

**ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA
MODIFICACIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DEL PROYECTO
“CONSTRUCCIÓN DE LA VARIANTE MUTATÁ (UF4) DE LA
CONCESIÓN AUTOPISTA AL MAR 2”**

**CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE
INFLUENCIA**

CAPÍTULO 5.1. CARACTERIZACIÓN DE MEDIO ABIÓTICO



AUTOPISTAS URABÁ S.A.S.



Realizado por



14/03/2025

TABLA DE CONTENIDO

5	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA	24
5.1	MEDIO ABIÓTICO	24
5.1.1	Geología.....	24
5.1.1.1	Geología regional	24
5.1.1.2	Geología local.....	27
5.1.1.3	Unidades geológicas superficiales	31
5.1.1.4	Geología estructural regional	33
5.1.1.5	Geología estructural local	35
5.1.1.6	Sismicidad	35
5.1.2	Geomorfología.....	39
5.1.2.1	Unidades geomorfológicas en el área de influencia	40
5.1.2.2	Rangos de pendientes	46
5.1.2.3	Patrón y densidad de drenaje	48
5.1.2.4	Análisis multitemporal de procesos morfodinámicos	49
5.1.2.5	Procesos morfodinámicos.....	54
5.1.2.6	Susceptibilidad procesos erosivos y movimientos en masa	59
5.1.2.7	Susceptibilidad a inundaciones	65
5.1.3	Paisaje.....	70
5.1.3.1	Unidades de paisaje	70
5.1.3.2	Percepción del paisaje.....	82
5.1.4	Suelos y uso de la tierra	124
5.1.4.1	Suelos según POT.....	125
5.1.4.2	Unidades de suelo	126
5.1.4.3	Uso actual del suelo	139
5.1.4.4	Uso potencial del suelo.....	144
5.1.4.5	Conflicto de usos del suelo	148
5.1.5	Hidrología	151
5.1.5.1	Identificación de sistemas lénticos y lóticos	152
5.1.5.2	Codificación y nomenclatura de cuencas	153
5.1.5.3	Identificación de datos hidroclimáticos.....	155
5.1.5.4	Análisis de calidad y consistencia de la información	157

5.1.5.5	Análisis temporal y espacial de las variables climáticas.....	188
5.1.5.6	Morfometría de las cuencas hidrológicas.....	204
5.1.5.7	Régimen hidrológico	213
5.1.5.8	Oferta hídrica.....	250
5.1.5.9	Análisis de inundabilidad	250
5.1.5.10	Dinámica fluvial.....	258
5.1.6	Calidad del agua.....	262
5.1.6.1	Cuerpos de agua continentales	262
5.1.6.2	Cuerpos de agua marino-costeros.....	288
5.1.7	Usos del agua.....	288
5.1.7.1	Identificación de fuentes hídricas.....	288
5.1.7.2	Usos actuales y proyectados	288
5.1.7.3	Usuarios actuales y proyectados	289
5.1.7.4	Demanda hídrica real y potencial.....	291
5.1.7.5	Indicadores del recurso hídrico	293
5.1.7.6	Conflictos sobre la disponibilidad.....	294
5.1.8	Hidrogeología	294
5.1.8.1	Contexto hidrogeológico regional.....	297
5.1.8.2	Identificación de acuíferos	301
5.1.8.3	Identificación y caracterización de las unidades hidrogeológicas.....	302
5.1.8.4	Inventario de puntos de agua subterránea.....	306
5.1.8.5	Identificación de zonas de recarga	306
5.1.8.6	Direcciones de flujo	311
5.1.8.7	Modelo hidrogeológico conceptual.....	313
5.1.8.8	Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación	314
5.1.9	Geotecnia	318
5.1.9.1	Unidades geológicas superficiales.....	318
5.1.9.2	Exploración Directa.....	321
5.1.9.3	Resultados de Ensayos de Laboratorio y Ensayos Insitu.....	322
5.1.9.4	Unidades de Geología para Ingeniería	327
5.1.9.5	Zonificación Geotécnica.....	329
5.1.9.6	Zonificación geotecnia con factores geoambientales	335

5.1.10	Atmósfera	339
5.1.10.1	Meteorología.....	340
5.1.10.2	Validación de los datos meteorológicos adquiridos.....	367
5.1.10.3	Modelos de cálculo	369
5.1.10.4	Identificación de fuentes de emisiones	370
5.1.10.5	Calidad del aire.....	374
5.1.10.6	Ruido	504
5.1.10.7	Vibraciones.....	564
BIBLIOGRAFÍA.....		572

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1 Áreas de las unidades geológicas	29
Tabla 5.2 Áreas de las unidades geológicas superficiales	31
Tabla 5.3 Eventos sísmicos históricos cercanos al proyecto (SGC, 2025)	35
Tabla 5.4 Leyenda de unidades geomorfológicas para el área del proyecto	40
Tabla 5.5 Calificación del factor morfometría	46
Tabla 5.6 Imágenes satelitales usadas para el análisis multitemporal.....	50
Tabla 5.7 Pesos asignados a los factores condicionantes	61
Tabla 5.8 Valores asignados a las clases de cada factor	62
Tabla 5.9 Susceptibilidad a procesos erosivos y remoción en masa	64
Tabla 5.10 Susceptibilidad a inundaciones – Análisis preliminar	67
Tabla 5.11 Susceptibilidad a inundaciones	69
Tabla 5.12 Unidades geomorfológicas y su ambiente utilizadas para el análisis del componente de paisaje	70
Tabla 5.13 Coberturas de la tierra utilizadas para el análisis del componente de paisaje	70
Tabla 5.14 Unidades de paisaje en el área de influencia abiótica	71
Tabla 5.15 Categorías de escala visual	84
Tabla 5.16 Escala visual para las unidades de paisaje en el área de influencia abiótica.....	85
Tabla 5.17 Categoría de escala visual para las unidades de paisaje en el área de influencia abiótica	86
Tabla 5.18 Criterio para la evaluación de la calidad visual	87
Tabla 5.19 Clases utilizadas para evaluar la calidad visual.....	88
Tabla 5.20 Evaluación de la calidad visual de las unidades de paisaje el área del proyecto	89
Tabla 5.21 Categorías de calidad visual en el área de influencia abiótica del proyecto.....	93
Tabla 5.22 Criterios de valoración para determinar la Capacidad de Absorción Visual (CAV) ..	95
Tabla 5.23 Categoría de valoración para determinar la Capacidad de Absorción Visual (CAV)	95
Tabla 5.24 Capacidad de Absorción Visual (CAV) y fragilidad en el área de influencia.....	96
Tabla 5.25 Fragilidad en el área de influencia abiótica del proyecto	100
Tabla 5.26 Categoría de los elementos discordantes según su número	102
Tabla 5.27 Tamaño de la discordancia según porcentaje del área.....	102
Tabla 5.28 Criterio de valoración para la correspondencia cromática	102
Tabla 5.29 Análisis de elementos discordantes, tamaño de la discordancia y correspondencia cromática para las unidades de paisaje del proyecto	103
Tabla 5.30 Análisis de elementos discordantes, tamaño de la discordancia y correspondencia cromática para las unidades de paisaje del proyecto	106
Tabla 5.31 Integridad escénica para las unidades de paisaje del proyecto	109
Tabla 5.32 Resultados de la integridad escénica para las unidades de paisaje del proyecto ..	110
Tabla 5.33 Niveles de interés en el área de influencia abiótica del proyecto	112
Tabla 5.34 Resultados de niveles de interés en el área de influencia abiótica del proyecto	113
Tabla 5.35 Categorías utilizadas para calificar los sitios de paisaje en las socializaciones con la comunidad del municipio de Mutatá.....	118
Tabla 5.36 Criterios de zonificación del componente de paisaje	121
Tabla 5.37 Zonificación de las unidades de paisaje en el área de influencia abiótica.....	121
Tabla 5.38 Zonificación de las unidades de paisaje en el área de influencia abiótica.....	122

Tabla 5.39 Componentes del símbolo de las unidades de suelos	128
Tabla 5.40 Características de los suelos presentes en el área de influencia del proyecto.....	130
Tabla 5.41 Sitios de observación en campo.....	135
Tabla 5.42. Perfil de los suelos Typic Eutrudepts.....	136
Tabla 5.43 Parámetros de análisis de los suelos Typic Eutrudepts.....	138
Tabla 5.44 Usos actuales del suelo en el Área de Influencia del componente suelos de la variante Mutatá y la cobertura asociada	139
Tabla 5.45 Clase de capacidad de uso del suelo	145
Tabla 5.46 Clase de capacidad de uso del suelo	146
Tabla 5.47 Uso potencial de los suelos del AI de la variante Mutatá	147
Tabla 5.48 Uso actual, uso potencial y conflicto de uso	149
Tabla 5.49 Conflictos por uso del suelo en el área de influencia	150
Tabla 5.50 Sistemas lénticos y lóticos – área de influencia abiótica.....	152
Tabla 5.51. Codificación de cuencas hidrográficas	154
Tabla 5.52 Estaciones hidroclimáticas analizadas	156
Tabla 5.53 Límites superiores – valores atípicos	173
Tabla 5.54 Valores atípicos de precipitación [mm]	174
Tabla 5.55 Registro histórico ONI (Oceanic Niño Index)	175
Tabla 5.56 Valores atípicos retirados [mm]	176
Tabla 5.57 Resultados de la prueba Mann-Whitney.....	177
Tabla 5.58 Resultados de la prueba de Pettit.....	179
Tabla 5.59 Resultados análisis de tendencias en las series de precipitación	180
Tabla 5.60 Porcentaje de datos faltantes	181
Tabla 5.61 Resultados de la prueba Mann-Whitney datos corregidos.....	185
Tabla 5.62 Resultados de la prueba de Pettit datos corregidos.....	186
Tabla 5.63 Resultados análisis de tendencias en las series de precipitación	187
Tabla 5.64 Precipitación media anual estaciones de análisis	189
Tabla 5.65. Precipitación media anual UHA (Unidades hidrográficas de análisis).	191
Tabla 5.66. Mínimos y máximos históricos - Villarteaga [12015010]	192
Tabla 5.67 Temperatura media anual multianual	193
Tabla 5.68 Evapotranspiración media anual en la zona de estudio	197
Tabla 5.69 Presión atmosférica media anual en la zona de estudio	199
Tabla 5.70 Valores mensuales de humedad relativa.....	200
Tabla 5.71 Valores mensuales de brillo solar estación Villarteaga [12015010]	202
Tabla 5.72 Irradiación directa normal (DNI) [kWh/m ²]	204
Tabla 5.73 Parámetros físicos de las microcuencas	205
Tabla 5.74 Índice de compacidad para la evaluación de la forma	206
Tabla 5.75 Clasificación del factor de forma.....	206
Tabla 5.76 Parámetros de forma.....	206
Tabla 5.77 Clasificación de la cuenca de acuerdo con la pendiente	207
Tabla 5.78 Parámetros de relieve de las cuencas de las Microcuencas.....	207
Tabla 5.79 Parámetros asociados al perfil del cauce de las UAH	208
Tabla 5.80 Descripción del índice de sinuosidad	208
Tabla 5.81 Clasificación de la densidad de corrientes.....	208
Tabla 5.82 Parámetros relacionados con la red de drenaje de las UAH.....	209

Tabla 5.83 Resultados de tiempos de concentración en las cuencas de estudio	211
Tabla 5.84 Resultados del balance hídrico a largo plazo	214
Tabla 5.85 Intervalos aproximados de variación de los parámetros hidráulicos del modelo	221
Tabla 5.86 Rango de condiciones iniciales en cada uno de los tanques	221
Tabla 5.87 Rango de variación de otros parámetros del modelo de tanques	222
Tabla 5.88 Estaciones con Influencia en la cuenca del Río Sucio	224
Tabla 5.89 Parámetros de calibración del modelo de tanques	224
Tabla 5.90 Estaciones con Influencia en las cuencas analizadas	226
Tabla 5.91 Caudal medio simulado – Modelo de Tanques.....	231
Tabla 5.92 Categorías del índice de Aridez IA	231
Tabla 5.93 Cálculo de índice de Aridez para las microcuencas de interés	232
Tabla 5.94 Categorías de IRH.....	232
Tabla 5.95 Cálculo del índice de regulación hídrica para las microcuencas de interés	232
Tabla 5.96 Caudal ambiental para cada microcuenca de interés	233
Tabla 5.97 Distribuciones de probabilidad empleadas	233
Tabla 5.98 Expresiones para el cálculo del factor de frecuencia y el error estándar	234
Tabla 5.99 Resultados de caudales mínimos distribución Gumbel con sus límites de confianza	234
Tabla 5.100 Resultados de caudales mínimos distribución LogNormal con sus límites de confianza	235
Tabla 5.101 Parámetros regionalizados y precipitación para el cálculo de las curvas IDF	236
Tabla 5.102 Distribución de la lluvia en el tiempo según el método asumido	238
Tabla 5.103 Porcentaje de cobertura en las cuencas hidrográficas	239
Tabla 5.104 Grupo hidrológico	241
Tabla 5.105 Numero de curva microcuencas de interés.....	241
Tabla 5.106 Coeficientes de escorrentía.....	241
Tabla 5.107 Caudales máximos estimados método hidrógrafas unitarias	249
Tabla 5.108 Caudales máximos estimados método racional.....	250
Tabla 5.109 Oferta hídrica disponible media anual	250
Tabla 5.110 Puntos de monitoreo de calidad del agua.....	262
Tabla 5.111 Laboratorios involucrados en la toma de muestras y análisis	264
Tabla 5.112 Fecha y tipo de monitoreo	265
Tabla 5.113 Métodos de análisis para los parámetros de calidad del agua evaluados.....	266
Tabla 5.114 Parámetros in situ de los puntos de monitoreo	269
Tabla 5.115 Clasificación de las aguas en términos de conductividad	271
Tabla 5.116 Resultados de análisis fisicoquímicos y microbiológicos Campaña 1	272
Tabla 5.117 Resultados de análisis fisicoquímicos y microbiológicos Campaña 2	273
Tabla 5.118 Criterios de clasificación para DBO y DQO en aguas superficiales	275
Tabla 5.119 Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA.....	283
Tabla 5.120 Resultados del Índice de Calidad del Agua – ICA 5 Variables.....	284
Tabla 5.121. Calificación de la contaminación según los valores que tomen los ICOMI.....	285
Tabla 5.122 Resultados del cálculo de índice ICOMI	285
Tabla 5.123. Calificación de la contaminación según los valores que tomen los ICO.....	286
Tabla 5.124 Resultados del cálculo de índice ICOMO	286
Tabla 5.125 Resultados del cálculo del índice ICOSUS	287

Tabla 5.126 Resultados del cálculo del índice ICOpH.....	287
Tabla 5.127 Usos del agua – Río Mutatá Tramo Urbano	289
Tabla 5.128 Objetivos de calidad tramo urbano Río Mutatá.....	289
Tabla 5.129 Usuarios del recurso hídrico en la zona de influencia – Concesiones superficiales	290
Tabla 5.130 Vertimientos puntuales identificados en la zona de influencia	291
Tabla 5.131 Demandas hídricas sectoriales para la cuenca del río Mutatá	292
Tabla 5.132 Demandas hídricas sectoriales para la cuenca de la quebrada Daira.....	292
Tabla 5.133 Clasificación para los valores del Índice de Uso de Agua.....	293
Tabla 5.134 Índice y categoría del Uso del Agua	293
Tabla 5.135 Matriz de relación entre IUA e IRH para la estimación del IVH.....	294
Tabla 5.136 Índice de Vulnerabilidad Hídrica para las microcuencas de interés	294
Tabla 5.137 Clasificación General para la definición de unidades hidrogeológicas	303
Tabla 5.138 Unidad hidrogeológica en el área de influencia	306
Tabla 5.139 Peso ponderado de los factores para el análisis de recarga.....	308
Tabla 5.140 Valores utilizados en la evaluación del potencial de recarga	308
Tabla 5.141 Recarga en el área de influencia	310
Tabla 5.142 Grado de vulnerabilidad según el método GOD	315
Tabla 5.143 Valores asignados a los parámetros de estimación del método GOD	317
Tabla 5.144 Áreas de las unidades geológicas superficiales	318
Tabla 5.145 Parámetros de resistencia en suelos y depósitos	321
Tabla 5.146 Relación de la exploración directa realizada.....	321
Tabla 5.147 Resumen de ensayos de laboratorio realizados	323
Tabla 5.148. Parámetros geotécnicos para las UGS en el área de influencia	327
Tabla 5.149. Parámetros geotécnicos para unidades de geología para ingeniería.....	327
Tabla 5.150. Cargas estructurales al suelo	333
Tabla 5.151. Valores de análisis para el Qu.....	333
Tabla 5.152. Resumen de Factor de seguridad por UGI	334
Tabla 5.153 Pesos asignados a los factores condicionantes	336
Tabla 5.154 Valores asignados a las clases de cada factor	336
Tabla 5.155 Susceptibilidad a procesos erosivos y remoción en masa	338
Tabla 5.156 Ubicación del punto utilizado para descargar datos meteorológicos.....	343
Tabla 5.157 Distribución espacial de estaciones pluviométricas	345
Tabla 5.158. Criterios para índices estadísticos para validación modelos	368
Tabla 5.159 Inventario de vías de acceso	373
Tabla 5.160 Parámetros medidos y métodos de medición empleados.....	375
Tabla 5.161 Identificación y georreferenciación de los puntos de monitoreo calidad del aire ..	377
Tabla 5.162 descripción de los métodos de medición empleados	378
Tabla 5.163 Descripción de los equipos de medición empleados	380
Tabla 5.164 Descripción del sitio de muestreo del Punto 1 “CA1”	383
Tabla 5.165 Descripción del sitio de muestreo del Punto 2 “CA2”.....	384
Tabla 5.166 Resultados de las concentraciones de PM10 del Punto 1 “CA1”	391
Tabla 5.167 Resultados de las concentraciones de PM10 del Punto 2 “CA2”	392
Tabla 5.168 Estadística descriptiva por punto para material particulado PM10	393
Tabla 5.169 Resultados de las concentraciones de PM2.5 del Punto 1 “CA1”	394

Tabla 5.170 Resultados de las concentraciones de PM2.5 del Punto 2 "CA2"	395
Tabla 5.171. Estadística descriptiva por punto para material particulado PM2.5.	396
Tabla 5.172 Resultados de las concentraciones de SO2 del Punto 1 "CA1".	398
Tabla 5.173 Resultados de las concentraciones máximas horarias de SO2 del Punto 1 "CA1".	399
Tabla 5.174 Niveles de ICA para las concentraciones de SO2, Punto 1 "CA1".	400
Tabla 5.175 Resultados de las concentraciones de SO2 del Punto 2 "CA2".	401
Tabla 5.176 Resultados de las concentraciones máximas horarias de SO2 del Punto 2 "CA2".	402
Tabla 5.177. Niveles de ICA para las concentraciones de SO2, Punto 2 "CA2".	403
Tabla 5.178. Estadística descriptiva por punto para el Dióxido de Azufre SO2	404
Tabla 5.179 Resultados de las concentraciones de NO2 del Punto 1 "CA1".	405
Tabla 5.180 Resultados de las concentraciones máximas horarias de NO2 del Punto 1 "CA1".	406
Tabla 5.181 Niveles de ICA para las concentraciones de NO2, Punto 1 "CA1".	407
Tabla 5.182 Resultados de las concentraciones de NO2, Punto 2 "CA2".	408
Tabla 5.183 Resultados de las concentraciones máximas horarias de NO2 del Punto 2 "CA2".	409
Tabla 5.184 Niveles de ICA para las concentraciones de NO2, Punto 2 "CA2".	410
Tabla 5.185 Estadística descriptiva por punto para Dióxido de Nitrógeno NO2.....	411
Tabla 5.186 Resultados de las concentraciones máximas octorarias de CO del Punto 1 "CA1".	412
Tabla 5.187 Niveles de ICA para las concentraciones octorarias de CO del Punto 1 "CA1"....	414
Tabla 5.188 Resultados de las concentraciones máximas octorarias de CO del Punto 2 "CA2".	415
Tabla 5.189. Niveles de ICA para las concentraciones octorarias de CO del Punto 2 "CA2"...	417
Tabla 5.190. Estadística descriptiva por punto para el Monóxido de Carbono	418
Tabla 5.191. Nivel de cumplimiento con la Resolución 2254 de 2017. Diagnóstico Ambiental S.A.S., 2024.....	418
Tabla 5.192 Coordenadas de los receptores para la emisión generada por el proyecto Modificación de Licencia Variante Mutatá	427
Tabla 5.193 Flujo de excavaciones y transferencia de materiales.....	428
Tabla 5.194 Maquinaria empleados durante la construcción.....	429
Tabla 5.195 Aforos vehiculares utilizados para el desarrollo del modelo de dispersión.....	430
Tabla 5.196 Aforos vehiculares utilizados para el desarrollo del modelo de dispersión.....	430
Tabla 5.197 Especificaciones de los tramos viales	430
Tabla 5.198 Estimación de emisiones de material particulado por resuspensión.	431
Tabla 5.199 Factores de emisión por combustión (en g contaminante/kg combustible).	431
Tabla 5.200 Consumo nominal de combustibles en vehículos	432
Tabla 5.201 Estimación de emisiones contaminantes provenientes de la combustión	433
Tabla 5.202 Estimación de emisiones contaminantes provenientes de la combustión de maquinaria.....	434
Tabla 5.203 Estimación de emisiones de material particulado para las actividades de trituración y transferencia de materiales.....	435
Tabla 5.204 Sitios de Muestreo Calidad de Aire.	447

Tabla 5.205 Concentraciones reportadas por estudio de calidad del aire	448
Tabla 5.206 Emisiones globales y efecto del control por humectación de las vías	450
Tabla 5.207 Análisis de sensibilidad para las fuentes ingresadas	490
Tabla 5.208 Análisis de sensibilidad entre la variación en la emisión y las predicciones del modelo AERMOD, para el periodo de 24 h para PM ₁₀	490
Tabla 5.209 Análisis de sensibilidad entre la variación en la emisión y las predicciones del modelo AERMOD, para el periodo anual para PM ₁₀	492
Tabla 5.210 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para PM ₁₀ escenario 1	494
Tabla 5.211 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para PM ₁₀ escenario 2.	495
Tabla 5.212 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para PM _{2.5} escenario 1	496
Tabla 5.213 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para PM _{2.5} escenario 2.	497
Tabla 5.214 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para NO ₂ escenario 1.	498
Tabla 5.215 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para SO ₂ escenario 1.	499
Tabla 5.216 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para CO escenario 1.....	500
Tabla 5.217 Identificación y georreferenciación de los puntos de monitoreo de ruido ambiental	509
Tabla 5.218. Descripción del método de medición empleada.	511
Tabla 5.219 Relación de los equipos de medición empleados	511
Tabla 5.220 Descripción de los equipos de medición empleados para el monitoreo de los puntos RA1 y RA2.....	512
Tabla 5.220 Descripción de los equipos de medición empleados para el monitoreo del punto RA3	513
Tabla 5.221 Descripción del sitio de muestreo del Punto 1 "CA1".....	514
Tabla 5.222 Descripción del sitio de muestreo del Punto 2 "CA2".....	515
Tabla 5.221 Descripción del sitio de muestreo del Punto 1 "CA1".....	516
Tabla 5.223 Datos de las condiciones meteorológicas de los puntos durante las mediciones	517
Tabla 5.224 Resultados de los niveles de ruido ambiental, Punto 1 "RA 1".....	519
Tabla 5.225 Resultados de los niveles de ruido ambiental, Punto 2 "RA 2".....	521
Tabla 5.226 Nivel de cumplimiento con la Resolución 0627 de 2006.	524
Tabla 5.227 Ubicación de la estación meteorológica utilizada en el desarrollo del modelo de ruido.	527
Tabla 5.228 Aforos de las vías para los escenarios modelados	532
Tabla 5.229 Ubicación puntos de medición de ruido para calibración del modelo	534
Tabla 5.230 Niveles de ruido permisible para vehículos manufacturados después de 1979. Fuente: EPA	536
Tabla 5.231 Ubicación de los puntos de monitoreo	542
Tabla 5.232 Resultados de mediciones para calibración del modelo.	542

Tabla 5.233 Niveles de ruido predichos por el modelo para los 30 receptores seleccionados, escenario 1.....	544
Tabla 5.234 Escala de colores empleada para la generación de los mapas de ruido.....	545
Tabla 5.235 Comparación mediciones vs. valores simulados mediante el SoundPLAN Essential.	548
Tabla 5.236 Mediciones de ruido con sus incertidumbres estimadas.....	549
Tabla 5.237 Equipos empleados durante la etapa de construcción.....	550
Tabla 5.238 Potencias sonoras de las fuentes en octavas.....	554
Tabla 5.239 Potencia total de las fuentes ajustada por distancia y tiempo de operación.	554
Tabla 5.240 Potencias ajustadas de las fuentes puntuales convertidas en fuentes de área, escenario 2.....	555
Tabla 5.241 Niveles de ruido predichos por el modelo para las ubicaciones seleccionadas, escenario 2.	558
Tabla 5.242 Diferencias entre los niveles de los escenarios 1 y 2 modelados.	559
Tabla 5.243 Identificación y georreferenciación de los puntos de medición de vibraciones.....	564
Tabla 5.244 Descripción de los equipos de medición empleados	565
Tabla 5.245 Descripción de los sitios de muestreo	566
Tabla 5.246 Valores de referencia para la velocidad de vibración pico en mm/seg, de las cimentaciones frente a duraciones de corta duración	567
Tabla 5.247 Velocidad de vibración en la componente predominante en VB1	568
Tabla 5.248 Resumen de aceleraciones máximas por ejes para el Punto 1.....	569
Tabla 5.249 Velocidad de vibración en la componente predominante en Punto VB2.....	569
Tabla 5.250 Resumen de aceleraciones máximas por ejes para el Punto 1.....	570
Tabla 5.251 Velocidad de vibración en la componente predominante para el Punto 3.....	570
Tabla 5.252 Resumen de aceleraciones máximas por ejes para el Punto 3.....	571

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 Mapa geología regional 1:400.000	25
Figura 5.2 Mapa geología local 1:10.000	30
Figura 5.3 Perfil geológico A-A'	30
Figura 5.4 Mapa de unidades geológicas superficiales 1:10.000	32
Figura 5.5 Columna estratigráfica UGS1.....	33
Figura 5.6 Columna estratigráfica UGS2.....	33
Figura 5.7 Mapa geología estructural regional 1:500.000.....	34
Figura 5.8 Eventos sísmicos cercanos al proyecto.....	38
Figura 5.9 Zonificación de amenaza sísmica	39
Figura 5.10 Esquema de jerarquización geomorfológica.....	40
Figura 5.11 Unidades geomorfológicas presentes en el área de influencia.....	42
Figura 5.12 Rangos de pendientes presentes en el área de influencia	47
Figura 5.13 Tipos de drenaje	48
Figura 5.14 Patrón de drenaje.....	49
Figura 5.15 Análisis de procesos morfodinámicos para el año 2012.....	51
Figura 5.16 Análisis de procesos morfodinámicos para el año 2020.....	52

Figura 5.17	Análisis de procesos morfodinámicos para el año 2021	53
Figura 5.18	Análisis de procesos morfodinámicos para los años 2023 - 2024	54
Figura 5.19	Procesos morfodinámicos en el área de influencia (años 2023 - 2024).....	58
Figura 5.20	Mapa de pendientes en el área de influencia	59
Figura 5.21	Mapa de coberturas de tierra en el área de influencia.....	60
Figura 5.22	Mapa de curvatura del plano en el área de influencia	61
Figura 5.23	Mapa de susceptibilidad a procesos erosivos y remoción en masa.....	64
Figura 5.24	Susceptibilidad a inundaciones en el área de influencia.....	67
Figura 5.25	Susceptibilidad a inundaciones en el área de influencia.....	69
Figura 5.26	Unidades de paisaje en el área de influencia abiótica	72
Figura 5.27	Modelo de visibilidad y observadores en el área de influencia abiótica	83
Figura 5.28	Escala visual	84
Figura 5.29	Escala visual en el área de influencia abiótica	86
Figura 5.30	Calidad visual en el área de influencia abiótica	94
Figura 5.31	Fragilidad visual en el área de influencia abiótica.....	101
Figura 5.32	Elementos discordantes en el área de influencia abiótica	107
Figura 5.33	Tamaño de la discordancia en el área de influencia abiótica.....	108
Figura 5.34	Correspondencia cromática en el área de influencia abiótica.....	109
Figura 5.35	Integridad escénica en el área de influencia abiótica	111
Figura 5.36	Niveles de interés en el área de influencia físico-biótica.....	113
Figura 5.37	Sitios de interés paisajístico en el área de influencia abiótica	115
Figura 5.38	Calificación de sitios paisajísticos	119
Figura 5.39	Zonificación paisajística en el área de influencia abiótica.....	123
Figura 5.40	Vocación actual del suelo en el área de influencia según POT	126
Figura 5.41	Significado del símbolo que denota las unidades de suelos, escala 1:25.000	127
Figura 5.42	Unidades de suelo presentes en el área de influencia	129
Figura 5.43	Sitio de muestreo en el área de influencia del proyecto	136
Figura 5.44	Uso actual del suelo en el área de influencia	140
Figura 5.45	Capacidad de uso del suelo según grupos de manejo en el área de influencia....	148
Figura 5.46	Conflictos por uso del suelo en el área de influencia.....	151
Figura 5.47	Identificación de sistemas lénticos y lóticos.....	153
Figura 5.48	Delimitación de cuencas hidrográficas	154
Figura 5.49	Localización de estaciones hidroclimáticas	156
Figura 5.50	Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación ABERTURA LA [26230240]	158
Figura 5.51	Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación ABRIAQUI [11110020]	159
Figura 5.52	Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación BARRANQUILLITA [12010030].....	159
Figura 5.53	Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación BELLAVISTA [11080010]	160
Figura 5.54	Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación BUCHADO [11060010]	161
Figura 5.55	Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación CLARITA LA [11070030]	161
Figura 5.56	Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación DOMINGODO [11100020]	162

Figura 5.57 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación FUEMIA [11110030]....	163
Figura 5.58 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación GIRALDO [26220090] .	163
Figura 5.59 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación GRANJA LA [26220100]	164
Figura 5.60 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación GUASABRA [26210130]	165
Figura 5.61 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación MUSINGA AUT [11115040]	165
Figura 5.62 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación NORMAL SANTA TERESA AUT [11110010]	166
Figura 5.63 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación NUEVO ORIENTE [12010170]	167
Figura 5.64 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación OPOGADO [11090010]	167
Figura 5.65 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación SABANALARGA [26230200]	168
Figura 5.66 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación TORMENTO EL [12010010]	169
Figura 5.67 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación TRIGANA [12010090] .	169
Figura 5.68 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación VILLARTEAGA [12015010]	170
Figura 5.69 Series de precipitación máxima – Valores atípicos.....	173
Figura 5.70 Curva de masa simple de las series de tiempo corregidas.....	185
Figura 5.71 Ciclo anual de la precipitación en las estaciones analizadas.....	189
Figura 5.72 Ciclo anual de la precipitación – Estación Villarteaga [12015010]	190
Figura 5.73 Variación espacial de la precipitación media anual	191
Figura 5.74 Distribución temporal de la temperatura del aire	192
Figura 5.75 Variación espacial de la temperatura media anual estimada mediante regionalización	193
Figura 5.76 Variación espacial de la evapotranspiración real media anual estimada mediante la ecuación Cenicafé – Budyko.....	195
Figura 5.77 Variación espacial de la evapotranspiración real media anual estimada mediante el método TURC.....	196
Figura 5.78 Variación espacial de la evapotranspiración real media anual estimada mediante el método de Factor Regional.....	197
Figura 5.79 Variación espacial de la presión atmosférica estimada mediante relación altura-presión.....	199
Figura 5.80 Humedad relativa mensual para las estaciones de interés.....	200
Figura 5.81 Velocidad promedio del viento a 10 m de altura.....	201
Figura 5.82 Velocidad máxima promedio del viento	202
Figura 5.83 Brillo solar diario promedio mensual para la estación Villarteaga [12015010]	203
Figura 5.84 Irradiación directa normal (DNI)	204
Figura 5.85 Patrones de drenaje regionales documentados en la bibliografía.....	213
Figura 5.86 Modelo de tanques agregado lineal	216
Figura 5.87 Caudal real y simulado en la estación ANIL EL [11117010]	225

Figura 5.88 Curva de duración de la serie de caudal real y simulado. Estación ANIL EL [11117010]	225
Figura 5.89 Caudales medios estimados a partir del balance hidrológico en el largo plazo y el modelo de tanques diario en la estación ANIL EL [11117010].	226
Figura 5.90 Resultados de la serie sintética generada para cuenca río Mutatá.	228
Figura 5.91 Resultados de la serie sintética generada para la microcuenca – Drenaje Sin Nombre 1	229
Figura 5.92 Resultados de la serie sintética generada para la microcuenca – Drenaje Sin Nombre 2	230
Figura 5.93 Resultados de la serie sintética generada para la microcuenca - Drenaje Sin Nombre 3	231
Figura 5.94 Curvas IDF estaciones de interés	237
Figura 5.95 Diagrama distribución temporal de la lluvia, según Huff (1967)	238
Figura 5.96 Coberturas vegetales, cuencas de interés.	240
Figura 5.97 Hietogramas precipitación total y efectiva para el periodo de retorno de 100 años	242
Figura 5.98 Esquematzación del hidrograma Unitario Sintético de Snyder.	245
Figura 5.99 Hidrograma Unitario Adimensional del S.C.S	246
Figura 5.100 Curva parámetro B vs n	248
Figura 5.101 Áreas afectadas por inundaciones durante eventos del fenómeno de La Niña, 1988, 2000, 2011 y 2012	251
Figura 5.102 Amenaza por inundación a nivel municipal, POT 2011	253
Figura 5.103 Amenaza por inundación a zona urbana, Cabecera Municipal Mutatá, POT 2011	254
Figura 5.104 Mancha de inundación Tr 100 años, Consorcio Ícaro – Urabá. (2016).	255
Figura 5.105 Sección de transversal de terreno	256
Figura 5.106 Perfiles longitudinales, secciones transversales.	257
Figura 5.107 Puntos de monitoreo de calidad del agua	263
Figura 5.108 Ciclo anual de precipitaciones en la zona de estudio	265
Figura 5.109 Variación de la temperatura	269
Figura 5.110. Variación del oxígeno disuelto.	270
Figura 5.111 Variación del pH.	271
Figura 5.112 Variación de la conductividad.	272
Figura 5.113 Resultados de DBO5 y DQO.	275
Figura 5.114 Resultados de Sólidos suspendidos totales	276
Figura 5.115 Resultados de turbiedad	277
Figura 5.116 Variación de metales.	279
Figura 5.117 Variación de la alcalinidad.	280
Figura 5.118 Variación del color real.	281
Figura 5.119 Variación de Coliformes	282
Figura 5.120 Usuarios del recurso hídrico presentes en la zona de interés.	290
Figura 5.121 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas.	296
Figura 5.122 Metodología de trabajo para la caracterización hidrogeológica del área de estudio	297
Figura 5.123 Provincias hidrogeológicas de Colombia.	298

Figura 5.124 Mapa de los sistemas acuíferos de Colombia	299
Figura 5.125 Unidades hidrogeológicas a nivel regional (escala 1:500.000) en el área de influencia	300
Figura 5.126 Ubicación de la provincia hidrogeológica de Urabá	301
Figura 5.127 Mapa de unidades hidrogeológicas del área de influencia	305
Figura 5.128 Esquema de distribución de zonas de recarga, descarga y sistemas de flujo	307
Figura 5.129 Mapa de recarga en el área de influencia	310
Figura 5.130 Dirección de flujo de carácter regional	312
Figura 5.131 Dirección de flujo de carácter intermedio	313
Figura 5.132 Modelo hidrogeológico conceptual del área de influencia.....	314
Figura 5.133 Leyenda de vulnerabilidad	316
Figura 5.134 Guía para aplicación del método GOD.....	316
Figura 5.135 Mapa de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación en el área de influencia.....	317
Figura 5.136 Mapa de unidades geológicas superficiales 1:10.000	319
Figura 5.137 Columna estratigráfica UGS1.....	320
Figura 5.138 Columna estratigráfica UGS2.....	320
Figura 5.139 Ubicación de exploración directa.....	322
Figura 5.140 Variabilidad de Nspt de los sondeos P1, P2, P3 y P4	325
Figura 5.141 Variabilidad de Nspt en los sondeos P5, P6, P7 y P8	326
Figura 5.142. Correlación N70 SPT y densidad	327
Figura 5.143. Morfodinámica de todo el trazado del proyecto	329
Figura 5.144. Factor de seguridad según capacidad de carga.....	330
Figura 5.145. Método de evaluación en área con unidades de geología para ingeniería	330
Figura 5.146. Mecanismo de Falla propuesto por Terzaghi.....	332
Figura 5.147. Ecuación general de capacidad de carga.....	332
Figura 5.148 Zonificación geotécnica del área de influencia	335
Figura 5.149 Zonificación geotécnica.....	338
Figura 5.150 Ubicación de la estación más próxima para descargar datos de precipitación del IDEAM.	341
Figura 5.151 Fuente de datos meteorológicos IDEAM.	342
Figura 5.152 Ubicación del punto para el análisis meteorológico.	342
Figura 5.153 Precipitación media mensual.....	343
Figura 5.154 Número de días con lluvia.....	344
Figura 5.155 Distribución temporal de la precipitación mensual en [mm/mes].	345
Figura 5.156 Distribución espacial de la precipitación anual en [mm/año].....	345
Figura 5.157 Temperatura media, máxima y mínima mensual multianual	346
Figura 5.158 Distribución temporal de la temperatura media mensual.	347
Figura 5.159 Distribución de la temperatura media multianual a partir de ecuación de Cenicafé	348
Figura 5.160 ETP mensual para la ubicación seleccionada.	349
Figura 5.161 Variación temporal de la evapotranspiración potencial mensual.	349
Figura 5.162 Variación mensual de la humedad relativa.....	350
Figura 5.163 Variación temporal mensual de la humedad relativa	351
Figura 5.164 Variación media diaria mensual del brillo solar en la ubicación P1-MET1	351
Figura 5.165 Variación temporal mensual del brillo solar.	352

Figura 5.166 Variación media mensual de la presión atmosférica.....	353
Figura 5.167 Variación de la presión atmosférica en la zona de estudio.	354
Figura 5.168 Variación media diaria de la nubosidad.....	355
Figura 5.169 Variación media mensual de la nubosidad.....	355
Figura 5.170 Variación media anual de la nubosidad.....	356
Figura 5.171 Variación media diaria mensual de la radiación solar en la ubicación P1-MET1	357
Figura 5.172 Variación temporal mensual de la radiación solar (W/m2-día).	357
Figura 5.173 Variación horaria de la radiación solar.	358
Figura 5.174 Relación entre temperatura y precipitación.....	359
Figura 5.175 Rosa de vientos del sector del proyecto, global.....	360
Figura 5.176 Geoposición de la Rosa de vientos del proyecto Variante Mutatá	361
Figura 5.177 Diagrama de frecuencia de distribución de las clases de velocidad	361
Figura 5.178 Rosa de vientos del sector del proyecto, periodo diurno	363
Figura 5.179 Rosa de vientos del sector del proyecto, periodo nocturno	364
Figura 5.180 Rosa de vientos del sector del proyecto, para el primer cuatrimestre.....	365
Figura 5.181 Rosa de vientos del sector del proyecto, para el segundo cuatrimestre	366
Figura 5.182 Rosa de vientos del sector del proyecto, para el tercer cuatrimestre	367
Figura 5.183 Resultados validación para la variable precipitación	369
Figura 5.184 Rutinas implementadas para el análisis de datos.....	370
Figura 5.185 Fuentes de contaminación en la zona de estudio.....	371
Figura 5.186 Análisis espacial puntos de monitoreo	372
Figura 5.187 Inventario de vías de acceso.....	373
Figura 5.188 Receptores potenciales en el AI.....	374
Figura 5.189 Ubicación de puntos de monitoreo de calidad de aire en el Área de Influencia ..	378
Figura 5.190 Registros de temperatura para periodo de medición	386
Figura 5.191 Registros de presión atmosférica para periodo de medición.	387
Figura 5.192. Registros de precipitación para periodo de medición.	388
Figura 5.193. Registros de humedad relativa para periodo de medición.	388
Figura 5.194. Registros de velocidad del viento para periodo de medición	389
Figura 5.195 Rosa de vientos del área de estudio para periodo de medición	
Figura 5.196 Dirección de los vientos del área de estudio	390
Figura 5.197 Concentración de PM10 para el Punto 1.	391
Figura 5.198 Concentración de PM10 para el Punto 2.	392
Figura 5.199 Diagrama de caja y bigotes para PM10.....	393
Figura 5.200 Concentración de PM2.5 para el Punto 1.	395
Figura 5.201. Concentración de PM2.5 para el Punto 2.....	396
Figura 5.202. Diagrama de caja y bigotes PM2.5.....	397
Figura 5.203 Concentración de SO2 diaria para el Punto 1.	398
Figura 5.204 Concentración de SO2 horaria para el Punto 1.	399
Figura 5.205 Concentración de SO2 diaria para el Punto 2.	402
Figura 5.206. Concentración de SO2 horaria para el Punto 2	403
Figura 5.207 Diagrama de caja y bigotes SO2.....	404
Figura 5.208 Concentración de NO2 diaria para el Punto 1.	405
Figura 5.209. Concentración de NO2 horaria para el Punto 1.	406
Figura 5.210 Concentración de NO2 diaria para el Punto 2.	408

Figura 5.211 Concentración de NO ₂ horaria para el Punto 2.....	409
Figura 5.212 Diagrama de caja y bigotes NO ₂	411
Figura 5.213 Concentración de CO octoraria para el Punto 1.	412
Figura 5.214 Concentración de CO horaria para el Punto 1.....	413
Figura 5.215 Concentración de CO octoraria para el Punto 1	413
Figura 5.216 Concentración de CO octoraria para el Punto 2.	415
Figura 5.217. Concentración de CO horaria para el Punto 2.....	416
Figura 5.218. Concentración de CO octoraria para el Punto 2.	416
Figura 5.219. Diagrama de caja y bigotes para el CO.....	418
Figura 5.220 Ubicación proyecto de Modificación de Licencia Variante Mutatá	422
Figura 5.221. Vista de los alrededores del proyecto de Modificación	423
Figura 5.222 Ubicación de fuentes lineales asociadas al proyecto	424
Figura 5.223 Ubicación de las fuentes de área asociadas al proyecto	424
Figura 5.224. Ubicación rejillas uniformes de receptores en la zona del proyecto.....	426
Figura 5.225 Ubicación de receptores discretos en la zona del proyecto	427
Figura 5.226 Categorías de vehículos según clasificación nacional.....	432
Figura 5.227 Efectividad de control de riego para superficies de viaje sin pavimentar. Fuente: AP-42 (EPA).....	436
Figura 5.228 Precipitación - Comportamiento típico mensual.....	437
Figura 5.229 Precipitación - Comportamiento típico horario.....	437
Figura 5.230 Temperatura superficial – Comportamiento mensual.	438
Figura 5.231 Temperatura – Comportamiento horario	438
Figura 5.232 Humedad relativa – Comportamiento mensual.....	439
Figura 5.233 Humedad relativa – Comportamiento horario.	440
Figura 5.234 Presión atmosférica – Comportamiento horario	440
Figura 5.235 Rosa de los vientos, del año 2024.....	442
Figura 5.236 Rosa de los vientos, elaborada con la información descargada del proveedor METEOBLUE.	443
Figura 5.237 Velocidad del viento – Comportamiento mensual.....	444
Figura 5.238 Velocidad del viento – Comportamiento horario.	444
Figura 5.239 Diagrama de frecuencia de distribución de las lases de velocidad	445
Figura 5.240 Perfil de frecuencia nubosidad	445
Figura 5.241 Altura de capa de mezcla global típica horaria.	446
Figura 5.242 Distribución horaria de la estabilidad atmosférica anual promedio	446
Figura 5.243 Puntos de Monitoreo Calidad de Aire	447
Figura 5.244 Concentraciones máximas de PM ₁₀ para el periodo de 24h (P98.5) en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1.....	451
Figura 5.245 Concentraciones máximas de PM ₁₀ para el periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1.....	452
Figura 5.246 Concentraciones máximas de PM ₁₀ para un periodo de 24h (P98.5), escenario 1.	453
Figura 5.247 Concentraciones máximas de PM ₁₀ para un periodo anual, escenario 1.....	454
Figura 5.248 Vista cercana de las concentraciones máximas de PM ₁₀ para los periodos de 24 h (P98.5) y anual, escenario 1.	455

Figura 5.249 Vista 3D de las concentraciones máximas de PM ₁₀ para el periodo de 24 h estimado como el percentil 98.5, escenario 1.....	456
Figura 5.250 Concentraciones máximas de PM ₁₀ para el periodo de 24h en las ubicaciones de los 421 receptores, con control de las emisiones.	457
Figura 5.251 Concentraciones máximas de PM ₁₀ para el periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, con control de las emisiones.	458
Figura 5.252. Concentraciones máximas de PM ₁₀ para el periodo de 24h, con control de las emisiones, escenario 2.	459
Figura 5.253 Concentraciones máximas de PM ₁₀ para el periodo anual, con control de las emisiones, escenario 2.	460
Figura 5.254 Vista cercana de las concentraciones máximas de PM ₁₀ para el periodo de 24h y anual, escenario 2.....	461
Figura 5.255 Vista 3D de las concentraciones máximas de PM ₁₀ para el periodo de 24h, con control de las emisiones, escenario 2.	462
Figura 5.256 Concentraciones máximas de PM _{2.5} para un periodo de 24 h (P98) en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1.....	463
Figura 5.257 Concentraciones máximas de PM _{2.5} para un periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1.....	464
Figura 5.258 Concentraciones máximas de PM _{2.5} para un periodo de 24 h (P98), escenario 1.	465
Figura 5.259 Concentraciones máximas de PM _{2.5} para un periodo anual, escenario 1.	465
Figura 5.260 Vista cercana de las concentraciones máximas de PM _{2.5} para los periodos de 24 h (P98) y anual, escenario 1.	466
Figura 5.261 Vista 3D de las concentraciones máximas de PM _{2.5} para el periodo de 24 h (P98), escenario 1.	467
Figura 5.262 Concentraciones máximas de PM _{2.5} para un periodo de 24h en las ubicaciones de los 421 receptores, con control de las emisiones, escenario 2.....	468
Figura 5.263 Concentraciones máximas de PM _{2.5} para un periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, con control de las emisiones, escenario 2.	469
Figura 5.264 Concentraciones máximas de PM _{2.5} para un periodo de 24h con control de las emisiones, escenario 2.	470
Figura 5.265 Concentraciones máximas de PM _{2.5} para un periodo anual, con control de las emisiones, escenario 2.	471
Figura 5.266 Vista cercana de las concentraciones máximas de PM _{2.5} para el periodo de 24h y anual, y con control de las emisiones, escenario 2.	472
Figura 5.267 Vista 3D de las concentraciones máximas de PM _{2.5} para el periodo de 24h, con control de las emisiones, escenario 2.	472
Figura 5.268 Concentraciones máximas de NO ₂ para un periodo de 1h expresada como el percentil 98 en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.	474
Figura 5.269 Concentraciones máximas de NO ₂ para un periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.....	474
Figura 5.270 Concentraciones máximas de NO ₂ para un periodo de 1h (P98), escenario 1. .	475
Figura 5.271 Concentraciones máximas de NO ₂ para un periodo anual, escenario 1.	475
Figura 5.272 Vista cercana de las concentraciones máximas de NO ₂ para los periodos de 1 h (P98) y anual, para escenario 1.	476

Figura 5.273 Vista 3D de las concentraciones máximas de NO ₂ para el periodo de 1 h (P98), escenario 1.	477
Figura 5.274 Concentraciones máximas de SO ₂ para un periodo de 1 h (P99) en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.	478
Figura 5.275 Concentraciones máximas de SO ₂ para un periodo 24h en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.	479
Figura 5.276 Concentraciones máximas de SO ₂ para un periodo de 1 h (P99), escenario 1 construcción.	480
Figura 5.277 Concentraciones máximas de SO ₂ para un periodo 24h, escenario 1 construcción.	481
Figura 5.278 Vista cercana de las concentraciones máximas de SO ₂ para los periodos de 1 h (P99) y 24h, escenario 1 construcción.	482
Figura 5.279 Vista 3D de las concentraciones máximas de SO ₂ para el periodo de 1 h (P99), escenario 1 construcción.	483
Figura 5.280 Concentraciones máximas de CO para un periodo de 1h en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.	484
Figura 5.281 Concentraciones máximas de CO para un periodo de 8h (octorario) en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.	485
Figura 5.282 Concentraciones máximas de CO para un periodo de 1h, escenario 1 construcción.	486
Figura 5.283 Concentraciones máximas de CO para un periodo de 8h (octorario), escenario 1 construcción.	486
Figura 5.284 Vista cercana de las concentraciones máximas de CO para los periodos de 1 h y 8h, para escenario 1.	488
Figura 5.285 Vista 3D de las concentraciones máximas de CO para el periodo de 1h, escenario 1 construcción.	489
Figura 5.286 Fuentes de ruido identificadas en la zona de estudio punto RA1	505
Figura 5.287 Fuentes de ruido identificadas en la zona de estudio RA2	506
Figura 5.288 Fuentes de ruido identificadas en la zona de estudio RA3	507
Figura 5.289 Receptores potenciales.....	508
Figura 5.290. Ubicación de puntos de medición de ruido ambiental, vista Satelital.	510
Figura 5.291 Diagrama de frecuencias promedio para los periodos medidos del Punto 1.....	520
Figura 5.292 Diagrama de frecuencias promedio para los periodos medidos del Punto 2.....	522
Figura 5.293 Información meteorológica ingresada al software SoundPLAN Essential. Fuente: SoundPLAN Essential.....	528
Figura 5.294 Ubicación de la zona de modelación del proyecto	529
Figura 5.295 Vista cercana de los alrededores del área de la Planta Mutatá de AUTOPISTAS URABÁ SAS	530
Figura 5.296. Ubicación de las fuentes lineales de influencia del proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá.....	531
Figura 5.297 Ubicación de las fuentes de área asociadas al proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá.....	531
Figura 5.298 Ubicación puntos de medición de ruido para calibración del modelo.....	534
Figura 5.299 Aplicación utilizada para predecir niveles de ruido de las vías, mediante los datos de aforos.....	535

Figura 5.300 Interfaz de la aplicación empleada para el desarrollo del modelo.	537
Figura 5.301. Software utilizado para la generación del archivo digital del terreno (DEM) del área donde se desea correr el modelo de ruido.	538
Figura 5.302 Salida entregada por el procesador de terreno implementado en la aplicación. .	539
Figura 5.303 Fuentes ingresadas en la aplicación para ser utilizadas dentro del desarrollo del modelo de ruido.	540
Figura 5.304 Receptores ingresados en la aplicación para ser utilizadas dentro del desarrollo del modelo de ruido.	540
Figura 5.305 Ejecución del modelo de ruido. Fuente: SoundPLAN Essential.	541
Figura 5.306 Nivel de ruido predicho por el modelo en la ubicación del Punto 7, escenario 1.	543
Figura 5.307 Nivel de ruido predicho por el modelo para la totalidad de las ubicaciones, escenario 1.	544
Figura 5.308 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 1.	546
Figura 5.309 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo nocturno, escenario 1.	546
Figura 5.310 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 1.	547
Figura 5.311 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo nocturno, escenario 1.	547
Figura 5.312 Mediciones de ruido para el periodo diurno con sus incertidumbres asociadas..	549
Figura 5.313 Mediciones de ruido para el periodo diurno para la incertidumbre total	549
Figura 5.314 Biblioteca de emisión del SoundPlan Essential	552
Figura 5.315 Algunos ejemplos de fuentes direccionales en las que la emisión es uniforme en determinados rangos de direcciones.....	552
Figura 5.316 Ajuste a la fuente de generador en función del tiempo de operación.....	553
Figura 5.317 Nivel de ruido predicho por el modelo en la ubicación del Punto 7, escenario 2.	556
Figura 5.318 Nivel de ruido predicho por el modelo para la totalidad de las 30 ubicaciones, escenario 2.	557
Figura 5.319 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 2.	560
Figura 5.320 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo nocturno, escenario 2.	560
Figura 5.321 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 2.	561
Figura 5.322 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 2.	561
Figura 5.323 Zona con niveles de ruido de hasta 55 dBA en periodo diurno, escenario 2.....	562
Figura 5.324 Zona con niveles de ruido de hasta 65 dBA en periodo diurno, escenario 2.....	562
Figura 5.325 Mapa de distribución espacial de la afectación de operación del proyecto, comparación de escenario 2 y 1, periodo diurno.....	563
Figura 5.326 Ubicación de puntos de medición, vista Satelital	565
Figura 5.327 Velocidad de vibración en las componentes x, y, z en función de la frecuencia – punto de medida 1	568

Figura 5.328 Velocidad de vibración en las componentes x, y, z en función de la frecuencia – punto de medida 2	569
Figura 5.329 Velocidad de vibración en las componentes X, Y y Z en función de la frecuencia para el punto de medición 3.....	570

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 5.1 Depósitos aluviales	28
Fotografía 5.2 Depósitos de terraza.....	29
Fotografía 5.3 Terraza de acumulación en el área de influencia	43
Fotografía 5.4 Planicie o llanura de inundación en el área de influencia	44
Fotografía 5.5 Geoforma de meandro abandonado	44
Fotografía 5.6 Planos y campos de llenos antrópicos	45
Fotografía 5.7 Jagüey en el área de influencia.....	46
Fotografía 5.8 Sedimentación aluvial	55
Fotografía 5.9 Sedimentación aluvial	55
Fotografía 5.10 Empozamiento en el área de influencia.....	56
Fotografía 5.11 Intervención antrópica en el área de influencia	57
Fotografía 5.12 Reptación en el área de influencia	58
Fotografía 5.13 Tejido urbano continuo en planos y campos de llenos antrópicos (UP2).....	73
Fotografía 5.14 Tejido urbano discontinuo en planos y campos de llenos antrópicos (UP3)	73
Fotografía 5.15 Zonas industriales o comerciales en planos y campos de llenos antrópicos (UP4)	74
Fotografía 5.16 Pastos limpios en terraza de acumulación (UP7)	75
Fotografía 5.17 Pastos enmalezados en terraza de acumulación (UP9)	76
Fotografía 5.18 Bosque de galería y ripario en terraza de acumulación (UP12).....	77
Fotografía 5.19 Plantación forestal en terraza de acumulación (UP13).....	78
Fotografía 5.20 Cuerpos de agua artificiales en Jagüey (UP14)	79
Fotografía 5.21 Cuerpos de agua artificiales en meandro abandonado (UP15)	79
Fotografía 5.22 Red vial y territorios asociados (calle 14) en planos y campos de llenos antrópicos (UP17)	80
Fotografía 5.23 Red vial y territorios asociados (Ruta Nacional 6202) en planos y campos de llenos antrópicos (UP17).....	80
Fotografía 5.24 Parque cementerio en planos y campos de llenos antrópicos (UP18)	81
Fotografía 5.25 Áreas deportivas en planos y campos de llenos antrópicos (UP19)	82
Fotografía 5.26 Construcciones	105
Fotografía 5.27 Cercos para delimitación de predios	105
Fotografía 5.28 Postes y red eléctrica existente en el área de influencia del proyecto	106
Fotografía 5.29 Cuerpo de agua lótico (Quebrada la Daira) en el área de influencia abiótica .	116
Fotografía 5.30 Suelos del paisaje de valle, en clima cálido muy húmedo	131
Fotografía 5.31 Geoformas del relieve terrazas, en el paisaje de valle	132
Fotografía 5.32 Cuerpos de agua en el área de influencia del proyecto.....	134
Fotografía 5.33 Zona urbana, con suelos inexistentes o sepultados: vía, casco urbano de Mutatá.	134

Fotografía 5.34 Conservación, protección: bosque de galería	141
Fotografía 5.35 Tierras con uso Ganadería de pastoreo extensivo	141
Fotografía 5.36. Áreas de uso en infraestructura: red vial y terrenos asociados	142
Fotografía 5.37 Uso en asentamiento residencial: tejido urbano discontinuo y continuo	142
Fotografía 5.38. Cuerpos de agua artificiales	143
Fotografía 5.39 Conservación, protección: plantación forestal y vegetación nativa	144
Fotografía 5.40 Características del cauce – Drenaje Sin Nombre 1	258
Fotografía 5.41 Características del cauce – Drenaje Sin Nombre 2 – Quebrada Daira	259
Fotografía 5.42 Características del cauce – Drenaje Sin Nombre 3 – Aguas arriba, Brazo izquierdo	260
Fotografía 5.43 Características del cauce - Drenaje Sin Nombre 3 – Aguas arriba, brazo derecho	261
Fotografía 5.44. Características del cauce - Drenaje Sin Nombre 3 – Aguas abajo	262
Fotografía 5.45 Punto de monitoreo JY	267
Fotografía 5.46 Punto de monitoreo D2 AB	267
Fotografía 5.47 Punto de monitoreo D3 AB	268
Fotografía 5.48 Punto de monitoreo D3 AR	268

REVISIÓN Y APROBACIÓN

Tipo de validación	Nombre de quién elaboró el informe	Fecha
Responsable de elaboración	<i>Equipo técnico AM – Alternativa Ambiental S.A.S</i>	
Responsable de revisión	<i>Angela María Salazar Guerrero</i> Coordinadora de proyectos	
Responsable de aprobación	<i>Diana Restrepo Londoño</i> Directora de proyectos y operaciones	

DESCRIPCIÓN DE LAS REVISIONES

Índice de revisión	Sección modificada del documento	Fecha modificación	Observaciones

5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 MEDIO ABIÓTICO

5.1.1 Geología

El componente geológico se desarrolla con la descripción a nivel regional y local de las unidades estratigráficas presentes en el área de influencia abiótica, así como de sus características estructurales.

5.1.1.1 Geología regional

La geología regional del área de influencia, presentada en este documento, se fundamenta en información litológica y estructural derivada del Mapa Geológico de Antioquia 1999, a escala 1:400.000, y de la plancha 103 escala 1:100.000 elaborados ambos por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

El área de influencia del medio abiótico, a nivel regional, se encuentra en una única unidad que corresponde a sedimentos cuaternarios de origen aluvial. Adicionalmente, en las zonas adyacentes afloran rocas ígneas de composición variable cuyas edades se remontan al cretácico (INGEOMINAS, 1999)¹. A continuación, se presenta la distribución espacial ([Figura 5.1](#)) y se detallan las unidades geológicas que caracterizan esta región:

¹ (INGEOMINAS, 1999)

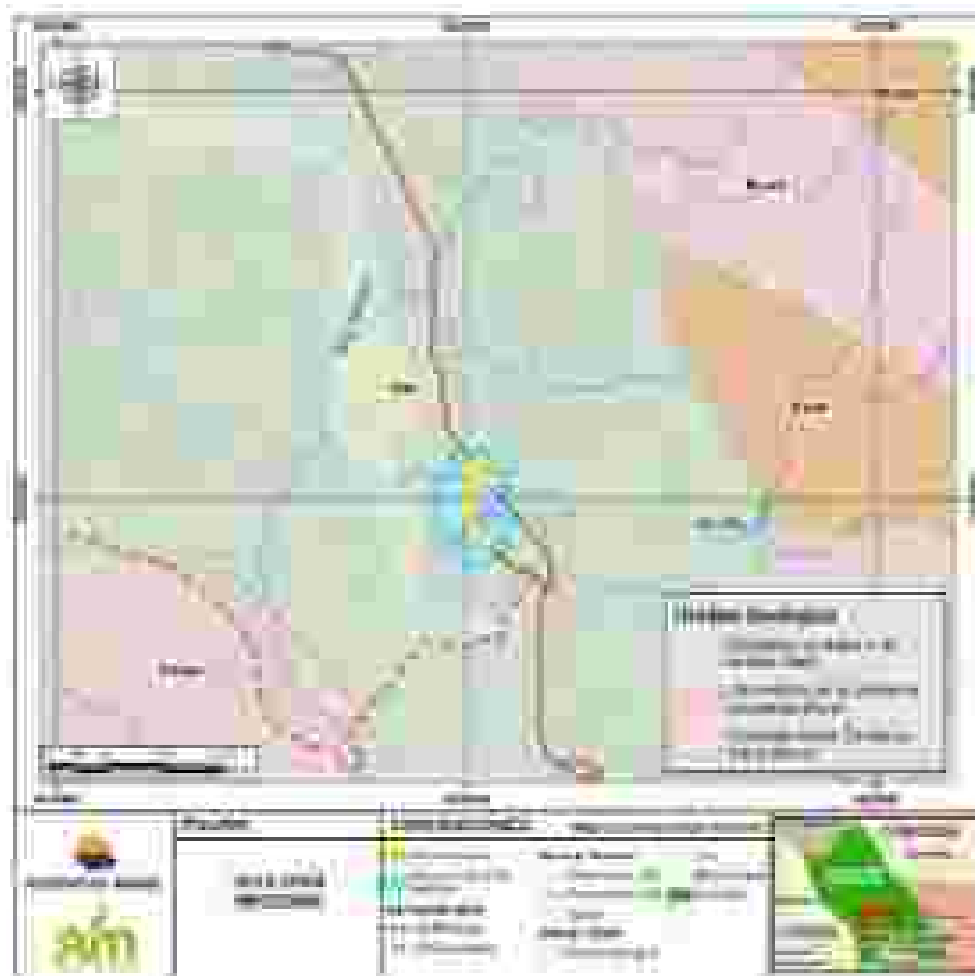


Figura 5.1 Mapa geología regional 1:400.000
Fuente: Modificado de (INGEOMINAS, 1999)²

5.1.1.1.1 Mesozoico

A. Ultramafitas la cordillera occidental (Kum)

Este bloque aflora en el flanco occidental de la Cordillera Occidental, siguiendo una dirección norte-sur, con una amplitud que varía entre 3 y 13 km. Se encuentra localizado desde el noroccidente de Dabeiba hasta el suroccidente de Frontino, en la zona de sutura entre dos bloques tectónicos. Esta unidad litoestratigráfica está compuesta por basaltos porfídicos y rocas piroclásticas, y se sitúa al occidente del Complejo Cañasgordas y al oriente del Complejo Santa Cecilia – La Equis. El bloque queda delimitado por la falla La Cerrazón-Murrí al occidente y por

² ibid

la falla Dabeiba-Pueblo Rico al oriente, representando las facies eruptivas del Arco de El Botón. (INGEOMINAS, 1999)³.

B. Complejo Santa Cecilia – La Equis (Ksvx)

La Formación Santa Cecilia, ubicada al oeste de la población homónima, está compuesta por lavas, aglomerados, brechas y tobas de composición básica, con lavas almohadilladas e intercalaciones de chert y calizas fosilíferas. Por su parte, la Formación La Equis incluye aglomerados, brechas y flujos de composición intermedia a ácida, algunas con estructuras columnares.

Ambas formaciones conforman el Complejo Santa Cecilia-La Equis, que abarca rocas volcánicas efusivas y piroclásticas al oeste de la Formación Guineales y al este del Batolito de Mandé, e incluye parcialmente rocas volcánicas del Togoridó. Estas últimas presentan aglomerados, brechas y basaltos hialocristalinos, además de tobas y andesitas en el oeste. Este complejo forma parte del Arco Chocó-Panamá, relacionado con el Batolito de Mandé y el de Acandí, y su origen está vinculado a procesos volcánicos y plutónicos en el Eoceno.

El Complejo Santa Cecilia-La Equis está compuesto por basaltos y andesitas con lavas almohadilladas, brechas y tobas con cristales de plagioclasa y clinopiroxeno. Sus rocas muestran texturas porfídicas, glomeroporfídicas y amígdalares, con matrices de texturas variolíticas, traquitoides e intersertales. Los fenocristales principales son de augita y plagioclasa, con accesorios como vidrio y minerales secundarios como clorita-palagonita.

Esta unidad aflora en el Segmento Norte de la Cordillera Occidental y cubre un área aproximada de 400 km², con afloramientos destacados en la carretera Dabeiba-Mutatá y los ríos Amparradó y Togoridó. Su composición y estructura reflejan un ambiente hidrotermal y procesos volcánicos complejos propios de un arco de islas. (SGC, 2013)⁴.

5.1.1.1.2 Cenozoico

A. Depósitos aluviales y de terraza (Qal)

En esta región de la Cordillera Occidental, los depósitos aluviales ocupan las llanuras de inundación de los cauces actuales. Estos están compuestos por materiales no consolidados, como bloques y gravas de origen volcánico básico, plutónico y sedimentario, en diversas proporciones, dentro de una matriz arenosa. Destacan los aluviones a lo largo del río Mutatá, que forman planicies estrechas paralelas a los ríos, ocupando las zonas de inundación y áreas cercanas, rellenando valles angostos.

También se identifican depósitos de origen fluvio-torrencial, generados por flujos torrenciales. Estos presentan una estructura interna soportada por matriz, con clastos angulares y redondeados arrastrados desde los lechos de las corrientes. Su mala clasificación refleja una sedimentación simultánea y caótica de bloques y materiales finos, diferenciándose como flujos de escombros o lodo según el porcentaje de bloques presentes. Además, pueden exhibir acumulaciones superficiales de bloques alineados en la dirección de la corriente o pendientes

³ ibid

⁴ (SGC, 2013)

superiores al 3-4%, características poco comunes en los depósitos aluviales típicos. (SGC, 2013)⁵.

5.1.1.2 Geología local

Para describir las unidades geológicas, se utilizó información secundaria disponible proporcionada por el Servicio Geológico Colombiano, complementada con observaciones realizadas durante la visita de campo. Esto permitió desarrollar una interpretación más precisa de la geología local. En el área de estudio se identificaron y mapearon dos (2) unidades, que, según la literatura disponible, corresponden a edades del Cenozoico (Cuaternario). A continuación, se presenta su distribución en el área de influencia y su descripción:

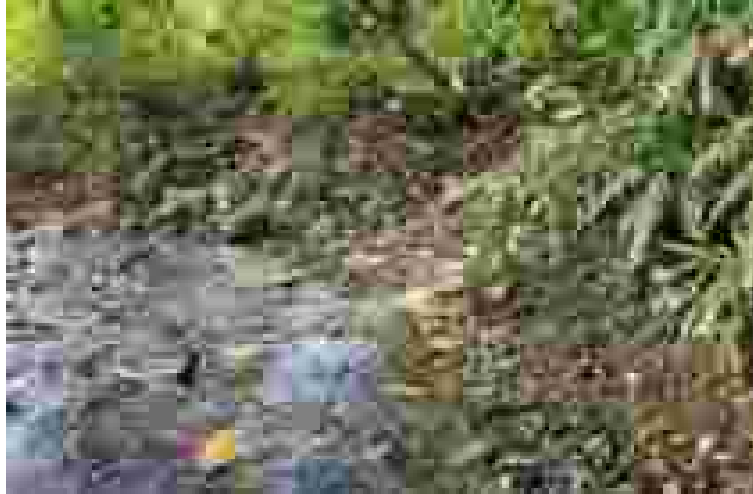
5.1.1.2.1 Cenozoico

A. Depósitos aluviales recientes (Q2al)

En esta región de la Cordillera Occidental, los depósitos aluviales se encuentran en las llanuras de inundación asociadas a los cauces actuales. Estos están compuestos por materiales no consolidados, como bloques y gravas de rocas volcánicas básicas, plutónicas y sedimentarias en diferentes proporciones, dentro de una matriz arenosa. Los aluviones presentes a lo largo del río Mutatá son especialmente representativos. Estos depósitos forman planicies estrechas que se desarrollan paralelas a los ríos, ocupando tanto las zonas de inundación como áreas cercanas, rellenando valles angostos.

Además, se identifican depósitos de origen fluvio-torrencial, generados por avenidas torrenciales. Estos se caracterizan por tener una estructura interna soportada por la matriz, con clastos angulares y redondeados transportados desde los lechos de las corrientes. Su mala selección refleja una sedimentación desordenada y simultánea de bloques y materiales finos, clasificándose como flujos de escombros o lodo según el contenido de bloques. También pueden presentar acumulaciones superficiales de bloques alineados en la dirección de la corriente o pendientes superiores al 3-4%, lo que diferencia de los depósitos aluviales típicos.

⁵ (SGC, 2013)



Fotografía 5.1 Depósitos aluviales

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

B. Depósitos de terraza (Qalt):

En esta parte de la Cordillera Occidental, los depósitos aluviales se localizan en las llanuras de inundación asociadas a los cauces actuales. Los cuales están compuestos por materiales no consolidados como bloques y gravas de rocas volcánicas básicas, plutónicas y sedimentarias, en diversas proporciones, dentro de una matriz arenosa. Estos depósitos forman planicies angostas que se extienden a lo largo de los ríos, ocupando tanto la zona de inundación como áreas cercanas, rellenando valles de carácter estrecho.

Se han identificado algunas áreas aluviales situadas a mayor altura respecto al nivel actual de los ríos, utilizando fotografías aéreas, y se han clasificado como terrazas. Aunque no se conoce con precisión su antigüedad, algunas de estas terrazas están siendo erosionadas por las corrientes actuales, lo que sugiere que podrían corresponder al Pleistoceno. Sin embargo, debido a la falta de información suficiente, todas han sido consideradas como formaciones del Holoceno.



Fotografía 5.2 Depósitos de terraza

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

En resumen, en el área de influencia del medio abiótico se identificaron dos (2) unidades geológicas: Depósitos aluviales (Q2al) (8,08 % del AI) y Depósitos de terraza (Qalt) (91,92% del AI); ver Tabla 5.1. Se puede observar la distribución espacial de las unidades geológicas. En la Figura 5.3 se presenta un perfil geológico y en la Figura 5.2 se presenta su localización.

Tabla 5.1 Áreas de las unidades geológicas

Unidad Geológica	Área (ha)	Área (%)
Depósitos de terraza (Qalt)	90,67	91,92
Depósitos aluviales recientes (Q2al)	7,97	8,08
Total	98,64	100

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.



Figura 5.2 Mapa geología local 1:10.000
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

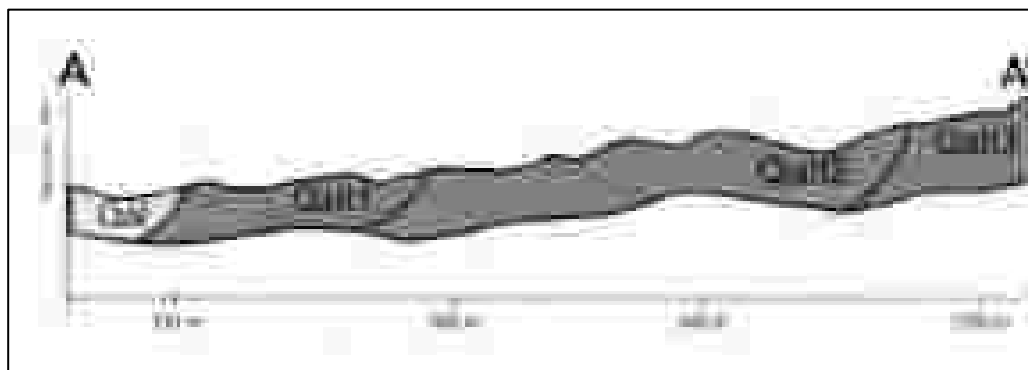


Figura 5.3 Perfil geológico A-A'
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.1.3 Unidades geológicas superficiales

La caracterización de las unidades geológicas superficiales se realizó a partir del reconocimiento en campo, apoyándose en la información disponible en los estudios regionales mencionados anteriormente. En este análisis, se clasificaron dos unidades geológicas superficiales: las dos (2) corresponden a suelos transportados. Esta clasificación permite una comprensión más precisa de la geología del área y su evolución geomorfológica.

En el marco del estudio se realizaron sondeos exploratorios descritos con mayor detalle en el capítulo de Geotecnia, sin embargo, en los recorridos de campo no fue posible identificar los depósitos antrópicos que fueron descritos en los sondeos P1, P3, P4 y P5, debido a que no se encontraron afloramientos de dichos depósitos. La discontinuidad de esta unidad de depósitos antrópicos y la falta de afloramientos de estos depósitos determina la identificación de unidades geológicas superficiales solo como 2, las cuales se describen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Áreas de las unidades geológicas superficiales

Unidad Geológica Superficial	Área (ha)	Área (%)
UGS1	7,97	8,08
UGS2	90,67	91,92
Total	98,64	100

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.



Figura 5.4 Mapa de unidades geológicas superficiales 1:10.000

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.1.3.1 UGS1

Esta unidad representa una franja al sur de la zona de influencia abiótica, correspondiente a los depósitos aluviales más recientes generados por el río adyacente, está compuesto esencialmente por arenas y gravas, su granulometría es variable presentando tamaños de arenas finas hasta gravas de 50 cm de diámetro. Estos depósitos presentan una topografía suavizada característica de su génesis.

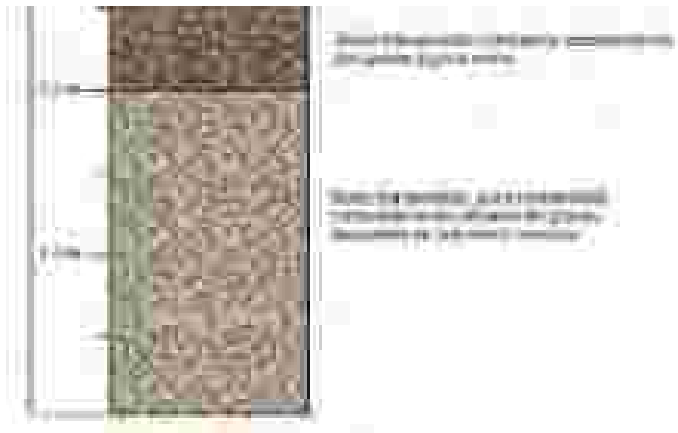


Figura 5.5 Columna estratigráfica UGS1

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.1.3.2 UGS2

Estos suelos cubren la mayor parte del área de estudio y se forman a partir de depósitos aluviales subcrecientes. Están compuestos por arenas, lodos y gravas, con cantos de rocas sedimentarias e ígneas. La granulometría de estos suelos varía desde materiales finos acompañados de gravas con bloques de hasta 40 cm de diámetro.

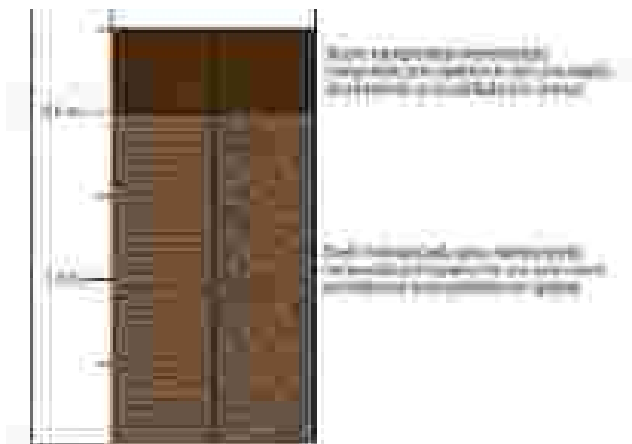


Figura 5.6 Columna estratigráfica UGS2

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.1.4 Geología estructural regional

El área de interés se localiza en el flanco occidental, al norte de la Cordillera Occidental de Colombia, y se encuentra estructuralmente al oeste de la Falla Cauca Almaguer y del Sistema de Fallas del Cauca. En esta zona, la tendencia estructural predominante está definida por fallas con dirección N-S. En el límite entre el Complejo Cañasgordas y el Complejo Santa Cecilia–La Equis,

esta tendencia se manifiesta mediante múltiples fallas trenzadas, que han generado un mosaico de bloques deformados con diversas litologías, conocido como el Sistema de Fallas de Dabeiba. (SGC, 2013)⁶ En la [Figura 5.7](#) se pueden observar las principales fallas que afectan el municipio de Mutatá donde resaltan las fallas Uramita y Murindó las cuales se describirán a continuación.

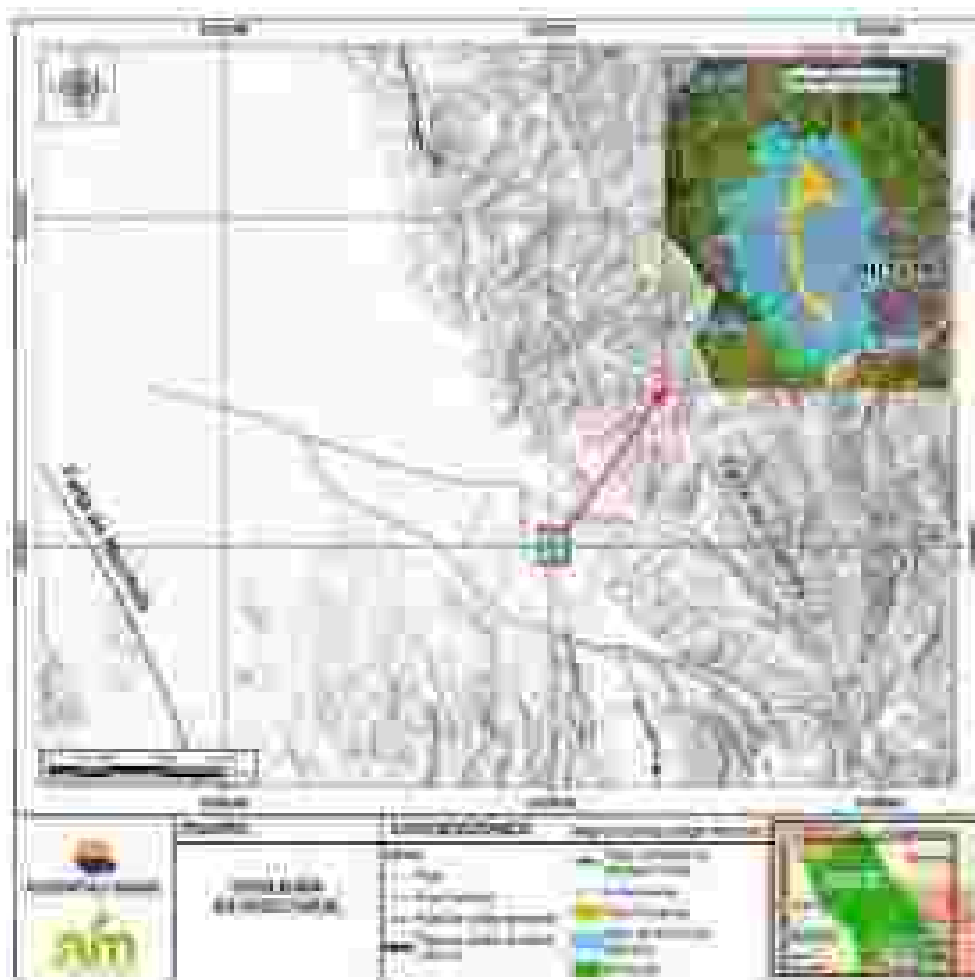


Figura 5.7 Mapa geología estructural regional 1:500.000

Fuente: Modificado de (SGC, 2023)⁷

5.1.1.4.1 Falla Uramita:

Es una estructura tectónica importante ubicada en el sector occidental de Colombia, que forma parte del sistema de fallas regionales asociado a la acreción de bloques litotectónicos oceánicos durante el Meso-Cenozoico. Esta falla constituye la prolongación hacia el norte de la Falla Dabeiba-Pueblo Rico y se extiende a lo largo del límite entre el Bloque Norandino y el Bloque del

⁶ (SGC, 2013)

⁷ (SGC, 2023)

Pacífico Colombiano. Su actividad ha jugado un papel crucial en la configuración geológica de la región, siendo responsable del contacto tectónico entre las ofiolitas cretácicas del Grupo Cañasgordas y las rocas del arco oceánico, como el Complejo Santa Cecilia–La Equis. (SGC, 2013)⁸.

5.1.1.4.2 Falla Murindó

Es una estructura tectónica significativa ubicada en el flanco occidental de la Cordillera Occidental de Colombia, extendiéndose desde el sur del río Arquía hasta la región de Riosucio y la cuenca del río Atrato hacia el norte. Con una longitud aproximada de 60,6 km y un rumbo promedio de N12,6°W $\pm$ 6°, esta falla presenta una inclinación alta, probablemente hacia el este, y un movimiento principal de tipo sinetral. Su ubicación estratégica dentro de una región caracterizada por una tectónica compleja, relacionada con la colisión entre el Bloque de Panamá y la placa Suramericana, resalta su importancia en el contexto geodinámico. La Falla Murindó, junto con las fallas Murri y Mutatá, delimita una fosa tectónica de aproximadamente 20 km de ancho. (SGC, 2013).

5.1.1.5 **Geología estructural local**

Debido al relieve altamente suavizado y a la cubierta de depósitos cuaternarios recientes en toda el área de estudio, no fue posible realizar caracterización en campo de estructuras geológicas. Además, el análisis de sensores remotos no reveló ningún rastro morfológico que indique la presencia de estructuras geológicas significativas. Estas condiciones limitan la capacidad de identificar y describir las características estructurales locales de manera detallada, dado que la cubierta superficial y la topografía plana ocultan cualquier evidencia de deformaciones tectónicas subyacentes.

5.1.1.6 **Sismicidad**

La sismicidad es un factor que incide en la estabilidad del material y de la infraestructura civil, considerando que la onda producida por cada evento sísmico genera una oscilación en el terreno, cuya afectación en superficie está relacionada con el tipo de material. Por ejemplo, las arenas sueltas o las arcillas blandas amplifican el movimiento del suelo generando una mayor oscilación de cualquier estructura y aumentando su probabilidad de daño.

Se consultó la base de datos del USGS, la Red Sismológica Nacional de Colombia y la plataforma DesInventar, en donde se filtraron los sismos ubicados a menos de 25 km alrededor de la zona de estudio.

En 25 km a la redonda de la zona de estudio se encontraron 47 sismos, los cuales se localizan en el departamento de Antioquia. En la Tabla 5.3 se presenta la información detallada de los sismos y en la [Figura 5.8](#) la ubicación geográfica de los mismos.

Tabla 5.3 Eventos sísmicos históricos cercanos al proyecto (SGC, 2025)

ID	FECHA	PROFUNDIDAD	MAGNITUD	CTM12_X	CTM12_Y
0	15/11/1993	0	3,4	4607651,24	2355447,63

⁸ (SGC, 2013)

ID	FECHA	PROFUNDIDAD	MAGNITUD	CTM12_X	CTM12_Y
1	28/11/1993	1	3,5	4616407,48	2343645,21
2	13/09/1994	0	4,3	4597980,47	2362942,65
3	13/09/1994	0	4,6	4595742,42	2359638,80
4	11/10/1994	0	3,1	4605978,14	2367639,84
5	30/07/1995	0	3,2	4615001,50	2376536,57
6	2/11/1996	0.8	3,1	4621662,74	2380470,10
7	21/02/1998	9.4	3,3	4601977,36	2351063,18
8	2/06/1998	18.8	3	4608712,36	2349682,14
9	10/02/1999	0	3	4621133,57	2354569,55
10	16/06/1999	0	3,4	4607539,72	2369398,96
11	25/02/2000	50	4,1	4622574,13	2384005,54
12	1/09/2000	1.6	3,8	4631695,67	2377515,39
13	6/07/2002	0	3,5	4637451,73	2363857,98
14	24/05/2003	94	4,2	4618434,38	2348501,08
15	22/06/2003	122	4	4628356,58	2374330,39
16	16/08/2003	0	3,1	4628770,45	2355730,42
17	22/08/2003	0	3,2	4629411,41	2382292,52
18	26/10/2003	0	3,1	4631684,03	2375965,77
19	20/02/2004	0	3,1	4616480,98	2353386,92
20	17/10/2004	0	3,1	4619388,22	2342958,72
21	30/05/2007	22.6	3,2	4618323,99	2363115,10
22	23/06/2007	0.9	3,4	4613484,29	2366252,28
23	28/06/2007	0	3,1	4621612,91	2344713,46
24	12/01/2008	0	3,3	4629594,12	2362476,71
25	22/06/2008	2	3,2	4610853,11	2369040,67
26	8/12/2009	4	3,2	4634274,38	2367644,64
27	29/12/2012	0	3,3	4599401,16	2374557,60
28	17/09/2015	4	3,1	4624672,92	2369487,54
29	14/09/2016	0	5,2	4642943,43	2359059,06
30	14/09/2016	0	3,3	4640809,52	2354314,94
31	14/09/2016	0	3,5	4641413,55	2361504,99
32	14/09/2016	0	3	4638182,13	2357875,65
33	14/09/2016	4	3,1	4642822,67	2357621,07
34	14/09/2016	0	3,2	4637388,49	2355114,21
35	14/09/2016	0	3,2	4641153,73	2356083,41

ID	FECHA	PROFUNDIDAD	MAGNITUD	CTM12_X	CTM12_Y
36	14/09/2016	0	3,3	4639496,56	2356205,93
37	14/09/2016	0	4,5	4634537,04	2358234,10
38	14/09/2016	0	3,1	4638297,44	2358538,93
39	14/09/2016	0.7	3	4641061,38	2358629,77
40	14/09/2016	0	3,2	4639189,62	2359639,35
41	14/09/2016	0	4	4641702,44	2355526,09
42	14/09/2016	0	4,3	4631008,92	2359477,53
43	21/09/2016	0	3,1	4638540,86	2361636,36
44	3/03/2017	0.6	3,5	4629973,46	2368894,17
45	3/05/2017	0	3,4	4641475,87	2354752,93
46	10/01/2018	0	3	4638584,57	2352338,50

Fuente: Modificado de (SGC, 2025)⁹.

El municipio de Mutatá, donde se encuentra la zona de estudio, está influenciado por varias fallas, siendo las más cercanas las Fallas Uramita y Murindó descritas anteriormente; y los eventos presentados en la Tabla 5.3 podrían asociarse a estas.

⁹ (SGC, 2025)

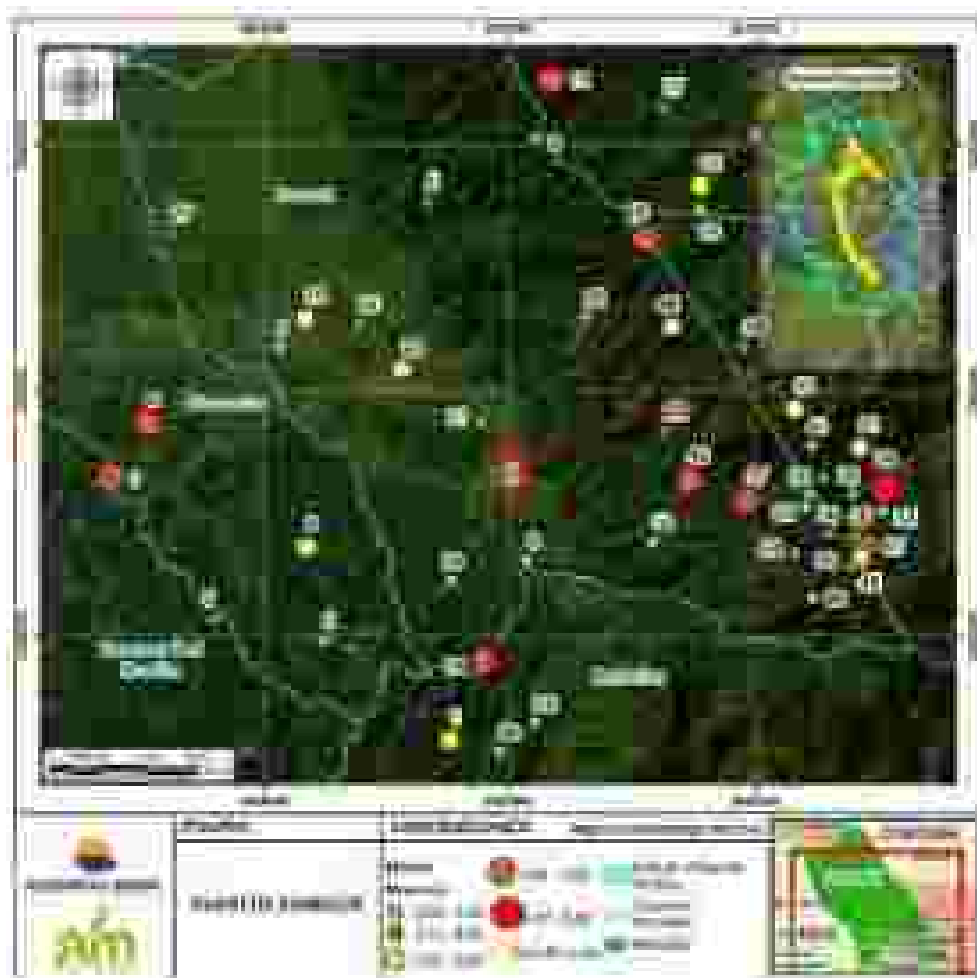


Figura 5.8 Eventos sísmicos cercanos al proyecto

Fuente: Modificado de (SGC, 2025)¹⁰.

Por otro lado, para conocer la amenaza sísmica en la zona del proyecto se consultó el Modelo de Amenaza Sísmica para Colombia publicado en el 2018 por el Servicio Geológico Colombiano¹¹, según el cual el área de influencia del proyecto se localiza en su totalidad en zona de amenaza Alta, como se aprecia en la [Figura 5.9](#).

¹⁰ Ibid

¹¹ (SGC, 2018)



Figura 5.9 Zonificación de amenaza sísmica

Fuente: Modificado de (SGC, 2025) ¹²

5.1.2 Geomorfología

La clasificación de las unidades geomorfológicas se desarrolla a partir de la jerarquización que presenta el SGC¹³, para la cual, las categorías definidas de escala menor a mayor son: Geomorfoestructuras, provincias, regiones, unidades, subunidades y componente geomorfológico (ver Figura 5.10).

¹² Ibid

¹³ (Servicio Geológico Colombiano, 2012)



Figura 5.10 Esquema de jerarquización geomorfológica

Fuente: SGC¹³, 2012.

5.1.2.1 Unidades geomorfológicas en el área de influencia

El área de influencia de la Variante Mutatá se ubica sobre el núcleo de la parte norte de la Cordillera Occidental, sobre las vertientes del río Sucio. El SGC en el Mapa Geomorfológico aplicado a movimientos en masa de la plancha 1103-Mutatá a escala 1:100.000, muestra las geoformas del área en dos ambientes morfogenéticos: fluvial y antrópico.

En la Tabla 5.4 se presenta la leyenda de las unidades geomorfológicas para el área de influencia del proyecto, y a continuación se describen sus principales características, y en la [Figura 5.11](#) su distribución espacial.

Tabla 5.4 Leyenda de unidades geomorfológicas para el área del proyecto

Geomorfoestructura	Provincia geomorfológica	Región geomorfológica	Unidad geomorfológica	Nomenclatura	Área (ha)	Área (%)
	Cordillera Occidental	Ambiente fluvial	Escarpe de terraza	Fet	2,52	2,56
			Terraza de acumulación	Fta	55,18	55,94

Geomorfoestructura	Provincia geomorfológica	Región geomorfológica	Unidad geomorfológica	Nomenclatura	Área (ha)	Área (%)
Sistema Orogénico Andino			Planicie o llanura de inundación	Fpi	5,15	5,22
			Meandro abandonado	Fma	0,05	0,05
		Ambiente antrópico	Planos y campos de llenos antrópicos	Ar	35,52	36,01
			Jagüey	Aj	0,22	0,22
Total					98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.



Figura 5.11 Unidades geomorfológicas presentes en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

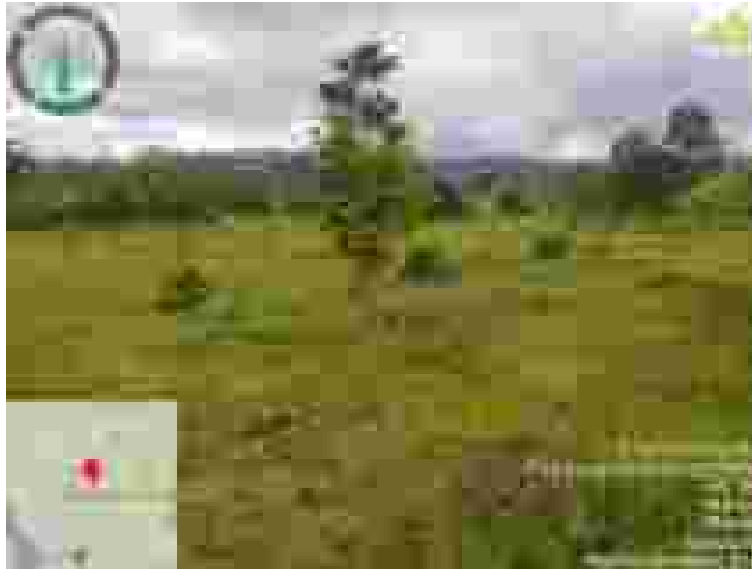
5.1.2.1.1 Geoformas de ambiente fluvial

A. Terraza de acumulación (Fta)

Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, modelada sobre sedimentos aluviales, que se presenta en forma pareada, limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce de un río. Su origen es relacionado a procesos de erosión y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. Su formación incluye fases de acumulación, incisión y erosión vertical. Estas terrazas pueden ser parte de cauces rectos a meándricos. Su depósito está constituido por gravas arenas, limos y arcillas, con disminución del tamaño a medida que se aleja del cauce del río¹⁴.

¹⁴ Ibid., p.42

En el área de influencia se identifican tres (3) niveles de terrazas, delimitados por los escarpes de erosión definidos. Esto sugiere que la terraza inicial experimentó procesos erosivos, resultando en la formación de niveles topográficos diferenciados.



Fotografía 5.3 Terraza de acumulación en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

B. Escarpe de terraza (Fet)

Plano vertical a subvertical, escalonado, excavado en sedimentos aluviales que bordean las terrazas de acumulación. Su origen es relacionado a la incisión y profundización del cauce. La altura de los escarpes puede alcanzar decenas de metros¹⁵.

Se encuentran varias geoformas de este tipo en el área de influencia, con predominancia en sentido E-W. Se identifican por tener mayores pendientes que las geoformas a su alrededor.

C. Planicie o llanura de inundación (Fpi)

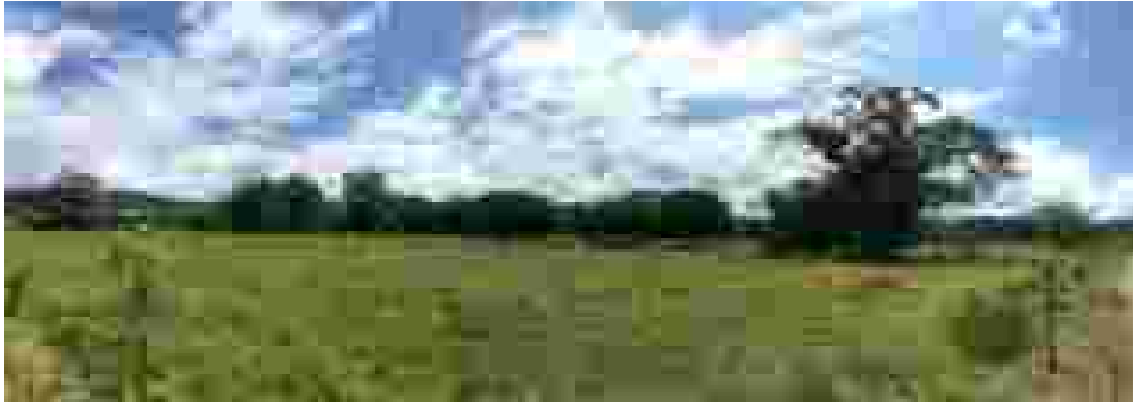
Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza.

Incluye los planos fluviales menores en formas de "U" o "V", al igual que a los conos coluviales menores de los flancos de los valles intramontanos. En regiones montañosas, donde las corrientes fluviales tienden a unirse con sus tributarios para formar el cauce principal, en red de drenaje de tipo subparalelo de mediana densidad, se presentan como superficies estrechas, alargadas y profundas. Su depósito está constituido por sedimentos finos, originados durante eventos de inundación fluvial¹⁶.

¹⁵ Ibid., p.38

¹⁶ Ibid., p.21.

Esta geoforma se presenta en la Fotografía 5.4 y se localiza en la zona sur del área de influencia, en la margen derecha del Río Mutatá.

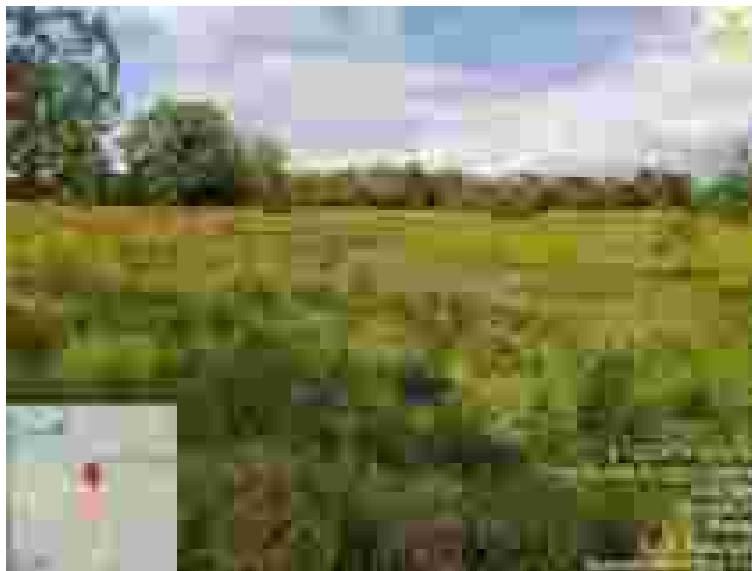


Fotografía 5.4 Planicie o llanura de inundación en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

D. Meandro abandonado (Fma)

Es una sección en forma de curva del cauce de un río antiguo, y su origen está relacionado a la migración de la corriente. Su depósito está constituido por sedimentos finos arcillosos con intercalaciones de turba, producto del estancamiento de aguas¹⁷. Esta geoforma se identificó por fotointerpretación, pues en campo se observó cómo se presenta en la Fotografía 5.5.



Fotografía 5.5 Geoforma de meandro abandonado

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

¹⁷ Ibid., p.40.

5.1.2.1.2 Geoformas de ambiente antrópico

A. Planos y campos de llenos antrópicos (Ar)

Son planos hechos artificialmente con material de relleno para acondicionar terrenos anegadizos para la construcción de viviendas¹⁸. En este proyecto se asigna esta geoforma a las coberturas de tejido urbano continuo y discontinuo, formados por el municipio de Mutatá, y a la red vial de este (ver Fotografía 5.6).



Fotografía 5.6 Planos y campos de llenos antrópicos

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

B. Jagüey (Aj)

Se trata de una depresión del terreno o excavación artificial (ver Fotografía 5.7) que actúa como un depósito de agua; y se utiliza principalmente para el abastecimiento de agua para animales.

¹⁸ Ibid., p.38.



Fotografía 5.7 Jagüey en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.2.2 Rangos de pendientes

Las pendientes del terreno son producto de la extracción y reclasificación de una Red Irregular de Triángulos (en inglés "Triangle Irregular Net") TIN, resultante de un correspondiente procesamiento digital de las curvas de nivel del área de estudio. Las TIN son un medio digital para representar la morfología de la superficie, son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices; los vértices están conectados con una serie de aristas para formar una red de triángulos, las aristas de los TIN forman facetas triangulares contiguas y no superpuestas que se pueden utilizar para capturar la posición de entidades lineales que juegan un papel importante en una superficie, como cadenas montañosas o arroyos.

Los rangos de pendientes son establecidos de acuerdo con las categorías de IGAC y la GDB de la ANLA, y sus valores se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Calificación del factor morfometría

Valor de la pendiente	Nomenclatura	Área (ha)	Área (%)
0 – 1%	A nivel	4,42	4,48
1 – 3 %	Ligeramente plana	31,49	31,93
3 – 7 %	Ligeramente inclinada	40,30	40,86
7 – 12 %	Moderadamente inclinada	12,29	12,46
12 – 25 %	Fuertemente inclinada	6,59	6,68
25 – 50 %	Ligeramente escarpada o ligeramente empinada	2,96	3,00
50 – 75%	Moderadamente escarpada o moderadamente empinada	0,51	0,52
75-100%	Fuertemente escarpada o fuertemente empinada	0,05	0,06

Valor de la pendiente	Nomenclatura	Área (ha)	Área (%)
>100%	Totalmente escarpada	0,01	0,01
Total		98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Como se observa en la Figura 5.12, en el área de influencia predominan las pendientes entre 3 y 7%, seguidas por las pendientes entre 1-3%, típico de las geoformas aluviales anteriormente descritas, que tienden a ser relativamente planas. Los mayores cambios de pendientes se presentan en los escarpes de terrazas, generados probablemente por incisiones de cuerpos de agua, pero que en realidad no representan cambios abruptos en el área de estudio, y que pueden ser comunes en estos tipos de ambientes.



Figura 5.12 Rangos de pendientes presentes en el área de influencia
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.2.3 Patrón y densidad de drenaje

Los patrones de drenaje se forman de manera natural y varían en función de las características geológicas y geomorfológicas de la zona. Los diferentes patrones de drenaje existentes se ilustran en la Figura 5.13.

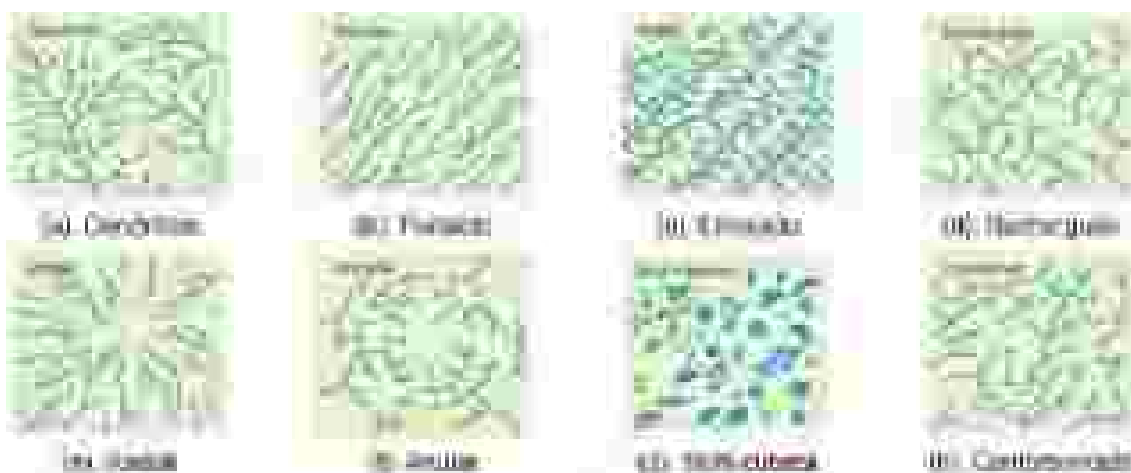


Figura 5.13 Tipos de drenaje

Fuente: Howard, A.D.¹⁹

Para un análisis más acertado del patrón de drenaje en el área de influencia se hace un análisis con una escala menor, para tener un contexto más general de este, por lo cual se consulta información cartográfica del IGAC para obtener los drenajes sencillos y dobles en el área de influencia y sus alrededores. Según lo observado en la [Figura 5.14](#), la zona donde se encuentra el área de estudio presenta un patrón de drenaje dendrítico; esto sugiere una litología homogénea y con topografía suavemente inclinada, en regiones con poca influencia tectónica reciente, y que no tiene restricciones significativas al flujo de agua debido a características estructurales o geomorfológicas.

¹⁹ (Howard, 1967)



Figura 5.14 Patrón de drenaje
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.2.4 Análisis multitemporal de procesos morfodinámicos

El análisis multitemporal está basado en los procesos morfodinámicos identificados en el área de estudio y su avance a través del tiempo, teniendo en cuenta la topografía, geología, intervención antrópica, vegetación presente y su variación, y los posibles factores detonantes.

Para el análisis se observaron fotografías satelitales de distintos años y fuentes, como se muestra en la Tabla 5.6, cubriendo un rango de 12 años con buena resolución de detalle para la escala trabajada en este componente (1:10.000).

Tabla 5.6 Imágenes satelitales usadas para el análisis multitemporal

Fuente	Año
Cartoantioquia ²⁰	2012
Landsat/Copernicus ²¹	2020
Maxar Technologies ²²	2021
Ortofoto elaboración propia	2024

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Las variaciones más significativas entre todos los años analizados se atribuyen a las intervenciones antrópicas, especialmente al crecimiento de la cabecera municipal de Mutatá y al desarrollo de las construcciones aledañas que conforman un tejido urbano discontinuo. Este proceso de expansión urbana ha tenido un impacto directo en las coberturas vegetales de la región, transformando áreas que anteriormente estaban dominadas por pastizales en sectores que ahora forman parte del tejido urbano consolidado.

Además, a lo largo de los años (desde 2012 hasta la actualidad) se ha identificado la presencia de drenajes intermitentes hacia la zona central del área de estudio (polígono S1 en las figuras a continuación), principalmente en las geoformas de planicie o llanura de inundación y la terraza de acumulación 1. Estos drenajes, probablemente alimentados por aguas lluvias, desempeñan un papel significativo en los procesos de transporte y depósito de sedimentos. Este fenómeno podría estar favoreciendo la sedimentación en ciertas áreas, aunque de manera moderada. Por este motivo, se decide clasificar un polígono hacia el sur como una zona de sedimentación aluvial activa, basada en los cambios observados en los cauces de drenajes intermitentes a través de las ortofotos analizadas. Sin embargo, es importante aclarar que no se trata de una sedimentación intensa y esto se respalda en la evidencia de la relativa estabilidad de las coberturas vegetales, la cual se observa en todas las ortofotos, indicando que el proceso de sedimentación no ha sido lo suficientemente significativo como para alterar drásticamente el paisaje o las coberturas existentes. En algunos de estos cauces intermitentes pueden ocurrir empozamientos como el observado en la fotografía del año 2023 y que prevalece para 2024, localizado en la zona sur del área de influencia (E4).

Desde el año 2012 se observan algunos empozamientos (asignados como puntos y polígonos en las figuras debidos a la escala de trabajo), estos favorecidos por una baja pendiente que hace que no se drenen fácilmente. De manera específica, el empozamiento E3 que se observa desde el año 2020, se encuentra ubicado en las proximidades de las obras proyectadas para la variante de este proyecto; no obstante, tiene dimensiones reducidas y se trata de un proceso deposicional, no denudativo. Finalmente, para los años 2023 y 2024 se observa un aumento en los empozamientos, encontrándose principalmente asociados a intervención antrópica (E7 al E20) debido a la construcción de vías y el crecimiento de la cabecera municipal.

Así mismo, para estos dos últimos años se han presentado tres (3) desprendimientos que ocurren en terrenos con reptación, caracterizados por desgarres de la capa superficial del suelo que ha

²⁰ (Gobernación de Antioquia, 2012)

²¹ (LANDSAT/Google Earth, 2020)

²² (ESRI, Maxar Technologies, 2021)

tenido leves movimientos gracias a la reptación, este proceso mueve pocos volúmenes de material, lo que hace que no se presenten mayores afectaciones en la infraestructura.

La laguna ubicada al occidente del área de influencia se considera una zona de sedimentación activa durante todo el análisis multitemporal. Esto se debe a que las partículas finas transportadas por las lluvias o mediante aguas de escorrentía tienden a depositarse en este entorno. A medida que el movimiento del agua disminuye, especialmente en zonas de menor turbulencia, estas partículas se asientan lentamente en el fondo, contribuyendo a la acumulación de sedimentos en la laguna. A lo largo de los años se observan cambios en su geometría y extensión, esto debido principalmente a la antropización del territorio a su alrededor.

Para el análisis de procesos en los años 2023 y 2024 se agregan también las vías que, como lo solicita la metodología para la elaboración de estudios ambientales, en el área de localización de la infraestructura del proyecto.



Figura 5.15 Análisis de procesos morfodinámicos para el año 2012

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.16 Análisis de procesos morfodinámicos para el año 2020

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.17 Análisis de procesos morfodinámicos para el año 2021
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.



Figura 5.18 Análisis de procesos morfodinámicos para los años 2023 - 2024

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.2.5 Procesos morfodinámicos

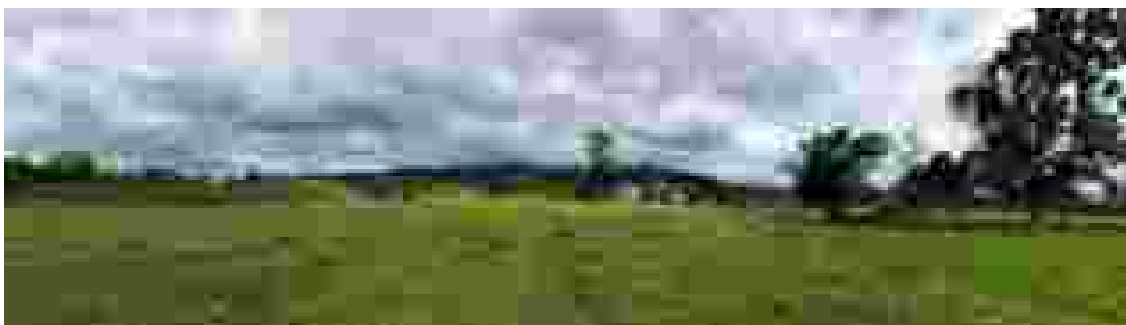
La cartografía de procesos morfodinámicos se realiza a partir de información primaria levantada en campo y sensores remotos, en escala 1:10.000 para los elementos de tipo polígono, y para los procesos que se encuentran por debajo del área mínima cartografiable se presentan como elementos puntuales, como se muestra en la [Figura 5.19](#).

5.1.2.5.1 Procesos de sedimentación activa

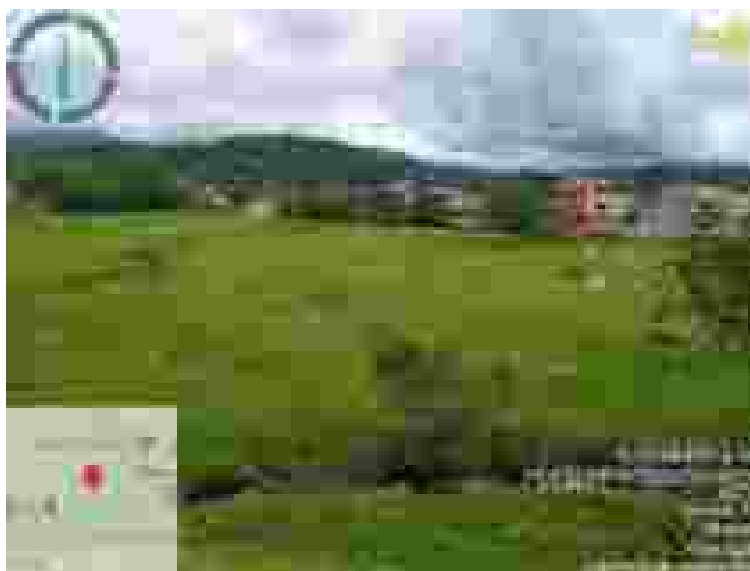
En el área de influencia se encuentran procesos de sedimentación principalmente de tipo aluvial, en donde se acumulan los materiales sólidos transportados por el agua en el área de influencia.

A. Sedimentación aluvial

En ciertas zonas de las terrazas de acumulación y de la planicie o llanura de inundación, se pueden identificar depósitos recientes compuestos por sedimentos arenosos. Estos materiales no están en contacto directo con los drenajes permanentes, lo que significa que no han sido transportados o modificados por corrientes de agua constantes. Sin embargo, su distribución en el terreno indica la presencia de antiguos o actuales drenajes intermitentes, que, aunque no son flujos de agua continuos, han desempeñado un papel importante en la deposición de estos sedimentos. Estos drenajes ocasionales suelen activarse en períodos de lluvia o eventos específicos, dejando a su paso estas acumulaciones características que evidencian su influencia en la configuración del paisaje.



Fotografía 5.8 Sedimentación aluvial
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.



Fotografía 5.9 Sedimentación aluvial
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

B. Empozamientos

Un empozamiento es un fenómeno donde el agua se acumula en áreas con drenaje deficiente, a menudo como resultado de lluvias intensas y una topografía plana. En este caso, la falta de pendiente pronunciada impide que el agua fluya libremente, lo que genera cuerpos de agua temporales en áreas bajas. En este contexto, el empozamiento puede actuar como un factor clave para la deposición de sedimentos de las partículas más finas.



Fotografía 5.10 Empozamiento en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

C. Intervención antrópica

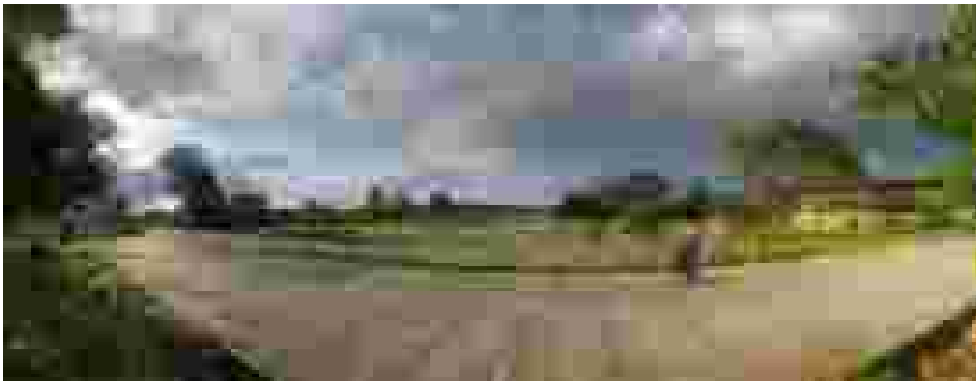
De acuerdo con el análisis multitemporal realizado, se evidenció que el área de influencia abiótica del proyecto ha experimentado un significativo nivel de intervención antrópica a lo largo de los años. Este proceso ha estado estrechamente relacionado con el crecimiento y expansión urbana de la cabecera municipal de Mutatá.

En cuanto a la infraestructura vial dentro del área de influencia, se destacan diversas obras que han influido notablemente en la dinámica territorial. Hacia la zona sur, se encuentra la construcción de la Variante de Mutatá, una vía de considerable importancia que ha modificado el entorno inmediato. En el sector central, el trazado de esta variante cruza la Calle 14, extendiéndose hasta la Carrera 5, la cual constituye una arteria principal dentro del municipio, pasando el trazado del proyecto por unas vías ya existentes. Esta carretera no solo atraviesa todo el casco urbano de Mutatá, sino que también desempeña un rol estratégico al conectar directamente a Mutatá con el municipio vecino de Chigorodó.

Otra intervención de origen antrópico que, aunque no se encuentra directamente dentro del área de influencia definida, podría tener repercusiones significativas sobre ella, es la extracción de material de playa en el río Mutatá. Esta actividad consiste en la remoción de arena, grava u otros

sedimentos que se acumulan en las orillas o el lecho del río, usualmente con fines de construcción o comerciales.

La extracción de estos materiales altera las dinámicas naturales del río, ya que modifica los procesos de erosión y sedimentación. En condiciones normales, el río equilibra la cantidad de sedimentos que transporta y deposita a lo largo de su cauce, asegurando la estabilidad de sus márgenes y manteniendo el flujo de agua en armonía con su entorno. Sin embargo, al retirar los sedimentos, se interrumpe este equilibrio, lo que puede dar lugar a un aumento de la erosión en ciertas zonas y una disminución en otras, afectando la estabilidad de las riberas y causando posibles desbordamientos o cambios en el curso del río.



Fotografía 5.11 Intervención antrópica en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.2.5.2 Movimientos en masa

Para el área de influencia del proyecto, se identificaron movimientos en masa tipo reptación, los cuales se asocian al sobrepastoreo de la zona.

D. Reptación

La reptación se refiere a los movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla. En el área del proyecto, este proceso morfodinámico es muy frecuente y está asociado al sobrepastoreo acelerado y al tránsito constante de animales, factores que han favorecido a la formación de reptaciones, terracetas y montículos. Geomorfológicamente, este proceso se identifica principalmente sobre las unidades de terraza de acumulación y escarpe de terrazas.



Fotografía 5.12 Reptación en el área de influencia
Fuente: Autopistas Urabá S.A.S, 2025.



Figura 5.19 Procesos morfodinámicos en el área de influencia (años 2023 - 2024)
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.2.6 Susceptibilidad procesos erosivos y movimientos en masa

El análisis de susceptibilidad a procesos erosivos y de remoción en masa del área de influencia se realizó siguiendo la metodología del SGC²³. En esta metodología se integran diversos factores condicionantes como geología, geomorfología, coberturas de la tierra, pendiente y curvatura del plano, utilizando operaciones por celdas con álgebra de mapas y pesos ponderados. El resultado es un mapa de susceptibilidad con tres niveles: baja, media y alta.

Los mapas de los factores condicionantes empleados en este análisis se generaron a partir de procesamiento en SIG de rasters con tamaño de píxel de 0,27 m. Los mapas de pendientes (Figura 5.20), de coberturas (Figura 5.21) y de curvatura del plano (Figura 5.22) se presentan a continuación. La zonificación de geomorfología y geología utilizadas en el análisis corresponde a las descritas en este estudio en sus respectivos capítulos.



Figura 5.20 Mapa de pendientes en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

²³ (Dirección de Geoamenazas, Servicio Geológico Colombiano, 2017)



Figura 5.21 Mapa de coberturas de tierra en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.



Figura 5.22 Mapa de curvatura del plano en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Inicialmente se lleva a cabo una categorización global del peso de los factores; luego se procede a clasificar las distintas clases dentro de cada factor condicionante, asignándoles valores según la sensibilidad asociada a cada variable, y la ponderación de estas según su peso asignado (ver Tabla 5.7 y Tabla 5.8), se hicieron aproximaciones conceptuales sobre la sensibilidad del suelo en relación con los fenómenos de remoción en masa. La susceptibilidad de cada variable y el resultado final se determina mediante un método heurístico, es decir, basado en la experiencia del profesional o del equipo que evalúa la susceptibilidad a procesos erosivos y de remoción en masa. El resultado final puede considerarse como un indicador preliminar de la resistencia del suelo.

Tabla 5.7 Pesos asignados a los factores condicionantes

Factor	Peso (W) [%]
Geología	15,00

Factor	Peso (W) [%]
Geomorfología	20,00
Cobertura	20,00
Pendiente	35,00
Curvatura del plano	10,00
Total	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Tabla 5.8 Valores asignados a las clases de cada factor

Categoría	Valor
Coberturas	
Áreas deportivas	1
Tejido urbano continuo	1
Tejido urbano discontinuo	1
Zonas industriales o comerciales	1
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	1
Pastos limpios	2
Pastos enmalezados	2
Bosque de galería y ripario	1
Cuerpos de agua artificiales	1
Parques cementerio	1
Plantación forestal	1
Geomorfología	
Terraza de acumulación	1
Escarpe de terraza	3
Planicie o llanura de inundación	1
Laguna	1
Meandro abandonado	1
Planos y campos de llenos antrópicos	1
Jagüey	1
Geología	
Depósitos aluviales recientes	1
Depósitos de terraza	1
Pendiente	
0-1%	1
1-3%	1
3-7%	1
7-12%	2
12-25%	2
25-50%	3

Categoría	Valor
50-75%	4
75-100%	5
>100%	5
Curvatura del plano	
Plano	1
Cóncavo	2
Convexo	3

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

De esta manera, se halla un valor de susceptibilidad mediante los valores y sus pesos ponderados, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Susceptibilidad\ MM = \sum_{i=1}^n Factor_i * W_i$$

Otra variable que se incluye en el análisis son los procesos erosivos y de remoción en masa que se hayan identificado en el análisis multitemporal. Como en este caso no se encontraron procesos de este tipo, esta variable no fue tomada en cuenta para este análisis.

La zonificación de susceptibilidad a procesos erosivos y remoción en masa se muestra en la [Figura 5.23](#), el área y el porcentaje que estas susceptibilidades representan en el área de influencia en la Tabla 5.9.



Figura 5.23 Mapa de susceptibilidad a procesos erosivos y remoción en masa

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Tabla 5.9 Susceptibilidad a procesos erosivos y remoción en masa

Rango de susceptibilidad	Área (ha)	Área (%)
Media	3,82	3,87
Baja	94,82	96,13
Total	98,64	100

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

La zonificación realizada en el área de influencia revela que la mayor parte de esta región presenta una susceptibilidad baja frente a los eventos analizados, abarcando aproximadamente el 96,13 % de la superficie total. Esta baja susceptibilidad es una característica intrínseca de áreas con pendientes suaves o casi planas, las cuales se encuentran asociadas predominantemente a geoformas de origen fluvial. Estas condiciones favorecen una menor

propensión a fenómenos de remoción en masa, pues suelen ofrecer estabilidad bajo dichas pendientes.

Por otro lado, las zonas clasificadas con una susceptibilidad media representan únicamente el 3,87 % del área de influencia. Estas áreas se ubican principalmente en terrenos cubiertos por pastos limpios y enmalezados, donde la topografía comienza a presentar una mayor variación en la pendiente. En estas regiones, aunque en casos puntuales las pendientes pueden superar el 100 %, lo más común es encontrar inclinaciones que oscilan entre el 12 % y el 50%. Este rango de pendientes se asocia con la presencia de geoformas más dinámicas, específicamente escarpes de terraza.

En resumen, la combinación de pendientes suaves y geoformas fluviales en el área de influencia contribuye a la baja susceptibilidad predominante, mientras que los escarpes de terraza y las pendientes moderadas a altas en áreas específicas generan condiciones locales que incrementan la susceptibilidad de manera limitada.

5.1.2.7 Susceptibilidad a inundaciones

La metodología descrita en los Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del agua²⁴ define identificación de las áreas susceptibles a inundaciones mediante el análisis de las unidades de geomorfología fluvial. Así, la determinación de las áreas susceptibles a inundación en el área de influencia del proyecto se realizó a partir de un enfoque geomorfológico, considerando las geoformas fluviales presentes y su relación con la dinámica hidrológica del cauce principal.

Inicialmente se consultaron cartografías oficiales del SGC y el POT del municipio de Mutatá²⁵, además de registros históricos de eventos de inundación reportados en la zona en la plataforma DesInventar. Esta información permitió establecer un marco de referencia inicial sobre las condiciones hidrogeomorfológicas de la región. Se empleó además la información generada en este mismo capítulo, donde las geoformas fueron delimitadas mediante la elaboración de hillshade y mapas de pendiente en el área de influencia. Toda esta información fue validada en recorridos de campo.

Con base en la posición relativa de las geoformas frente a los cauces de agua que se encuentran en el área de influencia, y su altitud respecto al nivel base actual, se definieron tres categorías de susceptibilidad a inundación así:

- Susceptibilidad alta: geoformas directamente vinculadas al régimen de crecientes, tales como llanura de inundación, meandro abandonado y paleocauce.
- Susceptibilidad media: geoformas con cierta elevación, pero aún asociadas al valle aluvial, principalmente terrazas bajas. En esta categoría también se incluyen sectores con pendientes suaves que no favorecen la escorrentía, donde pueden generarse encharcamientos durante lluvias prolongadas.

²⁴ (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2013)

²⁵ (Concejo Municipal de Mutatá, 2016)

- Susceptibilidad baja: geoformas elevadas, terrazas medias y altas o unidades estructurales con menor probabilidad de ser afectadas por desbordamientos. En esta categoría predominan pendientes donde la escorrentía es más eficiente.

Así entonces, se identifican las unidades de ambiente fluvial, las cuales corresponden a: Terraza de acumulación (Fta), Planicie o llanura de inundación (Fpi) y Meandro abandonado (Fma), todas susceptibles a inundaciones. Adicionalmente, en el inventario de procesos morfodinámicos realizado anteriormente, se identificó una zona específica con dinámica de sedimentación activa, la cual, al estar relacionada con transporte de sedimentos fluviales, se interpreta que su depositación requiere que haya lámina de agua intermitente.

La base de datos DesInventar reporta ocho eventos de inundación para el municipio de Mutatá; sin embargo, la mayoría de estos se asocian a cuerpos de agua ubicados fuera del área de influencia, o carecen de información precisa sobre la localización del evento, lo que impide determinar su coincidencia exacta con la zona evaluada.

Con base en este análisis, se delimitaron las zonas con alta susceptibilidad a inundaciones (ver Figura 5.24), localizadas principalmente en la geoforma de planicie o llanura de inundación. Estas áreas presentan un riesgo significativo debido a su proximidad al río Mutatá, lo que las hace especialmente vulnerables a los desbordamientos fluviales. Así mismo, en la geoforma de Terraza de acumulación se identificó un sector con sedimentación activa mencionado anteriormente. Esta sedimentación está asociada a la acumulación de materiales transportados de manera intermitente por el flujo de cauces menores, lo que genera condiciones favorables para el encharcamiento. Estas áreas son particularmente susceptibles a inundarse durante episodios de lluvias intensas o debido al flujo de aguas de escorrentía, que tienden a concentrarse en estos puntos por las características topográficas y geomorfológicas.

Por otro lado, el área restante fue clasificada con una susceptibilidad media. Esta categoría corresponde a las zonas ubicadas en la geoforma de terraza de acumulación con topografía de pendientes bajas. Aunque estas áreas no están en contacto directo con los principales cauces fluviales, las características geomorfológicas limitan el drenaje natural, lo que puede generar inundaciones temporales o persistentes, dependiendo de la intensidad y duración de las precipitaciones y de la capacidad de infiltración del suelo.

En conclusión, las características geomorfológicas y la cercanía al río Mutatá son los factores predominantes que determinan la susceptibilidad a inundaciones en el área de influencia desde un enfoque geomorfológico. Mientras que la llanura de inundación concentra los mayores riesgos debido a su proximidad al cauce (ocupa el 35,31 % del área), las terrazas de acumulación, aunque con menor susceptibilidad, también presentan desafíos importantes relacionados con el manejo de aguas superficiales y el drenaje natural.

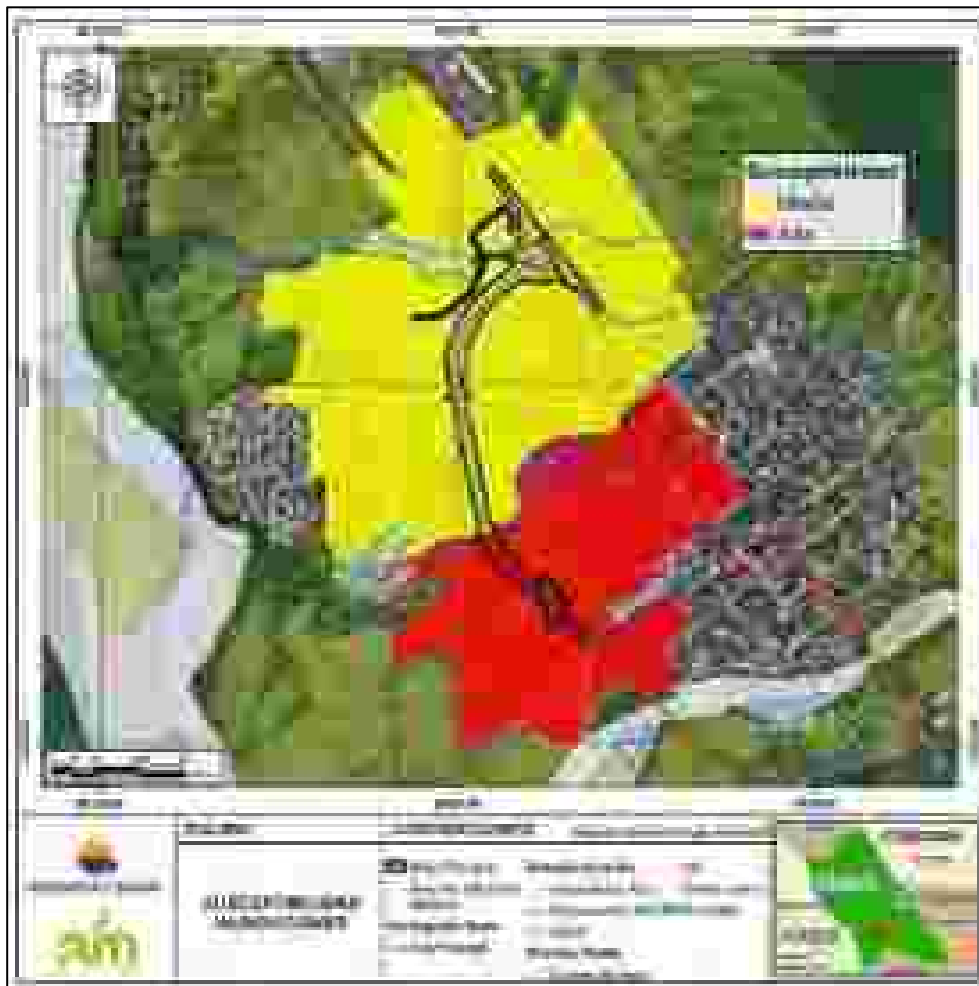


Figura 5.24 Susceptibilidad a inundaciones en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025

Tabla 5.10 Susceptibilidad a inundaciones – Análisis preliminar

Rango de susceptibilidad	Área (ha)	Área (%)
Alta	34,83	35,31
Media	63,81	64,69
Total	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025

De acuerdo con lo anterior, y con el propósito de elaborar un mapa de susceptibilidad a inundaciones con un mayor nivel de detalle, se incorporaron factores adicionales que permiten suplir las limitaciones del análisis previo, el cual no contemplaba una escala suficientemente precisa ni delimitaba de manera adecuada las áreas susceptibles en los drenajes menores. Para este fin se consideraron el trazado de los drenajes, la topografía, los cambios de pendiente, la ronda hídrica y las unidades geomorfológicas. En este contexto, la ronda hídrica no se asume

únicamente como la franja definida por la normativa, sino como una aproximación a la posible extensión de la mancha de inundación en los drenajes menores, dada la ausencia de dicha información específica. Con base en estos criterios se clasificaron como zonas de alta susceptibilidad aquellas áreas correspondientes a las rondas hídricas de los drenajes menores acotadas por los cambios abruptos de pendiente y la geoforma de escarpe, así como en áreas que evidencian variaciones significativas en la elevación.

Adicionalmente, las áreas colindantes con el casco urbano, el puente y la vía de conexión del proyecto vial presentan un manejo adecuado de la escorrentía superficial, favorecido por la presencia de obras viales como cunetas y canales. En consecuencia, estas zonas se clasifican con baja susceptibilidad a inundaciones, ya que la infraestructura existente permite un control efectivo del flujo y evita la acumulación de agua. De manera análoga, las áreas ubicadas en las partes altas de las microcuencas, caracterizadas por mayores pendientes, también presentan baja susceptibilidad, dado que la topografía favorece un rápido escurrimiento del agua durante eventos de precipitación. No obstante, si bien esta infraestructura contribuye en varias zonas al drenaje y a la prevención de anegamientos, el sector urbano más próximo al río Mutatá y con menor elevación puede presentar condiciones de inundabilidad debido a su cercanía con el cauce y la dinámica natural del mismo.

El resto del área de estudio ha sido clasificado con susceptibilidad media a inundaciones. Esta clasificación corresponde a zonas ubicadas en la geoforma de terraza de acumulación, caracterizadas por pendientes bajas y su superposición con drenajes menores dentro del área de influencia. En estos sectores, las condiciones del terreno pueden dificultar el drenaje eficiente, especialmente durante lluvias prolongadas, lo que puede dar lugar a inundaciones temporales o persistentes. La magnitud de estas inundaciones dependerá de factores como la intensidad y duración de las precipitaciones y la capacidad de infiltración del suelo.

En conclusión, Los principales factores que determinan la susceptibilidad a inundaciones en el área de influencia son sus características geomorfológicas y la proximidad tanto al río Mutatá como a los drenajes menores. En este orden de ideas, se obtiene lo siguiente:

Las planicies o llanuras de inundación y las rondas hídricas presentan la mayor susceptibilidad debido a su cercanía con los cuerpos de agua, abarcando un 20,13% del área (Ver Tabla 5.11).

Las terrazas de acumulación presentan una susceptibilidad media, atribuida a su predisposición a inundaciones y a la presencia de sistemas de drenaje simples, que pueden ser factores desencadenantes en la evaluación de la amenaza por inundación. Estas áreas ocupan el 30,85% del área de influencia. Finalmente, las geoformas de escarpe de terraza y las áreas urbanas con obras de manejo de escorrentía se clasifican con baja susceptibilidad (49,02%), ya que sus pendientes reducen significativamente el riesgo de inundación.

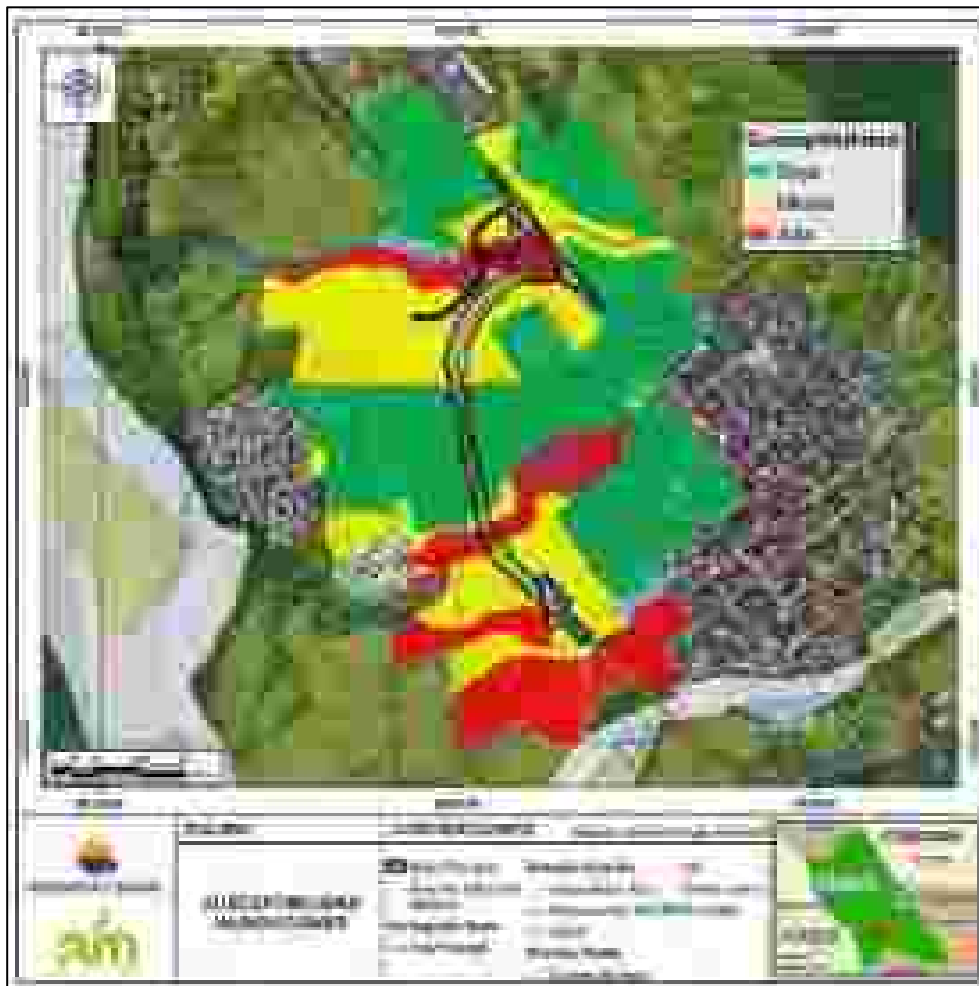


Figura 5.25 Susceptibilidad a inundaciones en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Tabla 5.11 Susceptibilidad a inundaciones

Rango de susceptibilidad	Área (ha)	Área (%)
Baja	48,35	49,02
Media	30,43	30,85
Alta	19,86	20,13
Total	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

En los Anexos C5_1/5_1_1_Geología y C5_1/5_1_2_Geomorfología se encuentran las capas asociadas a la geología, geoformas, geomorfología, pendientes y demás capas asociadas a los análisis de susceptibilidad a inundación.

5.1.3 Paisaje

El paisaje es una porción de espacio geográfico, homogéneo en cuanto a su fisionomía y composición, con un patrón de estabilidad temporal resultante de la interacción compleja de clima, rocas, agua, suelo, flora, fauna y el ser humano, que es reconocible y diferenciable de otras porciones vecinas de acuerdo con el análisis (resolución) espacio - temporal específico²⁶.

La configuración o expresión externa e interna que adquiere un paisaje es el resultado de los factores que intervienen en su formación (clima, geomorfología, suelos, litología/materiales parentales, vegetación y actividades humanas), lo cual determina la distribución espacial de los fragmentos. La geomorfología y la cobertura son dos (2) factores relevantes en la identificación y delineación de paisajes, pues constituyen las propiedades emergentes de éstos, y permiten reconocerlos y diferenciarlos unos de otros²⁷. Es a partir de estos parámetros que influyen la formación de los paisajes que se diferencian distintas unidades con características similares, que expresan particularidades intrínsecas del terreno, atributos biofísicos y antropogénicos.

5.1.3.1 Unidades de paisaje

Para analizar el paisaje del área de influencia abiótica, se utiliza la “Unidad de Paisaje” como base fundamental, de nomenclatura UP. Esta unidad se define a partir de la combinación de factores de relieve (geomorfología) y de coberturas de la tierra.

La cartografía de estas unidades se realizó a escala 1:10.000, a partir de los ambientes geomorfológicos y su correspondiente unidad geomorfológica como se aprecia en la Tabla 5.12 y las coberturas de la tierra de la [Tabla 5.13](#). Las unidades de paisaje resultantes se resumen en la [Tabla 5.14](#) con su respectivo porcentaje de ocupación y en la [Figura 5.26](#) se muestra la distribución espacial.

Tabla 5.12 Unidades geomorfológicas y su ambiente utilizadas para el análisis del componente de paisaje

Ambiente geomorfológico	Unidades geomorfológicas	Nomenclatura
Fluvial (F)	Escarpe de terraza	Fet
	Terraza de acumulación	Fta
	Planicie o llanura de inundación	Fpi
	Meandro abandonado	Fma
	Laguna	Flg
Antropogénico	Planos y campos de llenos antrópicos	Ar
	Jagüey	Aj

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.13 Coberturas de la tierra utilizadas para el análisis del componente de paisaje

Coberturas CORINE Land COVER (CIC)	Nomenclatura
1.4.2.2 Áreas deportivas	Ad
3.1.4. Bosque de galería y ripario	Bgr
5.1.4. Cuerpo de agua artificial	Caa

²⁶ (Etter, 1991)

²⁷ (Acuña, C, 2010)

Coberturas CORINE Land COVER (CIC)	Nomenclatura
1.4.1.2. Parques cementerios	Pc
2.3.3. Pastos enmalezados	Pe
2.3.1. Pastos limpios	Pl
3.1.5. Plantación forestal	Pf
1.2.2.1. Red vial y territorios asociados	Rvf
1.1.1. Tejido urbano continuo	Tuc
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	Tud
1.2.1. Zonas industriales y comerciales	Zic

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.14 Unidades de paisaje en el área de influencia abiótica

Unidades de paisaje	Nomenclatura	Área	
		ha	%
Tejido urbano continuo en Escarpe de terraza	UP1	0,01	0,01%
Tejido urbano continuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP2	24,71	25,05%
Tejido urbano discontinuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP3	0,52	0,53%
Zonas industriales o comerciales en Planos y campos de llenos antrópicos	UP4	1,47	1,49%
Pastos limpios en Escarpe de terraza	UP5	1,51	1,53%
Pastos limpios en Planicie o llanura de inundación	UP6	5,15	5,22%
Pastos limpios en Terraza de acumulación	UP7	39,36	39,91%
Pastos enmalezados en Escarpe de terraza	UP8	0,90	0,91%
Pastos enmalezados en Terraza de acumulación	UP9	13,14	13,32%
Bosque de galería y ripario en Escarpe de terraza	UP10	0,10	0,11%
Zonas industriales o comerciales en Terraza de acumulación	UP11	1,05	1,06%
Bosque de galería y ripario en Terraza de acumulación	UP12	0,61	0,62%
Plantación forestal en Terraza de acumulación	UP13	0,66	0,67%
Cuerpos de agua artificiales en Jagüey	UP14	0,22	0,22%
Cuerpos de agua artificiales en Meandro abandonado	UP15	0,05	0,05%
Red vial y territorios asociados en Planos y campos de llenos antrópicos	UP17	5,64	5,72%
Parques cementerio en Planos y campos de llenos antrópicos	UP18	1,04	1,05%
Áreas deportivas en Planos y campos de llenos antrópicos	UP19	2,14	2,17%
Tejido urbano discontinuo en Terraza de acumulación	UP22	0,36	0,36%
Total		98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



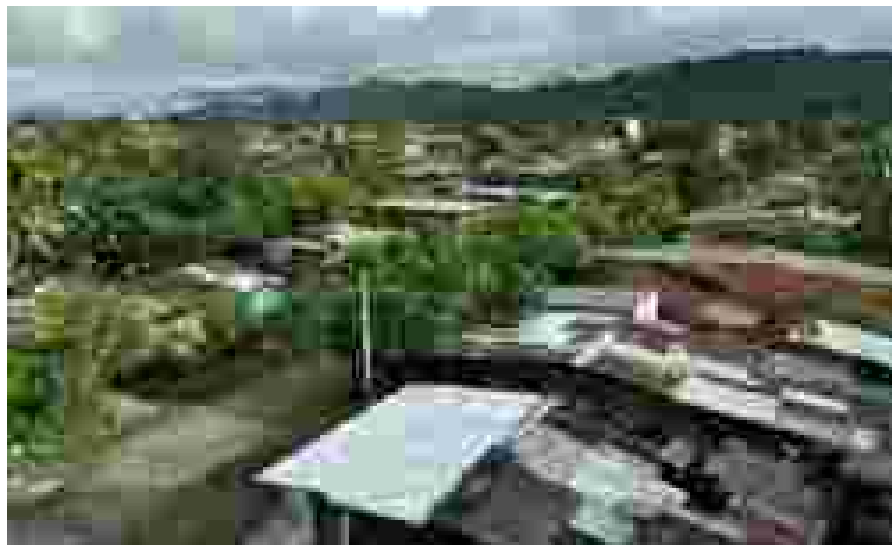
Figura 5.26 Unidades de paisaje en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

A continuación, se describe detalladamente cada una de las unidades de paisaje identificadas en el área de influencia abiótica del proyecto.

5.1.3.1.1 Unidades de tejido urbano continuo (UP1, UP2)

La unidad de paisaje está constituida por la cobertura tejido urbano continuo sobre las geoformas de planos y campos de llenos antrópicos de ambiente antropogénico y escarpe de terraza de ambiente fluvial, la cual se localiza al este, oeste, sureste, **noreste** y centro del área de influencia. La unidad está formada en conjunto por el **25,06%** del área de influencia, donde la unidad de paisaje tejido urbano continuo en planos y campos de llenos antrópicos es de mayor extensión respecto a **las demás**, abarcando el **24,71** ha que equivalen al **25,05%**. La unidad está conformada por edificaciones y áreas adyacente como vías y superficies artificiales y con vegetación y suelo desnudo. (Ver Fotografía 5.13)



Fotografía 5.13 Tejido urbano continuo en planos y campos de llenos antrópicos (UP2)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.2 Unidades de tejido discontinuo (UP3, UP22)

La unidad está constituida por coberturas de tejido urbano discontinuo en la geoforma de planos y campos de llenos antrópicos de ambiente antropogénico y terraza de acumulación, las cuales se ubican hacia el suroeste del área de influencia abiótica del proyecto. Estas unidades están formadas por 0,52 ha y 0,36 ha que corresponden al 0,53% y 0,36% respectivamente, se encuentran rodeadas por pastos limpios, lo que indica que la unidad se encuentra dispersa y discontinua dentro del área de influencia del paisaje. (Ver Fotografía 5.14)



Fotografía 5.14 Tejido urbano discontinuo en planos y campos de llenos antrópicos (UP3)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.3 Unidades de zonas industriales o comerciales (UP4, UP11)

Esta unidad se caracteriza por estar constituida de coberturas de zonas industriales o comerciales sobre la geoforma de planos y campos de llenos antrópicos de ambiente antropogénico y terrazas de acumulación, las cuales se localizan hacia el noreste del área de influencia. En estas unidades de paisaje, se resalta la infraestructura artificial asociada principalmente en el área de influencia por la Estación Descompresora de gas. Las unidades poseen en conjunto un área de 2,52 ha que representan el 2,55% del área (Ver Fotografía 5.15).



Fotografía 5.15 Zonas industriales o comerciales en planos y campos de llenos antrópicos (UP4)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.4 Unidades de pastos limpios (UP5, UP6, UP7)

Esta unidad se localiza al norte, noroeste, noreste, sur, suroeste y centro del área de influencia, y se encuentra ubicada sobre las geoformas escarpe de terraza, terraza de acumulación y planicie o llanura de inundación de ambiente fluvial. En conjunto, esta unidad forma el 46,66% del área de influencia, donde la unidad de pastos limpios en terraza de acumulación es la mayor representación en el área con un 39,36 ha que conforman el 39,91% del área de influencia abiótica del proyecto.

De manera general, esta unidad es el resultado de la intervención antrópica, donde se modifica la vegetación natural para adecuar zonas destinadas a la ganadería extensiva o intensiva principalmente. Las características de esta unidad no son particularmente atractivas pues no presentan gran variedad de vegetación, alguna variedad de color y contraste moderado. Además, no poseen gran importancia ecológica como otros tipos de coberturas. En la Fotografía 5.16 se muestra la representación de la unidad de paisaje pastos limpios en terraza de acumulación.



Fotografía 5.16 Pastos limpios en terraza de acumulación (UP7)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.5 Unidades de pastos enmalezados (UP8, UP9)

Esta unidad está conformada por coberturas tipo pastos enmalezados sobre geoformas de escarpe de terraza y terraza de acumulación de ambiente fluvial. La unidad forma en total el **14,23%** del área de influencia, se localiza al norte, noreste, noroeste y centro del área de influencia respectivamente. La unidad de pastos enmalezados en terrazas de acumulación es la de mayor extensión en el área con **13,14 ha** que equivalen al **13,32%** del área de influencia abiótica del proyecto (Ver Fotografía 5.17).

En general, esta unidad de pastos enmalezados es el resultado de intervención antrópica, debido a los procesos de producción ganadera mediante sistemas de pastoreo rotacional, en la cual se abandonan grandes extensiones de pastos para dar paso a la colonización de especies vegetales. Las características de esta unidad no son particularmente atractivas pues no presentan gran variedad de vegetación, alguna variedad de color y contraste moderado.



Fotografía 5.17 Pastos enmalezados en terraza de acumulación (UP9)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.6 Unidades de bosques de galería y ripario (UP10, UP11, UP12)

Esta unidad se caracteriza por estar conformada por coberturas de bosques de galería y ripario sobre las geoformas de escarpe de terraza y **terrazza de acumulación de ambiente fluvial**; se distribuye hacia **el este, suroeste** y centro del área, formando en su mayoría las zonas verdes alrededor de la Quebrada Daira, Drenaje 3 y Drenaje 1, como se muestra en la Fotografía 5.18. **Estas se encuentran** localizadas sobre geoformas de escarpe de terraza, y terraza de acumulación de ambiente fluvial. Ocupan en conjunto el **0,72%** del área de influencia, donde la unidad de paisaje bosque de galería y ripario en terraza de acumulación, es la de mayor representación en el área, con **0,61 ha** que corresponden al **0,62%** del área.

Esta unidad se caracteriza por presentar grandes servicios ecosistémicos y actuar como protección de las fuentes hídricas. También, hace que resalte el paisaje de la zona debido a su variedad de vegetación, color y contrastes con las demás coberturas.



Fotografía 5.18 Bosque de galería y ripario en terraza de acumulación (UP12)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.7 Unidades de plantación forestal (UP13)

Esta unidad de pasaje se encuentra conformada por la cobertura plantación forestal sobre la geoforma de terraza de acumulación de ambiente fluvial, la cual se encuentra ubicada al suroeste del área de influencia. Esta unidad ocupa el 0,66 ha que equivalen al 0,67% del área de influencia abiótica del proyecto.

Esta unidad en el área se caracteriza por ser creadas directamente por el hombre con fines manejo forestal, donde en el área la plantación se encuentra constituida por individuos arbóreos de la especie *Tectona grandis*, la cual es reconocida por ser madera de buena calidad, comúnmente utilizada en la construcción de barcos, ebanistería, carpintería y contrachapados. También, esta unidad resalta en el paisaje por la variedad de vegetación, color y contraste con las demás coberturas del área de influencia, ver Fotografía 5.19.



Fotografía 5.19 Plantación forestal en terraza de acumulación (UP13)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.8 Unidades de cuerpos de agua artificiales (UP14, UP15)

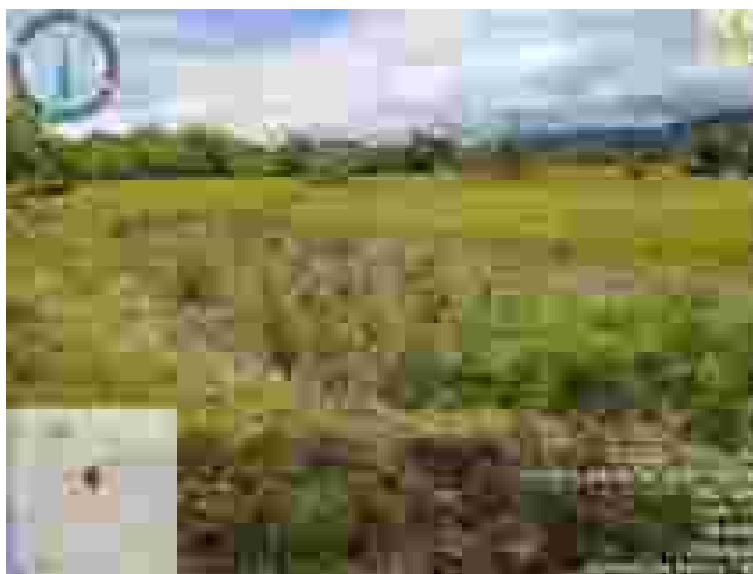
En esta unidad de paisaje se encuentra los cuerpos de agua artificiales sobre las geoformas de jagüey y meandro abandonado, la cual se localiza al noroeste, sur y suroeste del área de influencia. Conforman en conjunto el 0,27% del área de influencia, donde la unidad de paisaje de cuerpos de agua artificiales en jagüey es la de mayor extensión con 0,22 ha que equivalen al 0,22% del área. En la Fotografía 5.20 y Fotografía 5.21 se aprecia las unidades de paisaje de cuerpos de agua artificiales en jagüey y meandro abandonado.

La unidad de cuerpos de agua artificial son elementos introducidos por el ser humano, presentan gran importancia ambiental y socioeconómica en la zona. Desde una perspectiva ambiental, estos cuerpos artificiales promueven la biodiversidad y ayudan a mitigar la erosión del suelo y en términos socioeconómicos son cruciales para las actividades ganaderas de la zona.



Fotografía 5.20 Cuerpos de agua artificiales en Jagüey (UP14)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



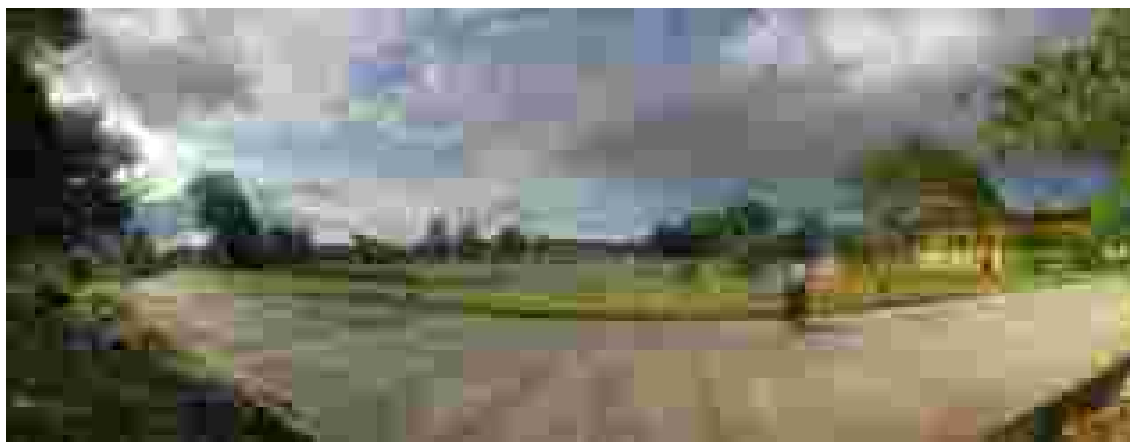
Fotografía 5.21 Cuerpos de agua artificiales en meandro abandonado (UP15)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.9 Unidades de red vial y territorios asociados (UP17)

En esta unidad de paisaje se encuentra la cobertura red vial y territorios asociados sobre la geoforma planos y campos de llenos antrópicos de ambiente antropogénico, la unidad se encuentra localizada hacia el norte, noreste, noroeste, sur y sureste del área y posee un área de 5,64 ha que corresponden al 5,72% del área.

Esta unidad de paisaje está relacionada en el área de influencia por áreas cubiertas de la infraestructura de vías internas a predios y barrios y a vías nacionales, como son la Ruta Nacional 6202, vía de acceso a instalaciones del Ejército Nacional de Colombia, vía de acceso a predio privado, calle 14, vía industrial, caminos o senderos y demás vías asociadas al casco urbano de la cabecera municipal de Mutatá y el Barrio el Regalo.



Fotografía 5.22 Red vial y territorios asociados (calle 14) en planos y campos de llenos antrópicos (UP17)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



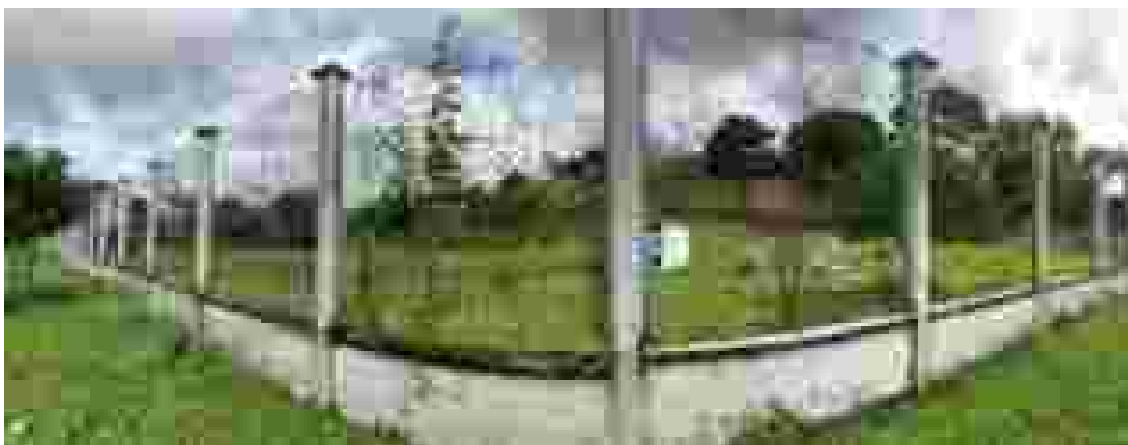
Fotografía 5.23 Red vial y territorios asociados (Ruta Nacional 6202) en planos y campos de llenos antrópicos (UP17)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.10 Unidades de parques cementerio (UP18)

Esta unidad está conformada por la cobertura parques cementerio, la cual se trata de una pequeña área hacia el norte del área de influencia. Esta unidad de paisaje ocupa el 1,04 ha que equivalen al 1,05% del área de influencia, y se encuentra sobre la geoforma planos y campos de llenos antrópicos de ambiente antropogénico. (Ver Fotografía 5.24)

Esta unidad es el resultado de la intervención antrópica donde las zonas verdes urbanas que hacen parte del tejido urbano cubiertas de vegetación las cuales no son destinadas para fines agrícolas, sino en el tejido urbano se destina un parque cementerio.



Fotografía 5.24 Parque cementerio en planos y campos de llenos antrópicos (UP18)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.1.11 Unidades de áreas deportivas (UP19)

Esta unidad de paisaje se localiza al noreste del área de influencia, la cual está definida por la cobertura áreas deportivas sobre la geoforma planos y campos de llenos antrópicos de ambiente antropogénico. La unidad forma 2,14 ha del área de influencia que equivalen al 2,17% y la se encuentra rodeada por pastos limpios y tejido urbano continuo.



Fotografía 5.25 Áreas deportivas en planos y campos de llenos antrópicos (UP19)

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.2 Percepción del paisaje

5.1.3.2.1 Análisis de visibilidad

La visibilidad del paisaje se analizó según el criterio de escala visual, en que las unidades de paisaje son agrupadas en categorías según las distancias a las que se pueden percibir las características que contribuyen a la calidad visual que las componen (vegetación, geomorfología, presencia de agua, color, fondo escénico, rareza, actuación humana), teniendo en cuenta además los puntos de observación posibles, determinados en los recorridos de campo. Así, se obtienen áreas desde donde el área de influencia del proyecto es visible, y desde donde no lo es.

Estas áreas se determinan a partir de un modelo de sistemas de información geográfica, procesando los datos de elevación del terreno disponibles a partir de dos métodos: en el primero se utilizan modelos de visibilidad en el software ArcMap utilizando como insumo principal un Modelo Digital del Terreno (DTM); y el segundo método a partir de categorías que corresponden a la visibilidad de las unidades de paisaje definidas según sus características e intervenciones antrópicas.

Como se mencionó anteriormente, con el primer método se busca conocer de manera más detallada los puntos de observación de las intervenciones proyectadas en el área de influencia. Para esto se utiliza un DTM, el cual presenta cada celda en planta de 0,27 m x 0,27 m, con un dato de elevación por encima del nivel del mar. Con este se generan dos modelos de visibilidad para conocer todos los puntos hacia los que existe una línea de visión despejada. En el primero de estos modelos se ubican “observadores en el software anteriormente mencionado (los observadores rojos que se presentan en la [Figura 5.27](#)) y en el segundo modelo se utiliza el límite definido para el área de influencia como los observadores.

En la siguiente [Figura 5.27](#) se presentan las áreas desde las que serían visibles a las intervenciones relacionadas de color verde y las no visibles de color rosado.



Figura 5.27 Modelo de visibilidad y observadores en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Como se puede observar en el resultado del modelo la visibilidad es bastante pronunciada a distancias considerables, a pesar de presentar una topografía de plana a totalmente escarpada, siendo la topografía ligeramente inclinada la de mayor representación en el área de influencia abiótica y por presentar coberturas naturales de alturas de vegetación que ayudan a disminuir la visibilidad a zonas más alejadas. No obstante, las áreas visibles del modelo se ubican en dirección a las unidades representadas por red vial y territorios asociados y tejido urbano continuo asociados a la infraestructura vial como vía nacional que hace parte del proyecto.

Por otro lado, el segundo método propuesto de categorías de visibilidad se realiza a partir de la metodología propuesta por el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología

de Materiales²⁸. Las categorías que se definen en esta metodología se presentan en la Tabla 5.15, y las categorías definidas para cada unidad de paisaje del proyecto se muestran en la [Tabla 5.16](#).

Tabla 5.15 Categorías de escala visual

Escala visual	Escala visual según datos geográficos ANLA	Descripción
Inmediata	Inmediata	En esta categoría se encuentran unidades de paisaje que son apreciables a una distancia inmediata, donde todos los atributos son percibidos y valorados por el observador del paisaje
Cercana	Primer plano	Estas unidades de paisaje presentan características que son visibles de manera cercana, en donde cada uno de sus elementos o atributos son valorados por los observadores del paisaje
Intermedia	Plano intermedio	Las unidades en esta categoría exhiben características comunes, que se asocian con contrastes cromáticos y recurso hídrico, que pueden ser percibidos a medianas distancias de visualización y elevan el interés visual y el atractivo escénico de los elementos de estas unidades de paisaje
Lejana	Plano lejano	En esta categoría se encuentran unidades de paisaje que son apreciables a una distancia lejana. Por ejemplo, las coberturas vegetales de gran altura o las geoformas más contrastantes pueden ser percibidas desde lejos.

Fuente: Modificado de Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales, 2020.



Figura 5.28 Escala visual

Fuente: Modificado de Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales, 2020.

En la siguiente [Tabla 5.16](#), se presenta el resultado de la escala visual para cada una de las unidades de paisaje en el área de influencia abiótica del proyecto.

²⁸ (Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales , 2020)

Tabla 5.16 Escala visual para las unidades de paisaje en el área de influencia abiótica

Unidad de paisaje	Nomenclatura	Escala visual
Tejido urbano continuo en Escarpe de terraza	UP1	Primer plano
Tejido urbano continuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP2	Inmediata
		Primer plano
Tejido urbano discontinuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP3	Inmediata
		Primer plano
Zonas industriales o comerciales en Planos y campos de llenos antrópicos	UP4	Inmediata
		Primer plano
Pastos limpios en Escarpe de terraza	UP5	Inmediata
		Primer plano
Pastos limpios en Planicie o llanura de inundación	UP6	Inmediata
		Primer plano
Pastos limpios en Terraza de acumulación	UP7	Inmediata
		Primer plano
Pastos enmalezados en Escarpe de terraza	UP8	Inmediata
		Primer plano
Pastos enmalezados en Terraza de acumulación	UP9	Inmediata
		Primer plano
Bosque de galería y ripario en Escarpe de terraza	UP10	Primer plano
Zonas industriales o comerciales en Terraza de acumulación	UP11	Inmediata
		Primer plano
Bosque de galería y ripario en Terraza de acumulación	UP12	Inmediata
		Primer plano
Plantación forestal en Terraza de acumulación	UP13	Primer plano
		Inmediata
Cuerpos de agua artificiales en Jagüey	UP14	Inmediata
		Primer plano
Cuerpos de agua artificiales en Meandro abandonado	UP15	Primer plano
Red vial y territorios asociados en Planos y campos de llenos antrópicos	UP17	Inmediata
		Primer plano
Parques cementerio en Planos y campos de llenos antrópicos	UP18	Inmediata
		Primer plano
Áreas deportivas en Planos y campos de llenos antrópicos	UP19	Inmediata
		Primer plano
Tejido urbano discontinuo en Terraza de acumulación	UP22	Inmediata

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

La escala determinada para las unidades de paisaje se relaciona principalmente con la altura de los elementos de vegetación presentes en estas áreas, además de la altura sobre el nivel de las diferentes unidades geomorfológicas y el contraste (especialmente de color) con el paisaje circundante. Así, únicamente la unidad de paisaje **UP22** presenta una escala visual **netamente** inmediata, la cual se localiza sobre una geoforma de terraza de acumulación, lo que hace que esta unidad sea apreciable, y todos sus atributos son percibidos y observados, pues por la topografía de la geoforma es fácil observar las características a distancias 0-0,1 Km. También se tiene que, las unidades de paisaje **UP1**, **UP10** y **UP15**, presentan un nivel de escala visual **netamente** de primer plano, ubicadas sobre geoformas de escarpe de terraza y meandro

abandonado, la cual permite tener una vista cercana, con características bastante visibles. Finalmente, el restante de las unidades de paisaje, presentan un nivel de escala visual inmediata y de primer plano, debido a la topografía de las geoformas de cada una de estas, los contrastantes por su color y su forma es observable a menores distancias.

Por lo anterior, en la Tabla 5.17 se observa el porcentaje de ocupación de las escalas visuales en el área de influencia y en la Figura 5.29 se muestra la distribución espacial de las mismas.

Tabla 5.17 Categoría de escala visual para las unidades de paisaje en el área de influencia abiótica

Escala visual	Área (ha)	Área (%)
Inmediata	30,08	30,49
Primer plano	68,56	69,51
Total	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.29 Escala visual en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.2.2 Análisis de calidad visual del paisaje

La calidad visual de las unidades de paisaje del proyecto se evalúa mediante el método indirecto propuesto por Bureau of Land Management²⁹, el cual asigna un puntaje a cada componente (morfología, vegetación, agua, color, fondo escénico, rareza y actuación humana) para cada unidad de paisaje, de acuerdo con los criterios de valoración, tal como se presenta en la Tabla 5.18. La suma de los puntajes asignados determina la clase de calidad visual, en comparación con la escala de referencia presentada en la Tabla 5.19. El análisis efectuado para cada unidad de paisaje se muestra en la Tabla 5.20.

Tabla 5.18 Criterio para la evaluación de la calidad visual

Componente	Criterios de valoración y puntuación		
Morfología	Relieve muy montañoso, marcado y prominente (acantilados, agujas, grandes formaciones rocosas); o bien relieve de gran variedad superficial o muy erosionado, o sistemas de dunas, o bien presencia de algún rasgo muy singular y dominante (5)	Formas erosivas interesantes o relieve variado en tamaño y forma. Presencia de formas y detalles interesantes, pero no dominantes o excepcionales (3)	Colinas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular (1)
Vegetación	Gran variedad de tipos de vegetación, con formas, texturas y distribución interesante (5)	Alguna variedad en la vegetación, pero sólo uno o dos tipos (3)	Poca o ninguna variedad o contraste en la vegetación (1)
Agua	Factor dominante en el paisaje, limpia y clara, aguas blancas (cascadas) o láminas de agua en reposo (5)	Agua en movimiento o reposo, pero no dominante en el paisaje (3)	Ausente o inapreciable (0)
Color	Combinaciones de color intensas y variadas o contrastes agradables (5)	Alguna variedad e intensidad en los colores y contrastes, pero no actúa como elemento dominante (3)	Muy poca variación de color o contraste, colores apagados (1)
Fondo escénico	El paisaje circundante potencia mucho la calidad visual (5)	El paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual en el conjunto (3)	El paisaje adyacente no ejerce influencia en la calidad del conjunto (0)
Rareza	Único o poco corriente o muy raro en la región, posibilidad de contemplar fauna y vegetación excepcional (6)	Característico, aunque similar a otros en la región (2)	Bastante común en la región (1)
Actuación humana	Libre de actuaciones estéticamente no deseadas o con modificaciones que inciden favorablemente en la calidad visual (2)	La calidad escénica está afectada por modificaciones poco armoniosas, aunque no en su totalidad, o las actuaciones no añaden calidad visual (0)	Modificaciones intensas y extensas, que reducen o anulan la calidad escénica (-1)

Fuente: Bureau of Land Management, 1980.

²⁹ (Bureau of Land Management, United States Department of Interior , 1980)

Tabla 5.19 Clases utilizadas para evaluar la calidad visual

Clase A	Áreas de calidad alto. Características excepcionales para cada aspecto considerado (puntaje de 19-33)
Clase B	Áreas de calidad medio. Características excepcionales para algunos aspectos y comunes para otros. (puntaje de 12-18)
Clase C	Áreas de calidad bajo. Características y rasgos comunes en la región (puntaje de 0-11)

Fuente: Bureau of Land Management, 1980.

En la Tabla 5.20 se presenta a evaluación de la calidad visual del paisaje, en la cual se relacionan las calificaciones de cada uno de los componentes en las unidades de paisaje presentes dentro del área de influencia del proyecto. Así mismo, se presenta la justificación de cada uno de los valores relacionados en los criterios de evaluación.

Tabla 5.20 Evaluación de la calidad visual de las unidades de paisaje el área del proyecto

Unidad de paisaje	Componente							Total	Calidad visual	Justificación
	Morfología	Vegetación	Agua	Color	Fondo Escénico	Rareza	Actuaciones Humanas			
UP1	3	1	0	1	0	1	-1	5	Bajo	La UP presenta formas y detalles interesantes, pero no dominantes o excepcionales; poca vegetación; ausencia de fuentes hídricas; poca variación de color; sin influencia por el paisaje adyacente; rareza bastante común; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.
UP2	1	1	0	1	0	2	-1	4	Bajo	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular; poca vegetación; ausencia de fuentes hídricas; poca variación de color; sin influencia por el paisaje adyacente; rareza similar a otros en la región; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.
UP3	1	1	0	1	0	2	-1	4	Bajo	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular; poca vegetación; ausencia de fuentes hídricas; poca variación de color; sin influencia por el paisaje adyacente; rareza similar a otros en la región; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.
UP4	1	1	0	1	0	2	-1	4	Bajo	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular; poca vegetación; ausencia de fuentes hídricas; poca variación de color; sin influencia por el paisaje adyacente; rareza similar a otros en la región; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.
UP5	3	3	3	3	3	2	0	17	Medio	La UP presenta formas erosivas interesantes o relieve variado en tamaño y forma; variedad en la vegetación, pero sólo uno o dos tipos; agua en movimiento, pero no dominante en el paisaje; variedad e intensidad en los colores y contrastes, pero no actúa como elemento dominante; el paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual en el conjunto; característico, aunque similar a otros en la región; afectada por modificaciones poco armoniosas, aunque no en su totalidad.

Unidad de paisaje	Componente							Total	Calidad visual	Justificación
	Morfología	Vegetación	Agua	Color	Fondo Escénico	Rareza	Actuaciones Humanas			
UP6	1	3	3	3	3	2	0	15	Medio	La UP presenta colinas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular; variedad en la vegetación, pero sólo uno o dos tipos; agua en movimiento, pero no dominante en el paisaje; variedad e intensidad en los colores y contrastes, pero no actúa como elemento dominante; el paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual en el conjunto; característico, aunque similar a otros en la región; afectada por modificaciones poco armoniosas, aunque no en su totalidad.
UP7	3	3	3	3	3	2	0	17	Medio	La UP presenta formas erosivas interesantes o relieve variado en tamaño y forma; variedad en la vegetación, pero sólo uno o dos tipos; agua en movimiento, pero no dominante en el paisaje; variedad e intensidad en los colores y contrastes, pero no actúa como elemento dominante; el paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual en el conjunto; característico, aunque similar a otros en la región; afectada por modificaciones poco armoniosas, aunque no en su totalidad, o las actuaciones no añaden calidad visual.
UP8	3	3	0	3	3	2	0	14	Medio	La UP presenta formas erosivas interesantes o relieve variado en tamaño y forma; variedad en la vegetación, pero sólo uno o dos tipos; ausencia de fuentes hídricas; variedad e intensidad en los colores y contrastes, pero no actúa como elemento dominante; el paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual en el conjunto; característico, aunque similar a otros en la región; afectada por modificaciones poco armoniosas, aunque no en su totalidad, o las actuaciones no añaden calidad visual.
UP9	3	3	3	3	3	2	0	17	Medio	La UP presenta formas erosivas interesantes o relieve variado en tamaño y forma; variedad en la vegetación, pero sólo uno o dos tipos; agua en movimiento, pero no dominante en el paisaje; variedad e intensidad en los colores y contrastes, pero no actúa como elemento dominante; el paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual en el conjunto; característico, aunque similar a otros en la región; afectada por modificaciones poco armoniosas, aunque no en su totalidad, o las actuaciones no añaden calidad visual.

Unidad de paisaje	Componente							Total	Calidad visual	Justificación
	Morfología	Vegetación	Agua	Color	Fondo Escénico	Rareza	Actuaciones Humanas			
UP10	3	5	3	5	5	2	2	25	Alto	La UP presenta formas erosivas interesantes o relieve variado en tamaño y forma; gran variedad de tipos de vegetación; agua en movimiento o reposo, pero no dominante en el paisaje; combinaciones de color intensas y variadas o contrastes agradables; el paisaje circundante potencia mucho la calidad visual; característico, aunque similar a otros en la región; libre de actuaciones estéticamente.
UP11	1	1	0	1	0	2	-1	4	Bajo	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos; pocos o ningún detalle singular; poca vegetación; ausencia de fuentes hídricas; poca variación de color; sin influencia por el paisaje adyacente; rareza similar a otros en la región; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.
UP12	3	5	3	5	5	2	2	25	Alto	La UP presenta formas erosivas interesantes o relieve variado en tamaño y forma; gran variedad de tipos de vegetación; agua en movimiento o reposo, pero no dominante en el paisaje; combinaciones de color intensas y variadas o contrastes agradables; el paisaje circundante potencia mucho la calidad visual; característico, aunque similar a otros en la región; libre de actuaciones estéticamente.
UP13	3	5	0	5	5	2	2	22	Alto	La UP presenta formas erosivas interesantes o relieve variado en tamaño y forma; gran variedad de tipos de vegetación; ausencia de fuentes hídricas; combinaciones de color intensas y variadas o contrastes agradables; el paisaje circundante potencia mucho la calidad visual; característico, aunque similar a otros en la región; libre de actuaciones estéticamente.
UP14	1	1	3	1	0	2	-1	7	Bajo	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular; poca o ninguna variedad/contraste en la vegetación; agua en movimiento o reposo, pero no dominante en el paisaje; poca variación de color; sin influencia por el paisaje adyacente; rareza similar a otros en la región; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.

Unidad de paisaje	Componente							Total	Calidad visual	Justificación
	Morfología	Vegetación	Agua	Color	Fondo Escénico	Rareza	Actuaciones Humanas			
UP15	1	1	3	1	0	2	-1	7	Bajo	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular; poca o ninguna variedad/contraste en la vegetación; agua en movimiento o reposo, pero no dominante en el paisaje; poca variación de color; sin influencia por el paisaje adyacente; rareza similar a otros en la región; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.
UP17	1	1	0	1	0	2	-1	4	Bajo	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular; poca o ninguna variedad/contraste en la vegetación; ausencia de fuentes hídricas; poca variación de color; sin influencia por el paisaje adyacente; rareza similar a otros en la región; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.
UP18	1	3	0	3	3	2	-1	11	Bajo	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular; variedad en la vegetación, pero sólo uno o dos tipos; ausencia de fuentes hídricas; variedad e intensidad en los colores y contrastes, pero no actúa como elemento dominante; el paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual; rareza similar a otros en la región; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.
UP19	1	3	0	5	3	1	0	13	Medio	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos; variedad en la vegetación, pero sólo uno o dos tipos; ausencia de fuentes hídricas; combinaciones de color intensas y variadas o contrastes agradables; el paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual; poca rareza, bastante común en la región; afectada por modificaciones poco armoniosas, aunque no en su totalidad.
UP22	1	1	0	1	0	2	-1	4	Bajo	La UP presenta formas suaves, fondos de valle planos, pocos o ningún detalle singular; poca vegetación; ausencia de fuentes hídricas; poca variación de color; sin influencia por el paisaje adyacente; rareza similar a otros en la región; con modificaciones intensas y extensas que reducen la calidad escénica.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En el área de influencia abiótica del proyecto, predomina la calidad visual del tipo media, representando el 63,06% de su extensión total, esto debido a la ausencia de morfologías notables, una vegetación poco representativa, predominancia de coberturas conformadas por pastos, los cuales son característicos en la región y similares en otras regiones, tienen variedad de vegetación y color, presencia de agua no dominante y presentan intervención antrópica con modificaciones poco armoniosas. Por otra parte, están las unidades de paisaje con calidad visual baja, representando el 35,54% del área de influencia abiótica, caracterizadas por tener una alta presencia de intervención antrópica, poca o ninguna variedad o contraste en la vegetación y poca variación de color o colores apagados, adicionalmente, en estas unidades la presencia de cuerpos de agua es principalmente nula. Finalmente, las unidades de paisaje con calidad visual alta están determinadas especialmente por la variedad de vegetación, color y por tener la presencia de agua, aunque esta no sea predominante.

En la [Tabla 5.21](#) se aprecia el porcentaje de ocupación de la calidad visual en el área de influencia y en la [Figura 5.30](#) se presenta la distribución espacial de la calidad visual con su respectiva categoría.

Tabla 5.21 Categorías de calidad visual en el área de influencia abiótica del proyecto

Calidad visual	Área (ha)	Área (%)
Bajo	35,06	35,54
Medio	62,21	63,06
Alto	1,37	1,39
Total	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.30 Calidad visual en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.2.3 Análisis de fragilidad del paisaje

La metodología de Yeomans³⁰ define la fragilidad visual como la susceptibilidad del paisaje al cambio cuando se desarrolla un uso sobre él, y la capacidad de absorción como la cualidad que tiene el paisaje para acoger acciones propuestas sin que se produzcan variaciones en su carácter visual; es decir, estos dos conceptos son inversamente proporcionales.

Así, para identificar la fragilidad visual de las unidades de paisaje se comienza determinando su capacidad de absorción, lo cual se hace a partir de la ecuación CAV. Esta ecuación depende de un conjunto de parámetros que se consideran determinantes para la fragilidad visual. A estos se les asignan determinados puntajes según la Tabla 5.22:

³⁰ (Yeomans, 1986)

Tabla 5.22 Criterios de valoración para determinar la Capacidad de Absorción Visual (CAV)

Factor	Condiciones	Puntajes	Nominal numérico
Pendiente (P)	Inclinado (pendiente >55%)	Bajo	1
	Inclinación suave (25-55% de pendiente)	Moderado	2
	Poco inclinado (0-25% de pendiente)	Alto	3
Estabilidad del suelo y erosionabilidad (E)	Restricción alta derivada de riesgo alto de erosión e inestabilidad, pobre regeneración potencial	Bajo	1
	Restricción moderada debido a ciertos riesgos de erosión e inestabilidad y regeneración potencial	Moderado	2
	Poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad y buena regeneración potencial	Alto	3
Potencial estético (R)	Potencial bajo	Bajo	1
	Potencial moderado	Moderado	2
	Potencial alto	Alto	3
Diversidad de vegetación (D)	Eriales, prados y matorrales	Bajo	1
	Coníferas, repoblaciones	Moderado	2
	Diversificada (mezcla de claros y bosques)	Alto	3
Actuación humana (C)	Fuerte presencia antrópica	Alto	3
	Presencia moderada	Moderado	2
	Casi imperceptible	Bajo	1
Contrastes de color (V)	Elementos de bajo contraste	Bajo	1
	Contraste visual moderado	Moderado	2
	Contraste visual alto	Alto	3

Fuente: Yeomans, 1986.

Los puntajes obtenidos en la evaluación se ingresan a la siguiente fórmula para determinar la Capacidad de Absorción Visual del Paisaje (CAV):

$$CAV = P * (E + R + D + C + V)$$

Los resultados obtenidos según la ecuación CAV se comparan con los valores de Tabla 5.23 para asignar así una clase cualitativa a cada unidad de paisaje.

Tabla 5.23 Categoría de valoración para determinar la Capacidad de Absorción Visual (CAV)

Clase	Escala
Bajo	<15
Moderado (medio)	15-30
Alto	>30

Fuente: Yeomans, 1986.

En la Tabla 5.24 se presenta la capacidad de absorción visual y fragilidad del paisaje, en la cual se relacionan las calificaciones de cada uno de los componentes en las unidades de paisaje presentes dentro del área de influencia del proyecto. Así mismo, se presenta la justificación de cada uno de los valores relacionados en los criterios de evaluación descritos anteriormente.

Tabla 5.24 Capacidad de Absorción Visual (CAV) y fragilidad en el área de influencia

Unidad de paisaje	Criterio							Capacidad de Absorción	Fragilidad visual	Justificación
	Pendiente (P)	Erosionabilidad (E)	Potencial estético (R)	Diversidad de vegetación (D)	Actuación humana (C)	Contrastes de color (V)	Puntuación CAV			
UP1	2	2	1	1	3	1	16	Moderado	Moderado	La UP evidencia una pendiente suave (25-55%), restricción moderada por riesgos de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, fuerte presencia antrópica y elementos de bajo contraste de color.
UP2	3	3	1	1	3	1	27	Moderado	Moderado	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, fuerte presencia antrópica y elementos de bajo contraste de color.
UP3	3	3	1	1	3	1	27	Moderado	Moderado	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, fuerte presencia antrópica y elementos de bajo contraste de color.
UP4	3	3	1	1	3	1	27	Moderado	Moderado	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, fuerte presencia antrópica y elementos de bajo contraste de color.
UP5	2	2	1	1	2	2	16	Moderado	Moderado	La UP evidencia una pendiente suave (25-55%), restricción moderada por riesgos de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, presencia antrópica moderada y elementos de contraste visual moderado.

Unidad de paisaje	Criterio							Capacidad de Absorción	Fragilidad visual	Justificación
	Pendiente (P)	Erosionabilidad (E)	Potencial estético (R)	Diversidad de vegetación (D)	Actuación humana (C)	Contrastes de color (V)	Puntuación CAV			
UP6	3	3	1	1	2	2	27	Moderado	Moderado	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, presencia antrópica moderada y elementos de contraste visual moderado.
UP7	3	3	1	1	2	2	27	Moderado	Moderado	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, presencia antrópica moderada y elementos de contraste visual moderado.
UP8	2	2	2	1	2	2	18	Moderado	Moderado	La UP evidencia una pendiente suave (25-55%), restricción moderada por riesgos de erosión e inestabilidad, potencial estético moderado, baja diversidad de vegetación, presencia antrópica moderada y elementos de contraste visual moderado.
UP9	3	3	2	1	1	2	27	Moderado	Moderado	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, potencial estético moderado, baja diversidad de vegetación, presencia antrópica casi imperceptible y elementos de contraste visual moderado.
UP10	3	3	3	3	1	3	39	Alto	Bajo	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, potencial estético alto, vegetación diversificada, presencia antrópica casi imperceptible y elementos de contraste visual moderado.

Unidad de paisaje	Criterio							Capacidad de Absorción	Fragilidad visual	Justificación
	Pendiente (P)	Erosionabilidad (E)	Potencial estético (R)	Diversidad de vegetación (D)	Actuación humana (C)	Contrastes de color (V)	Puntuación CAV			
UP11	3	3	2	1	3	1	30	Alto	Bajo	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, potencial estético moderado, baja diversidad de vegetación, fuerte presencia antrópica y elementos de bajo contraste visual.
UP12	3	3	3	3	1	3	39	Alto	Bajo	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, potencial estético alto, vegetación diversificada, presencia antrópica casi imperceptible y elementos de contraste visual moderado.
UP13	3	3	3	3	1	3	39	Alto	Bajo	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, potencial estético alto, vegetación diversificada, presencia antrópica casi imperceptible y elementos de contraste visual moderado.
UP14	3	3	1	1	3	1	27	Moderado	Moderado	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, potencial estético moderado, baja diversidad de vegetación, fuerte presencia antrópica y elementos de bajo contraste de color.
UP15	3	3	1	1	2	2	27	Moderado	Moderado	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, presencia antrópica moderada y elementos de contraste visual moderado.

Unidad de paisaje	Criterio							Capacidad de Absorción	Fragilidad visual	Justificación
	Pendiente (P)	Erosionabilidad (E)	Potencial estético (R)	Diversidad de vegetación (D)	Actuación humana (C)	Contrastes de color (V)	Puntuación CAV			
UP17	3	3	1	1	3	1	27	Moderado	Moderado	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, fuerte presencia antrópica y elementos de bajo contraste de color.
UP18	2	2	1	1	2	1	14	Bajo	Alto	La UP evidencia una pendiente suave (25-55%), restricción moderada por riesgos de erosión e inestabilidad, bajo potencial estético, baja diversidad de vegetación, presencia antrópica moderada y elementos de bajo contraste de color.
UP19	3	3	2	1	3	2	33	Alto	Bajo	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, potencial estético moderado, baja diversidad de vegetación, fuerte presencia antrópica y elementos de contraste visual moderado.
UP22	3	3	2	1	3	1	30	Alto	Bajo	La UP presenta un relieve poco inclinado (0-25% de pendiente), poca restricción por riesgo bajo de erosión e inestabilidad, potencial estético moderado, baja diversidad de vegetación, fuerte presencia antrópica y elementos de bajo contraste visual.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

La determinación de la capacidad de absorción visual de cada una de las unidades de paisaje, se obtuvo principalmente por la variable pendiente, la cual en el área del proyecto se **evidencia** con diferentes rangos entre los 0 a 100%, es decir, la zona se encuentra entre pendientes a nivel hasta pendientes totalmente escarpadas, siendo las pendientes ligeramente inclinada la de mayor representación; también se presenta la variable erosionabilidad, donde la estabilidad del área del proyecto **se clasifica** como muy alta según el factor de seguridad de las unidades geológicas superficiales en el área de influencia de este, lo que indica que la mayoría de las unidades de paisaje, están en suelos de poca restricción por riesgo de erosión e inestabilidad y buena regeneración potencial.

Por otra parte, las características de las unidades de paisaje con presencia de cobertura natural **UP10 y UP12**, se califican con **puntaje "Alto" en cuanto a** Potencial estético (R) y Diversidad de vegetación (D), debido a su composición florística y atractivo natural, mientras que las unidades de paisaje más intervenidas como UP1, UP2, UP3, UP4, UP5, UP6, UP7, UP14, UP15, UP17 y UP18, se les asigna un valor bajo en estas categorías, y calificaciones más altas en características como Actuación humana (C), dado su alto grado de intervención.

Como se mencionó anteriormente, la fragilidad visual y la capacidad de absorción visual son inversamente proporcionales. Por lo tanto, en la Tabla 5.25 se presenta el porcentaje de ocupación de la fragilidad visual en el área de influencia y en la **Figura 5.31** se muestra la distribución espacial de la fragilidad visual con su respectiva categorización.

Las unidades de paisaje analizadas tienen **capacidad** de absorción moderado (medio) en su mayoría, seguido por **los niveles** alto y bajo **respectivamente**, esto se debe principalmente a los diferentes rangos de pendientes de las unidades geomorfológicas presentes, pues como se observó en los modelos de visibilidad, las intervenciones que se realicen a las unidades de paisaje dejan de ser visibles a menores distancias. Otros factores que influyen en estos resultados son la intervención humana tan pronunciada y la poca presencia de coberturas naturales en el área.

Tabla 5.25 Fragilidad en el área de influencia abiótica del proyecto

Fragilidad visual	Área (ha)	Área (%)
Bajo	5,10	1,07
Moderado	92,48	93,72
Alto	1,05	5,21
Total	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.31 Fragilidad visual en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.2.4 Elementos discordantes, tamaño de la discordancia y correspondencia cromática

Con el fin de conocer la integridad escénica y el grado de intervención de las unidades de paisaje se identificaron los distintos elementos discordantes presentes en el área de influencia del proyecto, así como su respectivo tamaño y su correspondencia cromática con el paisaje.

A. Elementos discordantes

Los elementos discordantes son objetos que rompen con la homogeneidad de la escena. En el contexto paisajístico corresponden a los elementos antrópicos que se encuentran dentro del plano de visualización y genere impactos negativos para el observador, como las cercas con alambres de púas, señalizaciones, vallas o carreteras. Estos elementos pueden disminuir la calidad visual de las unidades de paisaje y así alterar el atractivo escénico que resulta de estas, además de indicar también su grado de intervención.

Las categorías cualitativas de elementos discordantes se estimaron a partir de la correspondencia con el número de elementos, como se muestra en la Tabla 5.26.

Tabla 5.26 Categoría de los elementos discordantes según su número

Elementos discordantes	Número
Alto	Mayor o igual a 3
Medio	2
Bajo	1
Nulo	0

Fuente: ANLA, 2016³¹.

B. Tamaño de la discordancia

El tamaño de la discordancia hace referencia a la ocupación de elementos discordantes con respecto al área total de cada unidad de paisaje. Entre mayor sea la discordancia, mayor será el grado de afectación en la calidad visual e integridad escénica del paisaje. Las categorías cualitativas para el tamaño de la discordancia se determinaron según lo definido por ANLA, presentado en la Tabla 5.27.

Tabla 5.27 Tamaño de la discordancia según porcentaje del área

Tamaño de la discordancia	Porcentaje del área total
Alto	Mayor o igual a 30%
Medio	15-30%
Bajo	0,1-15%
Nulo	0%

Fuente: ANLA, 2016³².

C. Correspondencia cromática

Este criterio se utiliza para calificar la discordancia entre el color de los elementos discordantes y de la unidad de paisaje. Entre mayor correspondencia cromática de los elementos discordantes con los elementos del paisaje, menor incidencia sobre el mismo y por lo tanto su integridad escénica resulta menos afectada, y viceversa. Para este parámetro se utilizaron cuatro categorías cualitativas: alto, medio, bajo y nulo como se evidencia en la Tabla 5.28, esto con base en las categorías disponibles en el modelo de almacenamiento de datos geográficos de ANLA.

Tabla 5.28 Criterio de valoración para la correspondencia cromática

Correspondencia cromática	Descripción
Alto	Hay una alta correspondencia cromática entre el elemento discordante y la unidad de paisaje de forma agradable.
Medio	Hay una correspondencia entre algunas de las tonalidades de la unidad de paisaje y el elemento discordante se percibe agradable.
Bajo	Hay alguna correspondencia cromática del elemento discordante con la unidad de paisaje, el elemento se percibe de forma desagradable.

³¹ (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), 2016)

³² (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), 2016)

Correspondencia cromática	Descripción
Nulo	La correspondencia cromática del elemento discordante con la unidad de paisaje es nula o desagradable.

Fuente: ANLA, 2016³³.

Utilizando los parámetros expuestos, se caracterizaron los elementos discordantes por número, tamaño de la discordancia y correspondencia cromática para cada unidad de paisaje en el área de influencia, y los resultados se muestran en la Tabla 5.29.

Tabla 5.29 Análisis de elementos discordantes, tamaño de la discordancia y correspondencia cromática para las unidades de paisaje del proyecto

Unidad de paisaje	Nomenclatura (UP)	Elementos discordantes	Tamaño discordancia	Correspondencia cromática
Tejido urbano continuo en Escarpe de terraza	UP1	Medio	Alto	Bajo
Tejido urbano continuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP2	Alto	Alto	Bajo
Tejido urbano discontinuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP3	Alto	Alto	Bajo
Zonas industriales o comerciales en Planos y campos de llenos antrópicos	UP4	Alto	Alto	Bajo
Pastos limpios en Escarpe de terraza	UP5	Alto	Bajo	Medio
Pastos limpios en Planicie o llanura de inundación	UP6	Alto	Bajo	Medio
Pastos limpios en Terraza de acumulación	UP7	Alto	Bajo	Medio
Pastos enmalezados en Escarpe de terraza	UP8	Bajo	Bajo	Medio
Pastos enmalezados en Terraza de acumulación	UP9	Alto	Bajo	Medio
Bosque de galería y ripario en Escarpe de terraza	UP10	Nulo	Nulo	Nulo
Zonas industriales o comerciales en Terraza de acumulación	UP11	Alto	Bajo	Medio
Bosque de galería y ripario en Terraza de acumulación	UP12	Alto	Bajo	Medio
Plantación forestal en Terraza de acumulación	UP13	Bajo	Bajo	Medio

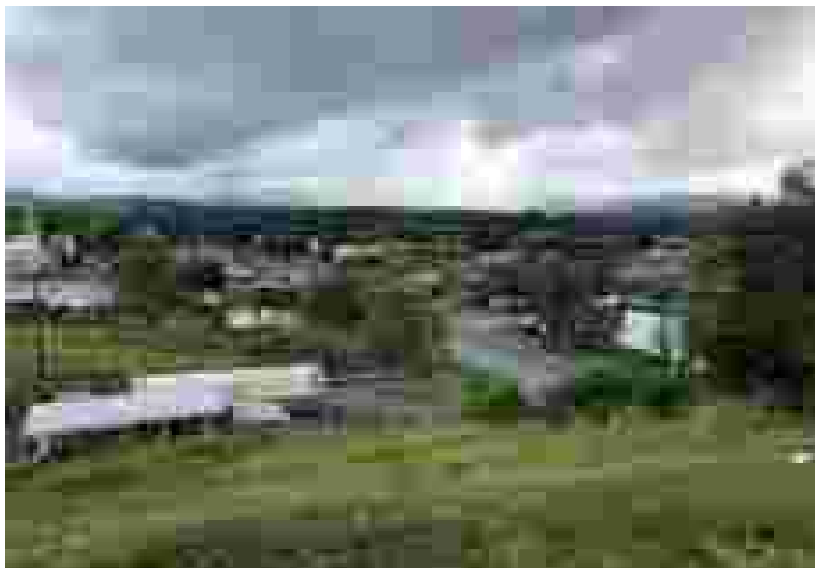
³³ (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), 2016)

Unidad de paisaje	Nomenclatura (UP)	Elementos discordantes	Tamaño discordancia	Correspondencia cromática
Cuerpos de agua artificiales en Jagüey	UP14	Bajo	Bajo	Medio
Cuerpos de agua artificiales en Meandro abandonado	UP15	Nulo	Nulo	Nulo
Red vial y territorios asociados en Planos y campos de llenos antrópicos	UP17	Alto	Alto	Bajo
Parques cementerio en Planos y campos de llenos antrópicos	UP18	Alto	Bajo	Medio
Áreas deportivas en Planos y campos de llenos antrópicos	UP19	Alto	Alto	Bajo
Tejido urbano discontinuo en Terraza de acumulación	UP22	Alto	Bajo	Medio

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

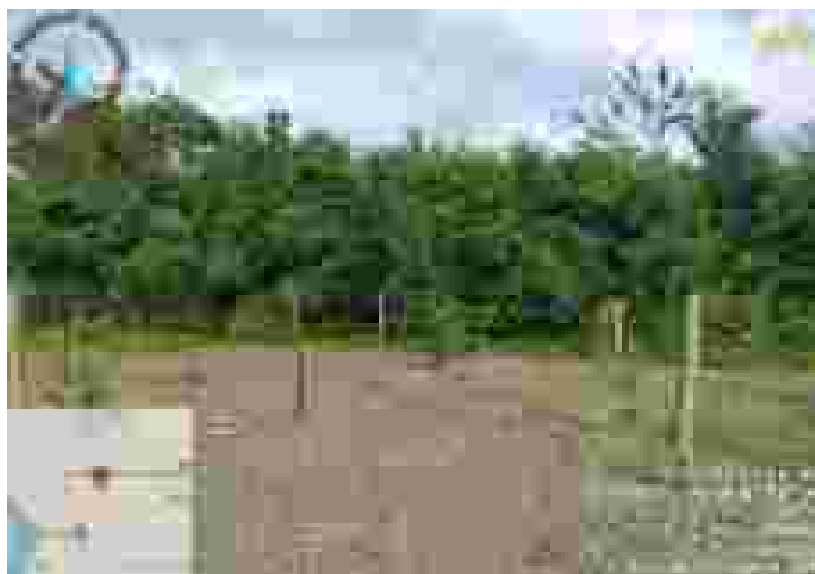
Los elementos discordantes presentes en el área del proyecto, se encuentran principalmente ubicados las coberturas más antropogénicas, como son las unidades de paisaje de tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo, zonas industriales o comerciales, red vial y territorios asociados, parques cementerios y áreas deportivas, donde los elementos discordantes localizados en estas áreas son principalmente construcciones, postes, vías, red eléctricas, elementos por los cuales se les asocia a estas UP una categoría de alto en la variable elementos discordantes.

También, las unidades de pastos limpios y pastos enmalezados se encontraron algunos elementos discordantes como postes, vías, red eléctrica y construcciones, caminos y cercas, algunos de las cuales se muestran de la Fotografía 5.26 a la Fotografía 5.28. La presencia de dichos elementos determinó calificaciones entre altas y bajas para dicha variable.



Fotografía 5.26 Construcciones

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S. 2025.



Fotografía 5.27 Cercos para delimitación de predios

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Fotografía 5.28 Postes y red eléctrica existente en el área de influencia del proyecto

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.30 Análisis de elementos discordantes, tamaño de la discordancia y correspondencia cromática para las unidades de paisaje del proyecto

Categoría	Elementos discordantes		Tamaño discordancia		Correspondencia cromática	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Alto	96,70	98,04	34,49	34,97	0,00	0,00
Medio	0,01	0,01	0,00	0,00	64,00	64,88
Bajo	1,73	1,76	64,00	64,88	34,49	34,97
Nulo	0,19	0,19	0,15	0,15	0,15	0,15
Total	98,64	100,00	98,64	100,00	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.32 Elementos discordantes en el área de influencia abiótica
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.33 Tamaño de la discordancia en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.34 Correspondencia cromática en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.2.5 Integridad escénica

La integridad escénica hace referencia al grado de alteración (antrópica) que presenta un paisaje y es un indicador de su condición estética. Tiene una relación directa con la calidad visual y el atractivo escénico de las unidades de paisaje.

Se estimó la integridad escénica para las unidades de paisaje del área de influencia cualitativamente, en una escala de muy bajo a muy alto, teniendo en cuenta las características de los elementos discordantes analizados con anterioridad y la calidad visual de cada unidad, los resultados se muestran en la Tabla 5.31.

Tabla 5.31 Integridad escénica para las unidades de paisaje del proyecto

Unidad de paisaje	Nomenclatura UP	Integridad escénica
Tejido urbano continuo en Escarpe de terraza	UP1	Muy baja

Unidad de paisaje	Nomenclatura UP	Integridad escénica
Tejido urbano continuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP2	Muy baja
Tejido urbano discontinuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP3	Muy baja
Zonas industriales o comerciales en Planos y campos de llenos antrópicos	UP4	Muy baja
Pastos limpios en Escarpe de terraza	UP5	Baja
Pastos limpios en Planicie o llanura de inundación	UP6	Baja
Pastos limpios en Terraza de acumulación	UP7	Baja
Pastos enmalezados en Escarpe de terraza	UP8	Baja
Pastos enmalezados en Terraza de acumulación	UP9	Baja
Bosque de galería y ripario en Escarpe de terraza	UP10	Alta
Zonas industriales o comerciales en Terraza de acumulación	UP11	Muy baja
Bosque de galería y ripario en Terraza de acumulación	UP12	Alta
Plantación forestal en Terraza de acumulación	UP13	Alta
Cuerpos de agua artificiales en Jagüey	UP14	Muy baja
Cuerpos de agua artificiales en Meandro abandonado	UP15	Muy baja
Red vial y territorios asociados en Planos y campos de llenos antrópicos	UP17	Muy baja
Parques cementerio en Planos y campos de llenos antrópicos	UP18	Muy baja
Áreas deportivas en Planos y campos de llenos antrópicos	UP19	Muy baja
Tejido urbano discontinuo en Terraza de acumulación	UP22	Muy baja

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

La mayoría de las unidades de paisaje tienen integridad escénica baja y muy baja, esto debido a la alta intervención antrópica principalmente para desarrollar la ganadería extensiva en la zona y para cultivos. También, se encuentra la integridad de tipo alta, la cual corresponde a coberturas de terrenos naturales o seminaturales en las que las intervenciones antrópicas fuertes son inapreciables, ya sea por su pequeña extensión o por su antigüedad.

En la Tabla 5.32 se presenta el porcentaje de ocupación de la integridad escénica en el área de influencia y en la [Figura 5.35](#) se evidencia la distribución de la integridad escénica con su respectiva categorización.

Tabla 5.32 Resultados de la integridad escénica para las unidades de paisaje del proyecto

Integridad escénica	Área (ha)	Área (%)
Muy baja (muy alterado)	37,20	37,72
Baja (moderadamente alterado)	60,06	60,89
Alta (parece inalterado)	1,37	1,39
Total	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.35 Integridad escénica en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.2.6 Niveles de interés paisajística

El nivel de interés está relacionado con el grado de importancia que las personas perciben en el paisaje, teniendo en cuenta los puntos desde donde este se observe. Para valorar este criterio se combinaron dos categorías estudiadas anteriormente: el grado de observación y visibilidad de las características de cada unidad de paisaje, representados por la escala visual ya definida, y la calidad estética, representada por la calidad visual.

El nivel de interés para cada unidad de paisaje resultante de la integración de estas categorías se presenta en la Tabla 5.33, su distribución espacial en [Figura 5.36](#) y el porcentaje de ocupación se presenta en la Tabla 5.34.

Como se presentó en las descripciones anteriores, en el área de influencia predominan las unidades con vista en primer plano y calidad visual medio, por eso el nivel de interés con mayor extensión es el de vista en primer plano con interés medio.

Tabla 5.33 Niveles de interés en el área de influencia abiótica del proyecto

Unidad de paisaje	Nomenclatura	Nivel de interés
Tejido urbano continuo en Escarpe de terraza	UP1	Vista en primer plano con interés bajo
Tejido urbano continuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP2	Vista en primer plano con interés bajo Vista inmediata con interés bajo
Tejido urbano discontinuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP3	Vista en primer plano con interés bajo Vista inmediata con interés bajo
Zonas industriales o comerciales en Planos y campos de llenos antrópicos	UP4	Vista en primer plano con interés bajo Vista inmediata con interés bajo
Pastos limpios en Escarpe de terraza	UP5	Vista inmediata con interés medio Vista en primer plano con interés medio
Pastos limpios en Planicie o llanura de inundación	UP6	Vista inmediata con interés medio Vista en primer plano con interés medio
Pastos limpios en Terraza de acumulación	UP7	Vista inmediata con interés medio Vista en primer plano con interés medio
Pastos enmalezados en Escarpe de terraza	UP8	Vista inmediata con interés medio Vista en primer plano con interés medio
Pastos enmalezados en Terraza de acumulación	UP9	Vista inmediata con interés medio Vista en primer plano con interés medio
Bosque de galería y ripario en Escarpe de terraza	UP10	Vista en primer plano con interés alto
Zonas industriales o comerciales en Terraza de acumulación	UP11	Vista en primer plano con interés alto Vista inmediata con interés bajo
Bosque de galería y ripario en Terraza de acumulación	UP12	Vista en primer plano con interés alto Vista inmediata con interés alto
Plantación forestal en Terraza de acumulación	UP13	Vista en primer plano con interés bajo Vista inmediata con interés alto
Cuerpos de agua artificiales en Jagüey	UP14	Vista en primer plano con interés bajo Vista inmediata con interés bajo
Cuerpos de agua artificiales en Meandro abandonado	UP15	Vista en primer plano con interés bajo
Red vial y territorios asociados en Planos y campos de llenos antrópicos	UP17	Vista en primer plano con interés bajo Vista inmediata con interés bajo
Parques cementerio en Planos y campos de llenos antrópicos	UP18	Vista en primer plano con interés bajo Vista inmediata con interés bajo
Áreas deportivas en Planos y campos de llenos antrópicos	UP19	Vista inmediata con interés medio Vista en primer plano con interés medio
Tejido urbano discontinuo en Terraza de acumulación	UP22	Vista inmediata con interés bajo

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.34 Resultados de niveles de interés en el área de influencia abiótica del proyecto

Niveles de interés	Área (ha)	Área (%)
Vista inmediata con interés bajo	11,08	11,23%
Vista inmediata con interés medio	18,82	19,07%
Vista inmediata con interés alto	0,18	0,18%
Vista en primer plano con interés bajo	23,79	24,11%
Vista en primer plano con interés medio	43,39	43,99%
Vista en primer plano con interés alto	1,39	1,40%
Total	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.36 Niveles de interés en el área de influencia físico-biótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.3.2.7 Sitios de interés paisajístico

Los sitios de interés paisajístico son lugares de importancia ecológica, histórica y cultural que se encuentran dentro del área de influencia del proyecto, donde se desarrollan actividades como el turismo, esparcimiento o contemplación, al igual que las zonas que concentran elementos naturales que albergan la biodiversidad nativa, formas del paisaje o zonas de interés naturales.

Estos sitios paisajísticos corresponden entonces a lugares de interés para la recreación, turismo y complementación en el área de influencia, y se pueden agrupar en dos tipos: los naturales y los históricos y culturales (en este último grupo se incluyen los económicos y recreativos). Los sitios de interés natural se caracterizan por la abundancia y pureza de aguas, formas de paisaje y biodiversidad de fauna y flora. Los históricos y culturales se relacionan con sitios de interés asociados con tradiciones religiosas, espirituales o tradicionales que se desarrollan en el territorio. Los económicos y recreativos están relacionados con espacios en lo que la comunidad del sector accede a servicios de ocio o tienen importancia para los servicios básicos y la economía local.

Dentro de las socializaciones realizadas con la comunidad de los barrios del casco urbano del municipio de Mutatá, Antioquia; se aplicaron las encuestas que permitieron identificar en detalle los sitios de interés paisajístico en el área de influencia abiótica del proyecto (ver Anexos_C5_1/5_1_3_Paisaje), donde se obtuvieron los siguientes sitios: económicos y recreativos (centro recreativo, cuerpos de agua lóticos y lénticos, parque educativo, biblioteca, miradores), naturales (Bosques naturales, montañas, cuerpos de agua lóticos y lénticos) y en cuanto a los sitios de interés históricos y cultural (Parque temático, iglesias, parque municipal, escuela, cuerpos de agua lóticos). Es importante mencionar, que la mayoría de dichos lugares paisajísticos se encuentran propiamente en el área de influencia de abiótica del proyecto. A continuación, se muestra la información relacionada a los sitios de interés paisajístico y se presenta su respectiva espacialización como se observa en la Figura 5.37.



Figura 5.37 Sitios de interés paisajístico en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

A. Sitios de interés paisajístico natural

Los sitios de interés natural identificados en el área de influencia, están asociados a las cuerpos de agua lóticos de importancia en la Quebrada "Daira" para el hábitat de los animales y agua de consumo para ganado y comunidad, los miradores con importancia de recreación y paisaje, los Bosques Naturales tienen una importancia en el material vegetal, como fuente de vida, control de contaminación y temperatura, control de erosión, tránsito y hábitat de fauna, los cuerpos lénticos con importancia de represamiento de agua lluvia en el suelo en épocas de lluvia, nacimientos y lagunas como servicio para la comunidad; las montañas con importancia de vegetación y calidad del aire. De estos sitios anteriormente definidos por la comunidad, se resalta que son espectaculares y agradables de acuerdo con la importancia dada a cada sitio identificado en el área de influencia. En la Fotografía 5.29, se muestra el cuerpo lótico de la Quebrada la Daira que resulta ser para la comunidad espectacular.



Fotografía 5.29 Cuerpo de agua lóxico (Quebrada la Daira) en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

B. Sitios de interés histórico y culturales

La mayoría de los sitios de interés histórico y cultural se encuentran ubicados en el casco urbano del municipio de Mutatá. La comunidad de los barrios del casco urbano del municipio de Mutatá, identificó como sitios históricos y culturales el parque temático representados por el parque principal y el parque Ana Joaquina, como sitio de recreación, las iglesias como la "Casa de Sión", "Adventistas", "Luz del mundo", "Cuadrangular" "Trinitaria Jesucristo" e "Interamericana" con importancia de encuentro espiritual, también estas la iglesia de Nuestra señora del Carmen para el enriquecimiento espiritual y de fe, esto de acuerdo a las encuestas desarrolladas en el área de influencia abiótica del proyecto.

C. Sitios de interés paisajístico económico y recreativo

La comunidad encuestada en el área de influencia abiótica del proyecto, determinaron como sitio de interés paisajístico económico y recreativo el sitio de centro recreativo la cancha Ana Joaquina, gimnasio al aire libre y la biblioteca y la unidad deportiva Jaime Escudero para la recreación. En la Figura 5.37 se presentan algunos de ellos que hacen parte del área de influencia abiótica del proyecto.

5.1.3.2.8 Descripción del proyecto dentro del componente paisajístico de la zona

De forma general, el área de influencia abiótica del proyecto, desde el punto de vista paisajístico se puede describir como una zona con calidad visual en su mayoría medio, con una fragilidad visual o, dicho en otras palabras, una susceptibilidad del paisaje al cambio cuando se desarrolla un uso sobre él moderado (medio); con alta presencia de elementos discordantes, especialmente en las coberturas seminaturales y artificializadas, y con una integridad escénica baja (moderadamente alterado).

El área posee una alta intervención antrópica, especialmente en la zona norte, noreste, noroeste, suroeste y centro del área de influencia, pero el paisaje se condiciona principalmente por la presencia de coberturas de pastos limpios, seguido de los pastos enmalezados, la cual abarcan en conjunto **cerca** del 61,00% del área de paisaje. No obstante, el área conserva coberturas naturales como bosques de galería y ripario y plantación forestal, colindantes con los pastos limpios y pastos enmalezados, y se localizan hacia el centro del área, suroeste y sur del área influencia.

En cuanto a la presencia del proyecto objeto de modificación de licencia Construcción de la Variante Mutatá (UF4), este se ubicará en zonas intervenidas, específicamente, sobre las unidades de paisaje de pastos limpios y pastos enmalezados en escarpe de terraza, planicie o llanura de inundación y terraza de acumulación (UP5, UP6, UP7, UP8 y UP9), y las unidades de paisaje como tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo, red vial y territorios asociados y parques cementerio en planos y campos de llenos antrópicos (UP2, UP3, UP17 y UP18).

El área de intervención del proyecto estará ubicada en 5,53 ha que equivalen a 3,74 ha de la unidad de paisaje pastos limpios en terraza de acumulación (UP7), la cual se caracteriza por ser una zona de pastizales bajo y altamente intervenida. Por lo tanto, las actividades propias del proyecto implican menormente una artificialización del entorno en donde se introducirán elementos discordantes, principalmente la "Variante Mutatá", área de maniobra, box vehicular, acceso a vía industrial norte (vía existente), acceso a vía industrial (vía existente), intersección Glorieta, muro de tierra armada, obras hidráulicas y zona temporal. Estas intervenciones proyectadas, que además tendrán media correspondencia cromática, actuarán principalmente sobre unidades de paisaje con calidad visual medio, fragilidad visual moderada (media), integridad escénica muy baja (muy alterado) e integridad escénica baja (se encuentran moderadamente alteradas) y con nivel de interés de vista inmediata con interés bajo, vista en primer plano con interés bajo, vista inmediata con interés medio y vista en primer plano con interés medio.

Aunque el proyecto objeto de modificación de licencia Construcción de la Variante Mutatá (UF4) se encontrará en el área de influencia, los modelos de visibilidad presentados en este capítulo indican que la zona conserva una alta exposición visual debido a su topografía, por lo cual esta intervención seguirá siendo perceptible a distancias considerables. Por otro lado, las vías de acceso existente y vía variante Mutatá serán visualmente muy similares a las relacionadas con las vías ya existente en la zona. Además, si bien estos elementos discordantes no presentan una correspondencia cromática alta con su entorno, al ocupar zonas puntuales y ser un número reducido, no generan gran detrimento en la calidad visual de la zona.

Dicho lo descrito anteriormente, se puede concluir que la presencia del proyecto en la zona de interés representará un cambio significativo a las condiciones paisajísticas de su entorno, ya que esta nueva infraestructura constituye un elemento de paisaje adicional con características diferentes a las ya presentes en el área de influencia, la cual se caracteriza por ser un área con condiciones intermedias desde el punto de vista paisajístico.

5.1.3.2.9 Programas, proyectos, planes y similares de ordenamiento territorial y/o política con proyección de uso, gestión, disfrute y/o protección de paisaje

De acuerdo con la información suministrada por la alcaldía de Mutatá, los programas con proyección de uso, gestión, disfrute y/o protección del paisaje contemplados en el Plan de ordenamiento territorial (POT)³⁴ del municipio son:

A. Componente General: Políticas, objetivos, estrategias y acciones

- Artículo 12. Políticas Territoriales: Para aprovechar las ventajas comparativas y su mayor competitividad y la consolidación de la imagen objetivo del municipio, se establecen las siguientes políticas territoriales para la construcción del Plan:
- Política ambiental

La política ambiental construirá las bases para la armonización entre las prácticas humanas y el entorno mediante la adecuada integración de los elementos naturales y agropecuarios del paisaje limitando el crecimiento de los centros poblados sobre áreas con características restrictivas para el desarrollo urbano, estableciendo acciones para la protección del medio ambiente, la conservación de los recursos naturales, la defensa del paisaje y el manejo de las áreas de reserva y de conservación ambiental. Se propone los siguientes objetivos.

5.1.3.2.10 Percepción de las comunidades como referente de su entorno físico en términos culturales

Como se comentó anteriormente, en las actividades de socialización con las comunidades se realizaron encuestas que permiten la identificación de los sitios de interés paisajístico para los habitantes del área de influencia abiótica del proyecto de los distintos elementos naturales del paisaje según las categorías que se detallan en Tabla 5.36, y los resultados se resumen en el Figura 5.38.

Tabla 5.35 Categorías utilizadas para calificar los sitios de paisaje en las socializaciones con la comunidad del municipio de Mutatá

Categorías	Descripción
Espectacular	Llama la atención por ser fuera de lo común
Agradable	Agrada o complace
Desagradable	Causa mala impresión, fastidio o disgusta
Indiferente	No le molesta, pero tampoco le parece nada especial, no despierta interés

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

³⁴ (Alcaldía de Mutatá, 2000)

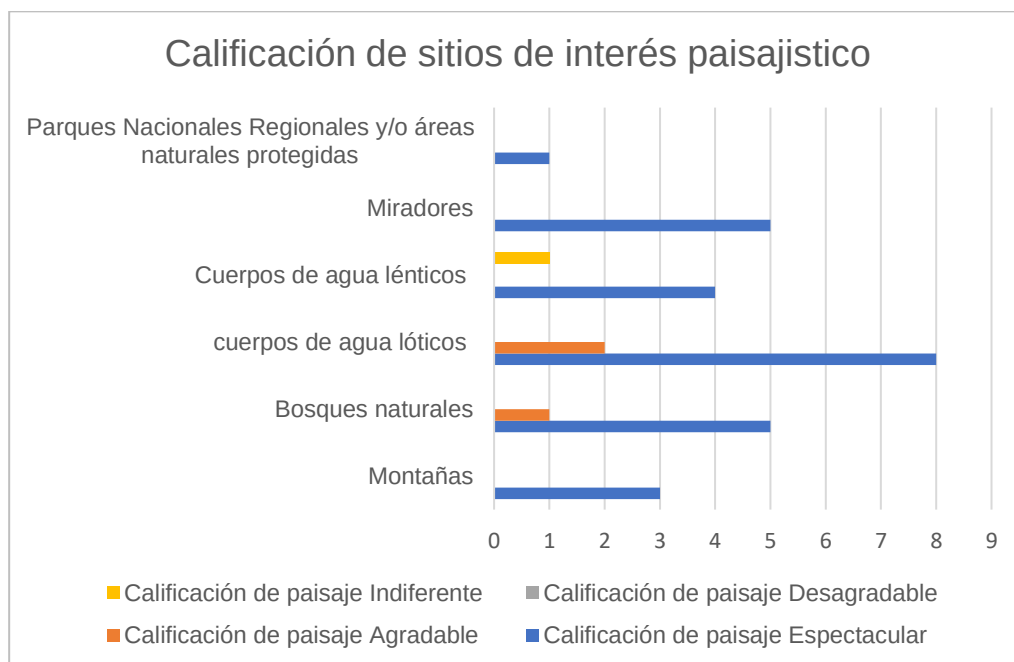


Figura 5.38 Calificación de sitios paisajísticos
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

De los resultados obtenidos en las encuestas, se determina que los cuerpos de agua lóticos y los Bosques naturales presentan gran importancia para la comunidad. Los sitios donde se dan los cuerpos de agua lóticos presentan gran importancia para el consumo humano y ganadero, como ecosistema faunístico, hábitat de animales; los bosques naturales representados por bosques de galería y ripario con importancia en fuente de vida, control de contaminación y temperatura, calidad del aire, evita la erosión en el área, hábitat y tránsito de fauna y regulador hídrico. Seguido de los sitios de miradores, que obtienen una calificación de espectacular por su importancia de paisaje y de recreación para la comunidad. También, se encuentran los sitios de cuerpos de agua lénticos, los cuales presenta una calificación de espectacular y agradable, debido a que son lagunas y jagüey con importancia en el servicio para la comunidad y como hábitat faunístico. Por último, se tiene los sitios asociados a montañas, los cuales presentan una calificación espectacular por su variedad de vegetación y calidad del aire; y los sitios asociados a parques naturales regionales y/o áreas naturales protegidas que presentan una calificación espectacular por ser un área protegida y fuente de paisaje.

a. Objetivos

- Sentar las bases para que las áreas naturales existentes conserven el equilibrio ecosistémico.
- Establecer acciones para un ambiente sano.
- Mantener la oferta de recursos naturales.
- Apoyar los procesos de concertación y participación comunitaria en torno a territorios Étnicos.

- Recuperar el equilibrio de procesos naturales.
- Recuperación del paisaje.
- Establecer las bases para una futura conexión ecosistémica.
- Lograr un uso sostenido de la unidad de Abanico Aluvial.
- Optimizar las ventajas comparativas a través de un uso adecuado del suelo.
- Conservar el capital natural municipal.
- Asegurar a las generaciones futuras el acceso a los recursos naturales.
- Asegurar el acceso equitativo al uso de los recursos naturales.

b. Estrategias

Las políticas antes relacionadas, se desarrollarán bajo las siguientes estrategias:

- Establecer parámetros y acciones para un ambiente sano.
- Establecer parámetros para la armonización de las actuaciones de los particulares con las necesidades colectivas de un ambiente sano.
- Establecer áreas de protección - conservación vinculables al sistema regional de áreas protegidas.
- Regular y proteger el recurso hídrico.
- Establecer parámetros para el uso sostenible y la conservación de los recursos naturales renovables y del subsuelo.
- Capacitación a las autoridades ambientales locales en sus funciones de control y vigilancia del medio ambiente.

c. Acciones

- Manejo integral de residuos sólidos y líquidos en fincas e industrias complementarias a la producción.
- Aprovechamiento sostenible de la fauna de humedales.
- Protección y recuperación de la Serranía de Abibe.
- Aprovechamiento sostenible de recursos naturales.
- Establecimiento de cobertura vegetal en áreas de retiro de los ríos.
- Recuperación de cuencas aportantes.
- Regulación de canales.
- Recuperación y manejo de la cuenca del Río León.
- Corregir, prevenir, mitigar y compensar impactos ambientales ocasionados por prácticas inadecuadas de acuerdo con las acciones planteadas por la política económica.
- Control de vertimientos y elementos contaminantes de acuerdo con lo planteado en la política de servicios públicos y saneamiento ambiental.

5.1.3.2.11 Zonificación paisajística

Para la determinación de la zonificación de cada una de las unidades de paisaje presentes en el área de influencia abiótica del proyecto, se realizó mediante la sumatoria de los criterios de percepción previamente evaluados (calidad visual (CV), fragilidad visual (FV), elementos discordantes (ED), tamaño de la discordancia (TD) y correspondencia cromática (CO), integridad

escénica (IE), y niveles de interés (NI)). La calificación de las unidades se hizo de acuerdo con los criterios presentados en la siguiente Tabla 5.36.

Tabla 5.36 Criterios de zonificación del componente de paisaje

Sensibilidad		Descripción
Categoría	Calificación	
Muy baja	Entre 7-9	Unidades de paisaje con nula integridad escénica, sin elementos excepcionales o sobresalientes para los aspectos considerados.
Baja	Entre 10-12	Unidades de paisaje con reducida integridad escénica, sin elementos excepcionales o sobresalientes para los aspectos considerados.
Moderada	Entre 13-15	Unidades de paisaje que exhiben atributos comunes o típicos, donde sus elementos de conservación son reducidos.
Alta	Entre 16-18	Unidades de paisaje con sensibilidad medio, como consecuencia de la presencia de atributos comunes o típicos en el territorio.
Muy alta	Entre 19-21	Unidades de paisaje con sensibilidad asociado a las características excepcionales que exhiben en el territorio.

Fuente: Modificado de Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales, 2020.

La calificación asignada para cada una de las unidades de paisaje y categorización final, en cuanto a sensibilidad se resumen en la Tabla 5.37.

Tabla 5.37 Zonificación de las unidades de paisaje en el área de influencia abiótica

Unidad de paisaje	Nomenclatura	Percepción de paisaje							Puntuación	Sensibilidad paisajística
		CV	FV	ED	TD	CO	IE	NI		
Tejido urbano continuo en Escarpe de terraza	UP1	1	3	2	1	1	1	1	10	Baja
Tejido urbano continuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP2	1	2	1	1	1	1	1	8	Muy baja
Tejido urbano discontinuo en Planos y campos de llenos antrópicos	UP3	1	2	1	1	1	1	1	8	Muy baja
Zonas industriales o comerciales en Planos y campos de llenos antrópicos	UP4	1	2	1	1	1	1	1	8	Muy baja
Pastos limpios en Escarpe de terraza	UP5	2	2	1	3	2	1	2	13	Moderada
Pastos limpios en Planicie o llanura de inundación	UP6	2	2	1	3	2	1	2	13	Moderada

Unidad de paisaje	Nomenclatura	Percepción de paisaje							Puntuación	Sensibilidad paisajística
		CV	FV	ED	TD	CO	IE	NI		
Pastos limpios en Terraza de acumulación	UP7	2	2	1	3	2	1	2	13	Moderada
Pastos enmalezados en Escarpe de terraza	UP8	2	2	1	3	2	1	2	13	Moderada
Pastos enmalezados en Terraza de acumulación	UP9	2	2	1	3	2	1	2	13	Moderada
Bosque de galería y ripario en Escarpe de terraza	UP10	3	1	3	3	1	3	3	17	Alta
Zonas industriales o comerciales en Terraza de acumulación	UP11	1	1	3	3	2	1	1	12	Baja
Bosque de galería y ripario en Terraza de acumulación	UP12	3	1	1	3	2	3	3	16	Alta
Plantación forestal en Terraza de acumulación	UP13	3	1	3	3	2	3	3	18	Alta
Cuerpos de agua artificiales en Jagüey	UP14	1	2	3	3	1	1	1	12	Baja
Cuerpos de agua artificiales en Meandro abandonado	UP15	1	2	3	3	1	1	1	12	Baja
Red vial y territorios asociados en Planos y campos de llenos antrópicos	UP17	1	2	1	1	1	1	1	8	Muy baja
Parques cementerio en Planos y campos de llenos antrópicos	UP18	1	3	1	3	2	1	1	12	Baja
Áreas deportivas en Planos y campos de llenos antrópicos	UP19	2	1	1	1	1	1	2	9	Baja
Tejido urbano discontinuo en Terraza de acumulación	UP22	1	1	3	3	2	1	1	12	Baja

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.38 se aprecia el porcentaje de ocupación de la zonificación paisajística en el área de influencia y en la Figura 5.39 se presenta la distribución espacial de la zonificación con su respectiva categoría.

Tabla 5.38 Zonificación de las unidades de paisaje en el área de influencia abiótica

Zonificación paisajística	Área (ha)	Área (%)
Muy baja	32,34	32,78
Baja	4,87	4,94
Moderada	60,06	60,89
Alta	1,37	1,39
Total	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

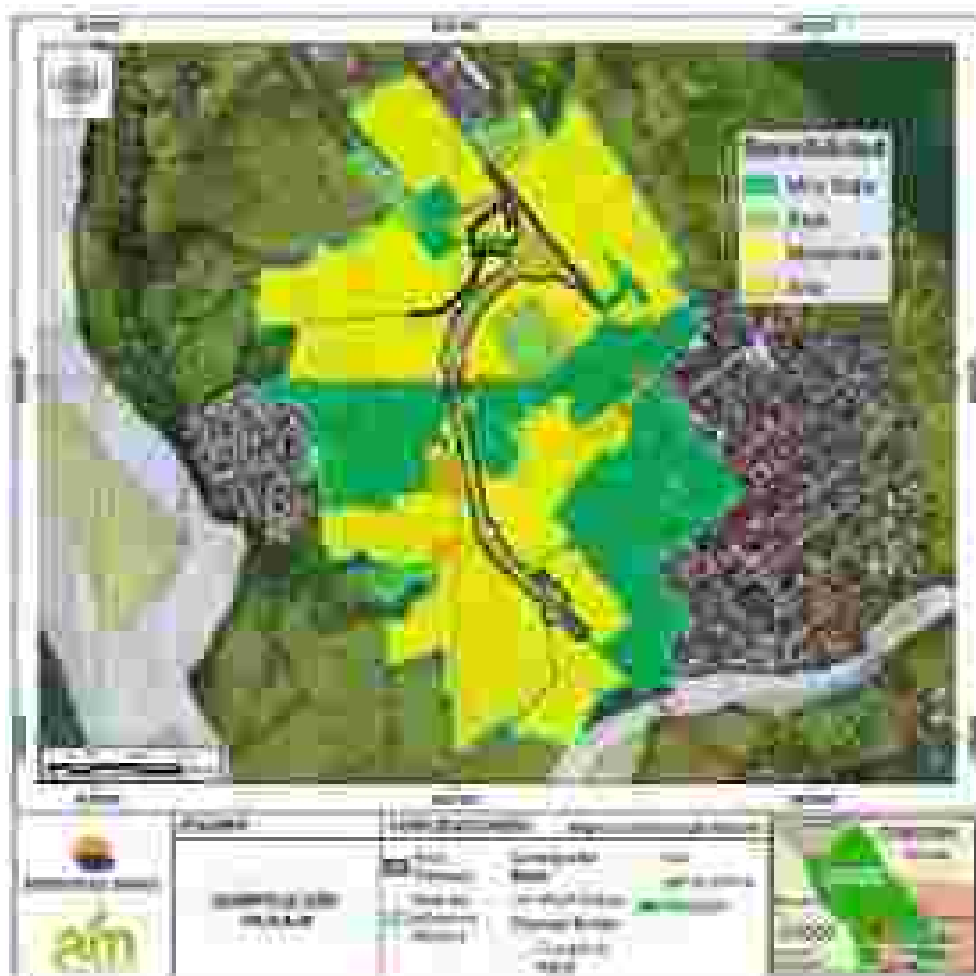


Figura 5.39 Zonificación paisajística en el área de influencia abiótica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Según los resultados determinados en la Tabla 5.38, en el área de influencia del proyecto se identificaron **siete (7)** unidades de paisaje con sensibilidad baja, las cuales abarcan una extensión de **4,87 ha** que corresponden al **4,94%** de ocupación, seguido de cinco (5) unidades de paisaje con sensibilidad moderada (media) y una ocupación de **60,06 ha** que equivalen a **60,89%**; posteriormente se encuentran cuatro (4) unidades de paisaje con sensibilidad muy baja con una extensión de **32,34 ha** con **32,78%** del área. Finalmente, se identificaron también, **tres (3)** unidades de paisaje con sensibilidad alta, la cual abarca un área de **1,37 ha** que está representado por **1,39%** del área de influencia abiótica del proyecto.

A. Sensibilidad muy baja

En esta categoría se encuentra integrada por unidades de paisaje totalmente antropizadas cuya calificación oscilan entre 7-9, la integridad escénica es muy baja por la influencia antrópica, lo

cual no hay riesgo de pérdida de características naturales que aporten a la calidad visual del área y se consideran como unidades de muy baja sensibilidad.

B. Sensibilidad baja

En esta categoría de sensibilidad se encuentran unidades de paisaje antropizadas conformada por tejido urbano continuo, **tejido urbano discontinuo**, cuerpos de agua artificiales, parques cementerio, **zonas industriales o comerciales** y áreas deportivas cuya calificación esta entre 10-12, donde la integridad escénica de esta unidad es muy baja por la alta influencia antrópica, por lo cual no existe un riesgo de pérdida de características naturales que aporten a la calidad visual del área, por lo que se determina como una unidad de baja sensibilidad.

C. Sensibilidad moderada

Las unidades de paisaje que hacen parte de la categoría de sensibilidad moderada presentan valores que oscilan entre 13-15. Estas unidades tienen características comunes en el área de influencia y con funciones para la realización de actividades socioeconómicas, y es evidente la influencia antrópica en el área; la mayoría son unidades asociadas a coberturas de pastos limpios y enmalezados. Es decir, su afectación no significa la perdida de características paisajísticas del área.

D. Sensibilidad alta

Las unidades de paisaje que oscilan entre 16-18, son clasificadas con una sensibilidad alta, debido a que presentan características importantes en cuanto a su vegetación, mostrando diversidad de contrastes, que atraen la atención del observador. La integridad escénica de esta unidad es alta por la poca influencia antrópica, lo que indica que hay un riesgo de pérdida de las características naturales que aportan a la calidad visual del área; por lo que se determina una unidad de alta sensibilidad.

5.1.4 Suelos y uso de la tierra

El suelo constituye el medio ecológico específico para el desarrollo de ciertos tipos de seres vivos³⁵ y es un cuerpo natural conformado por capas u horizontes, constituidas por minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. "El suelo es el resultado de la interacción del tiempo, el clima, los materiales parentales (rocas y minerales originarios), la topografía y los organismos (flora, fauna y ser humano), mediante un proceso denominado pedogénesis, que genera diferencias en el suelo respecto de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas"³⁶.

³⁵ (INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, IGAC. INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, MAVDT., 2010)

³⁶ (ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO)

5.1.4.1 Suelos según POT

El proyecto vial “Construcción de la Variante Mutatá (UF4)”, se ubica en zona urbana del municipio de Mutatá, en el departamento de Antioquia. Para la realización de este apartado se consulta el POT³⁷ del municipio mencionado.

5.1.4.1.1 Vocación del suelo

Según el Anuario Estadístico de Antioquia 2011, en el municipio de Mutatá, el 66 % del suelo está destinado a bosques, siendo el segundo en cobertura forestal en la zona centro, después de Turbo. Un 22% del territorio se utiliza para pastos, lo que refleja una importante actividad pecuaria, ubicándolo como el sexto municipio de Urabá con mayor área destinada a este uso. Los rastrojos representan un 6%, la agricultura un 4% (la más baja en cobertura en la zona centro) y otros usos ocupan el 2% del total³⁸.

En el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio, revisado y ajustado en 2011, se destaca que gran parte del suelo está destinado a resguardos indígenas, actividades agroforestales, forestales y áreas de protección, regeneración y conservación del río León. Estas características resaltan su importancia para la biodiversidad, la conservación hídrica y la producción sostenible. Debido a estas prioridades, el área agrícola es más reducida, con 16.221,4 hectáreas dedicadas principalmente a cultivos transitorios semi-intensivos³⁹.

Aunque la información de la capa no cubre la totalidad del área de influencia, se presenta en la [Figura 5.40](#) los usos del suelo según el POT.

³⁷ (Ortíz Palacios, 2016)

³⁸ Ibid., p7

³⁹ Ibid., p8



Figura 5.40 Vocación actual del suelo en el área de influencia según POT

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Como se observa en la [Figura 5.40](#), de la información incluida en el área de influencia, la mayor parte presenta uso residencial, un total de 35,02 ha, continúa el uso comercial con 3,51 ha, posteriormente institucional y recreativo ocupando 3,05 ha y por último 1,48 ha para uso institucional solamente. No se tiene en cuenta el área total de influencia o los porcentajes de la misma, considerando que esta capa no la cubre en su totalidad.

5.1.4.2 Unidades de suelo

En el área de influencia determinada para el proyecto se ajustaron las unidades de suelos según IGAC⁴⁰ con base en la zonificación climática, [el paisaje](#) y la geomorfología, hasta la categoría de forma de terreno (escala 1:25.000); posteriormente se asignó a cada forma de terreno la

⁴⁰ (IGAC, 2007)

respectiva unidad taxonómica, a nivel categórico de unidad cartográfica de suelo. Esta información se verificó durante la fase de campo.

A partir de la revisión de información secundaria y la información recopilada en campo, se realizó la descripción de los suelos identificados en el área de influencia del proyecto, de acuerdo con los lineamientos metodológicos del IGAC, descritos en el Capítulo 2. Las unidades de suelos se denotaron con un símbolo conformado por tres (3) letras mayúsculas que indican el paisaje, el clima y el componente taxonómico, y números arábigos con letras minúsculas que indican las fases por erosión y susceptibilidad a inundación (Figura 5.41 y Tabla 5.39).

En la Tabla 5.40 se presentan las unidades de suelos, en relación con el clima, el paisaje y la geomorfología de la zona de estudio, y en la [Figura 5.42](#) las unidades de suelo presentes en el área de influencia con base en la información del IGAC⁴¹.

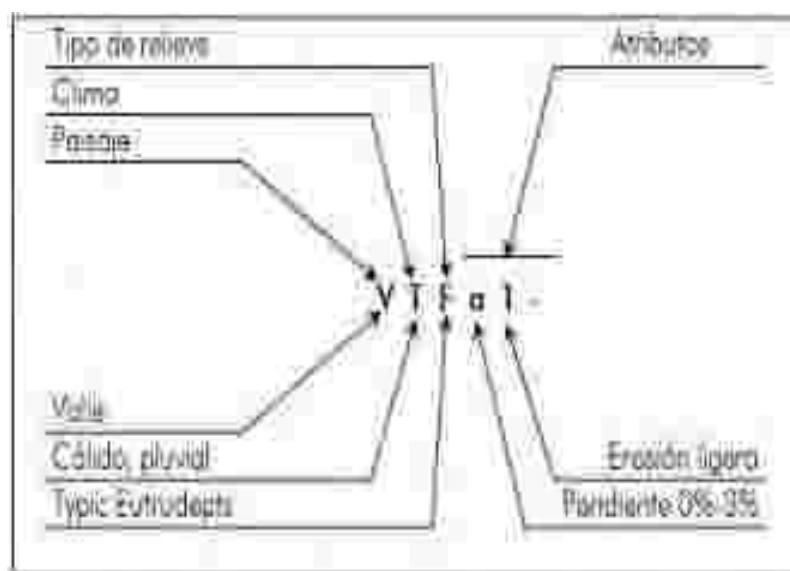


Figura 5.41 Significado del símbolo que denota las unidades de suelos, escala 1:25.000

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025., modificado de U.T. Estudios Ambientales Mar 2, 2017⁴².

⁴¹ (IGAC, 2007)

⁴² (UT. ESTUDIOS AMBIENTALES MAR2, 2017)

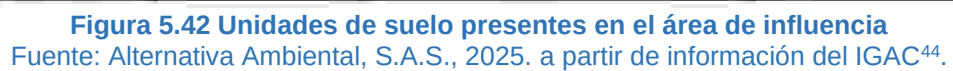
Tabla 5.39 Componentes del símbolo de las unidades de suelos

Paisaje		Clima		Pendiente		Atributos		Erosión	
L	Lomerío	T	Cálido pluvial	a	1-3%	x	Inundable	1	Ligera
A	Altiplanicie	U	Cálido muy húmedo	b	3-7%	y	Encharcable	2	Moderada
R	Planicie	V	Cálido húmedo	c	7-12%	-	N/A	-	N/A
V	Valle	W	Cálido seco	d	12-25%	-	N/A	-	N/A
M	Montaña	-	N/A	e	25-50%	-	N/A	-	N/A

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025., modificado de IGAC, 2010⁴³.

Con base en la Tabla 5.39, el clima es cálido muy húmedo (U) y, el paisaje en toda el área de estudio corresponde a Valle (V), con ambientes morfogenéticos fluvial y antropogénico. En este contexto, se identificaron los tipos de relieve terrazas fluviales asociadas a depósitos de terraza de nivel 1 a 3 y llanura de inundación, cuerpos de agua desarrollados sobre depósitos aluviales recientes y las zonas urbanas y la vía que completan el área de influencia.

⁴³ (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC, 2010)



129

Tabla 5.40 Características de los suelos presentes en el área de influencia del proyecto

Clima ambiental	Paisaje	Ambiente morfogenético del paisaje	Tipo de relieve	Material parental	Taxonomía	Símbolo*	Asociación/ Complejo	Área (ha)
Cálido muy Húmedo (U)	Valle (V)	Fluvial	Terrazas fluviales	Depósito de terraza nivel 2 y 3	Typic Udorthents; Fluventic Dystrudepts; Fluventic Eutrudepts; Oxic Dystrudepts; Typic Dystrudepts; Aquic Eutrudepts	VUFa1	Asociación Juradó (JU)	41,29
				Depósito de terraza nivel 1	Fluvaquentic Endoaquepts; Typic Udorthents; Aquic Eutrudepts	VUFb2	Complejo Rio Sucio (RS)	21,56
			Llanuras Inundación	Depósitos aluviales recientes				
			Cuerpo de agua	Cuerpo de agua	No suelos, Lámina de agua	CA	CA	0,26
			Antropogénico	Zona urbana	Zona urbana	No suelos	ZU	ZU
		Vía		Vía				
		Total, general						

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025., modificado de INERCO Consultoría Colombia, 2018.

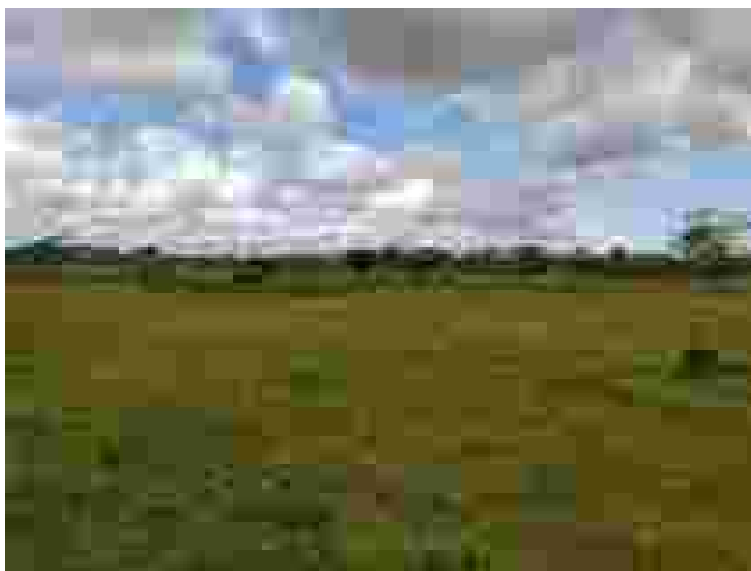
*se ajusta el símbolo de las unidades de suelo, sin embargo, debido a que se comparten atributos, en el mapa de unidades de suelo de la Figura 5.27, se muestran con la nomenclatura del completo u asociación al cual pertenecen.

*las denominaciones de zonas urbanas y cuerpos de agua se siguen conservando por sus siglas ZU y CA, respectivamente.

A continuación, se describen las unidades cartográficas encontradas en la zona de estudio y en el Anexos_C5_1/ 5_1_4_Suelos, se presentan los perfiles modales y los reportes de los análisis de laboratorio.

5.1.4.2.1 Suelos del paisaje de valle aluvial en clima cálido muy húmedo

Estos suelos, se desarrollaron en el ambiente morfogenético fluvial, en la geoforma terrazas fluviales, sobre el plano de terraza, en terrenos con relieve ligeramente plano y pendientes entre 3% y 7% (Fotografía 5.30).



Fotografía 5.30 Suelos del paisaje de valle, en clima cálido muy húmedo

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

A. Complejo Río Sucio (RS)

Los suelos que conforman esta unidad cartográfica se localizan en los municipios de Apartadó, Carepa, Chigorodó, Mutatá, Murindó y Vigía del Fuerte, en la Subregión de Urabá, así como en Dabeiba, Urrao y Frontino, ubicados en el Occidente y Suroeste de Antioquia. Esta área se caracteriza por un clima cálido y muy húmedo, abarcando un total de 53.031,10 hectáreas, lo que equivale al 0,84 % del territorio departamental⁴⁵.

Los suelos se originan a partir de sedimentos aluviales mixtos y heterogéneos, formando geoformas de llanuras de inundación en los valles de los ríos León y Atrato. El relieve predominante varía de ligeramente plano a ligeramente inclinado, con pendientes inferiores al 7 %⁴⁶.

Estas tierras son muy superficiales a moderadamente profundas, con capas de gravas, gravillas y arenas que limitan su desarrollo. Presentan un drenaje natural que oscila entre pobre y moderado, y sus texturas son diversas. La vegetación natural es escasa en el norte de la región, mientras que en el sur es más densa, incluyendo especies como yarumo,

⁴⁵ (IGAC, 2007)

⁴⁶ Ibid., p.451

guamo, ceiba, hobo, matarratón, olleto, caracolí, chiva, roble, quino, cativo, palmas y platanillo⁴⁷.

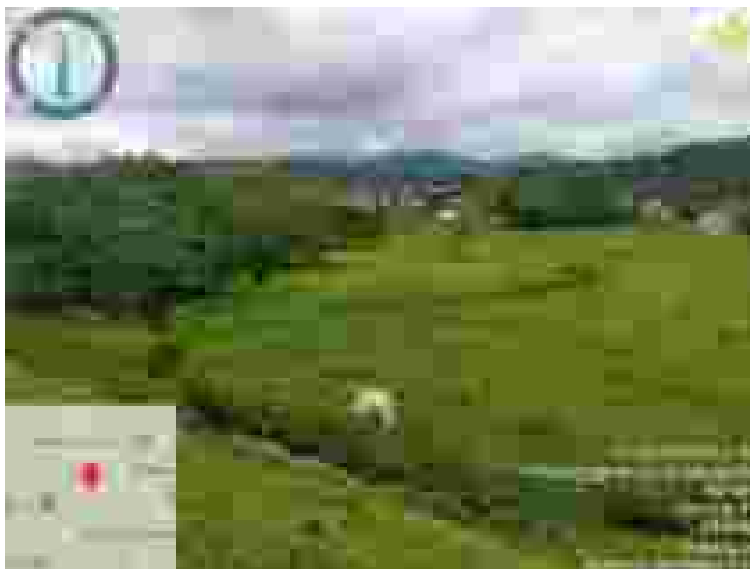
El uso predominante de esta unidad es la ganadería extensiva, realizada principalmente con pastos naturales como yaraguá, panameña, pasto estrella y pasto negro⁴⁸.

En términos de clasificación, esta unidad está constituida por los suelos Fluvaquentic Endoaquepts (40 %), Typic Udorthents (30 %) Aquic Eutrudepts (30 %), aunque esta última no se observa en el área de influencia⁴⁹.

Pertenece a la fase RSa: Complejo Río Sucio, fase ligeramente plana y ocupan 21,25 ha del área de influencia.

5.1.4.2.2 Suelos del paisaje de valle, en clima cálido muy húmedo

Estos suelos se desarrollaron en el ambiente morfogenético fluvial, en las geoformas de valle asociadas a los ríos Sucio y Mutatá. Ocupan las geoformas terrazas fluviales y llanura de inundación, en terrenos con relieve variable entre ligeramente plano en los planos de terraza y moderadamente escarpado en los escarpes, con pendientes entre 3% y 75% (fotografía 5-3).



Fotografía 5.31 Geoformas del relieve terrazas, en el paisaje de valle

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

A. Asociación Juradó (JU)

Esta unidad se encuentra ubicada en las subregiones de Urabá y Occidente, abarcando los municipios de Carepa, Chigorodó, Mutatá, Murindó, Vigía del Fuerte, Dabeiba, Frontino y Urrao. Corresponde a un clima cálido y muy húmedo, característico de la zona de bosque

⁴⁷ Ibid., p.451

⁴⁸ Ibid., p.451

⁴⁹ Ibid., p.451

muy húmedo tropical (bmh-T), con una superficie total de 99.484,32 hectáreas, lo que representa el 1,58 % del territorio departamental de Antioquia⁵⁰.

Desde el punto de vista geomorfológico, esta unidad forma parte del paisaje de piedemonte, incluyendo geoformas como abanicos aluvio-torrenciales, abanico-terrazas y glacis subrecientes y antiguos. Su relieve varía desde plano y ligeramente plano convexo hasta fuertemente inclinado, con pendientes que oscilan entre menos del 25 % en las laderas y entre 50 % y 70 % en los escarpes⁵¹.

Los suelos tienen su origen en depósitos aluviales mixtos con aportes coluviales. Se caracterizan por ser bien drenados, con texturas que van de gruesas a moderadamente gruesas, medias y finas. Pueden ser profundos o superficiales, pero su desarrollo está limitado por capas de cantos, rocas y niveles freáticos⁵².

El uso predominante de estos suelos incluye la conservación de bosques y la práctica de ganadería extensiva con pastos naturales. La vegetación predominante incluye especies como platanillo, palmiche, cedro, salvón, bijao, yarumo, dormidera, matarratón, escobilla y caucho⁵³.

Esta asociación de suelos está compuesta por Typic Udorthents, Typic Dystrudepts (Tabla 5.42), Fluventic Dystrudepts, Fluventic Eutrudepts, Oxic Dystrudepts, y Aquic Eutrudepts, describiendo a continuación solo los dos (2) primeros que son los que se encuentran en el área de influencia. Adicional a esto, en la Tabla 5.43 se encuentran los parámetros de análisis de la unidad Typic Dystrudepts⁵⁴.

Corresponde a la fase JUb: Asociación Juradó, fase ligeramente inclinada y ocupan 39,05 ha del área de influencia.

5.1.4.2.3 Zonas sin suelos, en el clima cálido muy húmedo

Completan el área de influencia del proyecto las zonas del ambiente morfogenético antropogénico, correspondientes a las unidades de cuerpos de agua (CA) zona urbana y vía (ZU), en las cuales no se encuentran suelos a nivel superficial. A continuación, se describen brevemente:

A. Cuerpos de agua, CA

En el área de influencia (AI) la unidad cuerpos de agua presenta suelos cubiertos por lámina de agua permanente o temporal, como es el caso cuerpos de agua superficiales presentes dentro del área. Esta unidad ocupa 0,26 ha (0,28 %) del AI (Fotografía 5.32).

⁵⁰ (IGAC, 2007)

⁵¹ Ibid., p.524

⁵² Ibid., p.524

⁵³ Ibid., p.524

⁵⁴ Ibid., p.524



Fotografía 5.32 Cuerpos de agua en el área de influencia del proyecto

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

B. Zona urbana, ZU

La unidad zona urbana presenta suelos muy alterados, inexistentes o sepultados por la infraestructura urbana, como son las construcciones de la cabecera municipal y la red vial asociada; esta unidad ocupa 34,85 ha (36,52 %) del AI (Fotografía 5.33).



Fotografía 5.33 Zona urbana, con suelos inexistentes o sepultados: vía, casco urbano de Mutatá.

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.4.2.4 Muestreo del suelo y análisis de laboratorio

Para el estudio técnico edafológico del área de influencia se realizó una (1) calicata modal en la Asociación Jurado (JU), denominada con el símbolo VUFa1. Lo anterior, con el propósito de determinar las características fisicoquímicas de la unidad, toda vez que sobre esta se realizará el emplazamiento de la infraestructura del proyecto (ver Tabla 5.41 y Figura 5.43).

La calicata se realizó de un (1) metro de ancho por un (1) metro de largo por un (1) metro de profundidad. Posteriormente, se procedió con el desarrollo de una descripción inicial en campo de los horizontes encontrados teniendo en cuenta características como: espesor, color, textura, consistencia, presencia de raíces, compactación, entre otros (ver Tabla 5.42). Así mismo, se cuantificaron las fracciones granulométricas para determinar las texturas asociadas.

Posteriormente, se colecta 1kg por cada horizonte encontrado. Estas muestras se depositan en bolsas plásticas transparentes, se rotula y se envía al laboratorio de suelos y aguas (Anexos_C5_1/ 5_1_4_Suelos), encontrando los resultados en la Tabla 5.43.

Tabla 5.41 Sitios de observación en campo

Tipo de muestreo	Nomenclatura	Coordenadas CTM 12 Origen Nacional	
		Este	Norte
Calicata modal 1	PM-UF4-12	4620214,37	2359585,08

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

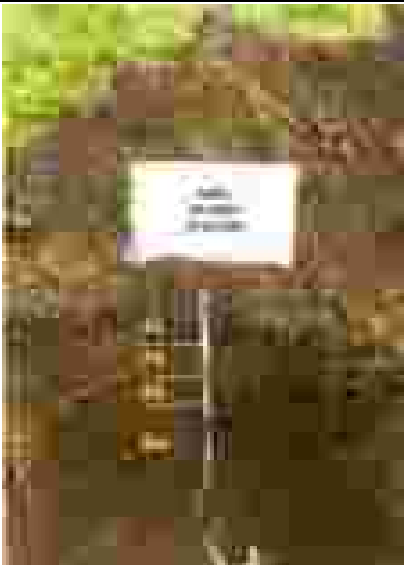
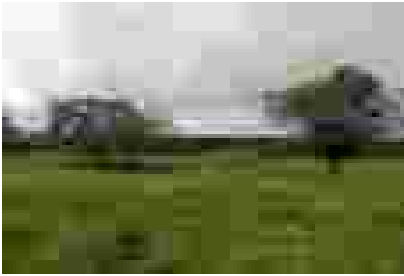


Figura 5.43 Sitio de muestreo en el área de influencia del proyecto
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

A. Punto de muestreo de los suelos Typic **Eutrudepts**

Tabla 5.42. Perfil de los suelos Typic **Eutrudepts**

Punto de muestreo: PM-UF4-12					
Fecha	01-12-2016	U.C. Suelos	VTE	Taxonomía	Typic Eutrudepts
Coordenadas		Municipio	Mutatá	Paisaje	Valle
X	Y	Vereda		Relieve	Ligeramente inclinado
4620214,37	2359585,08	Pendiente	4 %	Forma del terreno	Plano de terraza

Punto de muestreo: PM-UF4-12		
 Perfil de suelos   Formas de terreno: Plano de terraza	Horizonte A1 0-15 cm	Color Munsell (10YR3/1); textura franco-arcillosa con 10 % de fragmentos rocosos tipo gravilla redondeadas; estructura en bloques subangulares, fina, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente plástico; con pocos poros finos irregulares; con frecuente actividad de macroorganismos y raíces finas vivas, con distribución normal; límite claro y plano. Drenaje interno, moderadamente bien drenado.
	Horizonte A2 15-24 cm	Color Munsell (10YR4/3 y 10YR4/6); textura franco arcillo arenosa con 20 % de fragmentos rocosos tipo gravilla y gravas redondeadas; estructura en bloques subangulares, media, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente plástico; con pocos poros finos irregulares; con frecuente actividad de macroorganismos y raíces finas vivas, con distribución normal; límite claro y plano. Drenaje interno, moderadamente bien drenado.
	Horizonte A3 24-34 cm	Color Munsell (10YR4/3 y 10YR4/6); textura arenosa con 70 % de fragmentos rocosos tipo grava y piedra redondeadas; estructura en bloques subangulares, media, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente plástico; con pocos poros finos irregulares; con frecuente actividad de macroorganismos y raíces finas vivas, con distribución normal; límite claro y plano. Drenaje interno, moderadamente bien drenado.
	Horizonte Bw 34-64 cm	Color Munsell (10YR4/6); textura franco arcillo arenosa con 30 % de fragmentos rocosos tipo gravilla, grava, piedra, pedregón redondeadas; estructura en gránulos, fina, débil; consistencia en húmedo friable, en mojado no plástico; con pocos poros finos irregulares; con frecuente actividad de macroorganismos y raíces finas vivas, con distribución normal; límite claro y plano. Drenaje interno, moderadamente bien drenado.

Fuente: INERCO Consultoría Colombia, 2018, modificado por Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

Tabla 5.43 Parámetros de análisis de los suelos Typic Eutrudepts

Unidad taxonómica	Typic Eutrudepts		
Unidad cartográfica	JU		
Perfil	PM-UF4-12	A1/A2/A3	Bw
Parámetro / Reporte	Unidad	30721-16	30722-16
Profundidad	cm	0-34	34-64
pH	Und	4,99	5,23
Apreciación	-	Fuertemente ácido	Fuertemente ácido
Humedad	%	34,3	25,6
Aluminio intercambiable	meq/100g	0,37	0,12
Capacidad de Intercambio Catiónico	meq/100g	48,70	52,60
Calcio	mg/kg seco	828,2	708,6
Potasio	mg/kg seco	142,1	284,0
Magnesio	mg/kg seco	7906	7358
Sodio	mg/kg seco	75,0	215,6
Hierro	mg/kg seco	59517	53729
Saturación de Bases	%	86,6	92,4
Fósforo disponible	ppm	40,7	52,5
Materia orgánica	%	5,6	4,3
Carbono Orgánico	%	3,22	2,52
Nitrógeno amoniacal	mg/kg	21,5	52,3
Nitritos	mg/kg	0,080	0,048
Conductividad eléctrica	μS/cm	32,3	22,8
Mercurio	mg/kg seco	<0,50	<0,05
Arsénico	mg/kg seco	<0,125	<0,125
Cromo	mg/kg seco	77,5	69,6
Plomo	mg/kg seco	13,1	12,5
Saturación de humedad	%	47,8	64,3
Densidad aparente	g/cm3	1,26	1,15
Densidad real	g/cm3	1,74	1,75
Porosidad Total	%	27,6	34,3
Capacidad de Campo (0,3 Atm)	% P/V	32	26
Arena	%	52	50
Limo	%	28	24
Arcilla	%	20	26
Unidad taxonómica	Typic Eutrudepts		
Unidad cartográfica	JU		

Perfil	PM-UF4-12	A1/A2/A3	Bw
Parámetro / Reporte	Unidad	30721-16	30722-16
Profundidad	cm	0-34	34-64
Clase textural	Adim	Franco-Arcillo- Arenoso	N. A

Fuente: IGAC, 2000⁵⁵. Adaptado por INERCO Consultoría Colombia, 2018 y Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

5.1.4.3 Uso actual del suelo

Las unidades de uso actual de suelo se delimitaron con base en el mapa de coberturas vegetales generado con la metodología CORINE Land Cover-Colombia, agrupando las unidades de cobertura en las categorías de uso del suelo definidas por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible⁵⁶.

Como resultado de este análisis se encontró que en el área de influencia abiótica del proyecto en la variante Mutatá, el uso del suelo está dominado por la ganadería con pastoreo extensivo, ocupando el 60,89% del territorio, seguida por las áreas de asentamiento residencial con un 29,18%, lo que indica una combinación entre actividades agropecuarias y urbanización. La infraestructura de transporte representa un 5,72%, reflejando la importancia de la conectividad en la zona, seguido por las zonas industriales (2,55%). En menor medida, la conservación representada por el (0,72%) y la actividad forestal (0,67%) tienen una presencia limitada, mientras que los cuerpos de agua artificiales (0,27%) tienen una presencia muy limitada en el territorio. Esto sugiere un territorio principalmente orientado a la producción ganadera en pastos limpios, con una creciente urbanización, baja diversificación en actividades industriales y de conservación ambiental. (Tabla 5.44), las cuales se describen a continuación y se observan en el mapa de la Figura 5.44.

Tabla 5.44 Usos actuales del suelo en el Área de Influencia del componente suelos de la variante Mutatá y la cobertura asociada

Grupo de uso	Uso actual	Cobertura	Área (ha)	Área (%)
Cuerpo de Agua Superficial	Pastoreo extensivo (PEX)	Cuerpos de agua artificiales	0,26	0,27
Forestal	Sistema forestal productor (FPD)	Plantación forestal	0,66	0,67
Conservación	Protección (CPR)	Bosque de galería y/o ripario	0,71	0,72
Ganadería	Pastoreo extensivo (PEX)	Pastos enmalezados	60,06	60,89
		Pastos limpios		
Asentamiento	Industrial (ZIN)	Zonas industriales o comerciales	2,52	2,55
	Transporte (ITR)	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	5,64	5,72
	Residencial (ARE)	Tejido urbano continuo	28,78	29,18

⁵⁵ (IGAC, 2000)

⁵⁶ (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2012)

Grupo de uso	Uso actual	Cobertura	Área (ha)	Área (%)
		Tejido urbano discontinuo	98,64	100,00
		Áreas deportivas		
		Parques cementerio		
		Total, general	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025., modificado de INERCO Consultoría Colombia, 2018.

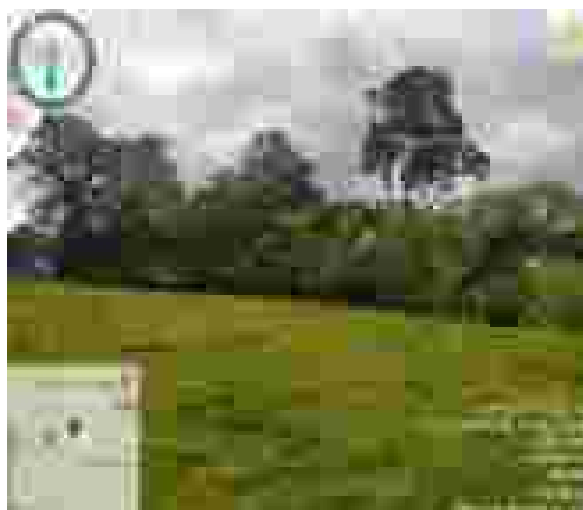


Figura 5.44 Uso actual del suelo en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.4.3.1 Conservación - Protección (CPR)

En esta unidad de uso actual se agruparon las zonas de bosque de galería considerando la escasa área que ocupan (0,71 ha). Este tipo de uso ocupa el 0,72% del área de influencia abiótica. Este tipo de uso provee protección al suelo contra los agentes erosivos y favorece la acumulación de materia orgánica, mediante el aporte de hojarasca (Fotografía 5.34).

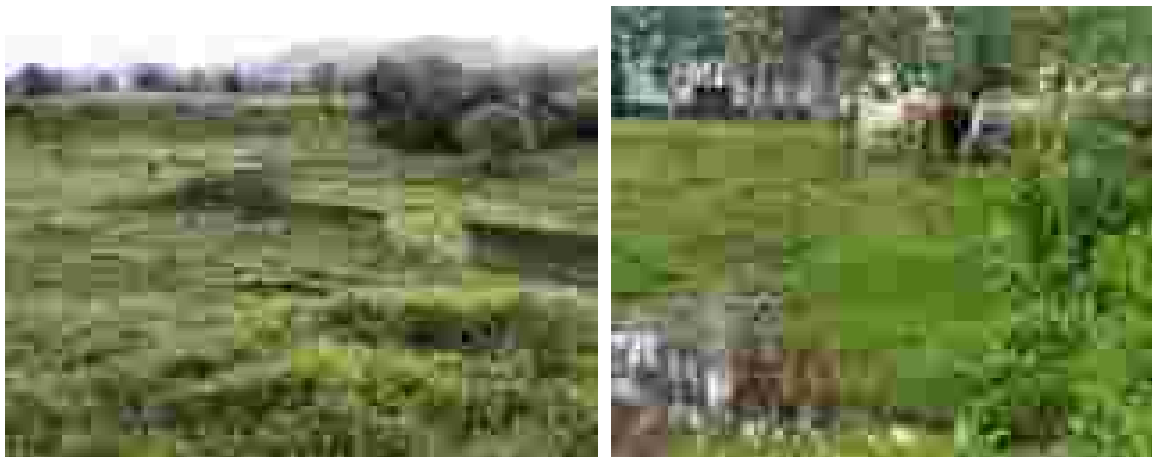


Fotografía 5.34 Conservación, protección: bosque de galería

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.4.3.2 Ganadería - Pastoreo extensivo (PEX)

El tipo de uso pastoreo extensivo se refiere a la cría y levante de ganado en áreas extensas con baja carga animal y baja implementación de tecnología e infraestructura. Esta unidad de uso ocupa 60,06 ha (60,89%) del área de influencia abiótica y se relaciona con las coberturas de pastos enmalezados y pastos limpios. En la Fotografía 5.35 se observan algunas zonas con uso en ganadería de pastoreo extensivo.

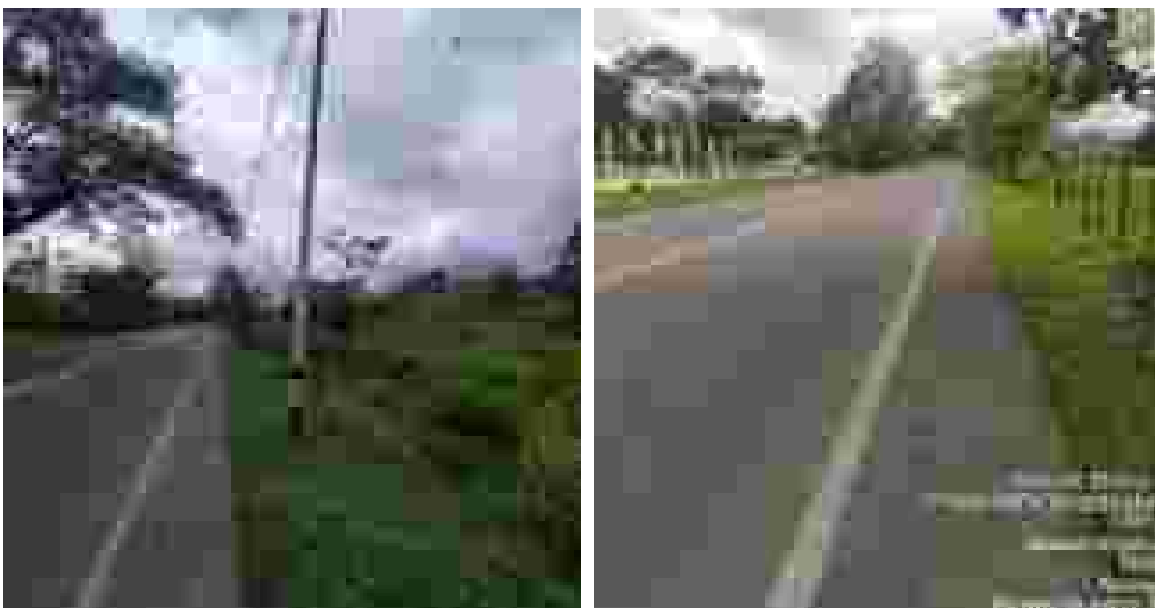


Fotografía 5.35 Tierras con uso Ganadería de pastoreo extensivo

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

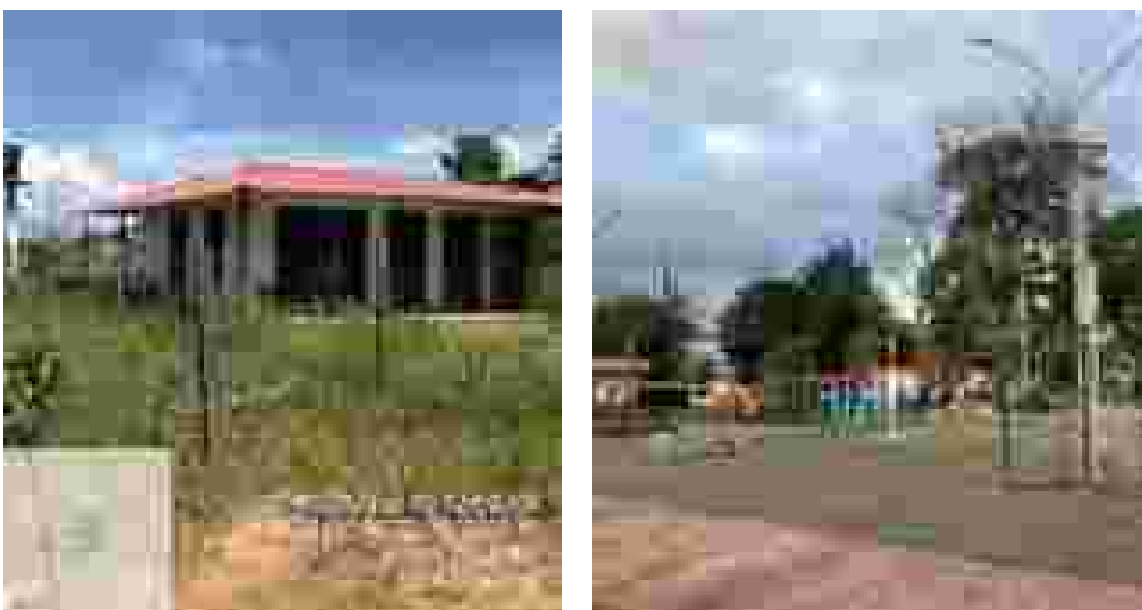
5.1.4.3.3 Asentamiento - Industrial (ZIN), Transporte (ITR) y Residencial (ARE)

En esta unidad de uso actual se agruparon las coberturas asociadas a las zonas industriales o comerciales, tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo, áreas deportivas, parques cementerio y la red vial y terrenos asociados (Fotografía 5.36) y las zonas residenciales (Fotografía 5.37), ocupando 36,94 ha (37,45 %) del área de influencia abiótica del proyecto.



Fotografía 5.36. Áreas de uso en infraestructura: red vial y terrenos asociados

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

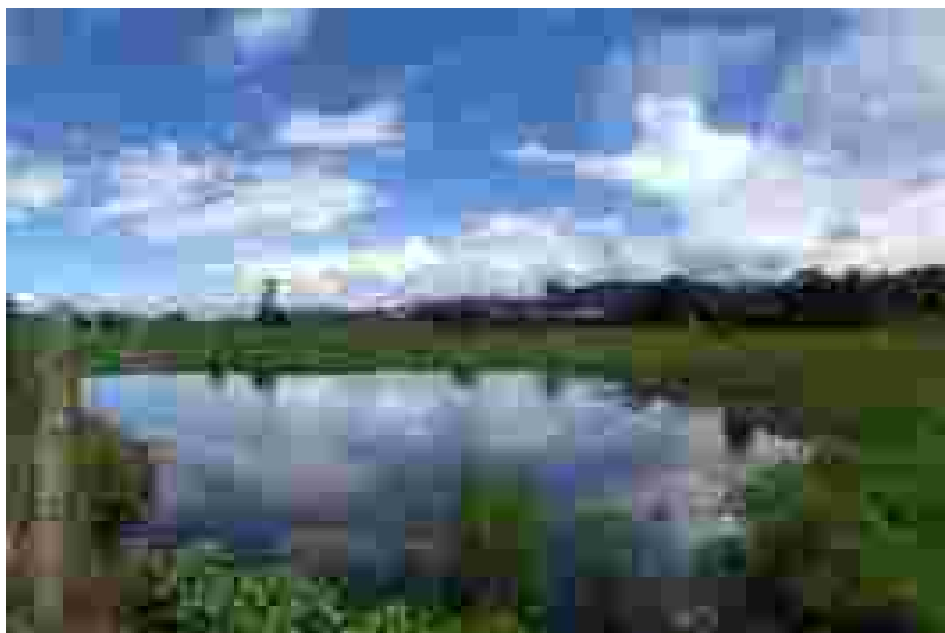


Fotografía 5.37 Uso en asentamiento residencial: tejido urbano discontinuo y continuo

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.4.3.4 Cuerpo de Agua Superficial - Pastoreo extensivo (PEX)

Los cuerpos de agua artificiales se agruparon dentro de la unidad de uso actual Pastoreo Extensivo (PEX), considerando que son utilizados como bebederos de los semovientes. Esto significa que su presencia está asociada a las extensiones de pastos limpios destinados a la actividad ganadera. Estos cuerpos de agua ocupan una superficie de 0,26 ha, lo que equivale al 0,27% del total del área, evidenciando su presencia mínima en el territorio y su uso exclusivamente vinculado a la ganadería.

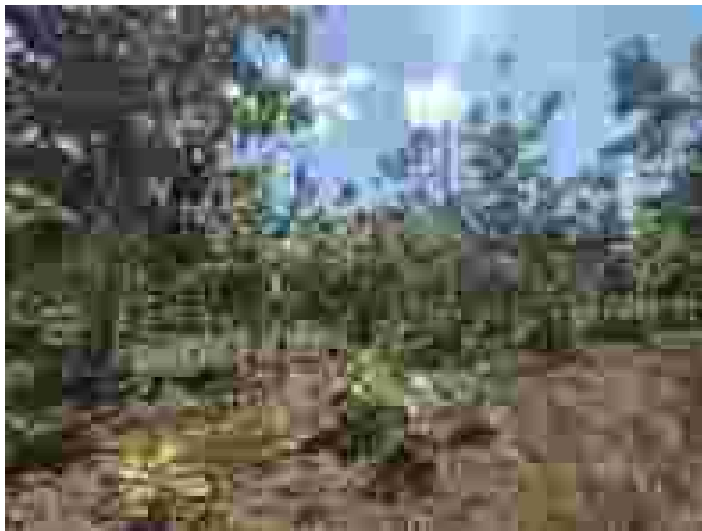


Fotografía 5.38. Cuerpos de agua artificiales

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.4.3.5 Forestal - Sistema forestal productor (FPD)

El uso forestal bajo la categoría de Sistema Forestal Productor (FPD) abarca 0,66 ha, lo que representa el 0,67% del total del área. La cobertura de este uso corresponde a plantaciones forestales de Teca (*Tectona grandis*), lo que indica una presencia muy limitada de superficies dedicadas a la producción de madera u otros productos forestales. Esta baja proporción sugiere que la actividad forestal no es un componente significativo en la distribución del suelo, debido a un enfoque territorial más orientado a la ganadería y los asentamientos.



Fotografía 5.39 Conservación, protección: plantación forestal y vegetación nativa

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.4.4 Uso potencial del suelo

En el análisis de la información para evaluar la capacidad de uso de las tierras o su clasificación agrológica, se utiliza el sistema de clasificación por capacidad de uso de las tierras, que permite agrupar las diferentes unidades de suelos, en grupos que tienen las mismas clases y grados de limitaciones y que responden en forma similar a los mismos tratamientos; la agrupación se basa en los efectos combinados del clima y de las características poco modificables de relieve y suelos, en relación con limitaciones para el uso, para la capacidad de producción, para el riesgo de deterioro y para los requerimientos de manejo del suelo. Una de las características de esta clasificación es que se realiza para fines agropecuarios, forestales, y para identificar las zonas que requieren mayor protección y conservación; donde se mezclan los aspectos que determinan el uso más adecuado para cada unidad de suelos y las prácticas recomendadas para la conservación.

El sistema de clasificación por capacidad de uso utilizado tiene tres categorías:

- Clase (nivel más general)
- Subclase (categoría intermedia)
- Grupo de manejo (nivel más detallado)

Al utilizar la clasificación agrológica se tiene en cuenta que: La clase agrupa tierras que presentan similitud en el grado relativo de limitaciones y/o en los riesgos en cuanto al deterioro del suelo. Las Clases son ocho (8) y se designan con números arábigos del 1 al 8. Las cuatro (4) primeras son arables, aptas para cultivos y pastos adaptados a las condiciones climáticas. Las limitaciones se incrementan de la clase 1 a la 4 en lo referente a las posibilidades de uso (ver Tabla 5.45).

- Las clases 1 y 2 agrupan tierras arables, con capacidad para cualquier tipo de cultivo adaptable a las condiciones climáticas y con requerimiento de pocas prácticas de conservación del suelo.

- Las clases 3 y 4 agrupan tierras arables con capacidad para algunos cultivos, adaptables a las condiciones ambientales, con necesidad de moderadas prácticas de conservación de suelos.
- La clase 5 agrupa suelos con limitaciones que solo son potencialmente utilizables en condiciones naturales por determinados períodos del año; su habilitación requiere prácticas costosas de adecuación.
- Las clases 6 y 7 tienen limitaciones severas y muy severas por lo que son aptas para plantas nativas o para algunos cultivos específicos, pastos y plantas forrajeras con prácticas intensivas de conservación y costos de operación muy elevados.
- La clase 8 corresponde a suelos con limitaciones extremadamente severas, por lo que se deben dedicar a la protección de la vida silvestre, a la investigación, a la recreación y a la conservación de los recursos naturales, especialmente de las fuentes de agua.

Las subclases son categorías subordinadas a las clases agrológicas, las cuales tienen el mismo tipo de limitantes y grado de afectación; se identifican mediante la adición de una letra minúscula que sigue al respectivo dígito de la clase; en la medida que aumenta el orden de la clase, pueden adicionarse hasta tres letras que indican en donde radica la limitación. Se han definido las subclases de pendiente (p), erosión (e), exceso de humedad o encharcamientos e inundaciones (h), limitaciones zona radical (s) y limitaciones por clima adverso (c). Se presenta su intensidad en la Tabla 5.45.

Tabla 5.45 Clase de capacidad de uso del suelo

AUMENTO DE LA INTENSIDAD DEL USO									
Clases de Capacidad de Uso	Vida Silvestre	Pastoreo o Forestal			Cultivo			Tasa de destrucción y erosión del suelo desnudo	
		Limitado	Moderado	Intensivo	Limitado	Moderado	Intensivo		Muy Intensivo
1									Extremadamente lenta
2									Muy lenta
3									Lenta
4									Moderada
5									Variable
6									Rápida
7									Muy rápida
8									Extremadamente rápida
Aumentan las limitaciones y riesgos en el sentido vertical Disminuye la adaptabilidad y la libertad de elección para el uso, en el mismo sentido.									

Fuente: IGAC, 2021⁵⁷.

⁵⁷ (IGAC, 2021. Clasificación de las Tierras por su Capacidad de Uso.)

Los suelos de las clases 1 a la 4 pueden considerarse con capacidad de uso para la agricultura y la ganadería, calificada como muy buena, buena y moderada, en su orden. La clase 5 no es apta para agricultura convencional, por razones como pedregosidad, pendiente, erosión, entre otras.

Los suelos de las clases 6 y 7 no son indicados para fines agrícolas, debido a rigurosas restricciones, como las fuertes pendientes y erosión severa; las tierras de clase 6 pueden utilizarse en ganadería y las de 7 en bosques. Los suelos de la clase 8 no tienen aptitud agropecuaria, ni forestal de producción y se deben dedicar a la conservación y protección de los recursos naturales y del medio ambiente.

Se reconocen limitaciones en subclases por pendiente (p), erosión (e), exceso de humedad (h), suelo (s) y clima ambiental extremo (c), las cuales se detallan en la Tabla 5.46.

Tabla 5.46 Clase de capacidad de uso del suelo

Subclase - Factor determinante de limitación	Descripción
Pendiente (p)	El relieve del área donde se encuentran estos suelos presenta pendientes superiores al 12%
Erosión y topografía (e)	Suelos con peligro de erosión al ser establecidos sobre ellos cultivos, o suelos ya erosionados. Si se cultivan, deben acompañarse de prácticas de conservación adecuadas.
Drenaje (h)	Suelos en los que los excesos de humedad en la zona de raíces o sobre la superficie, interfieren o dificultan el crecimiento y desarrollo de las plantas o la labranza del suelo.
Suelo (s)	Suelos cuyas propiedades adversas limitan el crecimiento y desarrollo de las plantas. Se incluyen, entre otras, perfiles de suelo muy delgados, problemas de salinidad, y presencia de panes.
Clima (c)	Suelos localizados en zonas donde la lluvia, la temperatura y la luminosidad, por exceso o defecto, se constituyen en factores limitantes para el desarrollo de las plantas.

Fuente: IGAC, 2021⁵⁸.

5.1.4.4.1 Vocación de uso o uso potencial de las tierras en el área de influencia (AI)

A partir de la clasificación agrológica de los suelos se determinaron las unidades de uso potencial o la vocación de uso de los suelos según el IGAC⁵⁹, que permiten una explotación sostenida del recurso sin generar pérdida o degradación. Sin embargo, se incorporó a la capa propuesta por el IGAC las zonas que actualmente están intervenidas antrópicamente convirtiéndolas en zonas urbanas, industriales y de transporte, ya que son áreas que en un futuro no tendrán otro uso o el suelo intervenido no es apto para un uso diferente.

A. Uso potencial sistemas agrosilvopastoriles (ASP)

Las tierras con uso potencial agroforestal de tipo silvopastoril ocupan **62,86 ha (63,72 %)** del AI del proyecto y se localizan sobre suelos con características biofísicas que no permiten la utilización exclusiva de usos agrícolas o ganaderos, correspondientes a las tierras con

⁵⁸ Ibid

⁵⁹ (IGAC, 2007)

clase agrológica 4s y 4hs, con limitaciones debidas a las condiciones inadecuadas del suelo y al drenaje.

Por sus características estos suelos deben ser usados con sistemas que combinen de forma armonizada los usos forestales y el pastoreo con la siembra de vegetación multiestratificada, árboles, arbustos y herbáceas, que garanticen el adecuado cubrimiento de la superficie del suelo⁶⁰.

B. Infraestructura urbana y transporte (ZU)

Esta unidad cartográfica agrupa las áreas urbanas en el AI del proyecto, las cuales ocupan **35,52 ha (36,01 %)**. Estas se caracterizan por la presencia de zonas industriales, residenciales y viales.

C. Cuerpos de agua

Las zonas con uso potencial de cuerpos de agua ocupan la menor parte del área de influencia con solo **0,26 ha que simbolizan el 0,27 %**. Debido a las propiedades de la tierra donde se localizan, el uso potencial corresponde al mismo del uso actual.

En la Tabla 5.47 se presenta la ocupación de las unidades de uso potencial, en relación con las clases agrológicas de los suelos y en la **Figura 5.45** su respectivo mapa.

Tabla 5.47 Uso potencial de los suelos del AI de la variante Mutatá

Uso principal	Clase agrológica	Subclase	Área (ha)	Área (%)
Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	4	hs	21,56	21,86
	4	s	41,29	41,86
Infraestructura urbana y transporte (ZU)	-	-	35,52	36,01
Cuerpos de agua (CA)	-	-	0,26	0,27
Total, general			98,64	100 %

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025., modificado de INERCO Consultoría Colombia, 2018.

⁶⁰ IGAC, CORPOICA, 2002. *Óp. cit.*, p 27.

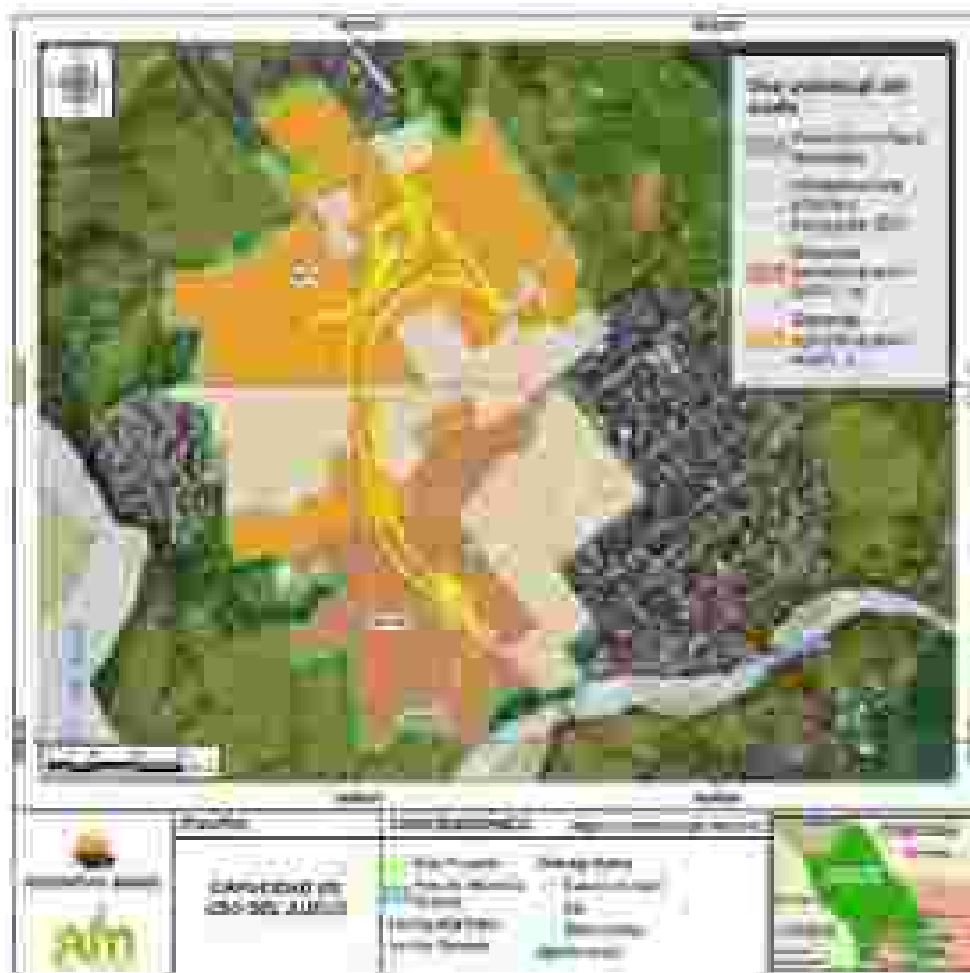


Figura 5.45 Capacidad de uso del suelo según grupos de manejo en el área de influencia
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Las tierras de clase 4 pueden tener la capacidad de usarse para la agricultura y la ganadería, ya que se califican de buenas a moderadas. Por su parte, la subclase 4sh presenta suelos con propiedades adversas que limitan el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como alta humedad que puede interferir en igualmente en su crecimiento⁶¹.

5.1.4.5 Conflicto de usos del suelo

El análisis de los conflictos de uso del suelo en el área de influencia del proyecto se efectuó teniendo en cuenta la vocación de uso o capacidad potencial de suelo para generar biomasa mediante sistemas agropecuarios, forestales y boscosos, comparada con la productividad obtenida mediante los usos actuales, según la metodología desarrollada por CORPOICA⁶².

⁶¹ (IGAC, 2007)

⁶² (CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA e INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, 2002)

En la Tabla 5.48 se presentan los conflictos definidos mediante el cruce entre uso actual y uso potencial, así como en la [Figura 5.46](#) se representan espacialmente estos conflictos y en la Tabla 5.49 las áreas de cada uno de ellos. A continuación, se describen las unidades de conflicto de uso de las tierras en el área de estudio.

Tabla 5.48 Uso actual, uso potencial y conflicto de uso

Uso actual		Uso Potencial	Conflicto de Uso	Símbolo y color	
Conservación	Protección (CPR)	Zonas urbanas (ZU)	Subutilización severa	S3	
		Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)			
Agroforestal	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	Infraestructura urbana y de transporte (ZU)	Subutilización severa	S3	
Cuerpos de Agua Artificiales	Pastoreo extensivo (PEX)	Cuerpos de Agua (CA)	Sobreutilización severa	O3	
Asentamiento	Industrial	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	Sobreutilización severa	O3	
	Transporte	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	Sobreutilización severa	O3	
	Residencial	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	Sobreutilización severa	O3	
Forestal	Sistema forestal productor (FPD)	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	Sin conflicto de uso o uso adecuado	A	
Ganadería	Pastoreo extensivo (PEX)	Sistemas agrosilvopastoriles (ASP)	Sin conflicto de uso o uso adecuado	A	
Asentamiento	Industrial	Zonas urbanas (ZU)			

Uso actual		Uso Potencial	Conflicto de Uso	Símbolo y color	
	Transporte	Zonas urbanas (ZU)			
	Residencial	Zonas urbanas (ZU)			

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025., modificado de INERCO Consultoría Colombia, 2018.

Tabla 5.49 Conflictos por uso del suelo en el área de influencia

Conflicto	Área ha	Área (%)
A	96,24	97,57
S3	0,71	0,72
O3	1,68	1,71
Total, general	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.4.5.1 Tierras sin conflicto de uso o uso adecuado (A)

En esta categoría se agrupan las zonas que presentan concordancia entre su capacidad de uso y el uso actual. El suelo no presenta deterioro de significancia y permite mantener las actividades productivas actuales y desarrollar nuevas, sin deteriorar la base natural de los recursos.

Se incluyeron en este tipo de conflicto las áreas con uso actual en infraestructura industrial, recreacional, transporte y asentamiento urbano, además de pastoreo extensivo (PEX) y Sistema forestal productor (FPD), con uso potencial variable; zonas urbanas (ZU) y sistemas agrosilvopastoriles (ASP). En el área de influencia del proyecto, **96,24 ha (97,57%)** presentan uso adecuado o no tiene conflictos de uso.

5.1.4.5.2 Tierras con conflicto de uso por subutilización severa S3

Esta categoría de conflicto corresponde a las zonas donde el uso actual se encuentra muy por debajo de la capacidad de uso de las tierras, desaprovechando severamente la productividad de los suelos por un uso inadecuado o por abandono de las áreas, en las cuales, aunque no hay pérdida del recurso como tal, pero sí se afecta la producción final.

Se incluyeron en este tipo de conflicto las áreas para la conservación y/o recuperación de la naturaleza (Protección (CPR) y las áreas destinadas a protección con uso potencial en infraestructura (Zonas urbanas (ZU) y Sistemas agrosilvopastoriles (ASP). En el área de estudio, este conflicto de uso se identificó en **0,71 ha (0,72 %)**.

5.1.4.5.3 Tierras con conflicto de uso por sobreutilización severa O3

Este conflicto ocurre en las zonas donde el uso actual se encuentra muy por encima de la capacidad de uso de las tierras, afectando fuertemente su producción sustentable, disminuyendo la productividad y la capacidad de regeneración del recurso, lo que puede reflejarse en la generación de procesos erosivos o de degradación fisicoquímica, originando alteraciones mayores en el corto plazo.

Este conflicto se encontró en las zonas con uso actual en pastoreo extensivo (PEX) relacionado con cuerpos de agua artificiales, y uso potencial en cuerpos de Agua (CA), y cuerpos de agua naturales, ocupando un área de **1,68 ha (1,71%)** del área de influencia del proyecto en la variante Mutatá.



Figura 5.46 Conflictos por uso del suelo en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Como se observa en la [Figura 5.46](#), la mayor parte del área de influencia no presenta conflictos por uso del suelo, dado que su uso es adecuado, y sólo 2,40 ha del área de estudio presenta conflictos de uso, considerando que la sobreutilización genera degradación de suelos por pérdida de productividad y degradación por erosión.

5.1.5 Hidrología

A continuación, se presenta el estudio hidrológico para las cuencas susceptibles a intervención dentro del proyecto "Variante Mutatá". En este capítulo se presenta el análisis espacial y temporal de las variables climáticas como la precipitación, evapotranspiración real, temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, brillo solar y radiación solar; también, se presentan las características morfológicas de las cuencas objeto de intervención, la estimación de los caudales medios, máximos y mínimos mediante implementación del balance hídrico a largo plazo, modelos

lluvia-escorrentía y análisis de frecuencia, adicionalmente, se calcula el caudal ambiental y la oferta hídrica considerando la metodología propuesta en la resolución 865 de 2004 y en el Estudio Nacional del Agua del año 2018.

El presente análisis se realizó basado en información secundaria de fuentes oficiales de la región, cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), datos hidrometeorológicos del instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), fotografías aéreas (ortofotos) e imágenes satelitales.

5.1.5.1 Identificación de sistemas lénticos y lóticos

En el área de influencia del medio abiótico se identificaron principalmente tres (3) drenajes principales los cuales drenan hacia el río Sucio y se denominan Drenaje 1, Drenaje 2 y Drenaje 3 (Figura 5.47), el río Mutatá y el río Sucio se tuvieron en consideración para la caracterización y entendimiento del régimen hidrológico de la región de análisis. Dentro del área de influencia únicamente se presentan cuerpos lénticos artificiales o modificados de forma antrópica. En la Tabla 5.50 se presentan los sistemas identificados en el área de influencia abiótica del proyecto.

Tabla 5.50 Sistemas lénticos y lóticos – área de influencia abiótica

Tipo de sistema	Nombre	Numero de cuerpos de agua
Lótico	Drenaje 1	3
	Drenaje 2 (Quebrada Daira)	
	Drenaje 3	
Léntico	Jaguey	3
	Laguna (Vestigios laguna de oxidación)	
	Otros cuerpos de agua (Cuerpo de agua artificial)	

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.47 Identificación de sistemas lénticos y lóticos
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.2 Codificación y nomenclatura de cuencas

Para la delimitación e identificación de las cuencas hidrográficas en la zona de interés, se utilizó información cartográfica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en escala 1:25.000 de las planchas 103IC, 103ID, 103IIIA, 103IIIB, 103IIIC y 103IIID y se empleó un Modelo Digital de Elevación (DEM) de resolución espacial de 12.5 m de píxel descargado del servidor geográfico ASF (Alaska Satellite Facility), como también información primaria de mayor detalle levantada in situ con resolución de 0,3 m de píxel.

Para la delimitación de las cuencas se tuvo en cuenta los drenajes cercanos a la vía, susceptibles a ser intervenidos, donde las de mayor importancia corresponden a los drenajes denominados como Drenaje 1, Drenaje 2 y Drenaje 3. Adicionalmente se presentan en la zonificación hidrográfica las cuencas del río Mutatá y río Sucio, cuencas principales en donde vierten las microcuencas de análisis en el área de influencia (Figura 5.48).

Para la codificación de las cuencas mencionadas, se tomó en cuenta la zonificación y codificación de unidades hidrográficas de Colombia, como las codificaciones de los niveles subsiguientes establecidas en los Planes de Ordenación y manejo de Cuenca Hidrográfica (POMCA) del río Sucio (Tabla 5.51).

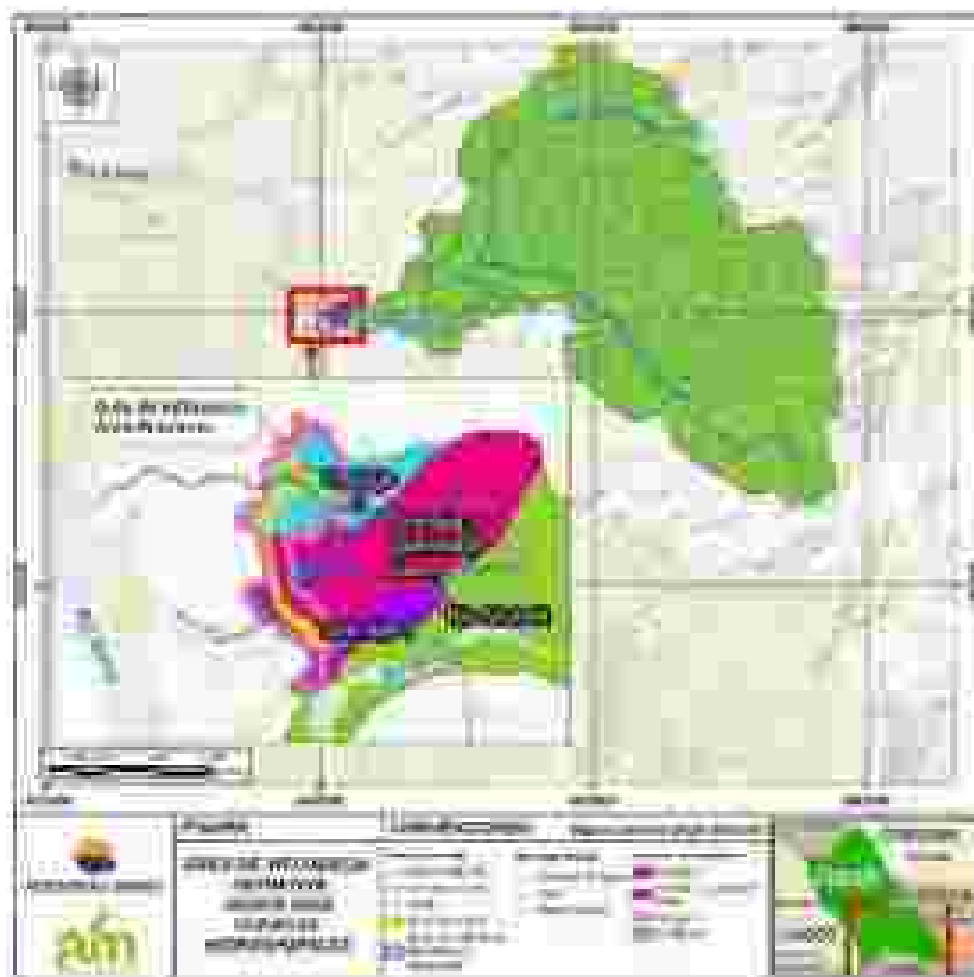


Figura 5.48 Delimitación de cuencas hidrográficas

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.51. Codificación de cuencas hidrográficas

ID	Nombre Cuenca	Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Subzona hidrográfica	NSS1	NSS2	Observaciones
0	Río Sucio Medio y Bajo - NSS	1	11	1111	111102	N/A	Cuenca del río Sucio en su tramo medio y bajo
1	Río Mutatá					11110200*	Cuenca delimitada hasta la confluencia con el río sucio.
2	Drenaje 1					11110297*	Microcuenca delimitada

ID	Nombre Cuenca	Área hidrográfica	Zona hidrográfica	Subzona hidrográfica	NSS1	NSS2	Observaciones
							aproximadamente 200 metros aguas debajo de la intervención
3	Drenaje 2 (Quebrada Daira)					11110298*	Microcuenca delimitada aproximadamente 200 metros aguas debajo de la intervención
4	Drenaje 3					11110299*	Microcuenca delimitada aproximadamente 200 metros aguas debajo de la intervención

*Para el nivel subsiguiente 2 la corporación autónoma regional encargada, en este caso Corpourabá no presenta codificación para los niveles subsiguientes 2 presentes en la cuenca Río Sucio Medio y Bajo – NSS (111102), por lo tanto, se opta por utilizar los valores 00, 97, 98 y 99.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025. a partir del POMCA del Río Sucio.

5.1.5.3 Identificación de datos hidroclimáticos

Para el desarrollo del estudio hidrológico se seleccionaron las estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales (IDEAM) cercanas a la zona, que disponían información de más de 15 años y que incluyeran registros de los últimos 10 años. Además, se tuvieron en cuenta criterios de consistencia y homogeneidad que serán evaluados en el siguiente numeral.

Si bien el presente análisis se realiza a una escala temporal amplia, con registros históricos de hasta 57 años, su propósito principal es la estimación del balance hídrico a largo plazo y la caracterización del comportamiento general de las series de precipitación de las estaciones analizadas. Este enfoque permite identificar tendencias, calcular promedios multianuales y evaluar la variabilidad climática en escalas extendidas, lo cual es fundamental para entender la dinámica hidrológica regional en el contexto del proyecto.

El enfoque adoptado es principalmente hidrológico, orientado a la determinación de caudales máximos, mínimos y medios, así como del caudal ambiental requerido para la conservación de los ecosistemas acuáticos. Por esta razón, se ha considerado una extensión temporal superior en el análisis de las series históricas, lo que permite obtener estimaciones más robustas y representativas del comportamiento hidrológico de las fuentes superficiales evaluadas.

No obstante, para obtener información más actualizada y específica sobre las condiciones climáticas recientes en la zona de estudio, se recomienda consultar el capítulo 5.1.10 del componente de atmósfera, el cual presenta datos correspondientes a los últimos cinco (5) años. Esta sección complementa el análisis histórico al ofrecer una visión más precisa de las condiciones actuales, relevantes para la evaluación de impactos ambientales y la formulación de medidas de manejo adaptadas al contexto climático reciente.

En la [Figura 5.49](#) se presenta la localización de las cuencas analizadas y en la [Tabla 5.52](#) se muestran las características de las estaciones utilizadas para el análisis hidrológico.

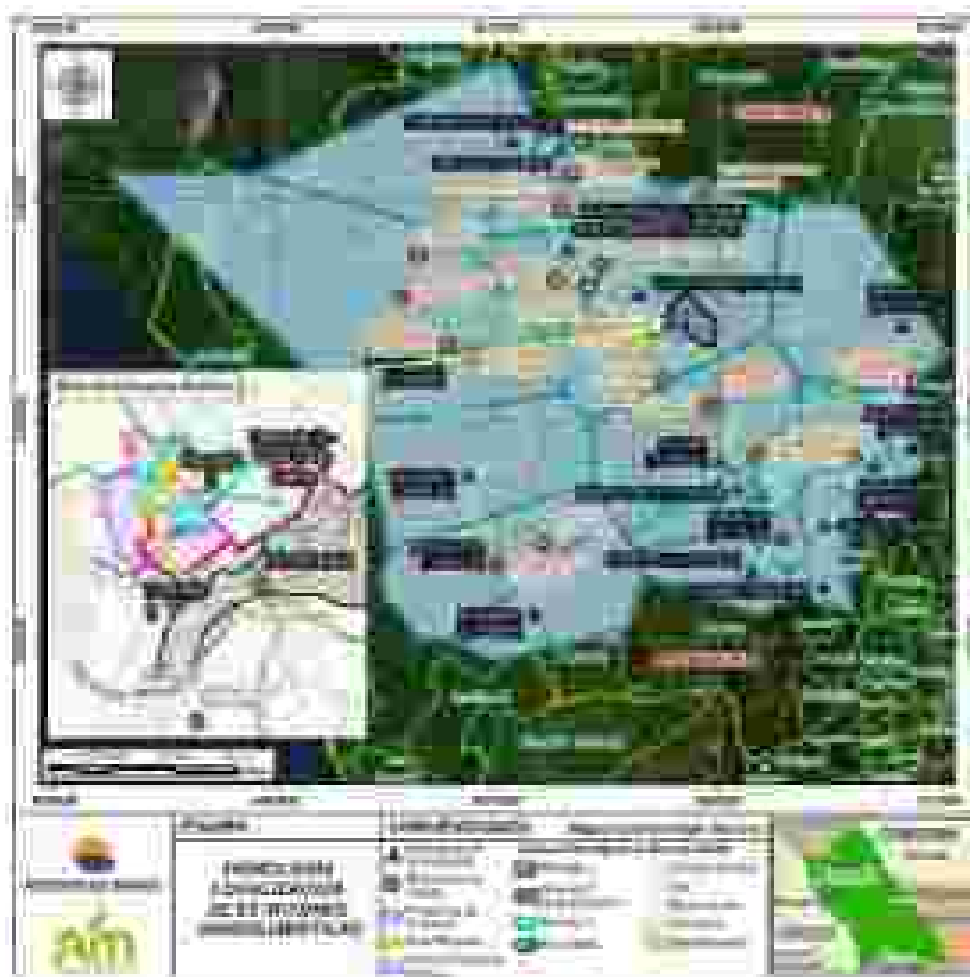


Figura 5.49 Localización de estaciones hidroclimáticas
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.52 Estaciones hidroclimáticas analizadas

Código	Nombre	Categoría	Coordenadas Este [m]	Coordenadas Norte [m]	Elevación [m.s.n.m.]	Periodo Evaluado
26230240	ABERTURA LA	PM	4.701.196,40	2.321.307,88	2.550	1993-2024
11110020	ABRIAQUI	PG	4.660.087,27	2.293.040,37	1.920	1975-2024
12010030	BARRANQUILLITA	PM	4.591.734,67	2.396.214,29	18	1974-2024
11080010	BELLAVISTA	CO	4.570.310,49	2.284.442,30	18	1969-2024
11060010	BUCHADO	PM	4.581.950,31	2.268.941,56	18	1969-2024
11070030	CLARITA LA	PM	4.650.763,54	2.281.693,97	2.300	1978-2024
11100020	DOMINGODO	PM	4.554.875,07	2.353.338,29	11	1969-2024
11110030	FUEMIA	PM	4.640.625,39	2.317.004,25	1.046	1977-2023

Código	Nombre	Categoría	Coordenadas Este [m]	Coordenadas Norte [m]	Elevación [m.s.n.m.]	Periodo Evaluado
26220090	GIRALDO	PM	4.673.643,34	2.297.129,26	1.930	1970- 2024
26220100	GRANJA LA	PM	4.698.190,14	2.359.983,83	1.028	1975- 2024
26210130	GUASABRA	PM	4.673.180,72	2.277.561,98	2.182	1975- 2024
11115040	MUSINGA AUT	CO	4.645.985,05	2.308.123,21	1.396	1985- 2024
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	PM	4.653.687,53	2.306.452,83	1.370	1969- 2024
12010170	NUEVO ORIENTE	PG	4.592.786,27	2.384.061,31	23	1991- 2023
11090010	OPOGADO	PM	4.560.867,22	2.312.580,83	50	1977- 2024
26230200	SABANALARGA	PG	4.689.003,09	2.315.382,64	910	1975- 2024
12010010	TORMENTO EL	PM	4.574.771,94	2.418.113,39	20	1975- 2021
12010090	TRIGANA	PM	4.590.591,15	2.415.898,72	21	1977- 2024
12015010	VILLARTEAGA	CO	4.615.168,16	2.369.966,45	132	1972- 2024
CO: Climática Ordinaria; CP: Climática Principal; PM: Pluviométrica, PG: Pluviográfica						

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.4 Análisis de calidad y consistencia de la información

En esta sección se presenta las metodologías utilizadas para el análisis de calidad de datos de las series hidroclimatológicas. El análisis de calidad y consistencia de la información se realizó considerando los siguientes elementos: análisis gráfico exploratorio, identificación de valores anómalos, identificación de tendencias y homogeneidad en las series utilizadas. En el Anexo_C5_1/5_1_5_Hidrologia/Datos_hidroclimaticos/Precipitación, se presenta un análisis más detallado de las series de precipitación descritas a continuación.

5.1.5.4.1 Análisis gráfico

En el presente análisis se muestran las series de tiempo diarias, graficas de masa simple y diagramas de caja o bigotes de los datos de las estaciones de precipitación de la zona de interés, esto con el propósito de detectar anomalías, datos faltantes o cambios en la media que puedan presentarse en los registros. De la Figura 5.50 a la Figura 5.68 se presentan dichas graficas mencionadas.

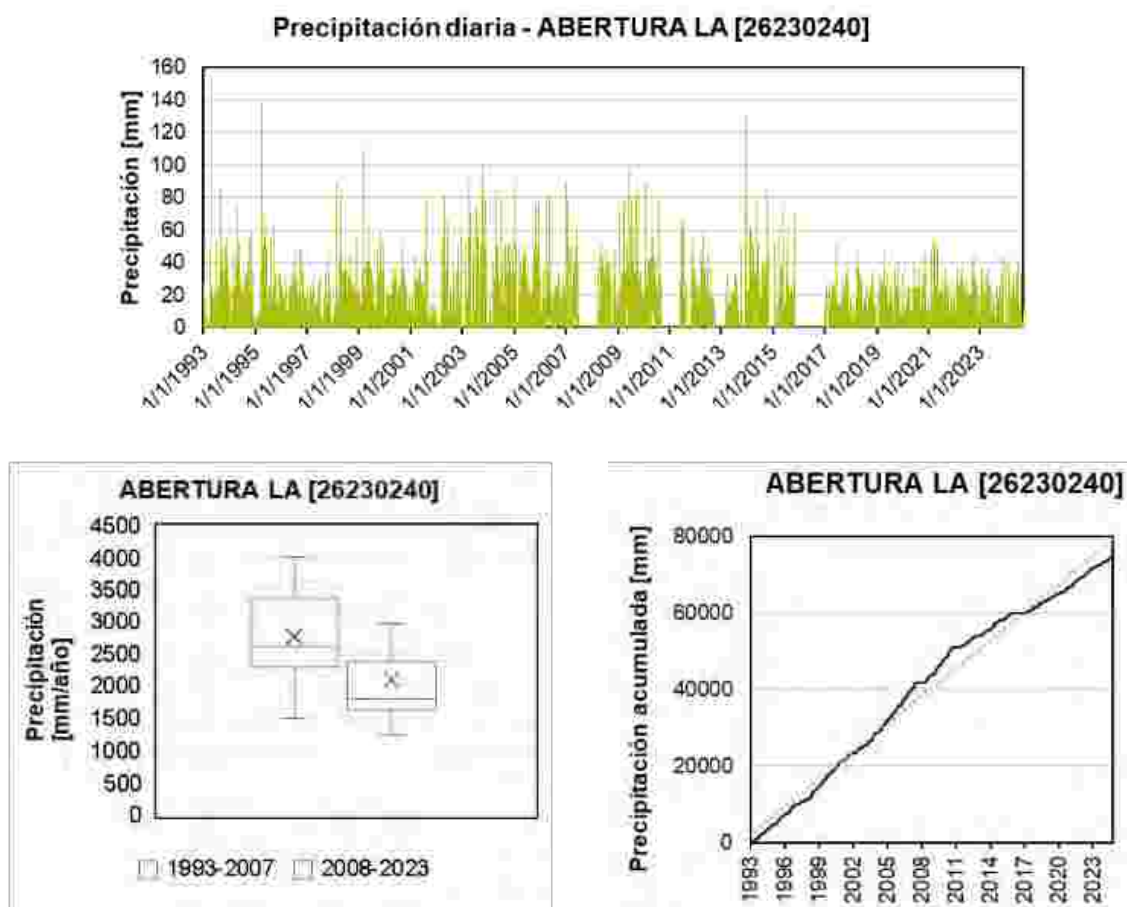
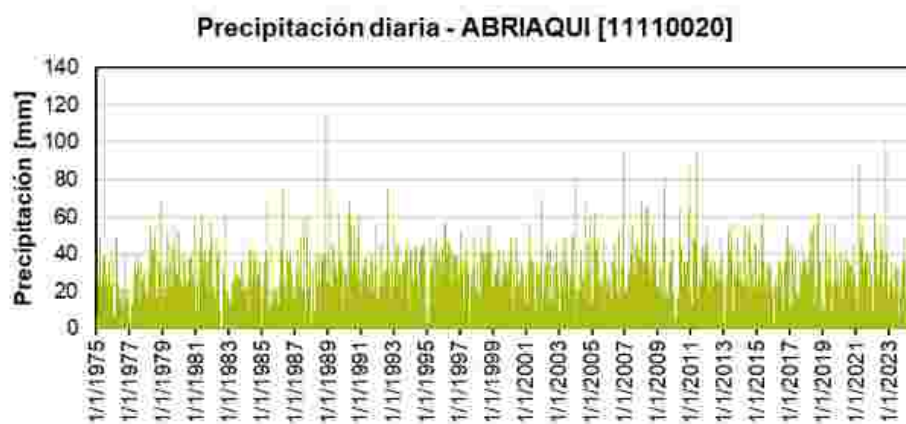


Figura 5.50 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación ABERTURA LA [26230240]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



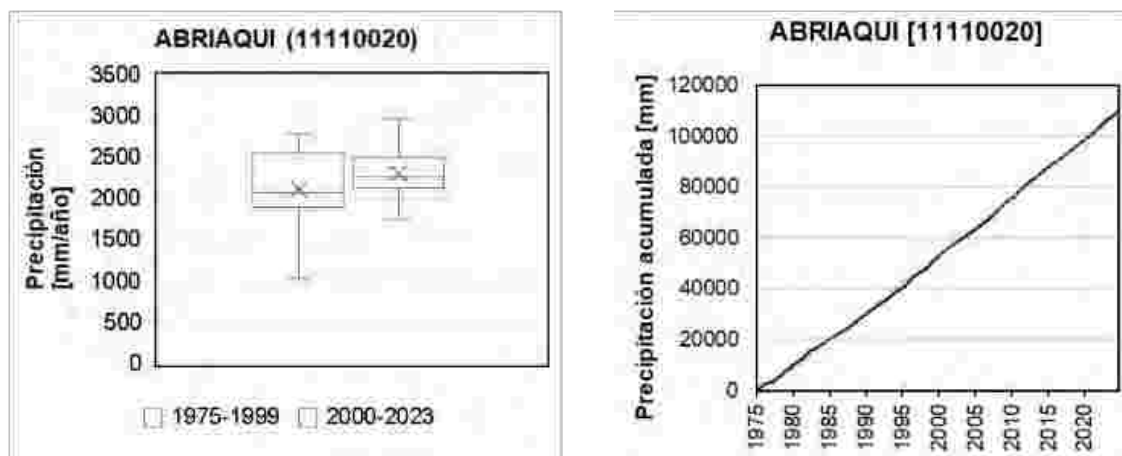


Figura 5.51 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación ABRIAQUI [11110020]
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

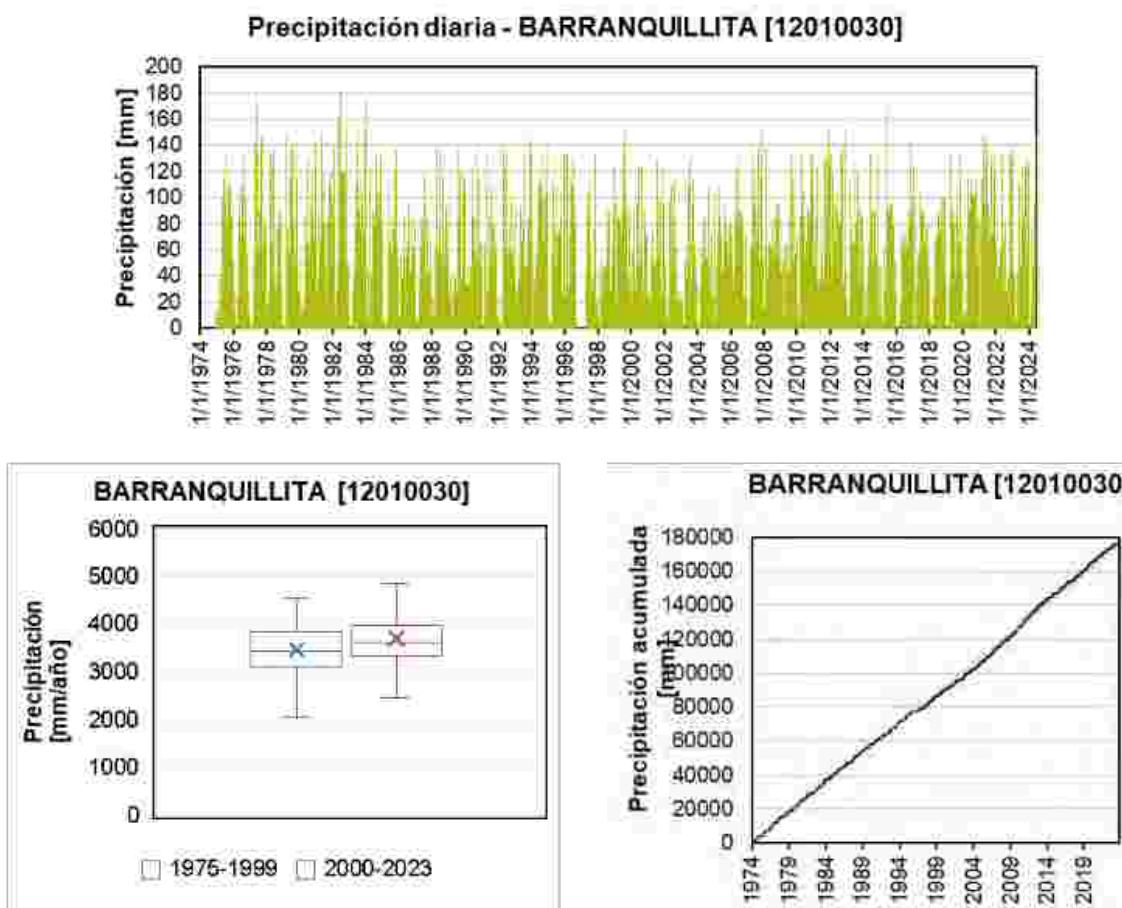


Figura 5.52 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación BARRANQUILLITA
[12010030]
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

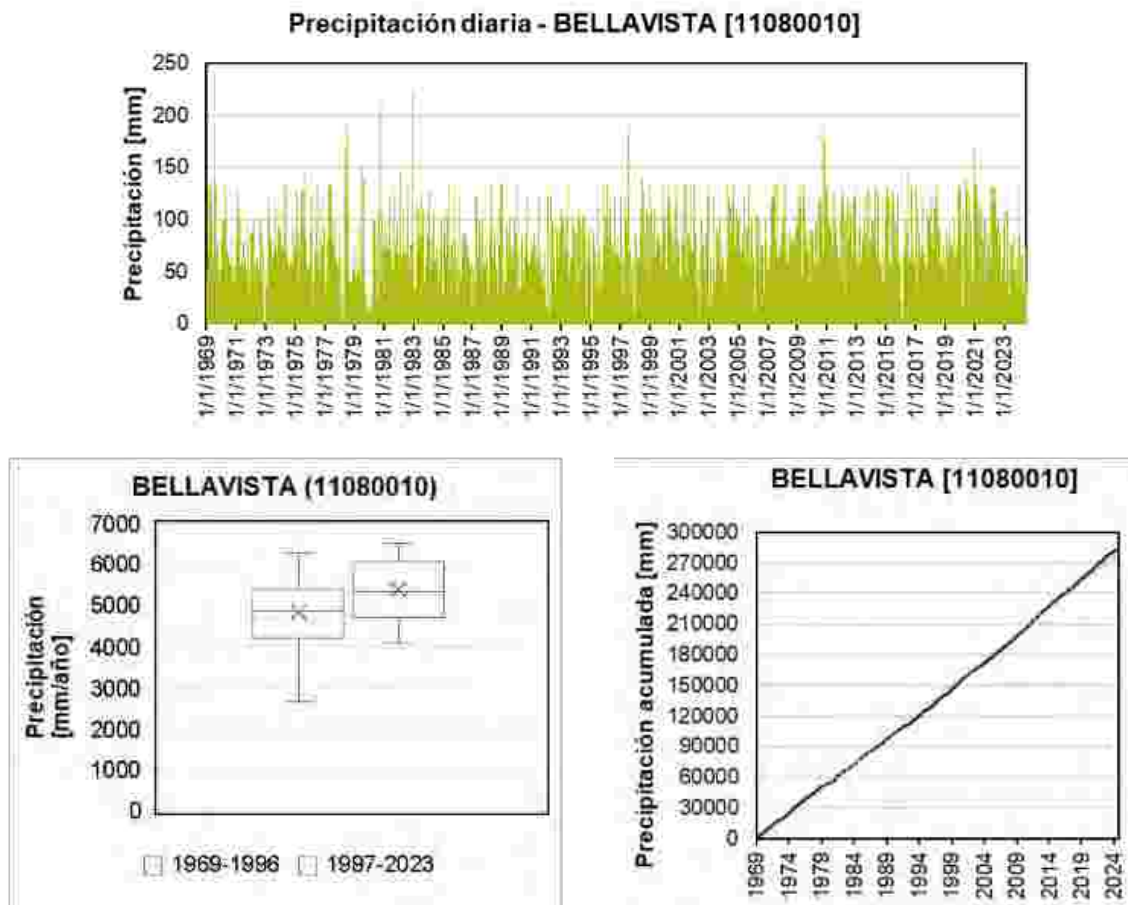
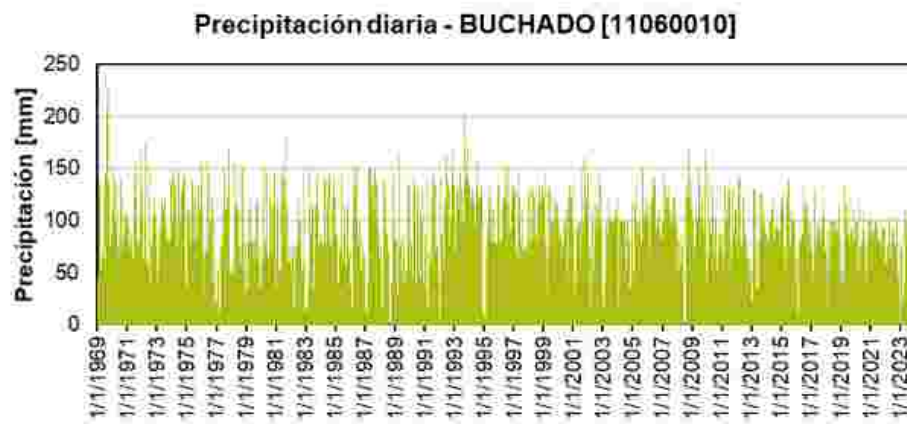


Figura 5.53 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación BELLAVISTA [11080010]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



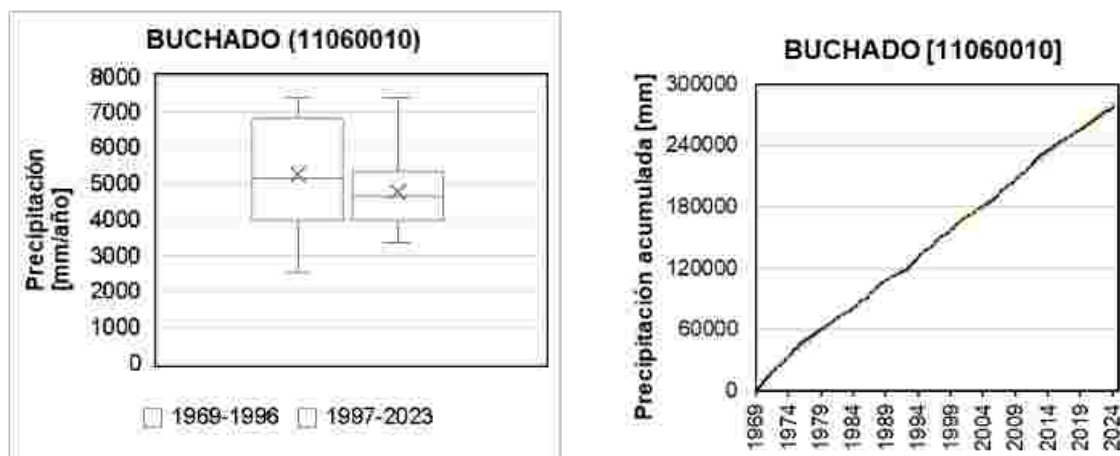


Figura 5.54 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación BUCHADO [11060010]
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

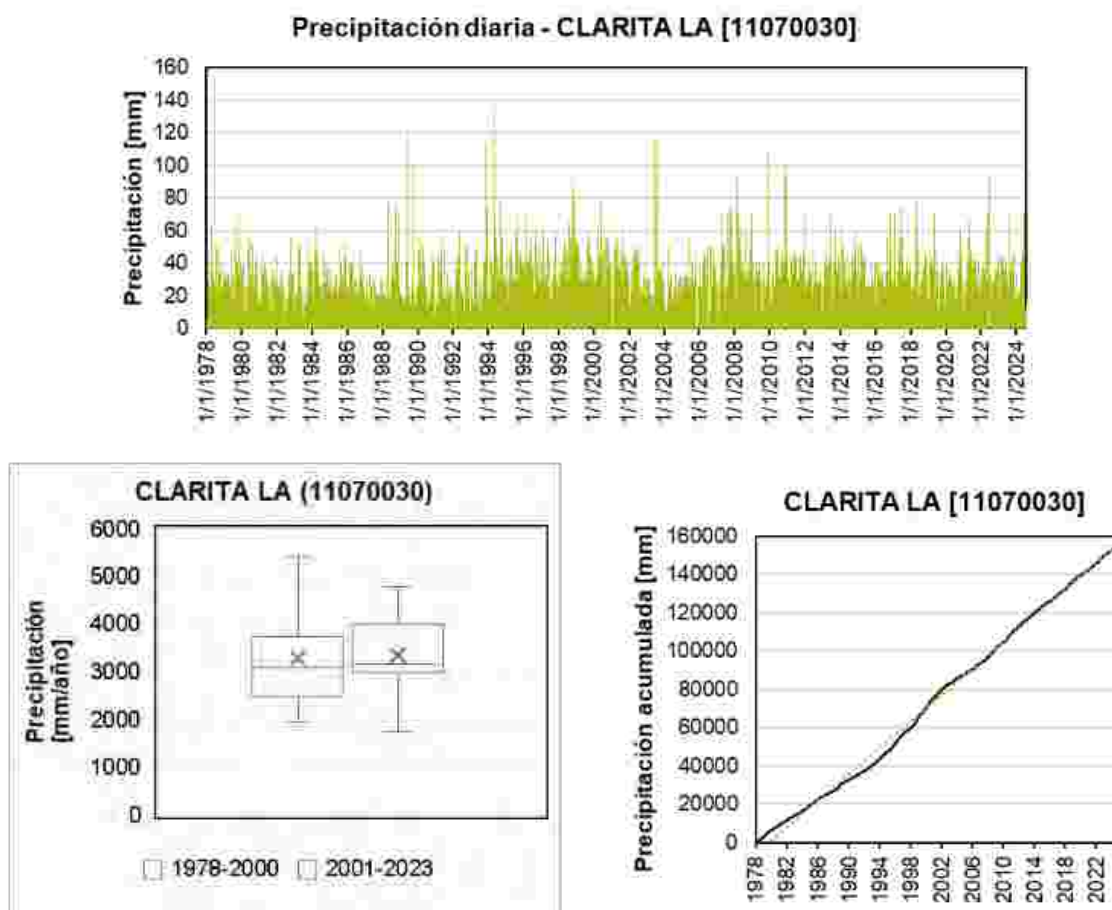


Figura 5.55 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación CLARITA LA [11070030]
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

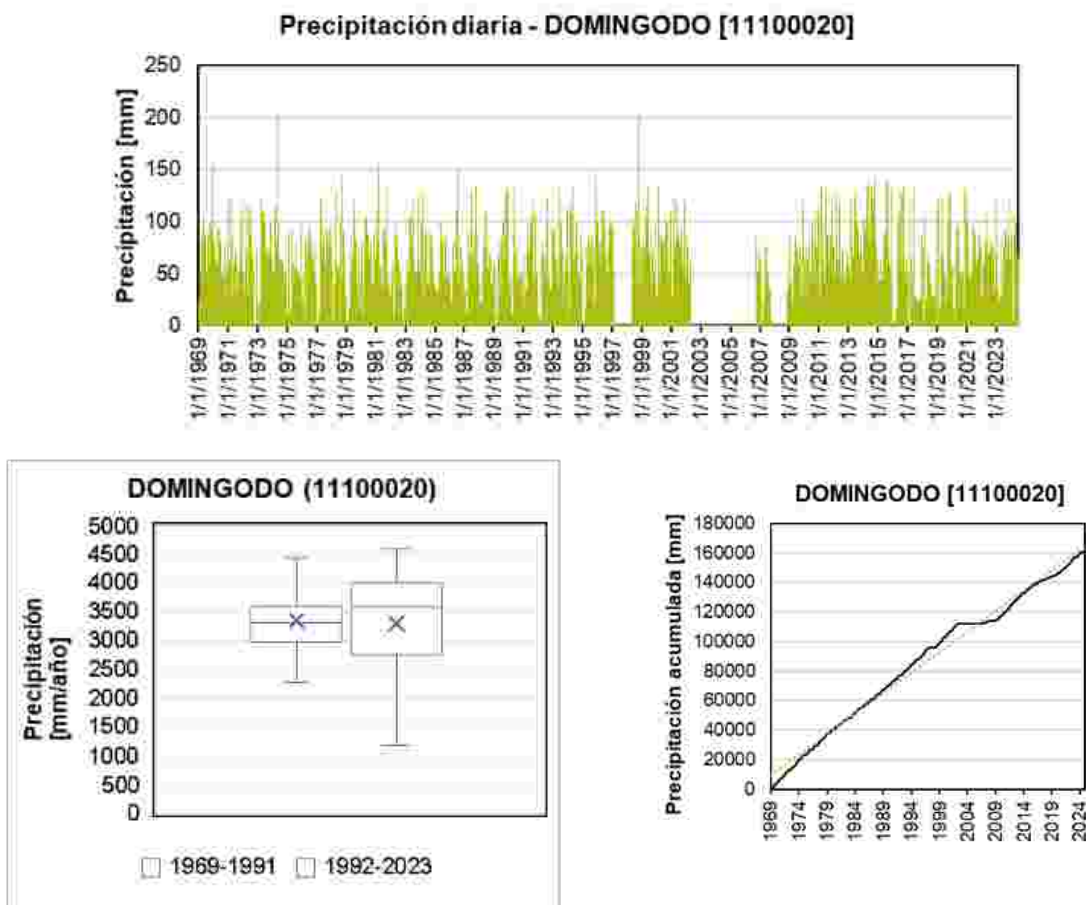
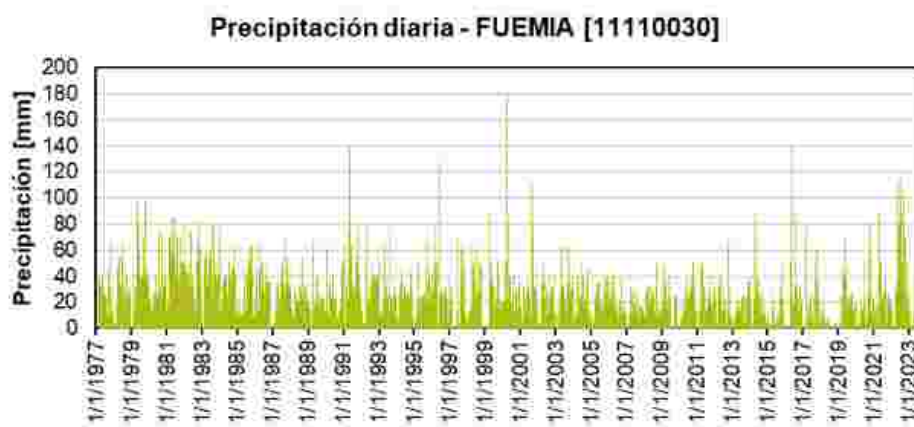


Figura 5.56 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación DOMINGODO [11100020]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



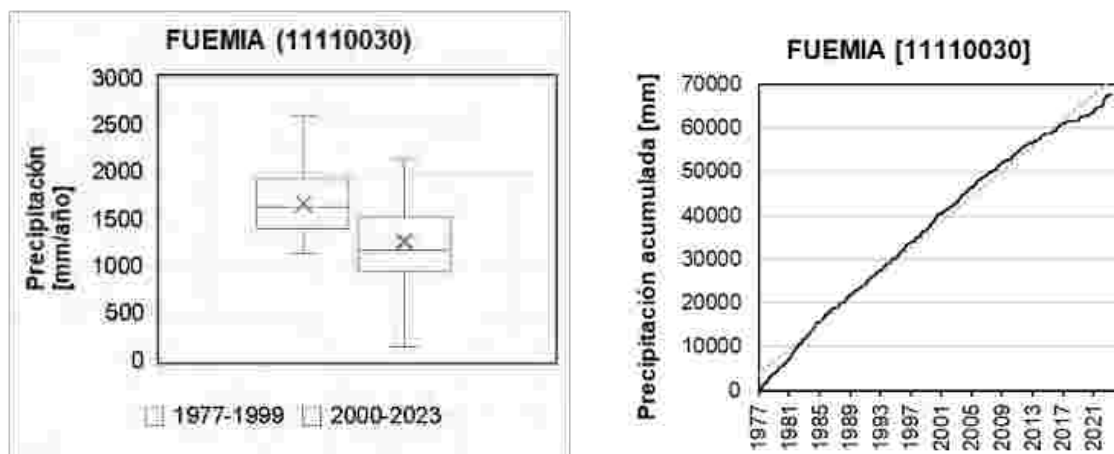


Figura 5.57 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación FUEMIA [11110030]
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

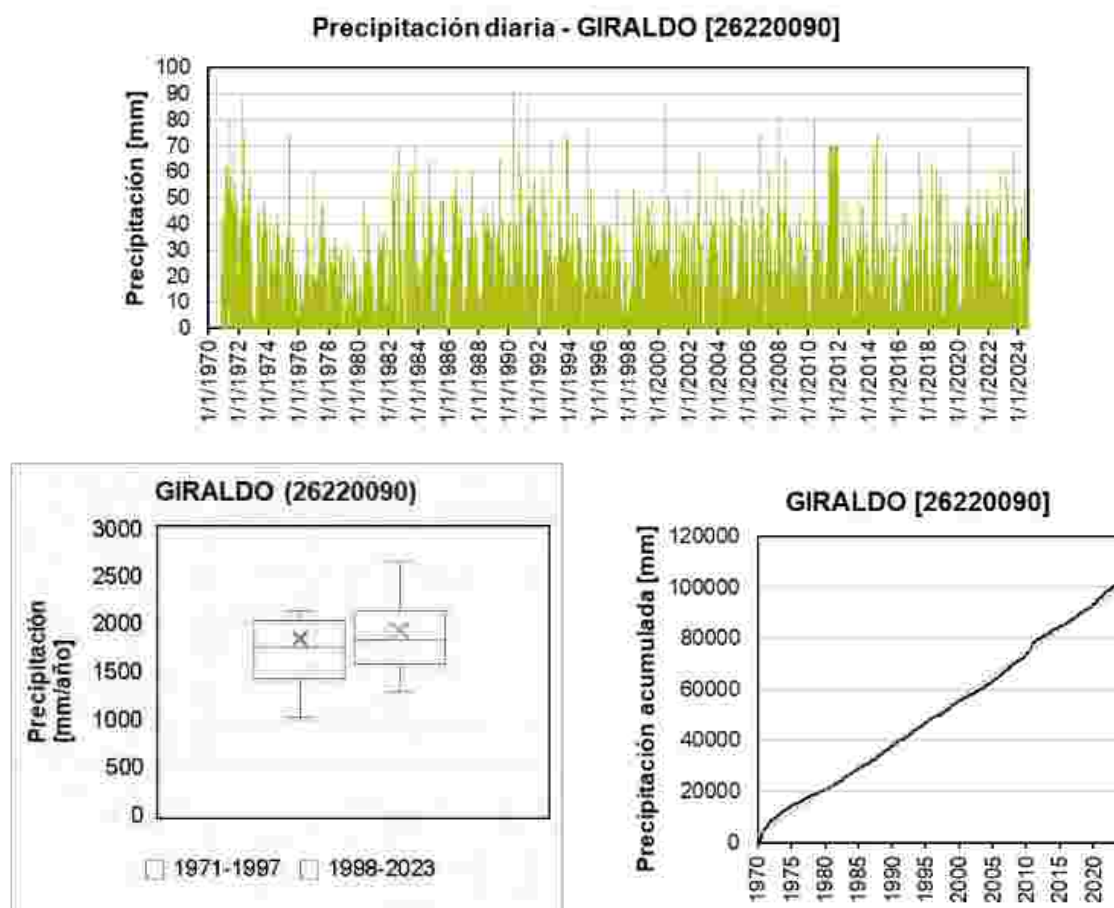


Figura 5.58 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación GIRALDO [26220090]
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

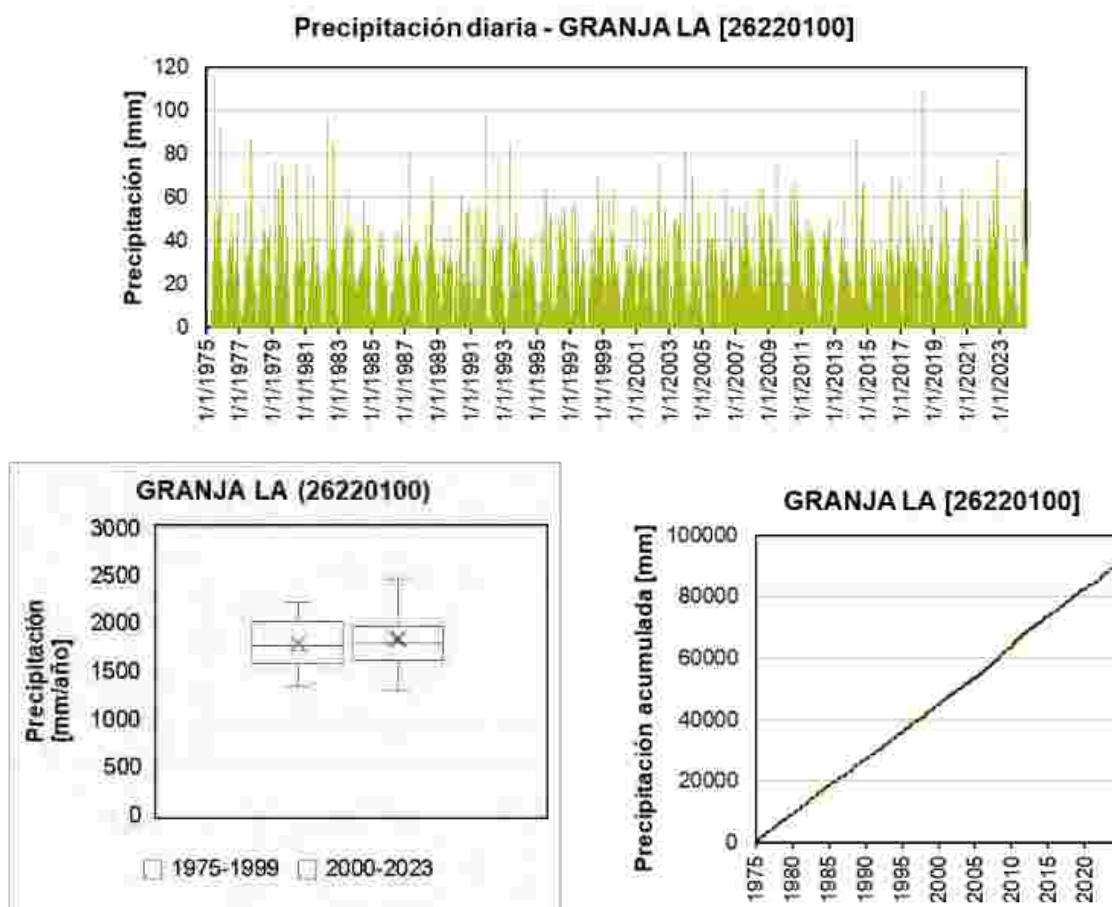
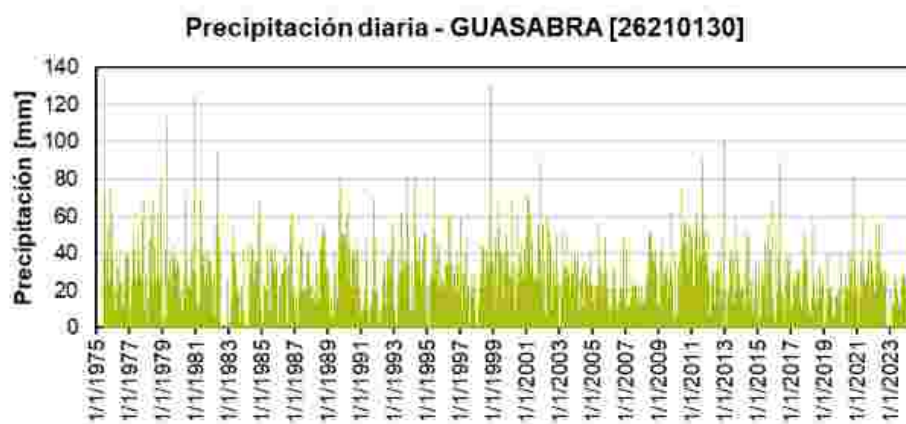


Figura 5.59 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación GRANJA LA [26220100]
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



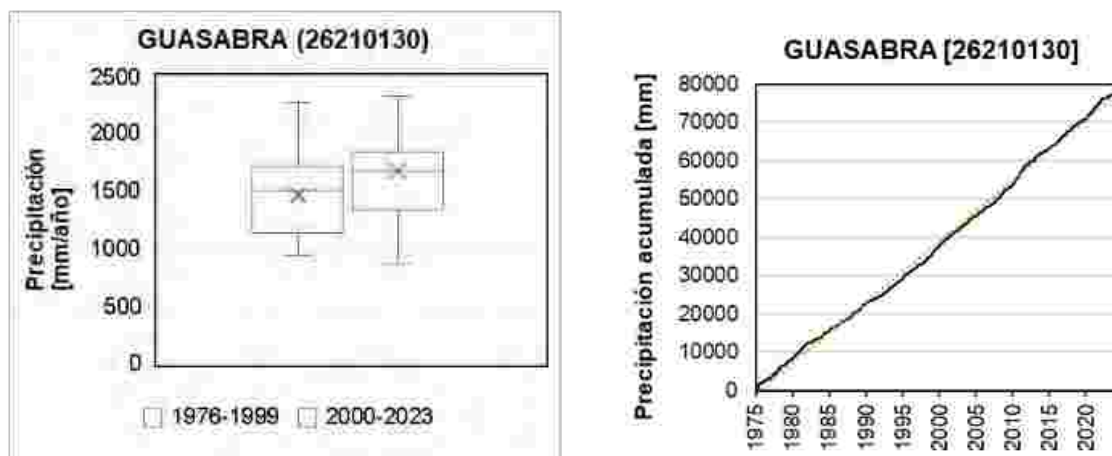


Figura 5.60 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación GUASABRA [26210130]
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

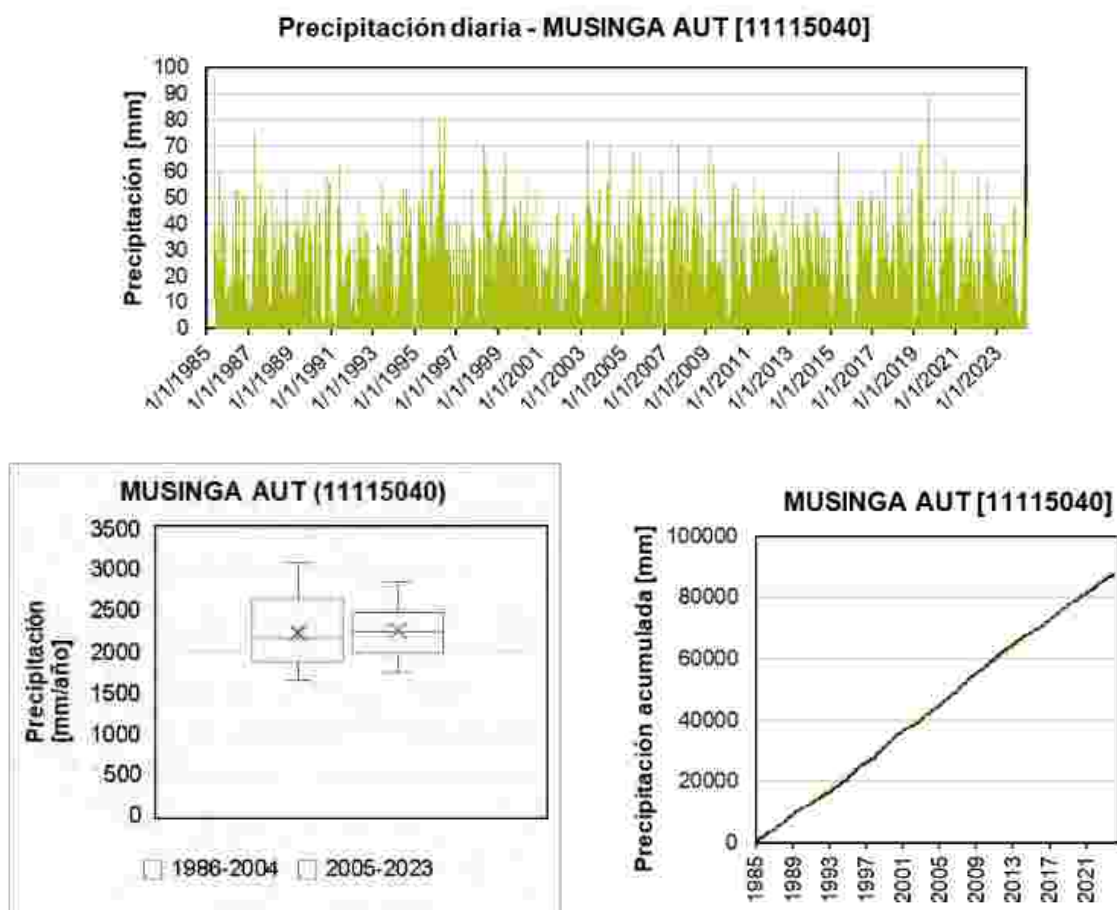


Figura 5.61 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación MUSINGA AUT
[11115040]
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

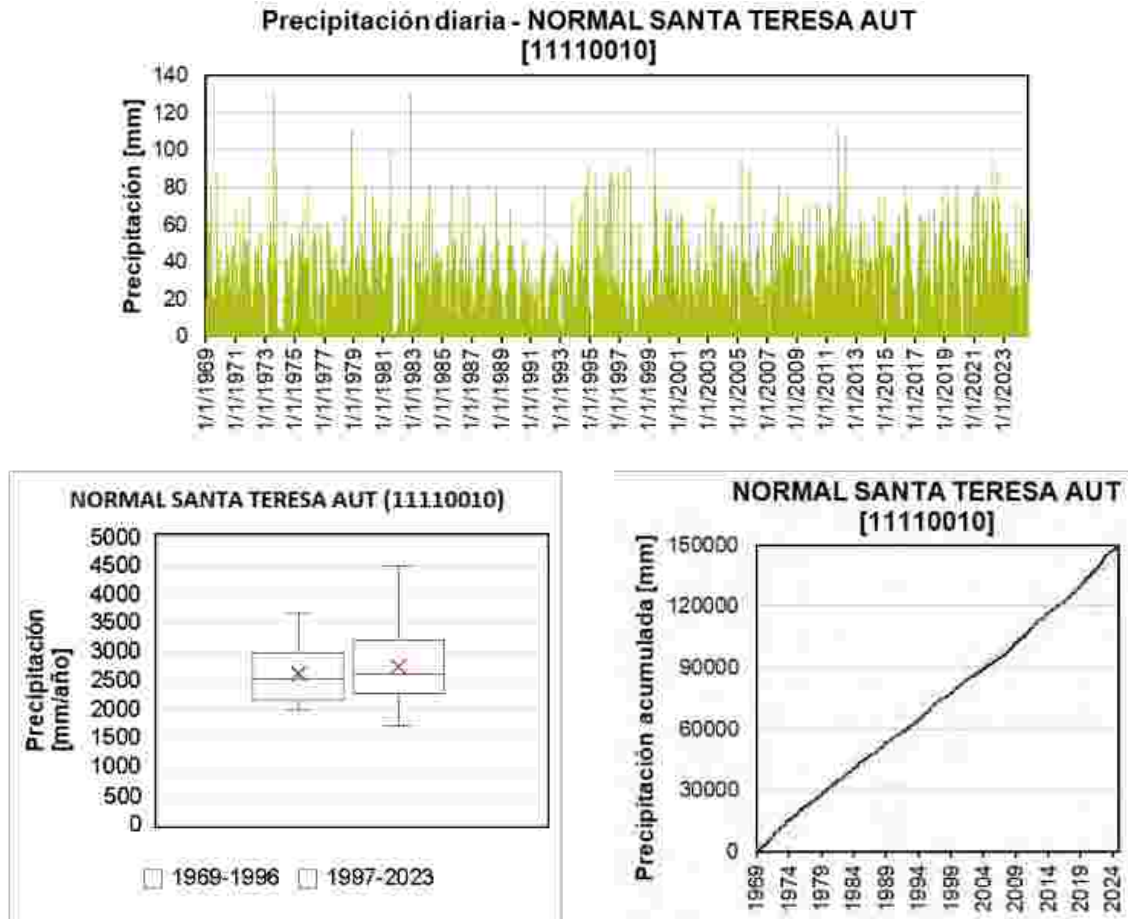
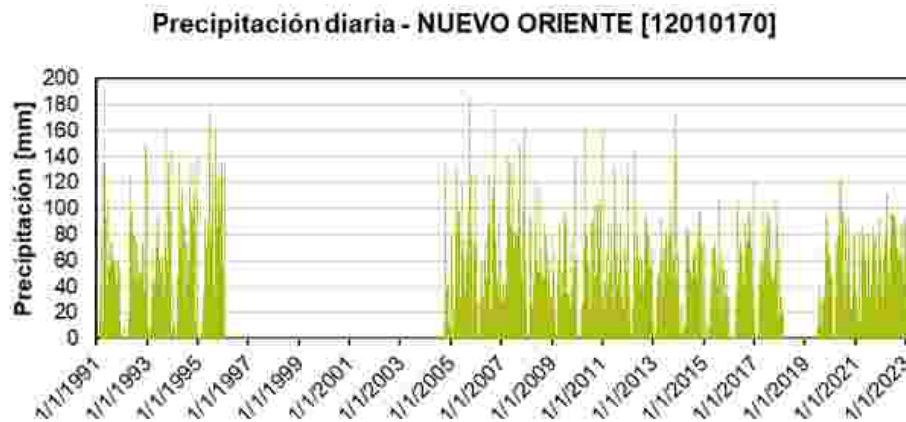


Figura 5.62 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación NORMAL SANTA TERESA AUT [11110010]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



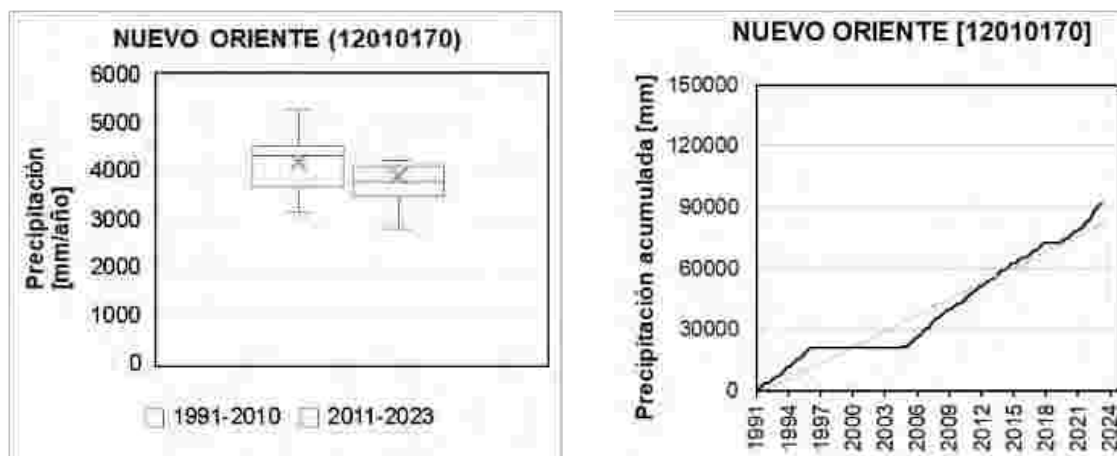


Figura 5.63 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación NUEVO ORIENTE [12010170]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

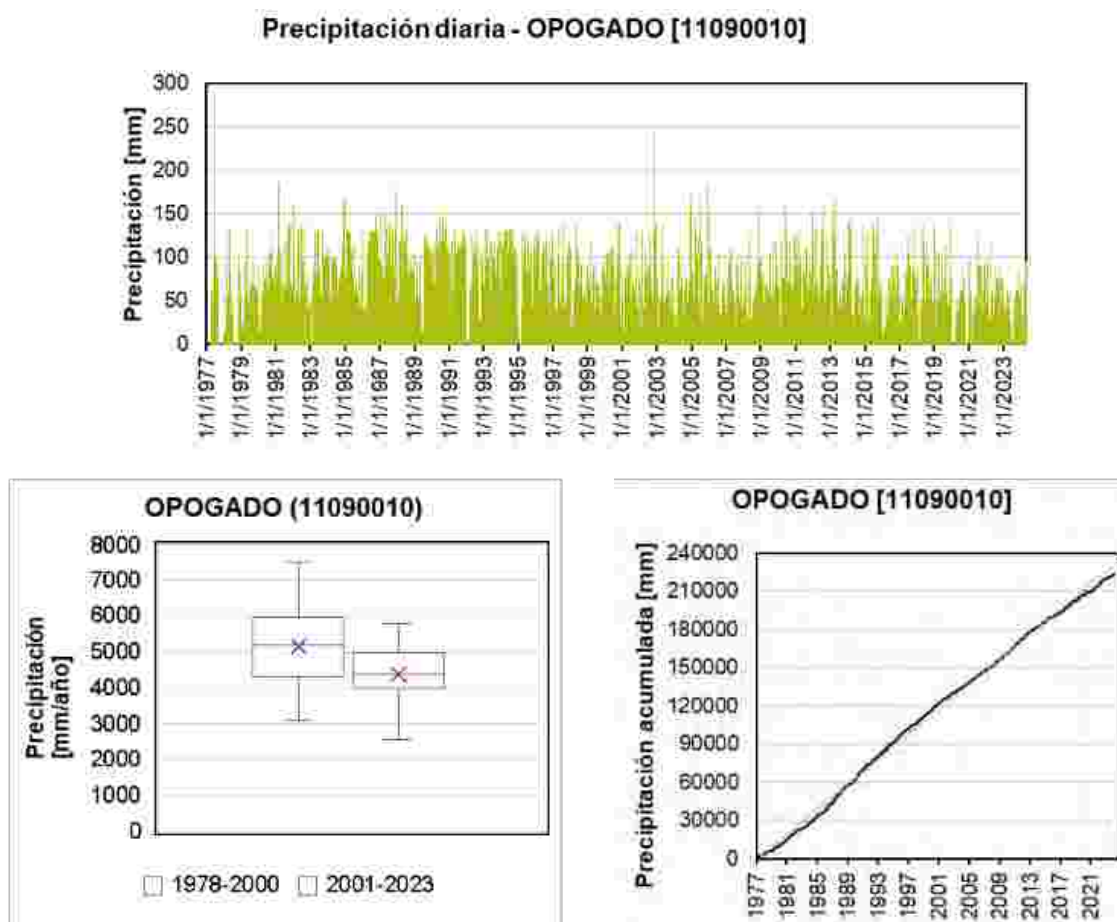


Figura 5.64 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación OPOGADO [11090010]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

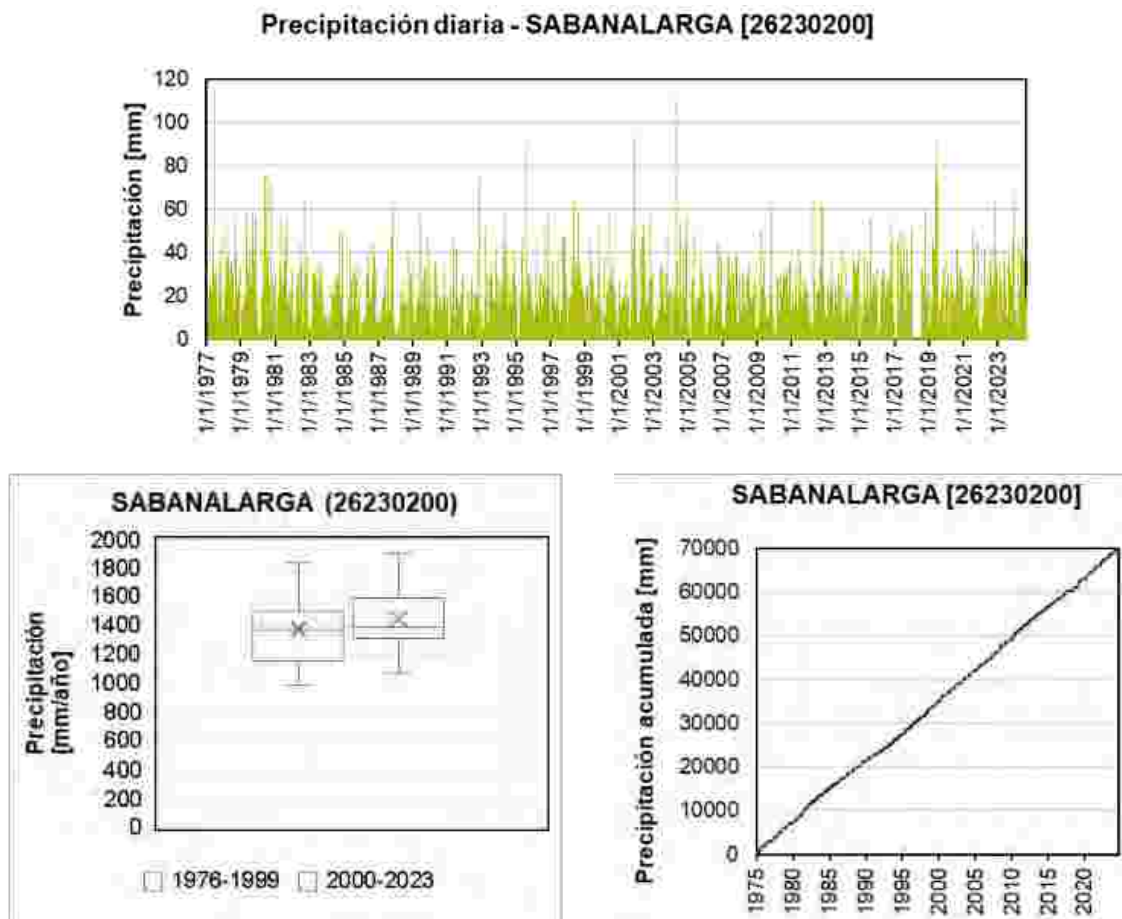
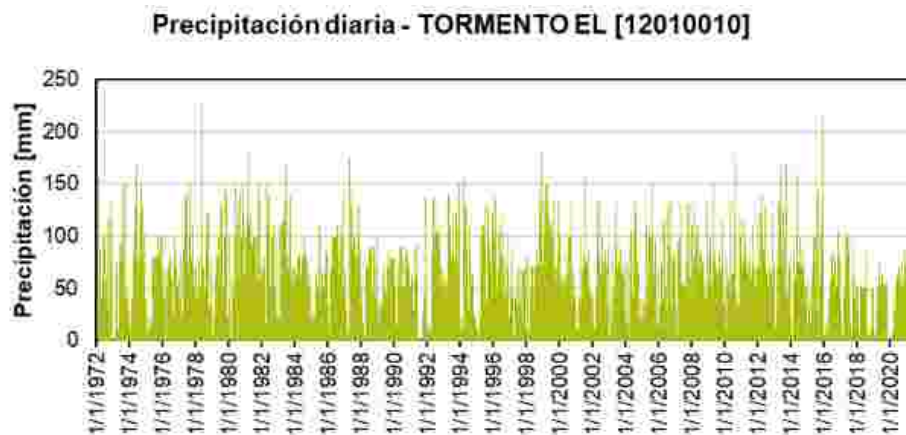


Figura 5.65 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación SABANALARGA [26230200]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



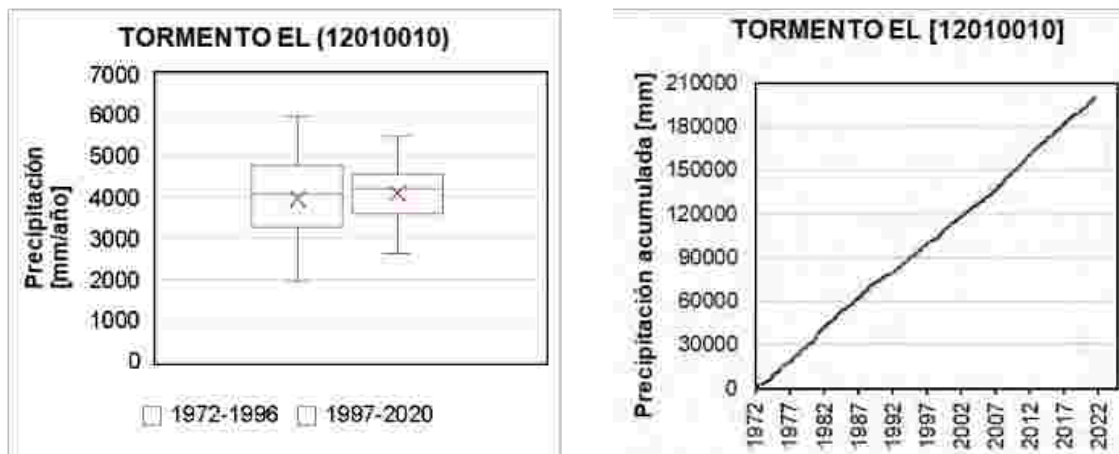


Figura 5.66 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación TORMENTO EL [12010010]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

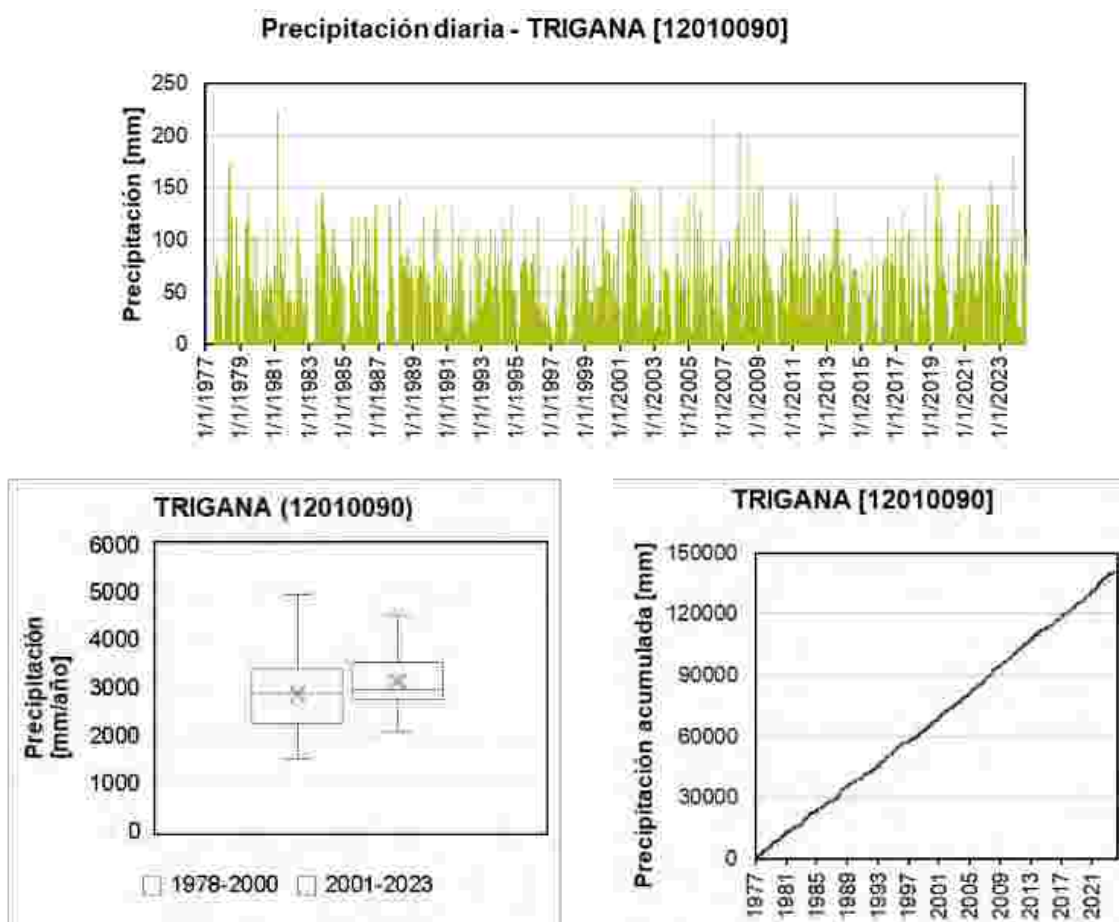


Figura 5.67 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación TRIGANA [12010090]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

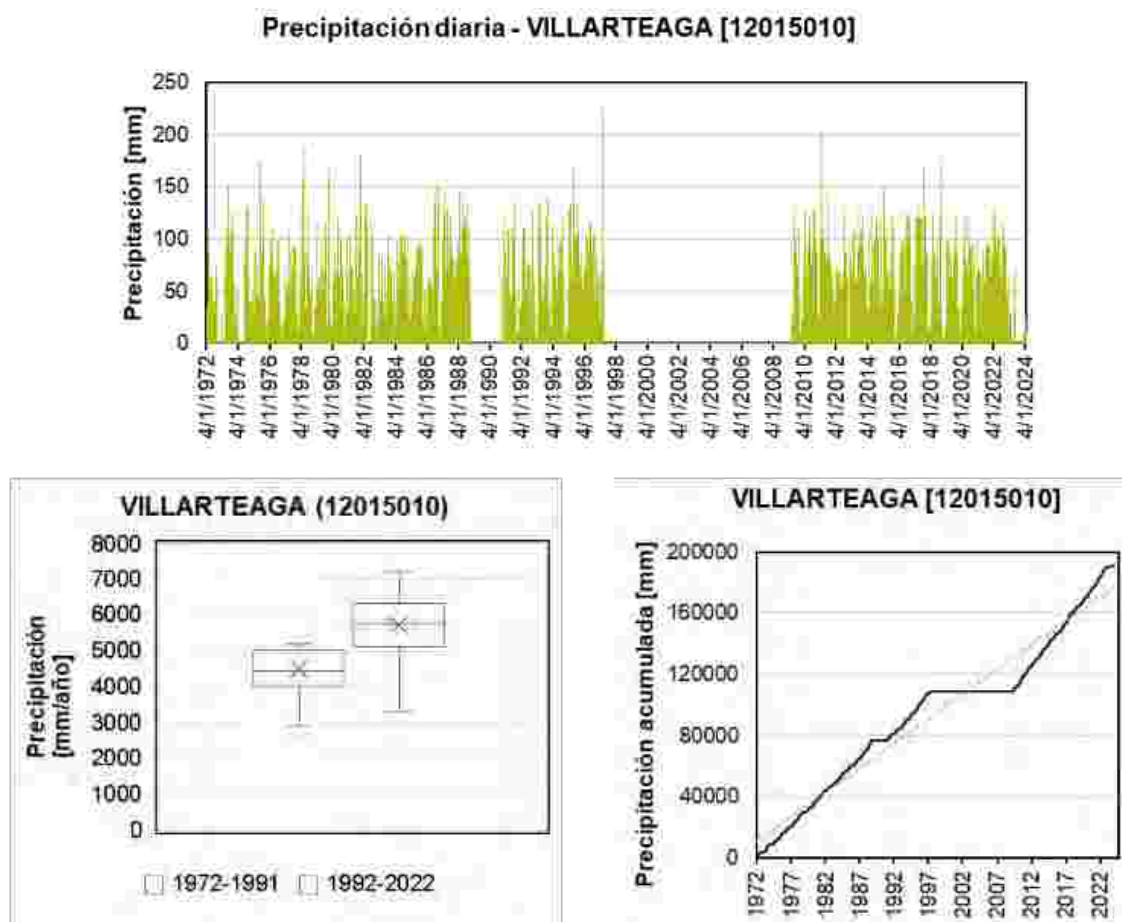


Figura 5.68 Análisis exploratorio de la serie de tiempo de la estación VILLARTEAGA [12015010]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.4.2 Análisis de datos anómalos

En la estadística, un valor atípico es un dato que difiere completamente de los otros datos en la muestra. Los valores atípicos en un conjunto de datos pueden alterar a los estadísticos sobre las anomalías experimentales o los errores en las mediciones tomadas, por esto pueden ser descartados del conjunto de datos. Al trabajar con datos que son producto de algún proceso de medición o conteo y de la captura de estos, generalmente se producen datos “extraños” que pueden ser resultado de errores de captura, o de operaciones aritméticas de los encargados de estos.

A los valores extremos se les llama “outliers”, los cuales son sospechosos de no pertenecer al conjunto de datos de donde proceden, o ser producto de sucesos extraños. Se pueden tener outliers moderados y extremos. La estadística proporciona criterios para detectar estos valores, e inclusive diferentes paquetes estadísticos especializados proporcionan rutinas para detectarlos.

El procedimiento consiste en determinar los límites o extremos de la muestra, para evaluar los valores que se encuentren por fuera del intervalo, estos corresponderían a outliers y posteriormente analizar si deben ser conservados o retirados de la muestra. El análisis para las series mensuales de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones de precipitación evaluará los outliers extremos, con el propósito de retirar los valores que se alejen considerablemente del comportamiento promedio de los datos.

Existen diferentes procedimientos para determinar el intervalo anteriormente mencionado, para este caso se utilizó el método del test de Tukey, el cual determina los límites mediante la siguiente expresión:

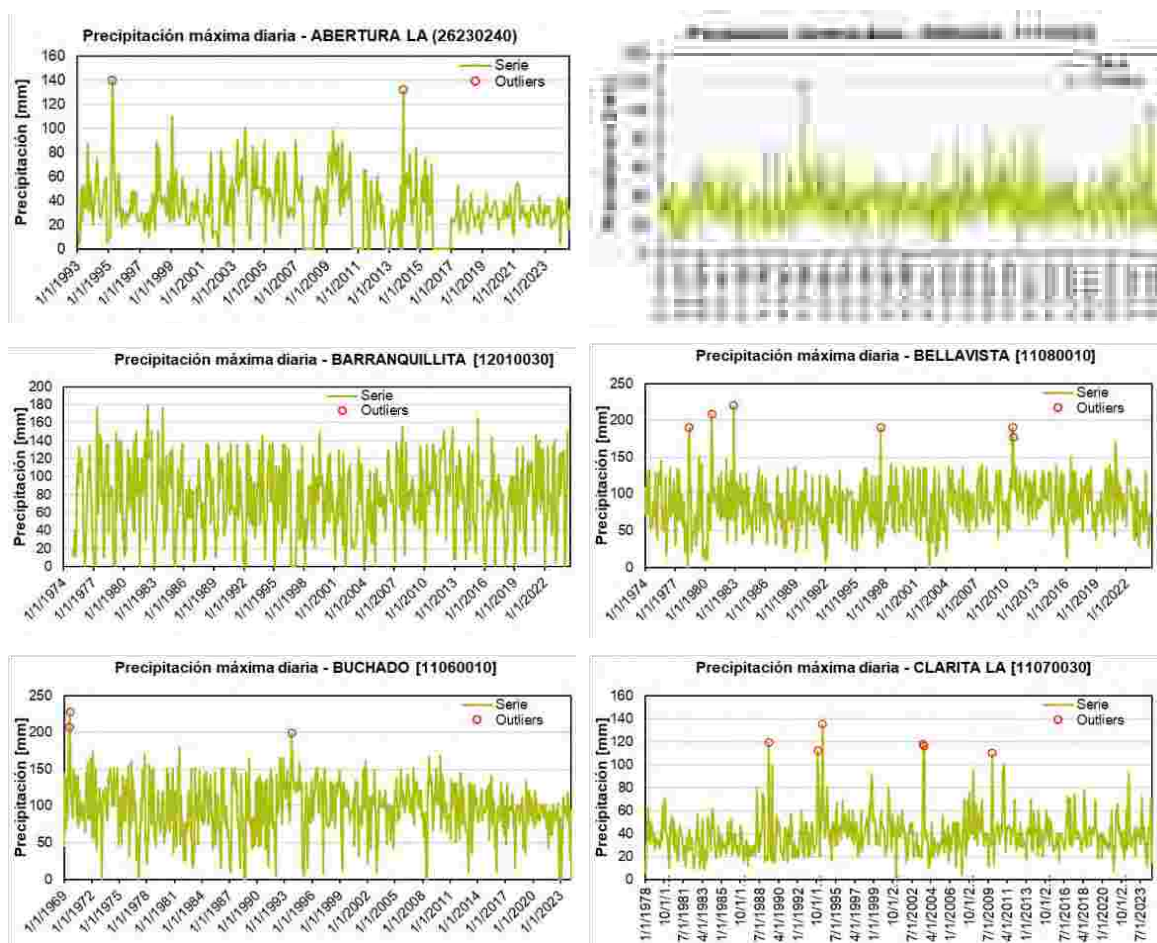
$$LimInf = Q_1 - k(Q_3 - Q_1)$$

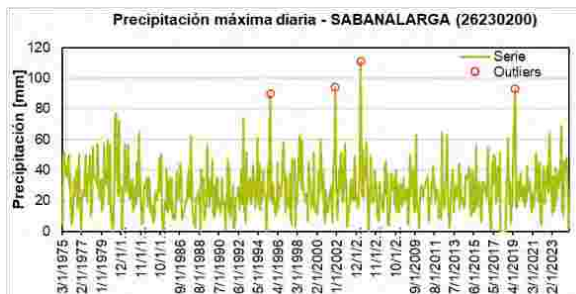
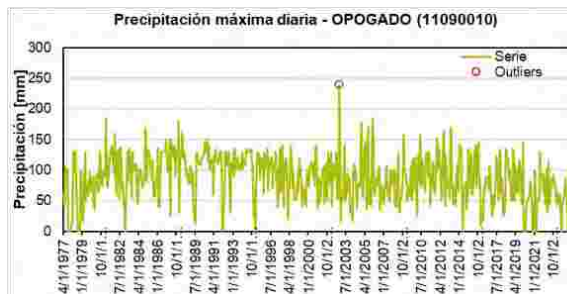
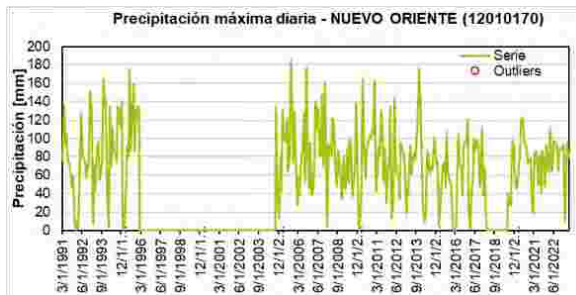
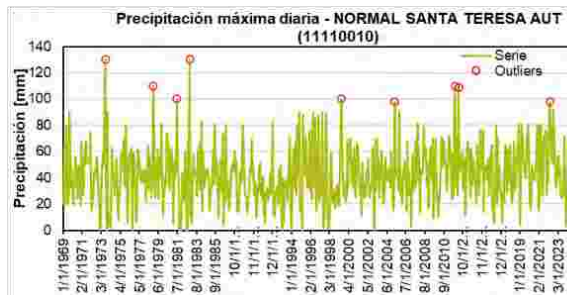
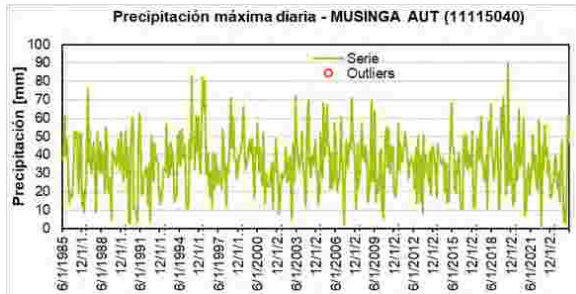
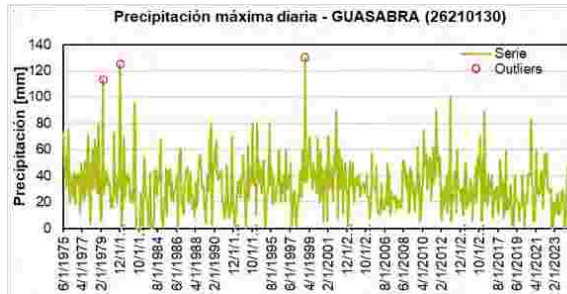
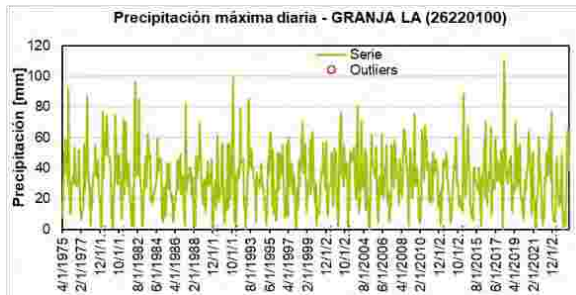
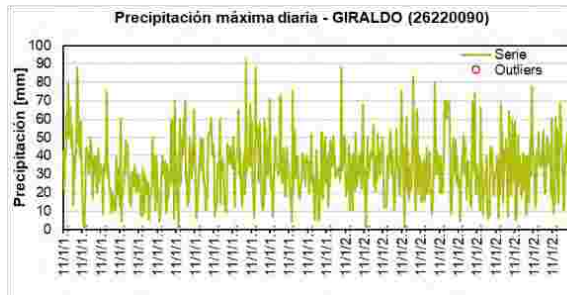
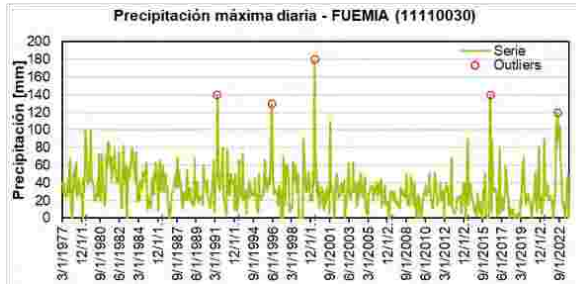
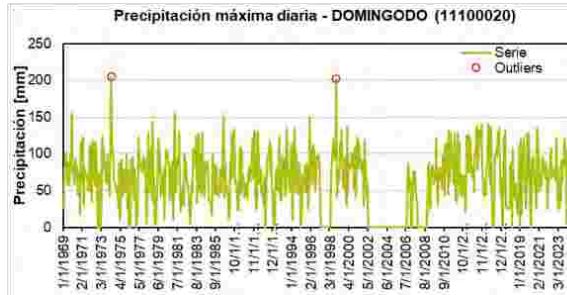
$$LimSup = Q_3 + k(Q_3 - Q_1)$$

Donde Q1 corresponde al primer cuartil y Q3 al tercer cuartil de la muestra.

Para este método se tiene que k tendría un valor correspondiente a 1,5 cuando se pretenden determinar outliers leves o moderados y un valor de 3,0 para outliers extremos.

La Figura 5.69, muestra las series de precipitación máxima en 24 horas para cada una de las estaciones, y los outliers detectados en las mismas.





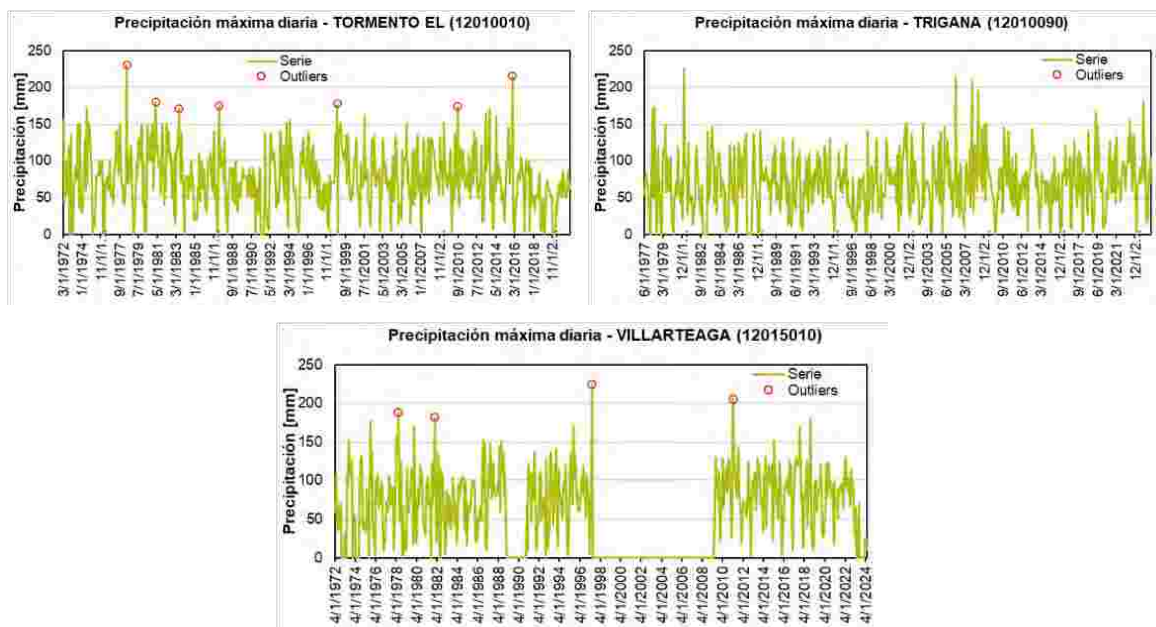


Figura 5.69 Series de precipitación máxima – Valores atípicos

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Al aplicar el procedimiento mencionado anteriormente, se determinan los límites superiores que permiten identificar los valores atípicos en cada una de las series de precipitación diaria. En la Tabla 5.53 se presentan los límites permisibles para las series analizadas.

Tabla 5.53 Límites superiores – valores atípicos

Código	Estación	Límite superior
26230240	ABERTURA LA	125
11110020	ABRIAQUI	97
12010030	BARRANQUILLITA	192
11080010	BELLAVISTA	176
11060010	BUCHADO	186
11070030	CLARITA LA	100
11100020	DOMINGODO	159
11110030	FUEMIA	114
26220090	GIRALDO	105
26220100	GRANJA LA	116
26210130	GUASABRA	112
11115040	MUSINGA AUT	104
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	95
12010170	NUEVO ORIENTE	231
11090010	OPOGADO	205
26230200	SABANALARGA	89
12010010	TORMENTO EL	170
12010090	TRIGANA	231
12015010	VILLARTEAGA	180

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.54 se presentan los valores atípicos registrados por cada serie de datos analizadas.

Tabla 5.54 Valores atípicos de precipitación [mm]

Estación		Valores atípicos [mm]					
ABERTURA LA	Fecha	4/5/1995	12/14/2013				
	Valor	140	132				
ABRIAQUI	Fecha	12/4/1988	10/28/2022				
	Valor	117	99,8				
BELLAVISTA	Fecha	6/30/1978	9/23/1980	11/19/1982	7/27/1997	9/15/2010	10/27/2010
	Valor	190	208	220	190	190	177
BUCHADO	Fecha	8/6/1969	9/13/1969	10/3/1993			
	Valor	207	227	199			
CLARITA LA	Fecha	5/23/1989	11/11/1993	4/27/1994	7/4/2003	8/16/2003	11/12/2009
	Valor	119	112	135	118	116	110
DOMINGODO	Fecha	4/29/1974	11/6/1998				
	Valor	205	202				
FUEMIA	Fecha	5/16/1991	5/27/1996	4/6/2000	5/2/2016	7/1/2022	
	Valor	140	130	180	140	120	
GUASABRA	Fecha	4/26/1979	12/5/1980	11/5/1998			
	Valor	113	125	130			
NORMAL SANTA TERESA AUT	Fecha	8/2/1973	11/21/1978	6/17/1981	11/18/1982	6/17/1999	4/10/2005
	Valor	130	110	100	130	100	98
	Fecha	11/11/2011	4/6/2012	4/19/2022			
	Valor	110	109	98			
OPOGADO	Fecha	11/19/2002					
	Valor	240					
SABANALARGA	Fecha	7/30/1995	11/13/2001	5/7/2004	6/5/2019		
	Valor	90	94	111	93		
TORMENTO EL	Fecha	5/12/1978	3/14/1981	6/14/1983	5/11/1987	11/16/1998	8/23/2010
	Valor	230	180	171	175	178	174
	Fecha	12/17/2015					
	Valor	215					
VILLARTEAGA	Fecha	6/14/1978	1/14/1982	6/3/1997	4/27/2011		
	Valor	188	182	224,8	205,7		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Con el fin de evaluar si los valores atípicos fueron ocasionados por algún comportamiento climatológico como El Niño Southern Oscillation – ENSO, se realizó la evaluación la evaluación del parámetro Oceanic Niño Index, el cual presenta las variaciones de este

fenómeno macro climático. Éste fenómeno mencionado se refiere a las perturbaciones intensas que pueden ocurrir cada 4 a 6 años y que se observan particularmente bien en la temperatura superficial del océano Pacífico ecuatorial⁶³. La Tabla 5.55 muestra el registro ONI, donde se indican en azul los periodos en los que se han presentado episodios fríos (Niña) y en rojo los cálidos (Niño).

Tabla 5.55 Registro histórico ONI (Oceanic Niño Index)

Año	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1980	0,6	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0	-0,1	0	0,1	0
1981	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1
1982	0	0,1	0,2	0,5	0,7	0,7	0,8	1,1	1,6	2	2,2	2,2
1983	2,2	1,9	1,5	1,3	1,1	0,7	0,3	-0,1	-0,5	-0,8	-1	-0,9
1984	-0,6	-0,4	-0,3	-0,4	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,6	-0,9	-1,1
1985	-1	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4
1986	-0,5	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,2	0,4	0,7	0,9	1,1	1,2
1987	1,2	1,2	1,1	0,9	1	1,2	1,5	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1
1988	0,8	0,5	0,1	-0,3	-0,9	-1,3	-1,3	-1,1	-1,2	-1,5	-1,8	-1,8
1989	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1
1990	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4
1991	0,4	0,3	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,8	1,2	1,5
1992	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1	0,7	0,4	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1
1993	0,1	0,3	0,5	0,7	0,7	0,6	0,3	0,3	0,2	0,1	0	0,1
1994	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	1	1,1
1995	1	0,7	0,5	0,3	0,1	0	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-1	-1
1996	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5
1997	-0,5	-0,4	-0,1	0,3	0,8	1,2	1,6	1,9	2,1	2,3	2,4	2,4
1998	2,2	1,9	1,4	1	0,5	-0,1	-0,8	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6
1999	-1,5	-1,3	-1,1	-1	-1	-1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,7
2000	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,7	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7
2001	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3
2002	-0,1	0	0,1	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,1
2003	0,9	0,6	0,4	0	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4
2004	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
2005	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8
2006	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,1	0	0,1	0,3	0,5	0,8	0,9	0,9
2007	0,7	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-1,1	-1,3	-1,5	-1,6
2008	-1,6	-1,5	-1,3	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7
2009	-0,8	-0,8	-0,6	-0,3	0	0,3	0,5	0,6	0,7	1	1,4	1,6
2010	1,5	1,2	0,8	0,4	-0,2	-0,7	-1	-1,3	-1,6	-1,6	-1,6	-1,6
2011	-1,4	-1,2	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-1	-1,1	-1

⁶³ (NOAA, National Oceanic & Atmospheric Administration, 2017)

Año	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2012	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	-0,3	0	0,2	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,2
2013	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3
2014	-0,4	-0,5	-0,3	0	0,2	0,2	0	0,1	0,2	0,5	0,6	0,7
2015	0,5	0,5	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,9	2,2	2,4	2,6	2,6
2016	2,5	2,1	1,6	0,9	0,4	-0,1	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,6
2017	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	-0,1	-0,4	-0,7	-0,8	-1
2018	-0,9	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0	0,1	0,2	0,5	0,8	0,9	0,8
2019	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5
2020	0,5	0,5	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-1,2	-1,3	-1,2
2021	-1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-1	-1
2022	-1	-0,9	-1	-1,1	-1	-0,9	-0,8	-0,9	-1	-1	-0,9	-0,8
2023	-0,7	-0,4	-0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,3	1,6	1,8	1,9	2

Fuente: NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2025.

Con base a la evaluación de los datos atípicos identificados y la variación en el fenómeno macro climático ENSO, se retiraron los valores que se presentan en la Tabla 5.56, debido a que no tendrían relación o concordancia con los periodos de variación del ONI.

Tabla 5.56 Valores atípicos retirados [mm]

Estación		Valores atípicos [mm]				
ABERTURA LA	Fecha	4/5/1995	12/14/2013			
	Valor	140	132			
BELLAVISTA	Fecha	6/30/1978	9/23/1980	11/19/1982	7/27/1997	
	Valor	190	208	220	190	
BUCHADO	Fecha	8/6/1969	9/13/1969	10/3/1993		
	Valor	207	227	199		
CLARITA LA	Fecha	11/11/1993	4/27/1994	7/4/2003	8/16/2003	11/12/2009
	Valor	112	135	118	116	110
FUEMIA	Fecha	5/16/1991	5/27/1996	5/2/2016		
	Valor	140	130	140		
GUASABRA	Fecha	4/26/1979	12/5/1980			
	Valor	113	125			
NORMAL SANTA TERESA AUT	Fecha	11/21/1978	6/17/1981	11/18/1982	6/17/1999	4/10/2005
	Valor	110	100	130	100	98
OPOGADO	Fecha	11/19/2002				
	Valor	240				
SABANALARGA	Fecha	7/30/1995	11/13/2001	5/7/2004	6/5/2019	
	Valor	90	94	111	93	
TORMENTO EL	Fecha	5/12/1978	3/14/1981	6/14/1983	5/11/1987	12/17/2015
	Valor	230	180	171	175	215
VILLARTEAGA	Fecha	6/14/1978	1/14/1982	6/3/1997		
	Valor	188	182	224,8		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.4.3 Pruebas estadísticas

A. Análisis de homogeneidad

Para el análisis de homogeneidad se utiliza la prueba no paramétrica de Mann – Whitney⁶⁴, la cual permite detectar si existe un cambio de media entre dos grupos de muestra independientes. Por definición, el cambio en la media es un cambio abrupto (ocurrido en un periodo corto de tiempo) en el nivel o magnitud de un parámetro. La prueba considera las siguientes ecuaciones:

$$V = R - p(p + 1)/2$$

$$W = pq - V$$

Donde p y q se consideran dos muestras de tamaño $N = p + q$, R es la suma de los rangos de los elementos de la primera muestra de tamaño p en la serie combinada y V representa el número de veces que un ejemplar de la muestra 1 sigue en rango a un ejemplar de la muestra 2.

El estadístico de prueba (U), a partir del cual se acepta o se rechaza la hipótesis nula la cual es que las dos muestras provienen de la misma población (Homogeneidad) se define a partir de las siguientes expresiones:

$$|u| = |(U - \bar{U})/Var(U)^{1/2}|$$

$$Var(U) = \left[\frac{pq}{N(N-1)} \right] \left[\frac{N^3 - N}{12} - \sum T \right]$$

$$\bar{U} = pq/2$$

En la Tabla 5.57 se muestran los resultados de la prueba Mann-Whitney donde se observa que la mayoría de las series de tiempo conservan homogeneidad de los datos, donde únicamente 5 de las 19 estaciones no conservan la homogeneidad de datos en la ventana de tiempo evaluada.

Tabla 5.57 Resultados de la prueba Mann-Whitney

Código	Estación	Año/Inicio 1	Año/Fi n 1	Año/Inicio 2	Año/Fi n 2	Homogeneidad
26230240	ABERTURA LA	1993	2007	2008	2023	No conserva homogeneidad
11110020	ABRIAQUI	1975	1999	2000	2023	Se conserva homogeneidad
12010030	BARRANQUILLITA	1975	1999	2000	2023	Se conserva homogeneidad
11080010	BELLAVISTA	1969	1996	1997	2023	No conserva homogeneidad
11060010	BUCHADO	1969	1996	1997	2023	Se conserva homogeneidad
11070030	CLARITA LA	1978	2000	2001	2023	Se conserva homogeneidad
11100020	DOMINGODO	1969	1991	1992	2023	Se conserva homogeneidad

⁶⁴ (WMO, 2011)

Código	Estación	Año/Inicio 1	Año/Fin 1	Año/Inicio 2	Año/Fin 2	Homogeneidad
11110030	FUEMIA	1977	1999	2000	2023	No conserva homogeneidad
26220090	GIRALDO	1971	1997	1998	2023	Se conserva homogeneidad
26220100	GRANJA LA	1975	1999	2000	2023	Se conserva homogeneidad
26210130	GUASABRA	1976	1999	2000	2023	Se conserva homogeneidad
11115040	MUSINGA AUT	1986	2004	2005	2023	Se conserva homogeneidad
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	1969	1996	1997	2023	Se conserva homogeneidad
12010170	NUEVO ORIENTE	1991	2010	2011	2023	Se conserva homogeneidad
11090010	OPOGADO	1978	2000	2001	2023	No conserva homogeneidad
26230200	SABANALARGA	1976	1999	2000	2023	Se conserva homogeneidad
12010010	TORMENTO EL	1972	1996	1997	2020	Se conserva homogeneidad
12010090	TRIGANA	1978	2000	2001	2023	Se conserva homogeneidad
12015010	VILLARTEAGA	1972	1991	1992	2022	No conserva homogeneidad

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

B. Análisis de cambio en la media

Para detectar cambios en la media de la serie de tiempo se aplicó la prueba no paramétrica⁶⁵ la cual se basa en rangos de valores.

$$X_d = 2 \sum_{i=1}^d r_i - d(n+1)$$

Para $d=1,2,\dots, n$ y la variación se detecta cuando el año m cumple con la siguiente expresión:

$$X_m = \max |X_d|$$

En la Tabla 5.58 se presentan los resultados de la prueba de Pettit, donde no se identificaron cambios considerables en la media de las estaciones analizadas, sin embargo, aproximadamente la mitad de las estaciones presentan cambio de acuerdo con el estadístico.

⁶⁵ (Pettitt, 1979)

Tabla 5.58 Resultados de la prueba de Pettit

Código	Estación	Estadístico K	K α	Resultado	Año cambio
26230240	ABERTURA LA	158	118	Existencia de cambio	2010
11110020	ABRIAQUI	280	245	Existencia de cambio	1994
12010030	BARRANQUILLITA	220	245	Inexistencia de cambio	--
11080010	BELLAVISTA	338	291	Existencia de cambio	1995
11060010	BUCHADO	268	291	Inexistencia de cambio	--
11070030	CLARITA LA	325	223	Existencia de cambio	1992
11100020	DOMINGODO	203	223	Inexistencia de cambio	--
11110030	FUEMIA	330	223	Existencia de cambio	2000
26220090	GIRALDO	210	275	Inexistencia de cambio	--
26220100	GRANJA LA	112	245	Inexistencia de cambio	--
26210130	GUASABRA	248	237	Existencia de cambio	1997
11115040	MUSINGA AUT	113	168	Inexistencia de cambio	--
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	344	291	Existencia de cambio	2006
12010170	NUEVO ORIENTE	58	73	Inexistencia de cambio	--
11090010	OPOGADO	191	223	Inexistencia de cambio	--
26230200	SABANALARGA	190	230	Inexistencia de cambio	--
12010010	TORMENTO EL	192	245	Inexistencia de cambio	--
12010090	TRIGANA	165	223	Inexistencia de cambio	--
12015010	VILLARTEAGA	265	155	Existencia de cambio	1992

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

C. Análisis de tendencia

Para estimar la presencia de la tendencia en la serie se ha empleado la metodología de la Prueba T, la cual se desarrolla a continuación:

I. Prueba T

Prueba estadística para detectar si hay o no tendencia en la media de una serie, se realiza mediante los siguientes pasos:

1. Se ajusta una línea recta a la serie de tiempo.
2. Se obtienen parámetros R^2 y R del ajuste.
3. Se calcula el parámetro T mediante la siguiente ecuación, en la que n es la cantidad de datos de la muestra.

$$T = abs\left(\frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}}\right)$$

4. Calcular el parámetro T_c (T crítico) a partir de la siguiente ecuación, donde t_{inv} es la distribución acumulada t-student inversa, y $n-2$ representa los grados de libertad.

$$T_c = t_{inv}(0,975; n - 2)$$

5. Finalmente se determina que la serie presenta tendencia en la media si $T > T_c$.

Una vez aplicado el procedimiento descrito previamente, se determinaron las tendencias en las series de precipitación máxima en 24 horas en la zona de estudio. La Tabla 5.59 contiene los resultados de este análisis.

Tabla 5.59 Resultados análisis de tendencias en las series de precipitación

Código	Estación	R ²	R	n	T	Tc	S	Tendencia
26230240	ABERTURA LA	0,0075	0,09	10.101	8,74	1,96	-3,00x10 ⁻⁴	Hay
11110020	ABRIAQUI	0,0015	0,04	17.995	5,20	1,96	7,00x10 ⁻⁵	Hay
12010030	BARRANQUILLITA	8,00x10 ⁻⁵	0,01	17.720	1,19	1,96	4,00x10 ⁻⁵	No hay
11080010	BELLAVISTA	7,00x10 ⁻⁴	0,03	20.065	3,75	1,96	1,00x10 ⁻⁴	Hay
11060010	BUCHADO	1,50x10 ⁻³	0,04	19.850	5,46	1,96	-2,00x10 ⁻⁴	Hay
11070030	CLARITA LA	2,20x10 ⁻³	0,05	16.779	6,08	1,96	1,00x10 ⁻⁴	Hay
11100020	DOMINGODO	3,20x10 ⁻³	0,06	17.669	7,53	1,96	2,00x10 ⁻⁴	Hay
11110030	FUEMIA	5,40x10 ⁻³	0,07	16.539	9,48	1,96	-1,00x10 ⁻⁴	Hay
26220090	GIRALDO	1,10x10 ⁻³	0,03	11.504	3,56	1,96	1,00 x10 ⁻⁴	Hay
26220100	GRANJA LA	8,00x10 ⁻⁵	0,01	17.720	1,19	1,96	4,00x10 ⁻⁵	No hay
26210130	GUASABRA	4,00x10 ⁻⁴	0,02	17.430	2,65	1,96	4,00x10 ⁻⁵	Hay
11115040	MUSINGA AUT	4,00x10 ⁻⁵	0,01	14.081	0,75	1,96	-1,00x10 ⁻⁵	No hay
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	7,00x10 ⁻⁴	0,03	19.961	3,74	1,96	5,00x10 ⁻⁵	Hay
12010170	NUEVO ORIENTE	9,40x10 ⁻³	0,10	8.094	8,76	1,96	5,00x10 ⁻⁴	Hay
11090010	OPOGADO	4,00x10 ⁻⁴	0,02	16.691	2,58	1,96	-1,00x10 ⁻⁴	Hay
26230200	SABANALARGA	1,00x10 ⁻⁷	0,00	17.792	0,04	1,96	-5,00x10 ⁻⁷	No hay
12010010	TORMENTO EL	1,00x10 ⁻⁴	0,01	17.647	1,33	1,96	-5,00x10 ⁻⁵	No hay
12010090	TRIGANA	2,00x10 ⁻⁴	0,04	16.741	1,83	1,95	6,00x10 ⁻⁵	No hay
12015010	VILLARTEAGA	6,20x10 ⁻³	0,08	11.504	8,47	1,96	5,00x10 ⁻⁴	Hay

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En general los resultados presentan pendientes mínimas en la tendencia de las series, lo que representa una variación poco relevante. En promedio hay un incremento en las precipitaciones de las series, a excepción de cuatro estaciones (ABERTURA LA, BUCHADO, FUEMIA y OPOGADO) que presenta un decrecimiento en la tendencia de los datos.

5.1.5.4.4 Datos faltantes

En la Tabla 5.60 se presentan los porcentajes de datos faltantes asociados a cada una de las series de tiempo empleadas en el análisis, los datos de precipitación en su mayoría presentan porcentajes de datos faltantes inferiores al 7%, a excepción de las estaciones APERTURA LA, DOMINGODO, NUEVO ORIENTE y VILLARTEAGA las cuales superan en gran medida el límite del 7%. Se realiza el llenado de datos para las estaciones y se verifica nuevamente el análisis de homogeneidad y consistencia para estas estaciones.

Tabla 5.60 Porcentaje de datos faltantes

Código	Estación	Resolución temporal	Total de datos	Datos faltantes	Porcentaje faltantes [%]
26230240	ABERTURA LA	Diaria	11.567	1.466	12,70
11110020	ABRIAQUI	Diaria	18.142	147	0,80
12010030	BARRANQUILLITA	Diaria	18.080	360	2,00
11080010	BELLAVISTA	Diaria	20.270	205	1,00
11060010	BUCHADO	Diaria	20.149	299	1,50
11070030	CLARITA LA	Diaria	17.014	235	1,40
11100020	DOMINGODO	Diaria	20.270	2.601	12,80
11110030	FUEMIA	Diaria	16.924	385	2,30
26220090	GIRALDO	Diaria	19.658	43	0,20
26220100	GRANJA LA	Diaria	18.011	187	1,00
26210130	GUASABRA	Diaria	17.959	529	2,90
11115040	MUSINGA AUT	Diaria	14.245	164	1,20
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	Diaria	20.333	372	1,80
12010170	NUEVO ORIENTE	Diaria	11.780	3.686	31,30
11090010	OPOGADO	Diaria	17.197	506	2,90
26230200	SABANALARGA	Diaria	18.063	271	1,50
12010010	TORMENTO EL	Diaria	18.050	403	2,20
12010090	TRIGANA	Diaria	17.150	409	2,40
12015010	VILLARTEAGA	Diaria	19.024	6.019	31,60

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.4.5 Corrección de series de datos

De acuerdo con el análisis de datos faltantes, las estaciones APERTURA LA, FUEMIA y VILLARTEAGA no cumplen con la mayoría de los criterios de homogeneidad y consistencia presentados anteriormente, sin embargo, gran parte de las estaciones presentan algún cambio en la variabilidad temporal de los mismos. Por lo tanto, se opta por completar o llenar los datos faltantes de todas las estaciones, y se revisa nuevamente los gráficos y estadísticos utilizados para el análisis de las series.

A. Completado de series

El completado de series o relleno de datos faltantes se realizó mediante el método de Razón Normal, que emplea la razón de los valores normales de las estaciones próximas a la estación en la que se desea completar los datos faltantes. Dicho método esta dado por la siguiente ecuación:

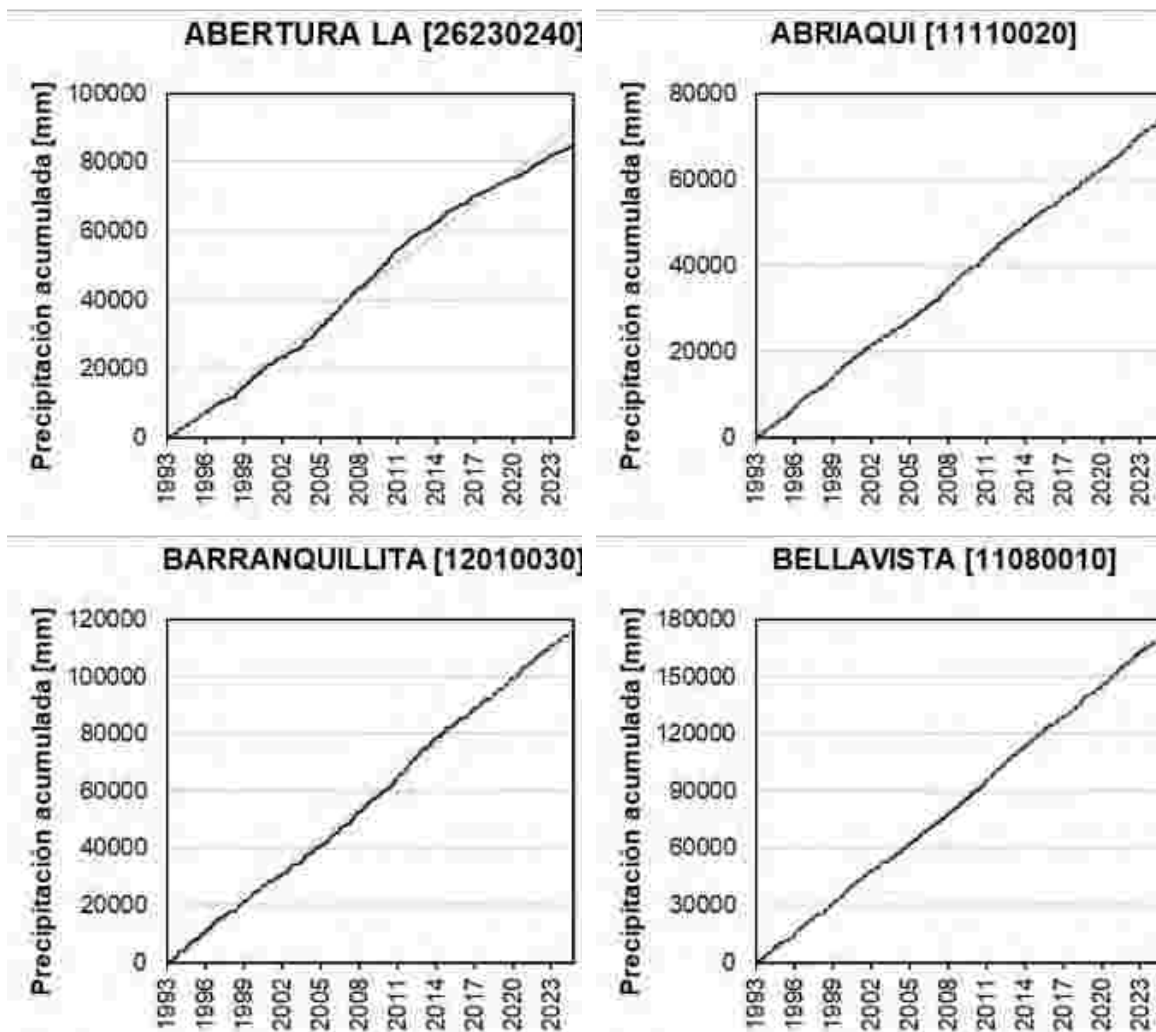
$$P_x = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right]$$

Donde n es el número de estaciones pluviométricas con registros continuos; P_x es la precipitación de la estación con datos faltantes (x) durante el período de tiempo a completar; P_1 a P_n es la precipitación de las estaciones auxiliares durante el período de

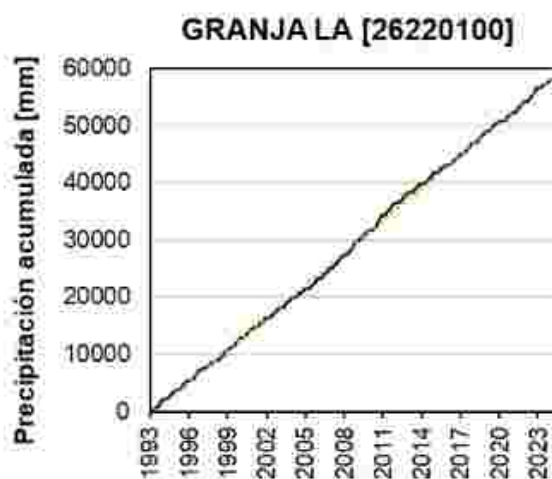
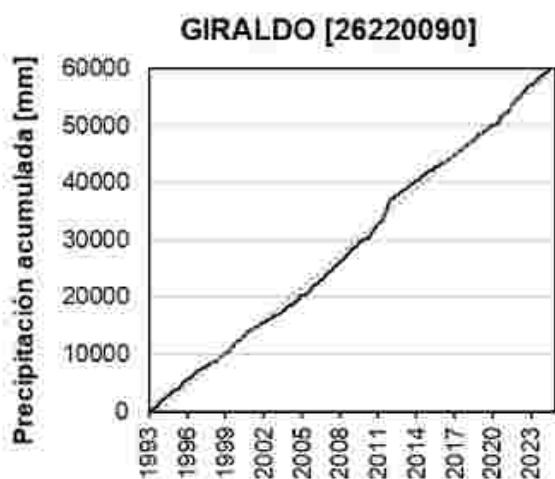
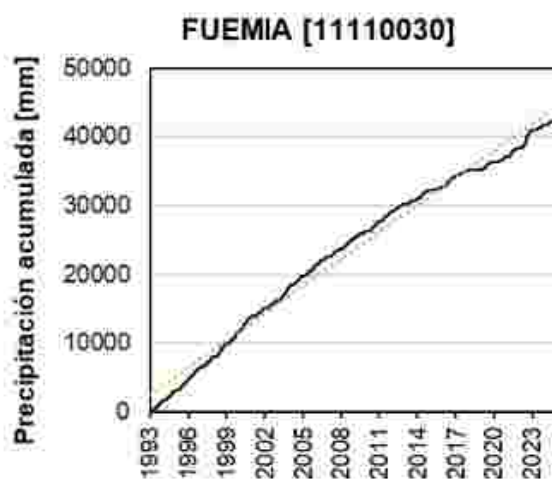
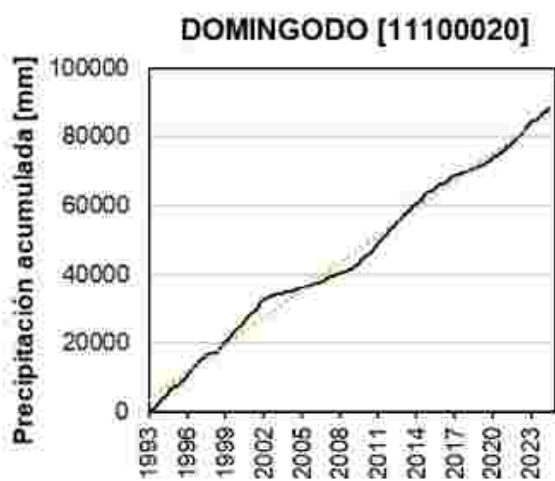
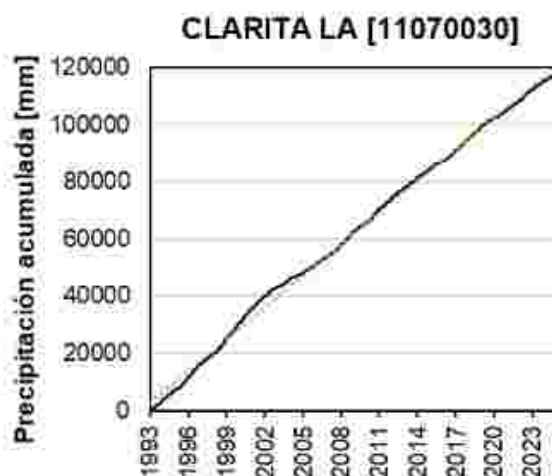
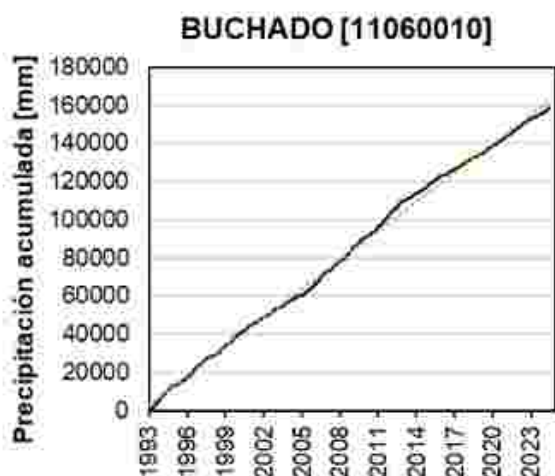
tiempo a completar; N_x es la precipitación media anual de la estación (x); N_1 a N_n es la precipitación media anual de las estaciones auxiliares⁶⁶.

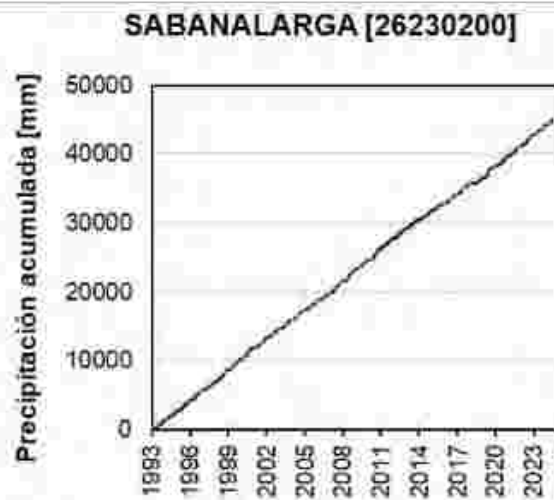
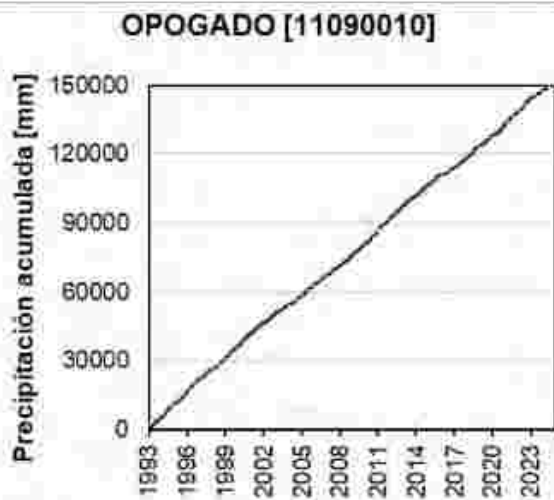
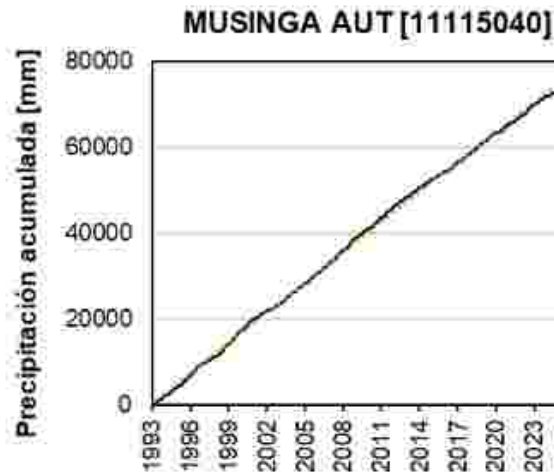
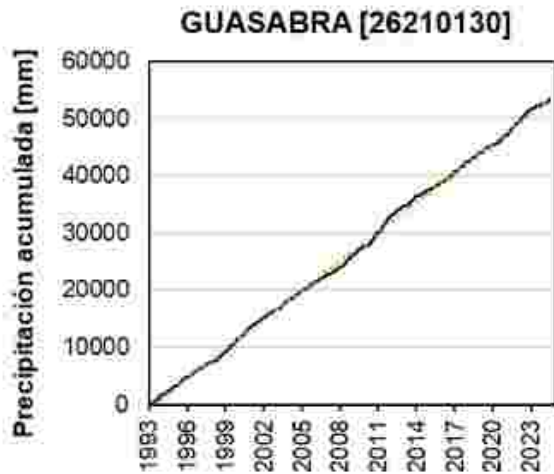
B. Análisis series corregidas

En la Figura 5.70 se presentan las curvas de masa de las series de precipitación corregidas para todas las estaciones, teniendo principalmente en consideración la ventana de tiempo comprendida entre los años 1993 y 2023, tiempo en el que se presenta la mayor cantidad de datos completos para la mayoría de las estaciones. En esta figura se puede apreciar que tras el rellenado de series se presenta mayor homogeneidad en las curvas de masa.



⁶⁶ (Monsalve, 2009)





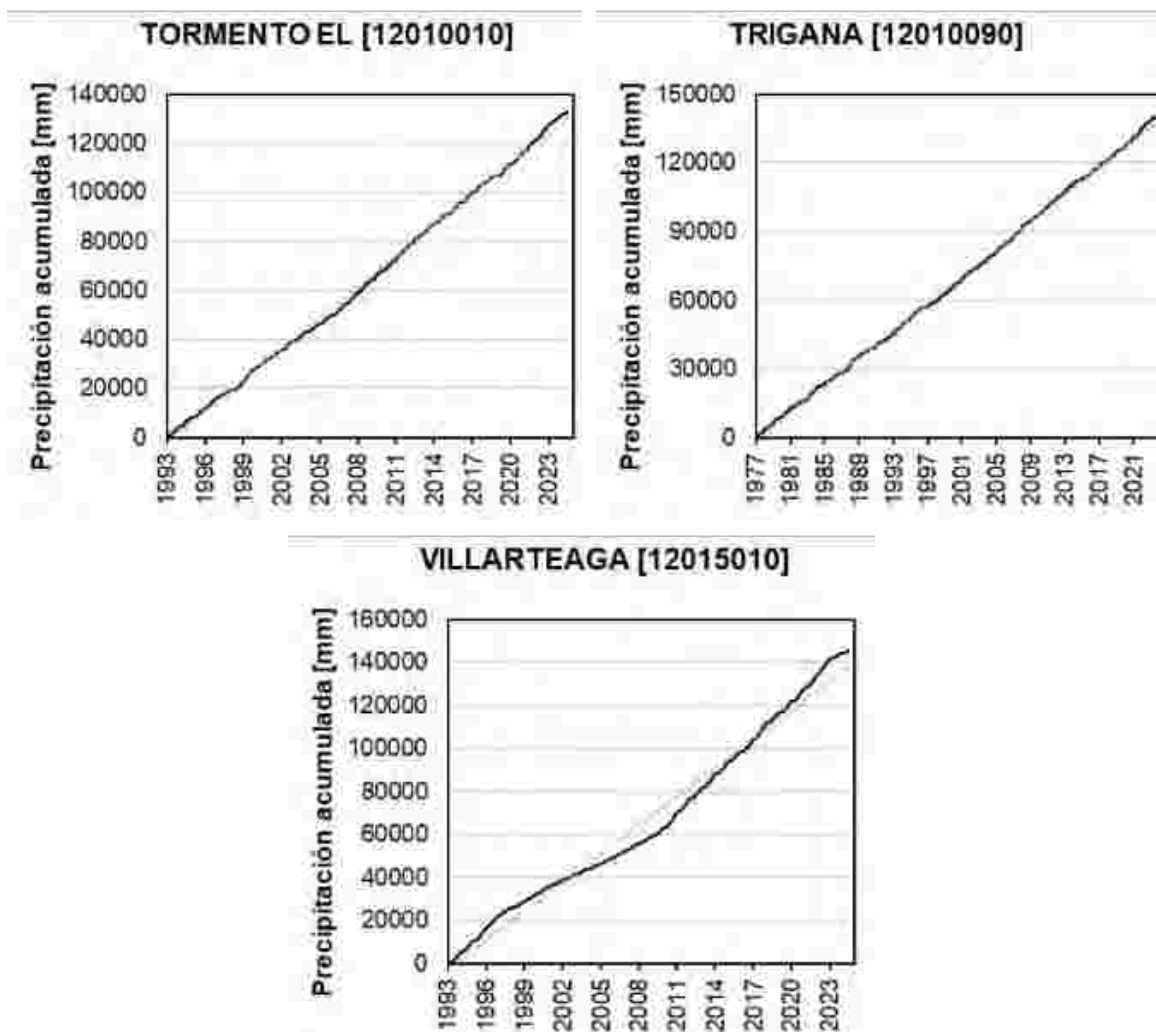


Figura 5.70 Curva de masa simple de las series de tiempo corregidas
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Posterior al análisis anterior, se aplicaron los estadísticos relacionados en la Tabla 5.61.

Tabla 5.61 Resultados de la prueba Mann-Whitney datos corregidos

Código	Estación	Año/Inicio 1	Año/Fin 1	Año/Inicio 2	Año/Fin 2	Homogeneidad
26230240	ABERTURA LA	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
11110020	ABRIAQUI	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
12010030	BARRANQUILLITA	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
11080010	BELLAVISTA	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
11060010	BUCHADO	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad

Código	Estación	Año/Inicio 1	Año/Fin 1	Año/Inicio 2	Año/Fin 2	Homogeneidad
11070030	CLARITA LA	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
11100020	DOMINGODO	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
11110030	FUEMIA	1993	2008	2009	2023	No conserva homogeneidad
26220090	GIRALDO	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
26220100	GRANJA LA	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
26210130	GUASABRA	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
11115040	MUSINGA AUT	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	1993	2008	2009	2023	No conserva homogeneidad
12010170	NUEVO ORIENTE	1993	2008	2009	2023	No conserva homogeneidad
11090010	OPOGADO	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
26230200	SABANALARGA	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
12010010	TORMENTO EL	1993	2008	2009	2023	No conserva homogeneidad
12010090	TRIGANA	1993	2008	2009	2023	Conserva homogeneidad
12015010	VILLARTEAGA	1993	2008	2009	2023	No conserva homogeneidad

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.62 Resultados de la prueba de Pettit datos corregidos

Código	Estación	Estadístico K	K α	Resultado	Año cambio
26230240	ABERTURA LA	148	124	Existencia de cambio	2011
11110020	ABRIQUI	56	124	Inexistencia de cambio	--
12010030	BARRANQUILLITA	80	124	Inexistencia de cambio	--
11080010	BELLAVISTA	80	124	Inexistencia de cambio	--
11060010	BUCHADO	142	124	Existencia de cambio	2012
11070030	CLARITA LA	138	124	Existencia de cambio	2001
11100020	DOMINGODO	112	124	Inexistencia de cambio	--
11110030	FUEMIA	166	124	Existencia de cambio	2005
26220090	GIRALDO	82	124	Inexistencia de cambio	--
26220100	GRANJA LA	60	124	Inexistencia de cambio	--
26210130	GUASABRA	64	124	Inexistencia de cambio	--
11115040	MUSINGA AUT	112	124	Inexistencia de cambio	--
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	134	124	Existencia de cambio	2006
12010170	NUEVO ORIENTE	144	124	Existencia de cambio	2007
11090010	OPOGADO	98	124	Inexistencia de cambio	--
26230200	SABANALARGA	56	124	Inexistencia de cambio	--

Código	Estación	Estadístico K	K α	Resultado	Año cambio
12010010	TORMENTO EL	134	124	Existencia de cambio	2005
12010090	TRIGANA	58	124	Inexistencia de cambio	--
12015010	VILLARTEAGA	180	124	Existencia de cambio	2009

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.63 Resultados análisis de tendencias en las series de precipitación

Código	Estación	R ²	R	n	T	Tc	S	Tendencia
26230240	ABERTURA LA	2,90x10 ⁻³	0,05	11.567,00	5,80	1,960	-2,00x10 ⁻⁴	Hay
11110020	ABRIAQUI	9,00x10 ⁻⁶	0,00	11.567,00	0,32	1,960	9,00x10 ⁻⁶	No hay
12010030	BARRANQUILLITA	8,00x10 ⁻⁵	0,01	11.504,00	0,96	1,960	6,00x10 ⁻⁵	No hay
11080010	BELLAVISTA	5,00x10 ⁻⁵	0,01	11.504,00	0,76	1,960	5,00x10 ⁻⁵	No hay
11060010	BUCHADO	1,60x10 ⁻³	0,04	11.504,00	4,29	1,960	-3,00x10 ⁻⁴	Hay
11070030	CLARITA LA	4,00x10 ⁻³	0,06	11.535,00	6,81	1,960	-2,00x10 ⁻⁴	Hay
11100020	DOMINGODO	3,00x10 ⁻⁴	0,02	11.504,00	1,86	1,960	-1,00x10 ⁻⁴	No hay
11110030	FUEMIA	4,50x10 ⁻³	0,07	11.504,00	7,21	1,960	-2,00x10 ⁻⁴	Hay
26220090	GIRALDO	1,10x10 ⁻³	0,03	11.504,00	3,56	1,960	1,00x10 ⁻⁴	Hay
26220100	GRANJA LA	1,00x10 ⁻⁵	0,00	11.504,00	0,34	1,960	9,00x10 ⁻⁶	No hay
26210130	GUASABRA	1,00x10 ⁻⁴	0,01	11.504,00	1,07	1,960	3,00x10 ⁻⁵	No hay
11115040	MUSINGA AUT	5,00x10 ⁻⁴	0,02	11.504,00	2,40	1,960	-7,00x10 ⁻⁵	Hay
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	2,70x10 ⁻³	0,05	11.504,00	5,58	1,960	2,00x10 ⁻⁴	Hay
12010170	NUEVO ORIENTE	4,00x10 ⁻⁴	0,02	11.504,00	2,15	1,960	-1,00x10 ⁻⁴	Hay
11090010	OPOGADO	2,00x10 ⁻⁴	0,01	11.504,00	1,52	1,960	-9,00x10 ⁻⁵	No hay
26230200	SABANALARGA	8,00x10 ⁻⁸	0,00	11.504,00	0,03	1,960	-7,00x10 ⁻⁷	No hay
12010010	TORMENTO EL	1,10x10 ⁻³	0,03	11.504,00	3,56	1,960	2,00x10 ⁻⁴	Hay
12010090	TRIGANA	9,00x10 ⁻⁵	0,01	11.504,00	1,02	1,960	6,00x10 ⁻⁵	No hay
12015010	VILLARTEAGA	6,20x10 ⁻³	0,08	11504,00	8,47	1,960	5,00x10 ⁻⁴	Hay

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Según el análisis previo, se detectaron algunas inconsistencias en varias estaciones. No obstante, los análisis gráficos y las series en general muestran mejorías, y se mantiene el registro completo de datos en la ventana temporal evaluada. Por tanto, no se considera necesario descartar ninguna de las estaciones para los cálculos futuros, ya que los datos

no difieren significativamente de la información de mayor calidad presente en los rangos más actuales de las series.

5.1.5.5 Análisis temporal y espacial de las variables climáticas

En este numeral se presenta la caracterización espacial y temporal de las variables climáticas en las microcuencas hidrográficas y el área de influencia del proyecto, teniendo en consideración las variables climatológicas como la precipitación, evapotranspiración, temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, brillo y radiación solares.

5.1.5.5.1 Precipitación

De las estaciones meteorológicas se descargaron valores de precipitación para los periodos presentados en la Tabla 5.52, sin embargo, para el análisis temporal, se utilizaron los valores entre 1993 y 2023 con el fin de mantener la misma escala temporal para todas las estaciones. En la Figura 5.71 se puede observar que la región está caracterizada por un régimen Bimodal (Dos periodos de mayor precipitación y dos periodos de menor precipitación) para las estaciones más cercanas a la cordillera occidental, con una temporada de menores precipitaciones entre los meses diciembre a febrero y de junio a agosto, mientras que para los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre se presenta aumento en las precipitaciones. Las estaciones más cercanas a la costa pacífica presentan un comportamiento más similar a una distribución unimodal, teniendo un periodo de lluvias mayores entre los meses de abril a diciembre, y menores precipitaciones en los meses de enero a marzo, con valores más bajos de la precipitación en el mes de febrero. En la Tabla 5.64 se presentan las precipitaciones anuales multianuales para cada estación en la región.

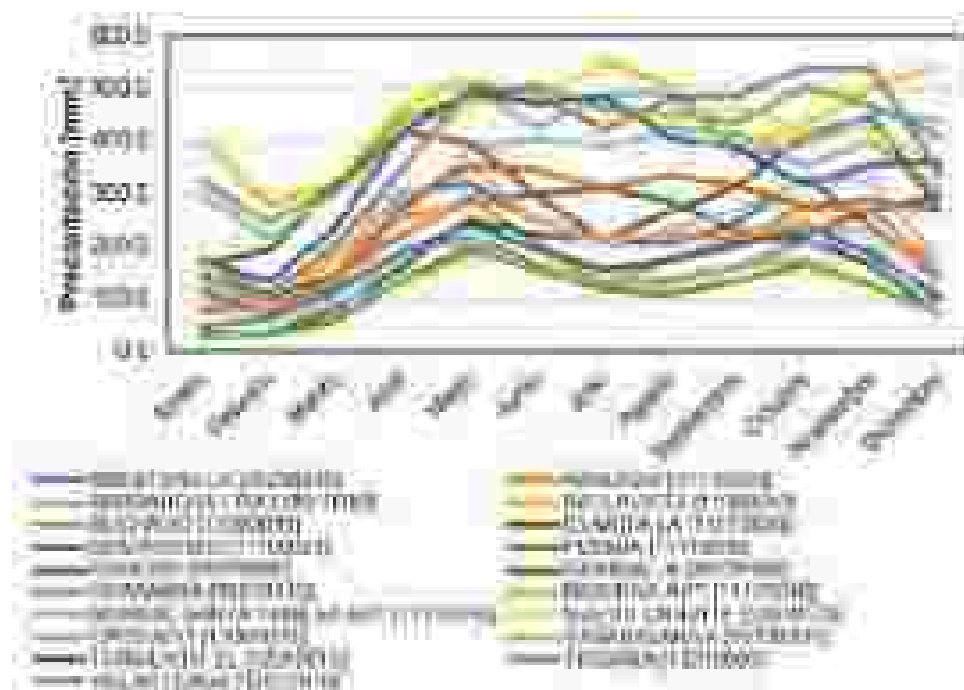


Figura 5.71 Ciclo anual de la precipitación en las estaciones analizadas

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.64 Precipitación media anual estaciones de análisis

Nombre estación	Precipitación anual multianual [mm/año]
ABERTURA LA [26230240]	2586,27
ABRIAQUI [11110020]	2332,92
BARRANQUILLITA [12010030]	3675,48
BELLAVISTA [11080010]	5371,41
BUCHADO [11060010]	5049,39
CLARITA LA [11070030]	3710,29
DOMINGODO [11100020]	2815,25
FUEMIA [11110030]	1343,57
GIRALDO [26220090]	1907,47
GRANJA LA [26220100]	1866,82
GUASABRA [26210130]	1701,84
MUSINGA AUT [11115040]	2315,50
NORMAL SANTA TERESA AUT [11110010]	2785,33
NUEVO ORIENTE [12010170]	4324,40
OPOGADO [11090010]	4788,89
SABANALARGA [26230200]	1435,38
TORMENTO EL [12010010]	4238,52
TRIGANA [12010090]	3097,79
VILLARTEAGA [12015010]	4639,33

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

La estación de precipitación más cercana al área de influencia de interés corresponde a la estación Villaarteaga [12015010] como se puede observar en la Figura 5.72, la cual

presenta un periodo de mayor precipitación entre los meses de mayo a noviembre, mientras que los meses de menor precipitación se presentan en enero y febrero, con una leve reducción en la precipitación en el mes de Julio. Este comportamiento se asocia a un régimen unimodal, ya que, aunque se observa una reducción en la precipitación a mitad de año, dicha variación es muy leve y no suficiente para ser considerada como indicativa de un régimen bimodal.

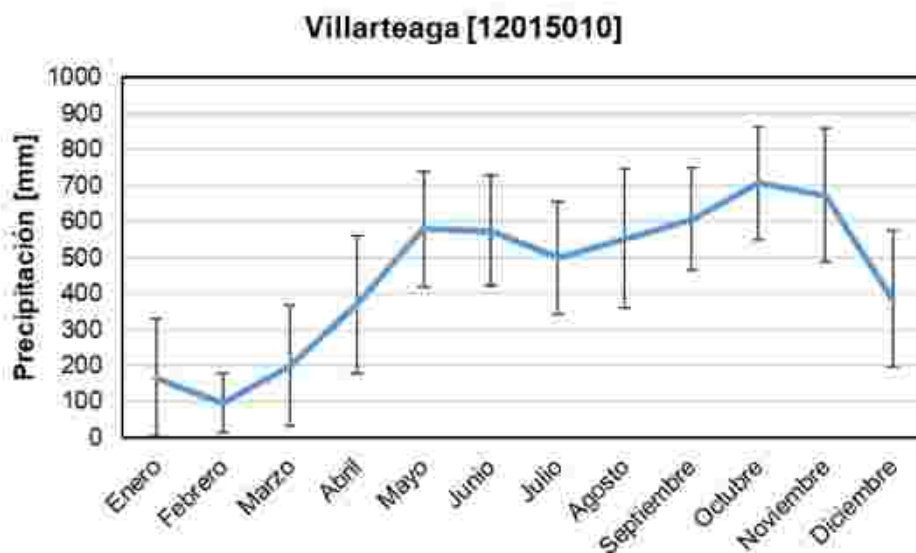


Figura 5.72 Ciclo anual de la precipitación – Estación Villarteaga [12015010]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para el análisis espacial de la lluvia en la zona de estudio se realizó la interpolación de la precipitación promedio anual de cada una de las estaciones presentadas anteriormente, a partir del método IDW (Ponderación de Distancia Inversa), el cual determina los valores de cada celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra, donde la ponderación es una función de la distancia inversa. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación, y es ampliamente usado en la interpolación de datos climáticos cuando la densidad de las estaciones meteorológicas es baja⁶⁷. La variación espacial de la lluvia obtenida por el método IDW se muestra en la Figura 5.73. Posteriormente, a partir del mapa de precipitaciones y el trazado de las cuencas se calculó la precipitación media anual asociada a cada una de estas, los resultados se muestran en la Tabla 5.65.

⁶⁷ (Singh, 2016)

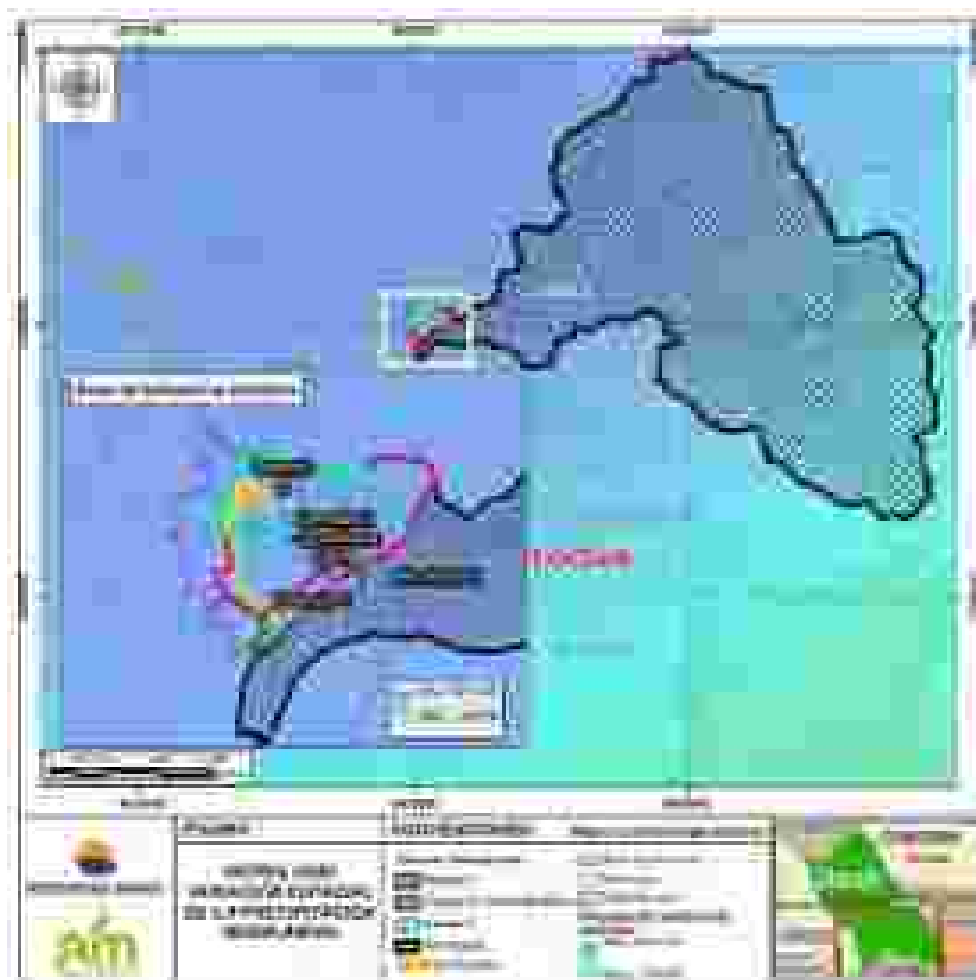


Figura 5.73 Variación espacial de la precipitación media anual

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la figura anterior se puede observar que las mayores precipitaciones se encuentran al noroccidente de las cuencas de interés, mientras que en dirección oriente se presentan las menores precipitaciones. Para las cuencas de interés las precipitaciones se encuentran entre los 3.410,96 mm/año y los 4.510,70 mm/año.

Tabla 5.65. Precipitación media anual UHA (Unidades hidrográficas de análisis).

ID	Nombre cuenca	Precipitación [mm/año]
0	Río Sucio Medio y Bajo - NSS	3.410,96
1	Río Mutatá	4.065,85
2	Drenaje 1	4.483,26
3	Drenaje 2	4.496,14
4	Drenaje 3	4.510,70

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.5.2 Temperatura

La variación temporal de la temperatura fue descargada de la estación climática ordinaria Villarteaga [12015010] la cual se encuentra cercana a las microcuencas de interés. En la Tabla 5.62 se presenta la temperatura media del aire para los diferentes meses del año, con sus valores mínimos, medios y máximos. Donde se observa que, en el mes de julio, en promedio ocurre la mayor disminución de la temperatura y en el mes de abril se presenta el mayor aumento en el año.

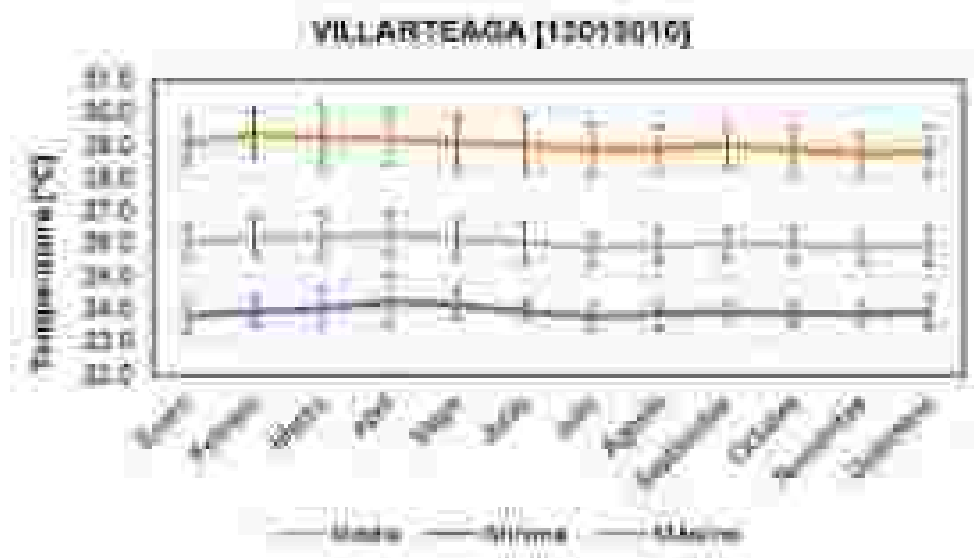


Figura 5.74 Distribución temporal de la temperatura del aire

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

De acuerdo con esta información la temperatura mayor promedio se presenta en el mes de febrero, mientras que la temperatura mínima promedio se presenta en el mes de julio. En promedio la temperatura en la zona a lo largo del año varía entre los 23,8 y 29,4°C.

Los mínimos y los máximos históricos presentados en la serie de la estación Villarteaga [12015010] se presenta en la Tabla 5.66, con un valor de 20,2°C y 36°C respectivamente.

Tabla 5.66. Mínimos y máximos históricos - Villarteaga [12015010]

Mes	Temperatura mínima absoluta [°C]	Temperatura máxima absoluta [°C]
Enero	20,2	34,2
Febrero	21,2	36,0
Marzo	20,8	34,6
Abril	21,2	36,0
Mayo	21,6	34,6
Junio	21,4	34,2
Julio	21,2	33,8
Agosto	21,0	34,2
Septiembre	21,2	33,0
Octubre	20,8	32,8
Noviembre	20,6	32,8
Diciembre	20,8	33,0

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para determinar la variación espacial de la temperatura se utilizó la ecuación propuesta por Cenicafe (1998) para la región pacífico (Chocó y Urabá), donde T_m es la temperatura media multianual y H es la elevación⁶⁸, los resultados se presentan en la Tabla 5.67.

$$T_m = 27,08 - 0,0056H$$

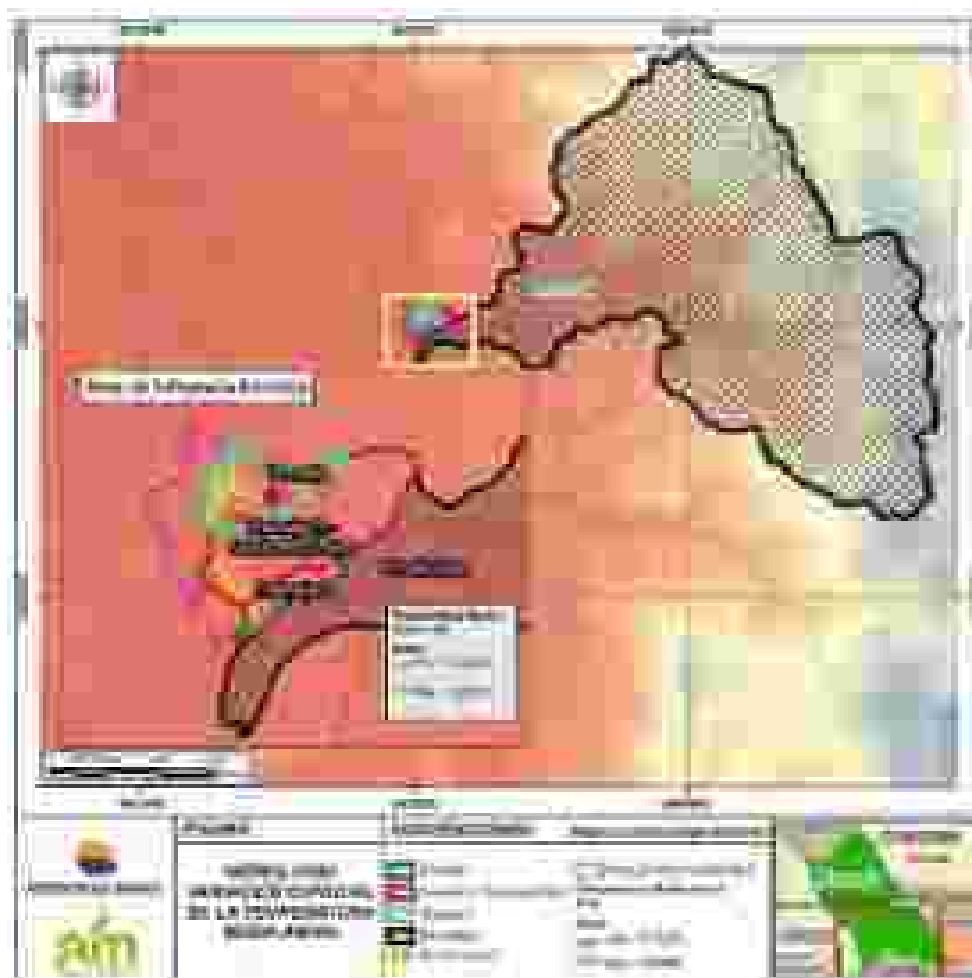


Figura 5.75 Variación espacial de la temperatura media anual estimada mediante regionalización

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.67 se pueden observar que en promedio la temperatura media anual de las microcuencas de interés se encuentra en promedio por los 26°C, teniendo las temperaturas más bajas al costado nororiente, la cual se encuentra en la zona con mayor elevación del área de interés.

Tabla 5.67 Temperatura media anual multianual

ID	Nombre microcuenca	Temperatura [°C]
0	Río Sucio Medio y Bajo - NSS	17,09
1	Río Mutatá	20,53

⁶⁸ (Jaramillo & Cháves, 1988)

ID	Nombre microcuenca	Temperatura [°C]
2	Drenaje 1	26,29
3	Drenaje 2	26,10
4	Drenaje 3	26,21

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.5.3 Evapotranspiración Real

A. Ecuación de Cenicafé – Budyko

La ecuación de Cenicafé permite estimar la Evapotranspiración Potencial media anual a partir de la elevación H , mediante la siguiente ecuación⁶⁹.

$$ETP = 1017,17 \exp(-0,0002H)$$

Para determinar la Evapotranspiración Real se empleó la transformación propuesta por Budyko (1974), cuya ecuación se presenta a continuación, donde P corresponde a la precipitación media.

$$ETR = \left(ETP \cdot P \cdot \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \cdot \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right) \right)^{1/2}$$

B. Ecuación de Turc

Su formulación está basada en un balance de masas en función de elementos meteorológicos como la temperatura y la precipitación, como se muestra en las siguientes expresiones, donde P es la precipitación y L es un parámetro heliotérmico en función de la temperatura media anual.

$$\text{Si } P/L > 0,316 \quad ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

$$\text{Si } P/L < 0,316 \quad ETR = P$$

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

C. Método Factor Regional

La evapotranspiración real (ETR) se estima mediante la siguiente ecuación empírica, donde, P es la precipitación media en la cuenca (mm/año), R_n es el equivalente de agua de la radiación neta con $R_n = 1172,69$ en (mm/año), ETR es la evapotranspiración real (mm/año) y α es un parámetro que depende de la escala de estimación de la variable. El método asume que la evaporación anual no excede los valores de P o R_n y tiene una relación $= \frac{P}{R_n}$ en el intervalo $0,23 < \mu < 1,97$, así mismo, se propone un valor $\alpha = 1,91$ con buenos resultados, pero aplicable para zonas con $0,85 < \mu < 6,37$.

⁶⁹ (Rojo, 2000)

$$ETR = \frac{P}{\left(1 + \left(\frac{P}{Rn}\right)^\alpha\right)^{1/\alpha}}$$

Desde la [Figura 5.76](#) a la [Figura 5.78](#) se presenta la variación espacial de la Evapotranspiración Real estimada por el método de Cenicafé-Budyko, Turc y Factor Regional, respectivamente.

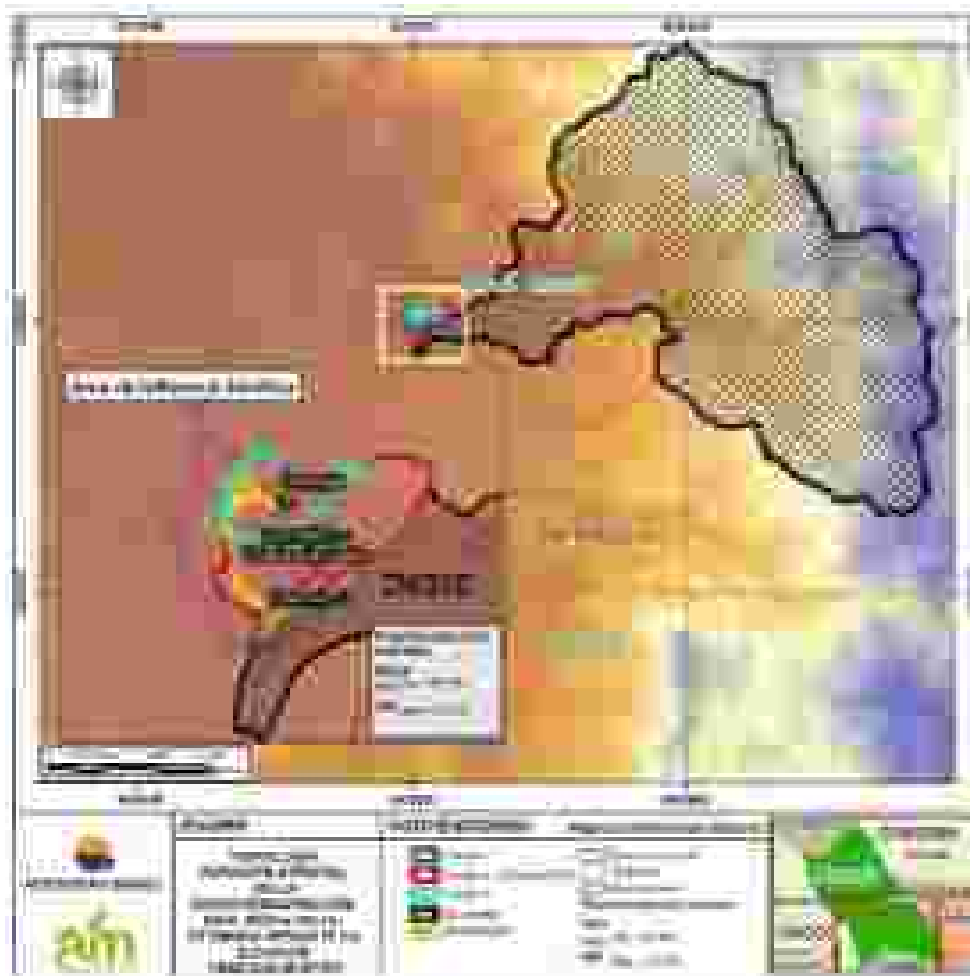


Figura 5.76 Variación espacial de la evapotranspiración real media anual estimada mediante la ecuación Cenicafé – Budyko

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

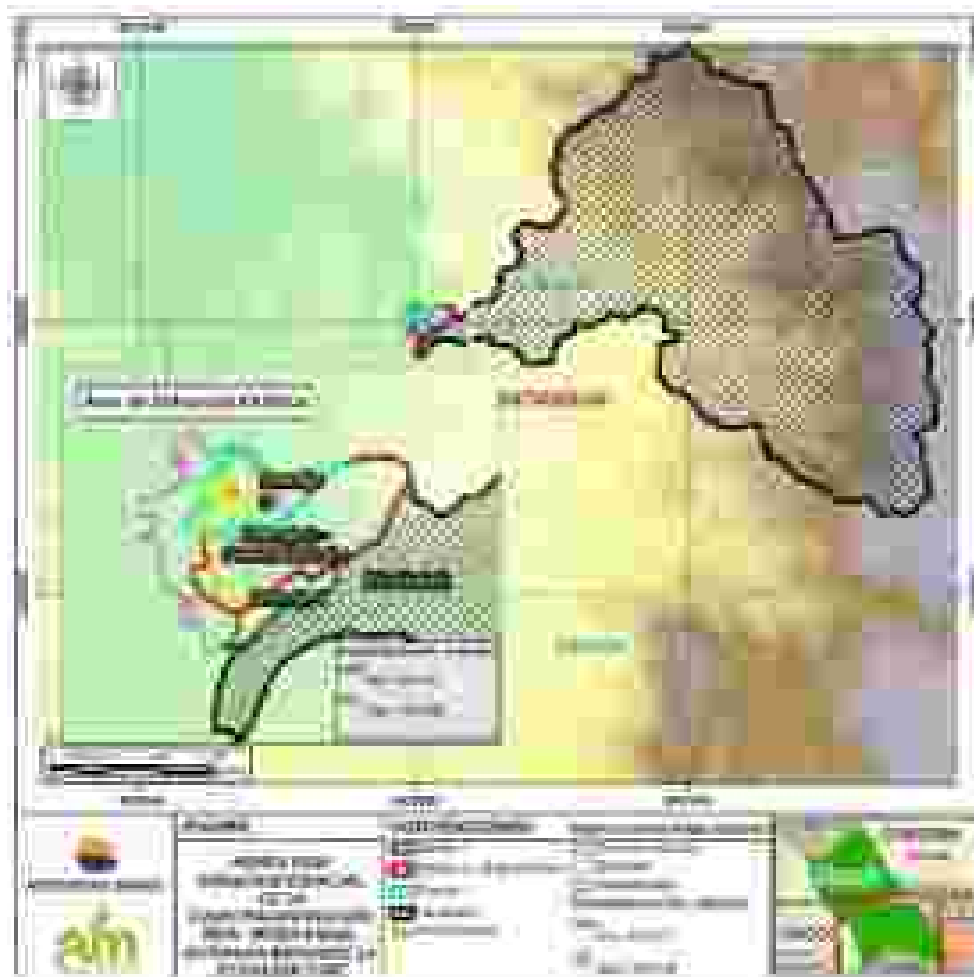


Figura 5.77 Variación espacial de la evapotranspiración real media anual estimada mediante el método TURC

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.78 Variación espacial de la evapotranspiración real media anual estimada mediante el método de Factor Regional

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.68 se presentan los resultados del cálculo de evapotranspiración real media anual de las microcuencas de estudio para cada una de las metodologías de cálculo empleadas.

Tabla 5.68 Evapotranspiración media anual en la zona de estudio

ID	Nombre microcuenca	ETP Cenicafe [mm/año]	ETR Cenicafe – Budyko [mm/año]	ETR Turc [mm/año]	ETR Factor Regional [mm/año]
1	Río Mutatá	809,57	770,59	1.216,38	1.118,36
2	Drenaje 1	988,91	936,69	1.735,52	1.127,91
3	Drenaje 2	982,34	930,94	1.716,91	1.128,14
4	Drenaje 3	986,09	934,47	1.728,67	1.128,40

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.5.4 Presión atmosférica

Para el análisis de la variación espacial de la presión atmosférica en la región de análisis, se tuvo en consideración la estimación de esta teniendo en consideración la altura sobre el nivel del mar mediante la siguiente ecuación:

$$Presión = 1013,25(1 - 0,0000225577H)^{5,2559}$$

Donde, H corresponde a la altitud sobre el nivel del mar.

Esta ecuación corresponde a una derivación del modelo de atmósfera estándar internacional (ISA)⁷⁰. La ecuación es una aproximación matemática basada en principios físicos de la atmósfera. Los valores reales presión barométrica varían no sólo con la altitud, sino que también varían con la localización geográfica y condiciones meteorológicas. La presión atmosférica a nivel de mar se considera normalmente 1013,25 mbar, a medida que la altitud aumenta la presión disminuye.

En la [Figura 5.79](#) se presenta la variación espacial de la presión atmosférica estimada mediante la relación entre la altitud y la presión.

⁷⁰ (Wallace & Hobbs, 2006)

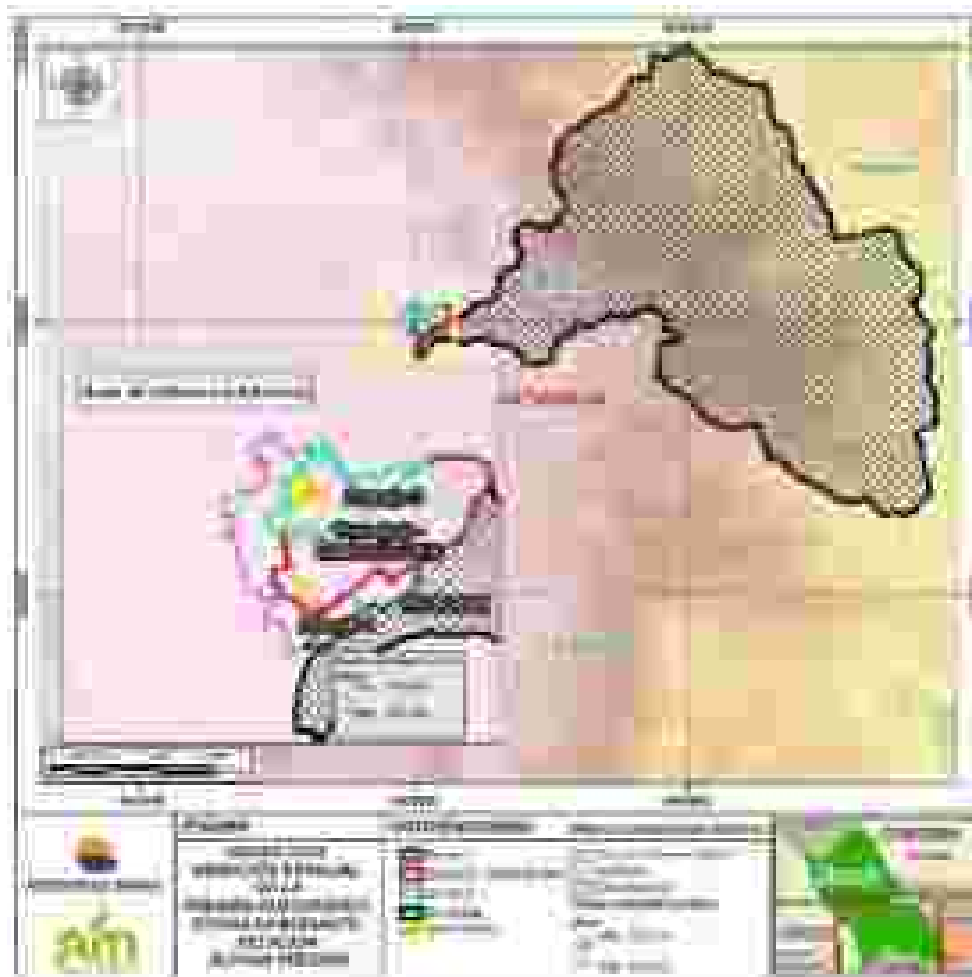


Figura 5.79 Variación espacial de la presión atmosférica estimada mediante relación altura-presión

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.69 se presentan los resultados del cálculo de presión atmosférica de las microcuencas de estudio para cada una de las metodologías de cálculo empleadas.

Tabla 5.69 Presión atmosférica media anual en la zona de estudio

ID	Nombre microcuenca	Presión atmosférica [mbar]
0	Río Sucio Medio y Bajo - NSS	965,22
1	Río Mutatá	881,95
2	Drenaje 1	996,44
3	Drenaje 2	992,49
4	Drenaje 3	994,75

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.5.5 Humedad relativa

Para el análisis de la humedad relativa media interanual a escala mensual, se emplearon los datos de la estación Villarteaga [12015010], con un periodo de registros superior a los

10 años. En la Tabla 5.70 se presentan los valores medios identificados para cada mes. En la Figura 5.80 se presenta la comparación gráfica entre las series medias mensuales multianuales.

Tabla 5.70 Valores mensuales de humedad relativa

Mes	Estación Villarteaga [12015010]
	Humedad relativa (%)
Enero	87,60
Febrero	86,90
Marzo	86,60
Abril	87,90
Mayo	88,60
Junio	88,90
Julio	88,30
Agosto	88,00
Septiembre	89,10
Octubre	88,80
Noviembre	88,80
Diciembre	88,40

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

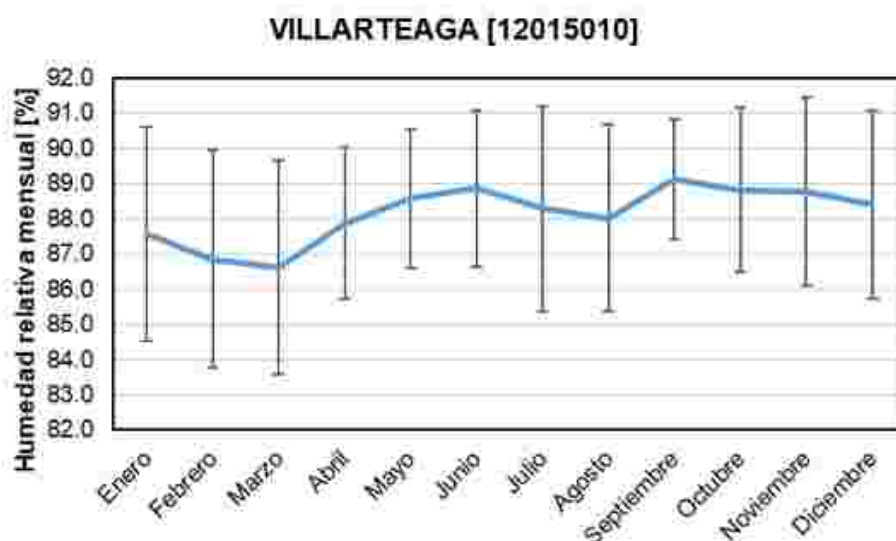


Figura 5.80 Humedad relativa mensual para las estaciones de interés

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

La humedad relativa presenta un ciclo anual bimodal tenue, con dos (2) periodos con reducciones en la humedad mensual entre los meses de enero a marzo, y julio a agosto. Los dos (2) periodos húmedos se presentan de abril a junio y de septiembre a diciembre, siendo el mes más húmedo septiembre.

5.1.5.5.6 Dirección y velocidad del viento

Para el análisis de la velocidad del viento se tuvo en consideración los atlas de velocidad del viento presentes en el IDEAM, 2015. Donde se presenta la velocidad promedio del viento a diferentes alturas de la atmosfera durante todo el año.

A. Distribución espacial de la velocidad del viento

De acuerdo con los atlas de velocidad del viento presentes en el IDEAM, se presentan las características de este en la zona de interés, como se muestra en la Figura 5.81 y la Figura 5.82 correspondiente a la velocidad promedio del viento a 10 m de altura y a la velocidad máxima promedio del viento respectivamente.

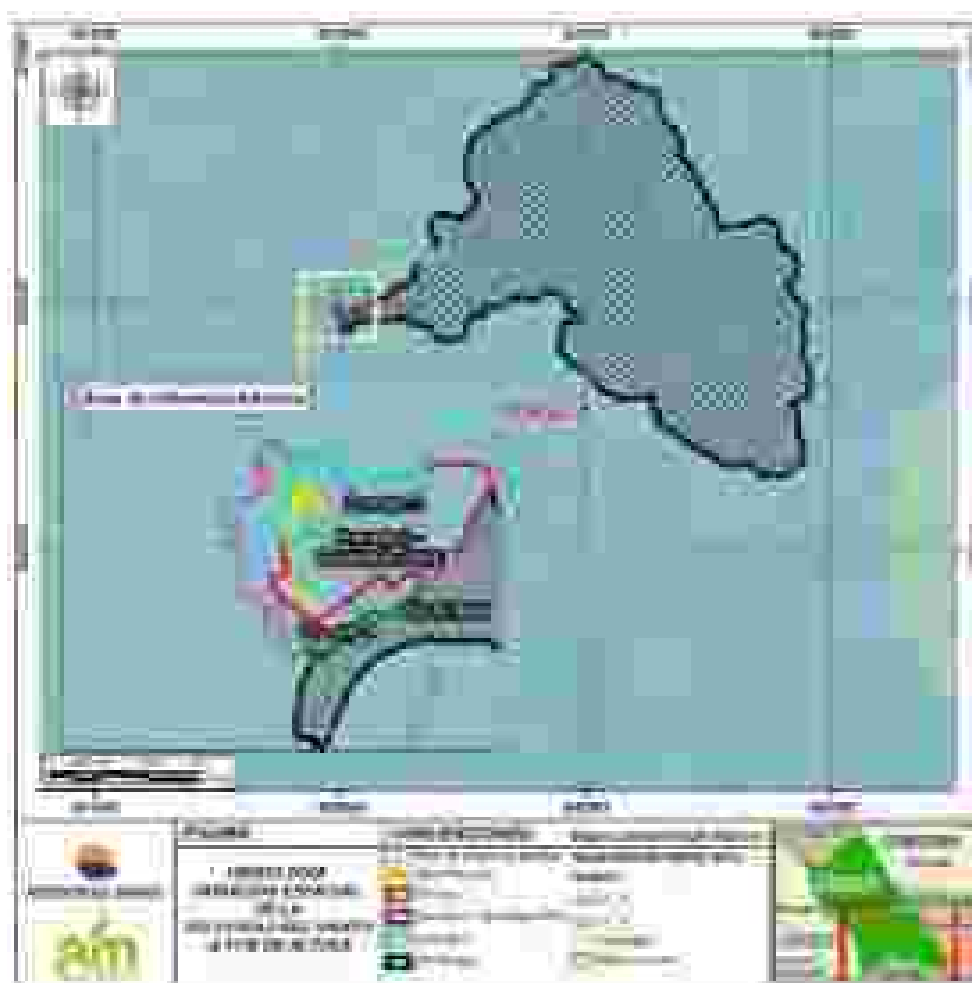


Figura 5.81 Velocidad promedio del viento a 10 m de altura

Fuente: IDEAM, 2015, modificado por Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

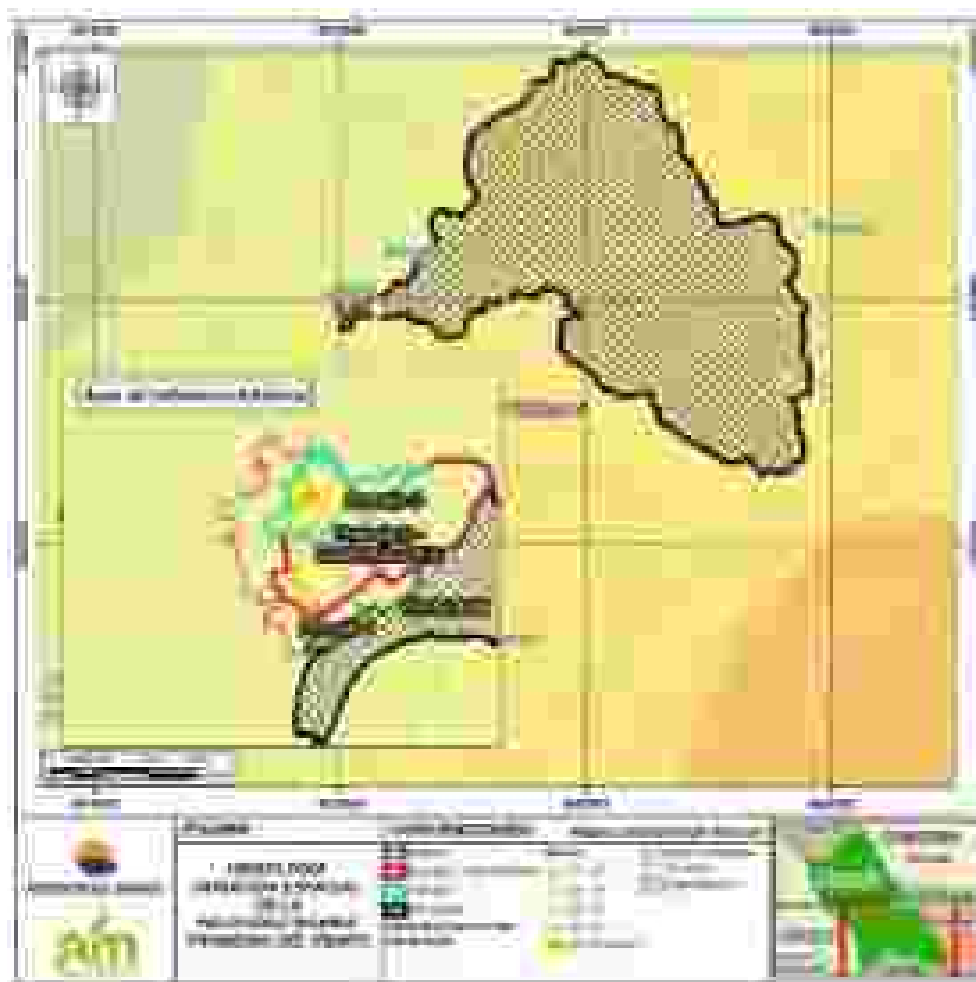


Figura 5.82 Velocidad máxima promedio del viento

Fuente: IDEAM, 2015, modificado por Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

De acuerdo con esto, en promedio la velocidad a 10 metros de altura se encuentra a una velocidad entre los 2 m/s y los 3 m/s. Respecto a la velocidad máxima promedio, alcanzan velocidades máximas entre los 24 m/s y 27 m/s.

5.1.5.5.7 Brillo solar

Por su parte, para la variable brillo solar, solo se contó con información de la estación Villarteaga [12015010]. En la Tabla 5.71 se presentan los valores medios, máximos y mínimos, y en la Figura 5.83 se muestra el ciclo anual de la variable junto con el error medio estadístico asociado.

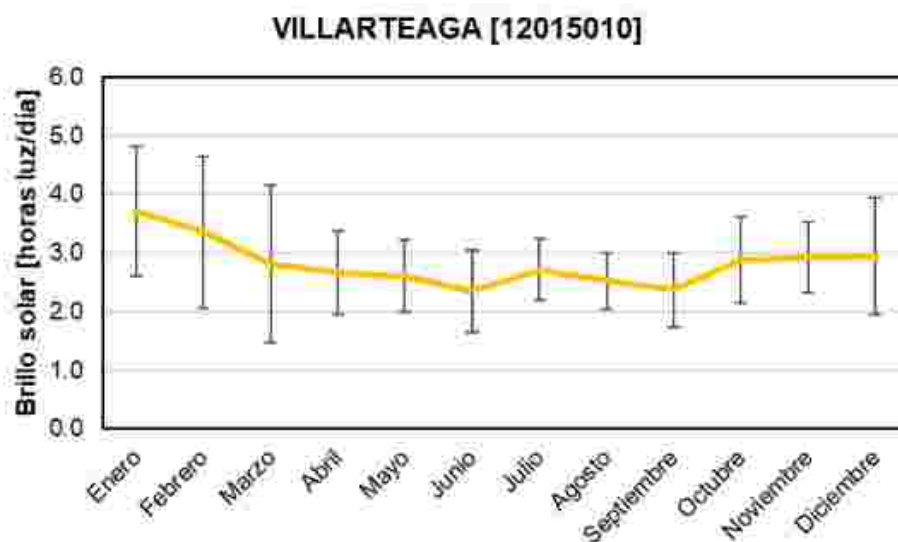
Tabla 5.71 Valores mensuales de brillo solar estación Villarteaga [12015010]

Mes	Estación
	Brillo solar [horas luz/ día]
Enero	3,7
Febrero	3,40
Marzo	2,80

Mes	Estación
	Brillo solar [horas luz/ día]
Abril	2,70
Mayo	2,60
Junio	2,40
Julio	2,70
Agosto	2,50
Septiembre	2,40
Octubre	2,90
Noviembre	2,90
Diciembre	2,90

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Figura 5.83 Brillo solar diario promedio mensual para la estación Villarteaga [12015010]



Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.5.8 Radiación solar

Respecto la radiación solar se tuvo en cuenta la información presente en Global Solar Atlas operado por Solargis en nombre de World Bank Group⁷¹, donde se presenta información de la irradiación directa normal (DNI), la cual corresponde a la cantidad de radiación solar que llega a un lugar en línea recta desde el sol y que incide en una superficie perpendicular a los rayos solares, medida en kWh/m². En la [Figura 5.84](#) se presenta la DNI para el periodo de registro de 1999 a 2019.

⁷¹ (World Bank Group & Solargis, 2024)

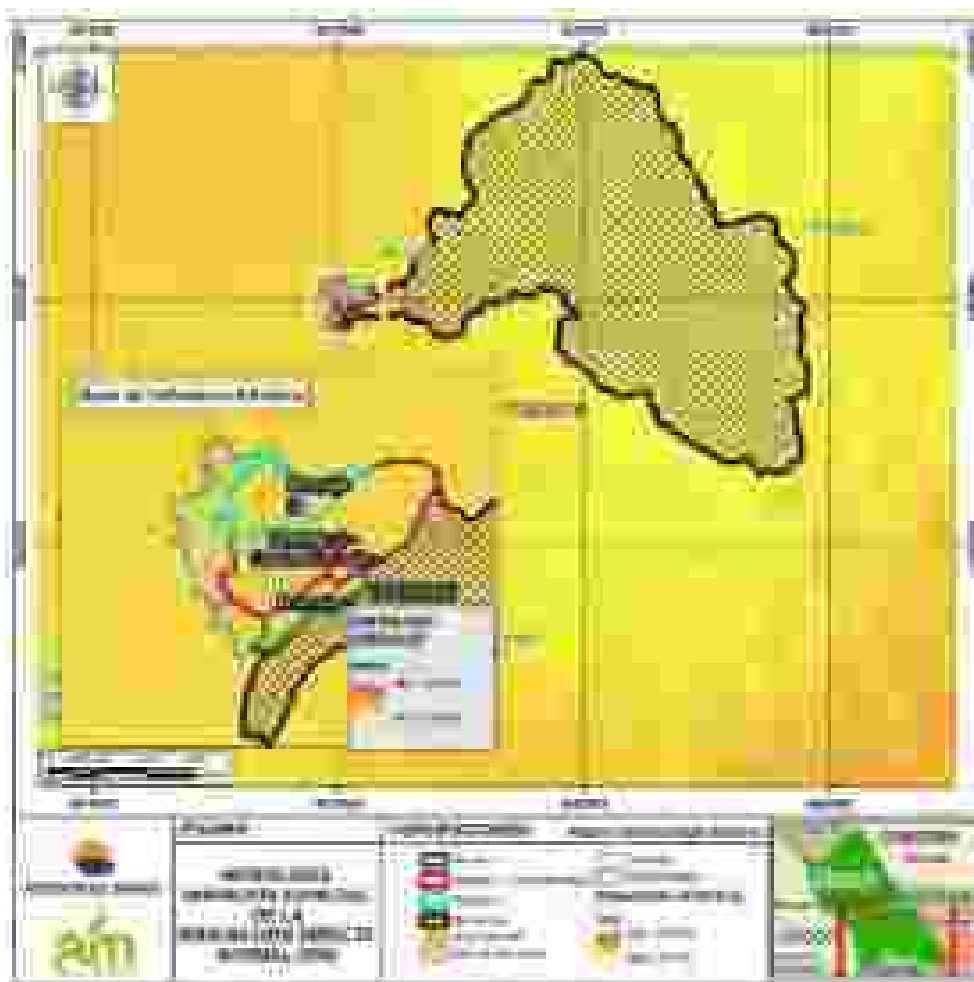


Figura 5.84 Irradiación directa normal (DNI)

Fuente: Global Solar Atlas (World Bank Group & Solargis, 2024), modificado por Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

En la Tabla 5.72 se presentan los valores de irradiación directa normal sobre las cuencas de análisis.

Tabla 5.72 Irradiación directa normal (DNI) [kWh/m²]

ID	Nombre microcuenca	Irradiación directa normal (DNI) [kWh/m ²]
0	Río Sucio Medio y Bajo - NSS	797,11
1	Río Mutatá	516,12
2	Drenaje 1	765,34
3	Drenaje 2	766,34
4	Drenaje 3	771,04

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.6 Morfometría de las cuencas hidrológicas

A continuación, se presenta la caracterización morfométrica de las microcuencas, donde se incluye los parámetros físicos, de forma, de relieve, las características del sistema de drenaje y la determinación del tiempo de concentración. Si bien el área hidrográfica

denominada Río Sucio Medio y Bajo se tuvo en consideración para el análisis de las variables climáticas, para el caso de la caracterización morfométrica no se tendrá en consideración, únicamente se tendrán presentes las cuencas a la altura del proyecto y la cuenca Río Mutatá por su cercanía.

5.1.5.6.1 Parámetros físicos de la cuenca

Los parámetros físicos de la cuenca corresponden a las dimensiones de la cuenca hidrográfica, cuyos resultados se presentan en la [Tabla 5.73](#).

A. Área de la cuenca

El área de la cuenca es la proyección horizontal del área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigida directa o indirectamente a un mismo cauce natural.

B. Perímetro

El perímetro de la cuenca corresponde a la longitud de la línea divisoria de la cuenca.

C. Longitud recta de la cuenca

La longitud recta de la cuenca es la longitud en línea recta con dirección “paralela” al cauce principal entre el punto de salida o descarga de la cuenca y el punto más alejado de este.

D. Ancho de la cuenca

El ancho de la cuenca es la relación entre el área de drenaje de la cuenca y la longitud de esta.

Tabla 5.73 Parámetros físicos de las microcuencas

ID	Nombre microcuenca	Área [km ²]	Perímetro [km]	Longitud de la cuenca [km]	Ancho de la cuenca [km]
1	Río Mutatá	151,92	73,48	19,31	10,25
2	Drenaje 1	0,14	2,40	0,94	0,24
3	Drenaje 2	0,73	4,51	1,67	0,48
4	Drenaje 3	0,31	3,68	1,05	0,54

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.6.2 Parámetros de forma

Para explicar cuantitativamente la forma de la cuenca, ésta se compara con figuras geométricas conocidas como lo son: el círculo, el óvalo, el cuadrado y el rectángulo. El resumen de los parámetros de forma de las microcuencas de interés se encuentra en la Tabla 5.76.

A. Índice de compacidad (K_c)

El índice de compacidad relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de igual área que la de la cuenca. Este parámetro describe la geometría de la cuenca y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico⁷²; se asigna una descripción según la Tabla 5.74.

⁷² (Reyes, Barroso, & Carvajal, 2010)

Tabla 5.74 Índice de compacidad para la evaluación de la forma

Clase	Rango	Descripción
Kc1	1 a 1,25	Forma casi redonda a oval – redonda
Kc2	1,25 a 1,5	Forma oval – oblonga
Kc3	> 1,5	Forma oval – oblonga a rectangular - oblonga

Fuente: Reyes, Barroso, & Carvajal, (2010).

Los resultados para las unidades hidrográficas analizadas se presentan en la , en la cual se indica que las cuencas poseen forma oval – oblonga a rectangular - oblonga, es decir que no tienden a concentrar grandes volúmenes de agua y los caudales de creciente tienden a ser amortiguados.

B. Factor de forma (K_f)

Es la relación entre el área de la cuenca (A) y la longitud de esta (L). Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas rápidas y muy intensas o lentas y sostenidas, existen tres categorías para la clasificación según el valor de este parámetro, presentadas en la Tabla 5.75.

Tabla 5.75 Clasificación del factor de forma

Clase	Rango	Descripción
K_{f1}	<1	Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas
K_{f2}	1	Cuadrada
K_{f3}	>1	Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

Fuente: Reyes, Barroso, & Carvajal, 2010.

Los resultados para las unidades de análisis hidrológico (UAH) se presentan en la Tabla 5.76, en la cual se indica que las cuencas son alargadas y presentan baja susceptibilidad a las avenidas cuando se producen lluvias intensas de acuerdo con los parámetros de forma.

Tabla 5.76 Parámetros de forma

ID	Nombre microcuenca	Kc	Descripción	Kf	Descripción
1	Río Mutatá	1,68	Cuenca oblonga a rectangular	0,41	Forma alargada con baja susceptibilidad a las avenidas
2	Drenaje 1	1,79	Cuenca oblonga a rectangular	0,16	Forma alargada con baja susceptibilidad a las avenidas
3	Drenaje 2	1,49	Cuenca oblonga a rectangular	0,26	Forma alargada con baja susceptibilidad a las avenidas
4	Drenaje 3	1,85	Cuenca oblonga a rectangular	0,33	Forma alargada con baja susceptibilidad a las avenidas

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.6.3 Parámetros asociados al relieve

A continuación, se presentan los parámetros asociados al relieve de las microcuencas, principalmente la elevación media y la pendiente.

A. Pendiente media de la cuenca

La pendiente corresponde a la variación de la inclinación de una cuenca, y determina su comportamiento respecto al desplazamiento de las capas de suelo (erosión o sedimentación). De esta manera, en zonas de altas pendientes se presentan con mayor frecuencia problemas de erosión, mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación⁷³.

En conjunto con el uso del suelo y la red de drenaje, la pendiente influye en el comportamiento de la cuenca, lo que afecta directamente la respuesta hidrológica, es decir, la magnitud y el tiempo de formación de una creciente en el cauce principal. En la Tabla 5.77 se muestra la clasificación de las cuencas según la pendiente.

Tabla 5.77 Clasificación de la cuenca de acuerdo con la pendiente

Pendiente media (%)	Tipo de relieve
0-3	Plano
3-7	Suave
7-12	Medianamente accidentado
12-20	Accidentado
20-35	Fuertemente accidentado
35-50	Muy fuertemente accidentado
50-75	Escarpado
>75	Muy escarpado

Fuente: IDEAM, 2013¹¹.

En la Tabla 5.78 se presentan los resultados para las microcuencas, en los cuales se puede apreciar que la cuenca del río Mutatá presenta un relieve escarpado, mientras que las cuencas de los Drenaje 1, Drenaje 2 y Drenaje 3 presentan relieves entre accidentados y suaves.

B. Elevación media de la cuenca

La variación altitudinal de una cuenca hidrográfica incide directamente sobre el clima, y por tanto sobre el régimen hidrológico; además brinda una base para caracterizar diferentes zonas climatológicas dentro de la misma cuenca. En la Tabla 5.78 se presentan los resultados de elevación media de las unidades de análisis hidrológico evaluadas.

Tabla 5.78 Parámetros de relieve de las cuencas de las Microcuencas

ID	Nombre microcuenca	Pendiente [%]	Descripción	Elevación media [m,s,n,m,]
1	Río Mutatá	51,60	Escarpada	1.168,85
2	Drenaje 1	4,70	Suave	140,89
3	Drenaje 2	12,46	Accidentado	174,38
4	Drenaje 3	8,52	Medianamente accidentado	155,18

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025..

5.1.5.6.4 Características del sistema de drenaje

⁷³ (IDEAM, 2013)

En este apartado se realiza la caracterización del sistema de drenaje de las UAH, como la longitud de cauce principal, las cotas de nacimiento y confluencia, y la pendiente media del cauce, cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.79. Adicionalmente se estiman el Índice de Sinuosidad, la Densidad de Drenajes y la Densidad de Corrientes, como se describe en los siguientes numerales.

Tabla 5.79 Parámetros asociados al perfil del cauce de las UAH

ID	Nombre microcuenca	Longitud del cauce principal [km]	Cota máxima del cauce [m.s.n.m.]	Cota mínima del cauce [m.s.n.m.]	Pendiente media del cauce [%]
1	Río Mutatá	26,75	2119,00	122,00	7,46
2	Drenaje 1	0,50	141,00	131,00	1,80
3	Drenaje 2	1,50	181,00	134,00	2,86
4	Drenaje 3	0,78	177,00	136,00	4,86

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

A. Índice de sinuosidad (I_s)

La sinuosidad se presenta frecuentemente en cauces de poca pendiente, mientras que una baja sinuosidad es representativa de cauces de mayor pendiente. Puede medirse basados en la longitud del cauce principal con relación de la longitud media de la cuenca y define el tipo de canal⁷⁴, de acuerdo con la Tabla 5.80.

Tabla 5.80 Descripción del índice de sinuosidad

I_s	Tipo de canal
1 – 1,2	Canal Rectilíneo
1,2 – 1,5	Canal Transicional
1,5 – 1,7	Canal Regular
1,7 – 2,1	Canal Irregular
>2,1	Canal Tortuoso

Fuente: Schumm, 1977¹².

El índice de sinuosidad de las corrientes objeto de estudio se muestran en la Tabla 5.82 teniendo que la mayoría de las corrientes poseen canales rectilíneos y canales transicionales, debido a que se presentan canales generalmente rectos y en los casos del río Mutatá y el Drenaje sin Nombre 2 – Quebrada Daira, se presenta cauces principalmente rectos y/o con sinuosidad moderada.

B. Densidad de drenajes (D_d) y corrientes (D_c)

La densidad del drenaje es la relación entre la longitud total de las corrientes de agua de la cuenca y su área total; como resultado se tiene que cuencas con drenaje pobre presentan valores bajos y cuencas bien drenadas tiene unos valores altos⁷⁵, como se muestra en la Tabla 5.81 Por otro lado, la densidad de corrientes es la relación entre el número total de corrientes en la cuenca y su área total; los valores elevados corresponden a cuencas bien drenadas.

Tabla 5.81 Clasificación de la densidad de corrientes

⁷⁴ (Schumm, 1977)

⁷⁵ (CORTOLIMA, 2009)

Densidad de drenaje (D_d)	Clase
0,1 – 1,8	Baja
1,9 – 3,6	Moderada
3,7 – 5,6	Alta

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.82 se presentan los valores de densidad de drenaje y densidad de corrientes, teniendo que todos los sistemas evaluados corresponden a cuencas con densidad de drenaje baja y moderada.

Tabla 5.82 Parámetros relacionados con la red de drenaje de las UAH

ID	Nombre microcuenca	Is	Descripción sinuosidad	Dd	Dc	Descripción densidad de drenaje y corrientes
1	Río Mutatá	1,40	Canal transicional	3,79	7,50	Densidad de corriente alta
2	Drenaje 1	0,98	Cauce rectilíneo	9,73	62,73	Densidad de corriente alta
3	Drenaje 2	1,18	Canal transicional	3,55	10,92	Densidad de corriente alta
4	Drenaje 3	1,12	Cauce rectilíneo	5,00	22,27	Densidad de corriente alta

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.6.5 Tiempo de concentración

Es considerado como el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente, desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida. Para su cálculo, se pueden emplear diferentes fórmulas que se relacionan con parámetros propios de la cuenca.

En la literatura se encuentran numerosas expresiones para determinar el tiempo de concentración de las cuencas hidrográficas, desarrolladas por diferentes autores para diferentes regiones del mundo. A continuación, se presenta un resumen de las ecuaciones utilizadas en el presente estudio.

Bransby-Williams: $T_c = 14,6L * A^{-0,1} * S_0^{-0,2}$

T_c : Tiempo de concentración [min]

A : Área de la cuenca [km²]

L : Longitud del cauce principal [km]

S_0 : Diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente sobre L [m/m]

California Culverts Practice $T_c = 0,0195 \left(\frac{Lm^3}{H} \right)^{0,385}$

T_c : Tiempo de concentración [min]

Lm : Longitud del cauce principal [m].

H : Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente [m]

Giandotti: $T_c = \left(\frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{25,3\sqrt{LS_0}} \right)$

T_c : Tiempo de concentración [h]

A : Área de la cuenca [km^2].

L : Longitud del cauce principal [km]

S_0 : Diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente sobre L [m/m]

Johnstone y Cross:
$$T_c = 5 \left(\frac{Lm}{\sqrt{S_0}} \right)^{0,5}$$

T_c : Tiempo de concentración [h]

Lm : Longitud del cauce principal [mi]

S_0 : Pendiente del cauce principal [pies/mi]

Kirpich:
$$T_c = 0,0078 * L_p^{0,77} * Sp^{-0,385}$$

T_c : Tiempo de concentración [min]

L_p : Longitud del cauce principal [pies]

Sp : Pendiente del canal [m/m]

Linsey:
$$T_c = Ct \left(\frac{Lm * Lc}{S^{0,5}} \right)^{0,35}$$

T_c : Tiempo de concentración [h]

Ct : Constante (1.2, áreas montañosas; 0.72, en zonas de pie de ladera; 0.35, en valles).

Lm : Longitud de la cuenca [mi].

Lc : Distancia desde el punto de interés al centro de gravedad de la cuenca [mi]

S : Diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente sobre L [%]

Passini:
$$T_c = a \frac{(SL)^{1/3}}{i^{0,5}} \quad a = \frac{L}{\sqrt{S}}$$

T_c : Tiempo de concentración [h]

a : Alejamiento medio

L : Longitud del cauce principal [km].

S : Área de la cuenca [km^2]

i : Pendiente media del cauce principal [%]

Pérez Monteagudo:
$$T_c = \frac{L}{72 * \left(\frac{H}{L} \right)^{0,6}}$$

T_c : Tiempo de concentración [h]

L : Longitud del cauce principal [km]

H : Diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente [km]

Pilgrim y McDermott:
$$T_c = 0,76A^{0,38}$$

T_c : Tiempo de concentración [h]

A: Área de la cuenca [km^2]

SCS – Ranser:
$$T_c = 0,947 K^{0,385} \text{ donde } K = \sqrt{\frac{L_c^3}{H}}$$

T_c : Tiempo de concentración [h]

L_c : Distancia desde el punto de interés al punto donde la corriente corta la divisoria [km]

H: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente [pies]

Snyder:
$$T_c = Ct(Lm * Lc)^{0,3}$$

T_c : Tiempo de concentración [h]

Ct: Constante (1,2, áreas montañosas; 0,72, en zonas de pie de ladera, 0,35, en valles).

Lm: Longitud de la cuenca [mi]

Lc: Distancia desde el punto de interés al centro de gravedad de la cuenca [mi]

Témez:
$$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,75}$$

T_c : Tiempo de concentración [h].

L: Longitud del cauce principal [km].

S : Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L [%].

Williams:
$$T_c = \frac{Lm * Am^{0,4}}{DS^{0,2}}$$

T_c : Tiempo de concentración [h]

Lm: Distancia en línea recta desde el punto de interés al punto más alto de la cuenca [mi]

Am: Área de la cuenca [mi]

D: Diámetro de una cuenca circular [mi].

S: Diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente sobre L [%]

El tiempo de concentración se estimó como el promedio aritmético de los valores obtenidos por las diferentes metodologías. Los datos por fuera de los límites de confianza definidos (resaltados en color gris) no fueron usados para el análisis. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.83.

Tabla 5.83 Resultados de tiempos de concentración en las cuencas de estudio

ID	1	2	3	4
Método	Río Mutatá	Drenaje 1	Drenaje 2	Drenaje 3
Bransby - Williams	397,32	19,82	46,15	27,60
California Culvert Practice	135,83	10,54	20,71	12,20
Giandioti	15,01	5,66	6,50	4,24
Johnstone y Cross	274,59	53,59	82,77	57,40
Kirpich	135,69	10,96	21,40	12,18

ID	1	2	3	4
Método	Río Mutatá	Drenaje 1	Drenaje 2	Drenaje 3
Linsey	65,99	10,22	14,05	9,39
Passini	378,47	20,08	39,60	20,12
Pérez Monteagudo	105,78	4,36	10,03	4,87
Pilgrim y McDermott	307,39	21,80	40,51	29,22
SCS - Ramser	104,48	35,59	44,23	34,27
Snyder	75,74	12,36	17,42	13,18
Témez	145,28	9,59	20,09	12,60
Williams	204,48	16,77	29,35	19,05
T seleccionado [min]	121,66	14,68	25,39	14,10

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.6.6 Patrones regionales de drenaje

Los patrones de drenaje son configuraciones en las redes hídricas que presentan ciertos arreglos geométricos o irregulares; el conocimiento de su disposición, ramificación y caracterización es básico si se considera su influencia en la respuesta hidráulica e hidrológica de una cuenca. Dependiendo de la forma que presenten los cauces que posee la cuenca, se puede hablar de patrones de drenaje, entendido esto como la forma que tiene él o los cauces encargados de drenar o extraer el agua de los terrenos circundantes (vertientes), en la Figura 5.85 se presentan algunos patrones de drenaje documentados en la literatura. Para las cuencas de interés se tiene patrones de drenaje dendríticos y contorsionados, donde se observan controles asociados a intervenciones antrópicas por modificación del suelo.

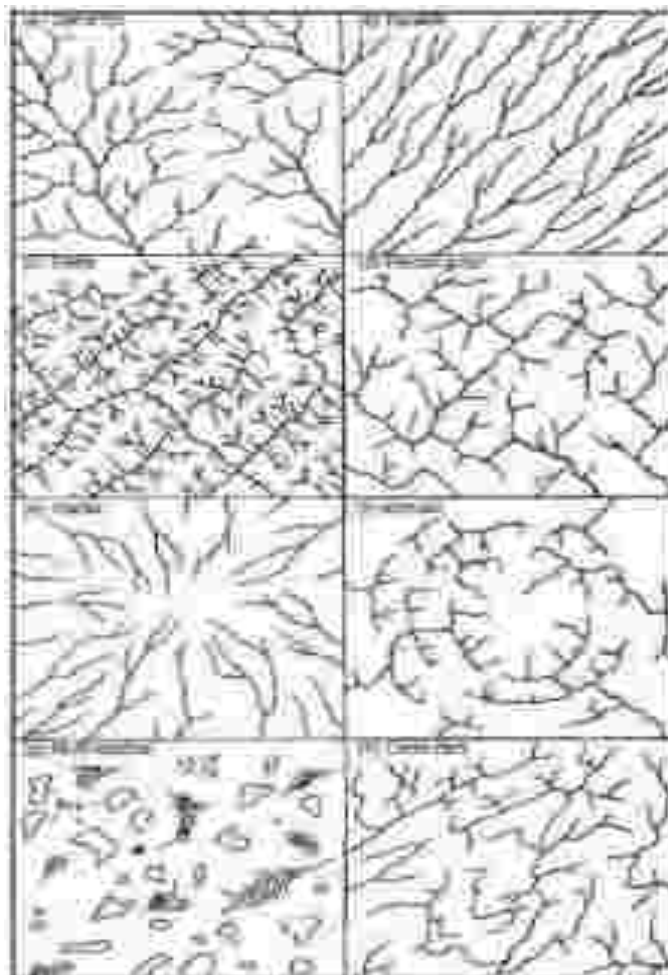


Figura 5.85 Patrones de drenaje regionales documentados en la bibliografía
Fuente: Singh, 2016⁷⁶.

5.1.5.7 Régimen hidrológico

En este apartado se presentan los caudales característicos de las microcuencas de interés: caudal medio, caudal ambiental, la estimación de la oferta hídrica disponible, los caudales máximos y caudales mínimos asociados a los periodos de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

5.1.5.7.1 Caudal medio

A. Balance hídrico a largo plazo

Para el balance hidrológico, se utilizaron las ecuaciones de conservación de masa de agua en un sistema o volumen de control. En este caso, el volumen de control considerado está conformado por las columnas atmosféricas y de suelo, donde la frontera horizontal está definida por la divisoria de la cuenca; el borde inferior de la columna de suelo es un estrato impermeable y el borde superior de la columna atmosférica es su tapa. El balance de agua en el volumen de control para la columna atmosférica está dado por la siguiente ecuación,

⁷⁶ (Singh, 2016)

donde $dS(t)$ es el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo en el tiempo t en mm, $P(t)$ es la precipitación en el tiempo t en mm, $E(t)$ es la evapotranspiración en el tiempo t en mm, $R(t)$ es la escorrentía superficial en la cuenca en el tiempo t en mm.

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - E(t) - R(t)$$

Al integrar dicha ecuación en el largo plazo para un tiempo T , se considera que el cambio en almacenamiento es igual a cero, obteniendo la siguiente expresión, donde $\bar{R}$, $\bar{P}$ y $\bar{E}$ representan los valores medios a largo plazo para la escorrentía, precipitación y evapotranspiración en la cuenca.

$$\bar{R} = \bar{P} - \bar{E}$$

Una suposición adicional que se realiza es identificar a $\bar{R}$ con el promedio de escorrentía superficial, la cual es justificada por la imposibilidad de observar, medir o estimar la componente subterránea. De esta manera, al simplificar términos y remplazar los promedios en el tiempo se obtiene la siguiente ecuación, donde $\bar{Q}$ es el caudal medio de largo plazo en unidades de (L^3/T) , A es el área en unidades de (L^2) , $\bar{P}$ es la precipitación en unidades de (L/T) , $\bar{E}$ es la evapotranspiración en unidades de (L/T) .

$$\bar{Q} = A(\bar{P} - \bar{E})$$

Para una cuenca dada, el cálculo del balance hidrológico se hace aplicando la ecuación anterior en cada punto interior (x, y) . Así, para cada píxel en el interior de la cuenca, se estima la precipitación y la evapotranspiración real a partir de los mapas descritos en la sección 5.1.5.5, se evalúa la ecuación y su resultado se multiplica por el área del píxel, obteniendo así el volumen de agua que éste aporta durante el intervalo de tiempo dado (un año en este caso). Finalmente, la integración sobre toda la cuenca estima el volumen total de agua que sale del sistema durante el mismo período de tiempo.

En la Tabla 5.84 se presentan los resultados del balance hídrico a largo plazo estimado para cada una de las UAH. Se puede observar que los resultados obtenidos por cada una de las metodologías presentan pequeñas variaciones; por lo que para seleccionar la metodología que represente de mejor manera los caudales medios, se comparó con los datos obtenidos para la cuenca del río Sucio en la estación ANIL EL [11117010], la cual tiene un valor medio de $35,19 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniendo que la metodología que más se acerca al valor medio observado es la calculada mediante el método de Turc la cual para la misma cuenca presenta un valor de $36,34$, de esta manera se espera que los valores estimados de ETR por el método de sean más precisos para las demás cuencas de la zona.

Tabla 5.84 Resultados del balance hídrico a largo plazo

ID	Nombre microcuenca	Metodología	ETR [mm/año]	P [mm/año]	Q [m^3/s]
1	Río Mutatá	Cenicafé - Budyko	770,59	4065,85	15,85
		Turc	1.216,38		13,70
		Regional	1.118,36		14,17
2	Drenaje 1	Cenicafé - Budyko	936,69	4483,26	0,02
		Turc	1.735,52		0,01
		Regional	1.127,91		0,02
3	Drenaje 2	Cenicafé - Budyko	930,94	4496,14	0,08
		Turc	1.716,91		0,06
		Regional	1.128,14		0,07

ID	Nombre microcuenca	Metodología	ETR [mm/año]	P [mm/año]	Q [m³/s]
4	Drenaje 3	Cenicafé - Budyko	934,47	4510,70	0,04
		Turc	1.728,67		0,03
		Regional	1.128,40		0,03

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

B. Estimación de caudales medios mediante modelo hidrológico lluvia-escorrentía

A continuación, se realiza una descripción conceptual del modelo de tanques agregado lineal⁷⁷, en donde el intervalo de tiempo utilizado en este caso en la simulación es de un día. Una metodología detallada del proceso de calibración del modelo de tanques puede ser consultada en Jaramillo et al. 2004⁷⁸ y Amaya et al. 2009⁷⁹.

Este modelo cuenta con siete (7) parámetros de calibración, representados en propiedades físicas del suelo; además se considera como parámetro a ser calibrado los tiempos de residencia del agua en las diferentes capas de suelo. Dada la naturaleza de los parámetros de calibración y de la escala de simulación diaria, el ajuste del modelo representa de mejor manera los caudales medios y mínimos, razón por la que se implementa este método para la estimación de estos caudales. En el Anexo_C5/5_1_5_Hidrologia/Series_sinteticas se presentan los modelos utilizados en la estimación de caudales medios mediante modelo hidrológico lluvia-escorrentía

I. Modelo Agregado lineal – Descripción teórica

En el modelo, la producción de escorrentía se basa en balance hídrico en la cuenca, asumiendo que el agua se distribuye en cuatro tanques o niveles de almacenamiento conectados entre sí, en donde cada uno de estos tanques representan las diferentes partes del suelo y subsuelo que aportan a la escorrentía, como puede observarse en la Figura 5.86.

⁷⁷ (Vélez, 2001)

⁷⁸ (Jaramillo Uribe, Vélez Upegui, & Vélez Otálvaro, 2004)

⁷⁹ (Amaya, Tamayo, Vélez, Vélez, & Álvarez, 2009)

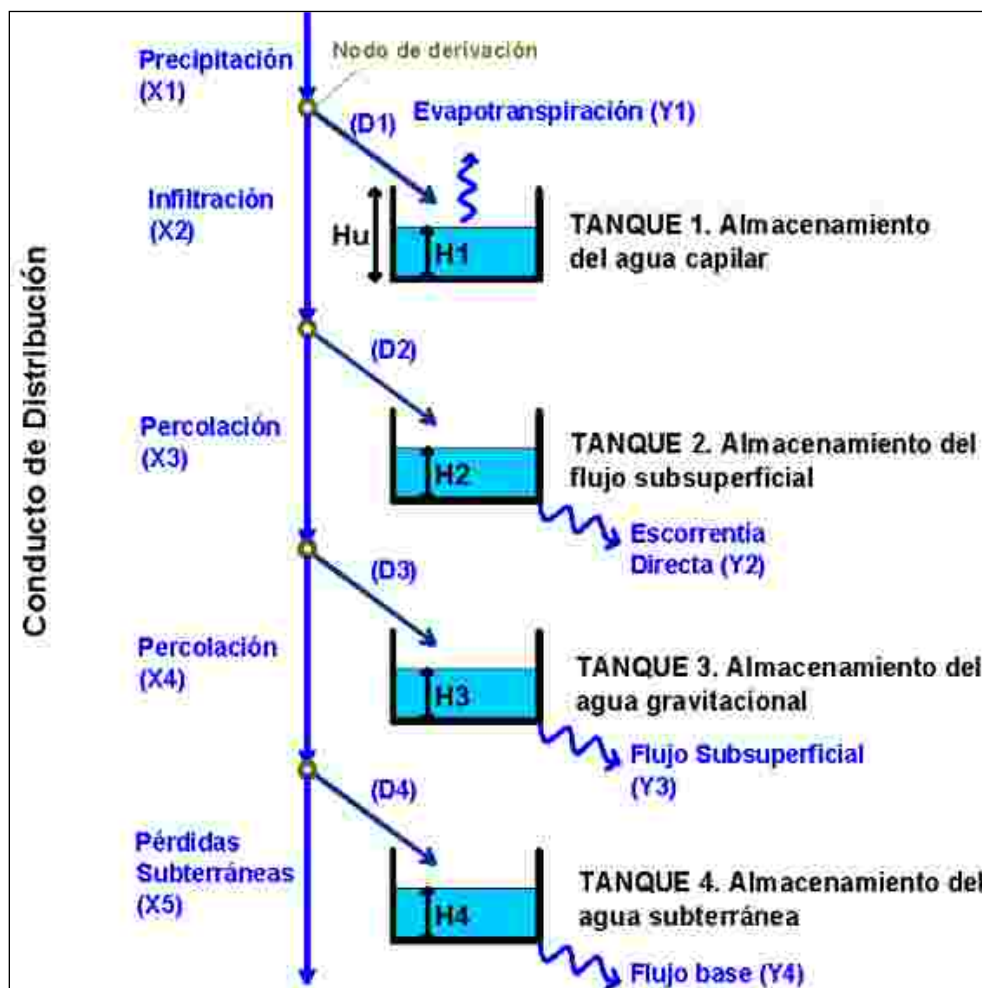


Figura 5.86 Modelo de tanques agregado lineal

Fuente. Vélez, J. I., 2001.

En cada intervalo de tiempo, la precipitación, X_1 , se distribuye a los distintos almacenamientos (o tanques), donde en función del volumen almacenado en cada uno de ellos, H_i , se determina su contribución a la escorrentía Y_i .

El modelo realiza el balance de agua en cada tanque y actualiza los volúmenes almacenados en cada uno de ellos.

La cantidad de agua que se deriva en cada nodo, D_i , y la que continua hacia los niveles inferiores X_i por el conducto distribuidor depende de la cantidad de agua disponible, del estado de almacenamiento del tanque y de la capacidad del conducto distribuidor aguas abajo del nodo, la cual que se puede relacionar con la conductividad hidráulica en el subsuelo.

La descarga Y_i en cada uno de los tanques está en función del volumen almacenado y de las características de la cuenca que se pueden asociar con el tiempo de permanencia del agua en un elemento de almacenamiento temporal.

i. Tanque 1: Almacenamiento Capilar en el Suelo

Representa el agua que transita por la cuenca y que sólo sale de ella por evapotranspiración, por lo tanto, no hace parte de la escorrentía. Este almacenamiento se refiere a la interceptación, la detención de agua en charcos y el agua que se retiene en el suelo debido a fuerzas capilares.

De acuerdo con la configuración del modelo, la precipitación X1 se estima según los registros de las estaciones más cercanas, empleando un método de interpolación espacial.

El valor obtenido de lluvia entra a un conducto del que se deriva una cantidad D1 para el almacenamiento o tanque T1. La capacidad máxima (Hu) se supone igual a la suma de la capacidad de almacenamiento de "agua útil" en el suelo y la capacidad de la cobertura de la superficie para almacenar agua. La capacidad de almacenamiento de "agua útil" está relacionada con la cantidad de agua que hay que agregar a una columna de suelo muy seco hasta alcanzar el mayor almacenamiento capilar posible sin que el agua fluya por la acción de la gravedad. La capacidad de la cobertura de la superficie por lo general está relacionada con la cobertura vegetal.

La cantidad de agua que se deriva y que entra al almacenamiento estático, corresponde de una forma muy elemental; al mínimo entre el agua existente en el conducto distribuidor, el que se requiere para llenar el tanque de almacenamiento capilar, y el máximo que puede ingresar al suelo durante un intervalo de tiempo.

Así, a menos que se llene el almacenamiento capilar, no se deja pasar nada a la escorrentía. En la realidad puede haber escorrentía sin que necesariamente se haya llenado el almacenamiento capilar en el suelo. Entonces se utiliza un coeficiente para lograr que la cantidad de agua que se deje pasar corresponda a una fracción de la lluvia que está relacionada con el estado del almacenamiento capilar tal que, cuando este almacenamiento esté muy lleno deje pasar mucho, y cuando está muy vacío deje pasar poco. En este caso corresponde a

$$D_1 = \text{Min}\{\varphi X_1, Hu - H_1\}$$

$$\varphi = 1 - \left(\frac{H_1}{Hu}\right)^a$$

Este esquema ha sido utilizado por varios modelos conceptuales agregados. Es el caso del modelo HBV (Bergström, 1995 en Vélez J. I. en 2001⁸⁰) en el que a puede tomar valores entre 1 y 3 y es un parámetro que define el analista. Otro caso es el de los modelos GR-3J y GR-3H (Arnaud y Lavabre, 1996 en Vélez J. I. en 2001 (Vélez, 2001)¹⁸) en los que a es igual a 2.

La cantidad de agua que representa la evapotranspiración Y1 es función del agua disponible en el tanque y la evapotranspiración real ETR.

La ETR depende de la cantidad de agua disponible, así cuando hay déficit de agua en el suelo la evapotranspiración es menor que la evapotranspiración potencial ETP. Varios autores han utilizado una expresión en la que se obtiene un estimado de la evaporación real a partir de la evapotranspiración potencial y de la relación entre la humedad del suelo

⁸⁰ (Vélez, 2001)

y la humedad del suelo a la capacidad de campo. En el modelo esto equivale a la relación entre el agua que se encuentra en el almacenamiento estático y la capacidad máxima para ese almacenamiento, así:

$$Y_1 = ETP \left(\frac{H_1}{Hu} \right)^b$$

En los modelos GR-2 y GR-3 del CEMAGREF (Michel, 1989 en Vélez J. I., (2001)) se utiliza una expresión muy similar a la anterior y el parámetro b tiene un valor de 0.5. Igualmente, el modelo HBV (Bergström, 1995 en Vélez J. I., (2001)) utiliza una expresión equivalente cuando $b = 1$. Singh y Dickinson (1975) en Vélez J. I., (2001) obtienen buenos resultados con b igual a 0.7.

Además, en el modelo se tiene en cuenta que el valor de la evapotranspiración real no puede ser mayor que el agua disponible para evaporación en este almacenamiento estático, así:

$$Y_1 = \text{Min} \left\{ ETP \left(\frac{H_1}{Hu} \right)^b, H_1 \right\}$$

Para estimar la evapotranspiración potencial se recomienda utilizó la ecuación de Cenicafé⁸¹. De acuerdo con lo propuesto en el modelo, el agua que no ingresa al almacenamiento estático T1 sigue su camino por la zona capilar del suelo hacia abajo.

$$X_2 = X_1 - D_1$$

ii. Tanque 2: Almacenamiento del Flujo Superficial

En este almacenamiento se representa el agua que es susceptible a infiltrarse a un nivel inferior o que fluye por la ladera (escorrentía directa). Se supone que la capa superior del suelo tiene una conductividad hidráulica K_s representativa o característica y que se asocia al tipo de suelo y a su estructura, lo cual está relacionando la cobertura vegetal, el uso y manejo del suelo.

Por lo tanto, la cantidad de agua que entra al almacenamiento T_2 , está relacionada con la capacidad del suelo para dejar pasar el agua a su interior K_s , una conductividad hidráulica de la capa superior del suelo asociada a la cobertura en condiciones de saturación, y con el flujo excedente del almacenamiento capilar X_2 según la siguiente relación:

$$D_2 = \text{Max}\{0, X_2 - K_s \Delta t\}$$

Para el flujo superficial en la cuenca, suponiendo velocidad constante y aplicando la ecuación de continuidad, la escorrentía directa se puede representar mediante un embalse lineal: $Y_2 = \alpha H_2$. En donde el coeficiente de descarga α es función del tiempo de residencia del agua en el interior del suelo.

$$\alpha = \frac{1}{\text{tiempo de residencia}}$$

El agua que no ingresa al almacenamiento estático T_2 , sigue su camino por la zona capa superior del suelo hacia la capa inferior.

⁸¹ (Barco & Cuartas, 1998)

$$X_3 = X_2 - D_2$$

iii. Tanque 3: Almacenamiento de Agua Gravitacional en la Capa Superior del Suelo

Este almacenamiento representa al agua almacenada en la capa superior del suelo mientras fluye lentamente hacia la red de drenaje, se desarrolla inicialmente sobre una capa delgada que fluye lateralmente hacia abajo por el interior de esta capa hasta que sale a los elementos de la red de drenaje.

De acuerdo con lo propuesto en el modelo, durante el intervalo de tiempo, se tiene una cantidad de agua gravitacional X_3 que se mueve verticalmente hacia el interior del suelo.

De esta cantidad, una parte X_4 , podrá percolar o seguir hacia la zona inferior del suelo, mientras que el resto del agua se deriva al almacenamiento superior del suelo donde se convertirá en flujo subsuperficial.

Se supone igualmente que la capa inferior del suelo tiene una capacidad de percolación representativa que se asocia al tipo de subsuelo y su estructura, lo cual está estrechamente relacionado con las características geológicas (litológicas y estructurales) y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo. En algunos casos la capacidad de percolación y su variabilidad espacial se pueden inferir por características del relieve, algunos rasgos morfológicos, el desarrollo de la vegetación, el uso y manejo del suelo y la producción de flujo base aguas abajo.

La cantidad de agua que ingresa al almacenamiento durante el intervalo de tiempo se puede asociar con el flujo excedente del almacenamiento del flujo superficial en ladera X_3 y la conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo (subsuelo) en condiciones de saturación que se conoce como capacidad de percolación K_p y que se expresa:

$$D_3 = \text{Max}\{0, X_2 - K_p \Delta t\}$$

Para la producción de escorrentía subsuperficial en la ladera se hace una formulación análoga a la presentada en el almacenamiento T_2 para obtener la siguiente relación lineal:

iv. Tanque 4: Almacenamiento Subterráneo

Se representa por un tanque donde se considera el almacenamiento del agua gravitacional mientras fluye a través del interior del suelo hacia la red de drenaje, en lo que se podría considerar como el acuífero, y donde sale a formar el flujo base.

El volumen de agua que durante el intervalo de tiempo ingresa por percolación X_4 tiene la posibilidad de que una cantidad de agua siga hacia las pérdidas subterráneas X_5 (debido a fallas, fracturas, unidades cársticas, etc.) y que el resto sea derivado hacia el almacenamiento subterráneo T_4 .

La cantidad de agua que se deriva para el flujo subterráneo depende de la cantidad de agua que ha percolado y de la cantidad que pasa a las pérdidas.

$$D_4 = \text{Min}\{0, X_4 - K_{pp}\}$$

Para la representación del flujo a través del almacenamiento subterráneo, se utiliza la ecuación de continuidad y una ecuación que relaciona la tasa de flujo que sale de este almacenamiento con la cantidad de agua almacenada:

$$Y_4 = \alpha H_4$$

La importancia de la representación del flujo subterráneo en la modelación de crecidas está en reproducir adecuadamente las recesiones del flujo en los cauces y que esto sea coherente con el volumen de agua que ha ingresado al almacenamiento subterráneo.

Finalmente, el caudal promedio diario total en la cuenca para cada intervalo de tiempo es la suma del flujo producido en cada tanque o almacenamiento:

$$Q = Y_2 + Y_3 + Y_4$$

II. Información de entrada

La calidad de la información utilizada en el modelo, tanto para la calibración de los parámetros del modelo, como para la generación de series, repercute directamente en la calidad de los resultados del modelo en cuencas donde no se cuente con registros históricos de caudal. Entre las variables de entrada que el modelo requiere se encuentran: La evaporación potencial, la precipitación diaria, caudal diario, etc. A continuación, se hace una descripción de cómo se obtiene cada una de estas variables.

i. Área de la cuenca

Conociendo la ubicación del sitio de interés sobre la corriente, ya sea para calibración del modelo o para generación de series, con el programa HidroSIG 4.0 (UNAL, 2010) se obtiene la estimación de la línea divisoria del área de drenaje, así como el valor del área.

ii. Caudal diario

En el caso que se requiera realizar una calibración del modelo es necesario tener la serie de caudales diarios. Es una de las variables más importantes juntamente con la precipitación en la etapa de la calibración del modelo, y es necesario poner en consideración la homogeneidad en la serie para garantizar que los caudales simulados sean consistentes con los reales. Aunque para calibrar el modelo no se exige una cantidad mínima de años, cuanto más largo sea el período de calibración serán más confiables las calibraciones. Para realizar la calibración no se requiere completar los datos faltantes en la serie de caudales. En este estudio se utilizó el modelo para la reconstrucción y extensión de series de caudales diarios en la cuenca de apoyo, y para la simulación (o construcción) de caudales diarios en las cuencas de interés, las cuales son hidrológicamente homogéneas a escala regional.

iii. Precipitación diaria

Conjuntamente con la calidad y longitud de los registros de las series de precipitación, otro criterio para la selección de las series de precipitación utilizadas es la ubicación de éstas al lugar de interés, es decir su cercanía. Tal y como está programado el modelo como mínimo requiere de una estación de precipitación y como máximo cinco, aunque se podría simular con más estaciones. El número máximo de estaciones está limitado por la hoja de cálculo.

iv. Reconstrucción de datos faltantes

Se tiene que completar las series de precipitación diaria, de tal forma que todas las series tengan la misma longitud y estén completas.

v. Evaporación potencial

La evaporación potencial se calcula usando algún método reportado en la literatura, y que sea acorde con el área de interés. El método de Cenicafé es usualmente usado en Colombia, y éste asume que la evaporación potencial es función de la altura media de la cuenca.

III. Parámetros del modelo

i. Parámetros hidráulicos

En cuanto a los parámetros hidráulicos se tienen el almacenamiento capilar del suelo, la conductividad del suelo en su capa superficial e inferior; el tiempo medio de residencia del flujo superficial, subterráneo y del flujo base. Cada uno de estos parámetros tiene un intervalo de variación, y dicho rango de variación se ha definido con base en trabajos previos y los reportes de la literatura científica y con base a los valores esperados de acuerdo con el tipo de suelo del proyecto, las fallas estructurales, etc. Los parámetros y el rango de variación se muestran en la Tabla 5.85.

Tabla 5.85 Intervalos aproximados de variación de los parámetros hidráulicos del modelo

Parámetros Hidráulicos	Min	Max
Almacenamiento capilar (mm)	20,00	600,00
Conductividad capa superior (mm/día)	1,00	100,00
Conductividad capa inferior (mm/día)	0,01	10,00
Perdidas subterráneas (mm)	0,00	10,00
Tiempo medio de residencia flujo superficial (días)	1,00	10,00
Tiempo medio de residencia flujo subsuperficial (días)	1,00	10,00
Tiempo medio de residencia flujo base (días)	50,00	200,00

Fuente. Vélez, J. I., 2001⁸².

ii. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales de almacenamiento de cada uno de los tanques se obtienen conociendo, o infiriendo, las condiciones hidráulicas del terreno, la calidad y textura (Tabla 5.86).

Tabla 5.86 Rango de condiciones iniciales en cada uno de los tanques

Parámetro (mm)	Tanque	Min	Max
Almacenamiento Capilar	T1	0	300
Almacenamiento Agua superficial	T2	0	10
Almacenamiento Gravitacional Z Superior	T3	0	30
Almacenamiento Gravitacional Z Inferior (acuífero)	T4	0	2000

Fuente. Vélez, J. I., 2001.

⁸² (Vélez, 2001)

iii. Otros parámetros del modelo

Son los parámetros correspondientes a la evaporación real y a la infiltración de la cuenca: exponente de infiltración y de evaporación.

A diferencia de los parámetros hidráulicos del modelo, los exponentes de evaporación y de infiltración han sido explorados de manera más amplia por los diferentes autores y el rango de variación de cada uno de éstos no es tan amplio, tal como se observa en la Tabla 5.87, y de los cuales ya algunos autores recomiendan dichos valores.

Tabla 5.87 Rango de variación de otros parámetros del modelo de tanques

Otros parámetros del modelo	Min	Max
Exponente infiltración (Se recomienda 2)	1	3
Exponente evaporación (Se recomienda 0.7)	0,25	1,5

Fuente. Vélez, J. I. (2001).

iv. Influencia de las estaciones de precipitación

Durante la simulación se debe tener en cuenta tanto la influencia de cada una de las estaciones de precipitación, como el valor de la precipitación media anual en la cuenca. Esto último para garantizar que la precipitación que entra a la cuenca proveniente de las estaciones de precipitación sea igual a la precipitación media anual sobre la misma.

Para darle peso a cada una de las estaciones de precipitación, se realiza definiendo un peso ponderado por la distancia de las estaciones respecto a la línea divisoria de aguas, siendo mayor la influencia de aquellas dentro del área de la cuenca, y de menor influencia las estaciones alejadas de la cuenca. El peso final que se le da a cada estación tiene en cuenta que la precipitación media total que entra a la cuenca (obtenida de las estaciones una vez ponderadas y estimando el primer momento estadístico), sea igual a la que se obtiene a partir de la precipitación media estimada en el largo plazo. Por supuesto, cuando las series son de mayor registro, las estimaciones son más confiables.

Para la calibración del modelo se observa la correspondencia entre los datos históricos de caudales y los datos simulados. Durante la calibración se debe entender que la componente fuerte del modelo son los caudales medios y mínimos, los cuales son el objetivo de los análisis presentados en este capítulo, por lo que, al momento de realizar la calibración de cada uno de estos parámetros, las recesiones de ambas series (histórica y simulada) deben ser lo más similares posibles. De la misma manera en la curva de duración de caudales simulada y observada es importante que los caudales correspondientes a probabilidades de excedencia entre 50 y 95 % sean lo más similares posible.

El objetivo del modelo no es simular caudales extremos, y esto se debe principalmente al tipo de escala temporal de simulación, la cual es de 1 día. En cuencas pequeñas, como es el caso de estudio, los eventos extremos se dan en períodos de tiempo de minutos y por lo tanto es imposible representar dichos eventos con este modelo lluvia escurriente.

IV. Calibración del Modelo

La calibración del modelo se realizó con la estación limnimétrica ANIL EL [11117010]. Esta estación fue seleccionada dado que dispone de buenos registros de caudal con pocos datos faltantes y cumple con los criterios de homogeneidad y consistencia evaluados en el

numeral 5.1.5.4 dando como resultado que es adecuada para las estimaciones hidrológicas a realizar.

Si bien existen estaciones de caudal más cercanas al área de influencia del proyecto y a las cuencas asociadas a los drenajes de interés, estas no cuentan con las características adecuadas ni con un registro temporal suficiente para la calibración del modelo de tanques. Entre las estaciones consideradas como candidatas por su cercanía y por pertenecer a la misma macrocuenca del río Sucio, se encuentran: ANIL EL [11117010], DABEIBA 2 - AUT [11117050], MUTATÁ - AUT [11117040], MUTATÁ [1111700231] y TASCÓN [11117030].

La estación más cercana al área de influencia del proyecto es MUTATÁ [1111700231], ubicada sobre el río Mutatá. Sin embargo, esta estación presenta un registro de datos de únicamente 2 años, lo cual resulta insuficiente para modelar el comportamiento de los caudales medios y mínimos, así como para representar adecuadamente los periodos asociados a fenómenos climáticos regionales.

La siguiente estación con información más cercana es MUTATÁ - AUT [11117040], ubicada sobre el río Sucio, con registros desde 1976 hasta 2019, lo que equivale a 43 años de información. No obstante, no incluye los años más recientes y presenta un porcentaje de datos faltantes del 31 %, lo cual afecta la calidad del modelo de tanques. Adicionalmente, esta estación representa una cuenca con un área hasta 20 veces superior a la del río Mutatá, lo que introduce una diferencia significativa entre la cuenca pivote y las cuencas que se desean modelar, reduciendo su representatividad.

La estación TASCÓN [11117030], también ubicada sobre el río Sucio, cuenta con un registro de 22 años (1977–1999) y presenta un porcentaje de datos faltantes del 48 %. Al igual que las estaciones anteriores, no dispone de una cantidad de datos adecuada ni de información correspondiente a los últimos 25 años, por lo que tampoco se considera apropiada para la realizar la calibración del modelo.

Por su parte, la estación DABEIBA 2 - AUT [11117050], ubicada sobre el río Sucio, presenta un registro de 40 años (1976–2016) y un porcentaje de datos faltantes de 6,9 %. Si bien esta estación cuenta con una buena cantidad de datos y pocos valores faltantes, no incluye información de los últimos 9 años, lo que limita su utilidad para la calibración del modelo en el contexto actual del proyecto.

Finalmente, se opta por utilizar la información correspondiente a la estación ANIL EL [11117010], la cual presenta un registro de 52 años, desde 1972 hasta la actualidad. Aunque presenta un porcentaje de datos faltantes del 7,7 %, dispone de una mayor cantidad de información y su cuenca asociada presenta diferencias menores con respecto a las cuencas de interés, en comparación con las estaciones mencionadas anteriormente.

Si bien esta estación se encuentra a una distancia aproximada de 50 km del área de influencia del proyecto, pertenece a la misma cuenca hidrográfica del río Sucio, lo que permite asumir una continuidad hidrológica relevante. Adicionalmente, la estación ANIL EL presenta condiciones hidroclimatológicas y un régimen de caudales similares a los observados en las cuencas de interés, lo cual se relaciona con el hecho de que todas estas áreas pertenecen a la misma región biogeográfica. Esta similitud en las condiciones físicas y climáticas fortalece la validez de utilizar esta estación como referencia para la calibración del modelo de tanques, especialmente ante la ausencia de registros más completos y representativos en estaciones más cercanas.

La serie de precipitación diaria utilizada como entrada del modelo fue obtenida a partir del trazado de los polígonos de Thiessen de las estaciones que tiene influencia en la cuenca del río Sucio, tomando como punto de cierre la estación ANIL EL [11117010] Las estaciones y su factor de influencia son mostradas en la Tabla 5.88.

Tabla 5.88 Estaciones con Influencia en la cuenca del Río Sucio

Código	Estación	Área [km²]	Porcentaje de influencia [%]
11110020	ABRIAQUI	237,51	33,00
11070030	CLARITA LA	41,03	6,00
26220090	GIRALDO	93,57	13,00
26210130	GUASABRA	14,39	2,00
11110010	NORMAL SANTA TERESA AUT	316,69	44,00
26230200	SABANALARGA	14,39	2,00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para la estimación de la evapotranspiración se utilizó el campo de ETP calculada mediante la metodología de Cenicafé como se mostró en el capítulo 5.1.5.5. Se obtuvo una ETP anual para la cuenca de la estación ANIL EL [11117010] de 688,13 mm/año y 3,13 mm/día, este valor es el que se utilizó en toda la longitud de la serie de precipitación para el periodo de la modelación.

En la Tabla 5.89 se muestran los parámetros de calibración del modelo de tanques, en la Figura 5.87 la serie diaria real medida en la estación ANIL EL [11117010] y la serie simulada y en la Figura 5.88 la curva de calibración obtenida con los datos simulados y los datos reales.

Tabla 5.89 Parámetros de calibración del modelo de tanques

Parámetros del modelo	Valor
Área de la Cuenca en Km²	719,74
Almacenamiento Máximo Capilar	472,30
Conductividad Capa Sup (mm/día)	8,20
Conductividad Capa Inf (mm/día)	9,60
Perdidas Subterráneas (mm)	0,00
Tiempo de Residencia Flujo Superficial (días)	10,00
Tiempo de Residencia Flujo Subsuperficial (días)	1,00
Tiempo de Residencia Flujo Base (días)	50,00
Almacenamiento Capilar	300,00
Almacenamiento Agua Superficial	0,00
Almacenamiento Gravitacional Z Sup	0,00
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero)	378,50
Exponente Infiltración	1,00
Exponente Evaporación	0,90
Altura media (m)	1.983,60
Precipitación media cuenca (IDW) (mm)	2.456,90
Precipitación media cuenca (Factores de ponderación) (mm)	2.528,93

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Cómo se puede observar en las figuras, la serie simulada sigue de cerca el comportamiento medido en la estación ANIL EL [11117010], capturando muy bien los caudales mínimos y

las curvas de recesión de caudales. Las mayores diferencias se obtienen en caudales de mayor magnitud, y se debe a que en estas fechas se reconstruyó la información faltante de precipitación. El caudal medio real, definido como el valor esperado de todos los registros diarios durante los 11 años ($37,57 \text{ m}^3/\text{s}$) fue similar al caudal medio simulado en dicho período de tiempo ($37,39 \text{ m}^3/\text{s}$), presentando un error relativo de 0,48 %.

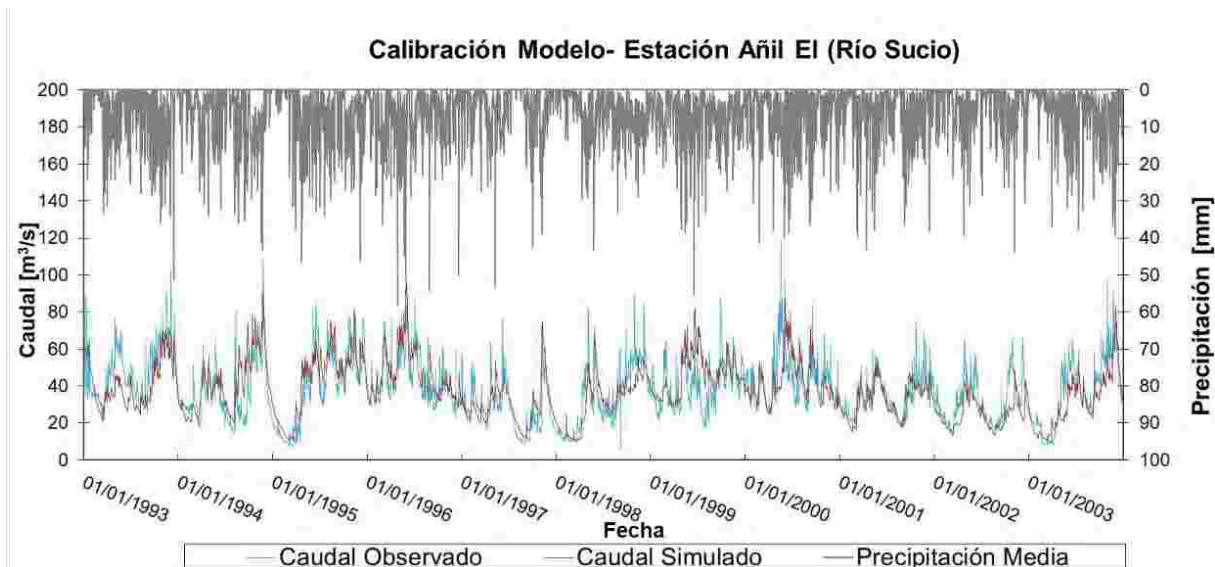


Figura 5.87 Caudal real y simulado en la estación ANIL EL [11117010]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

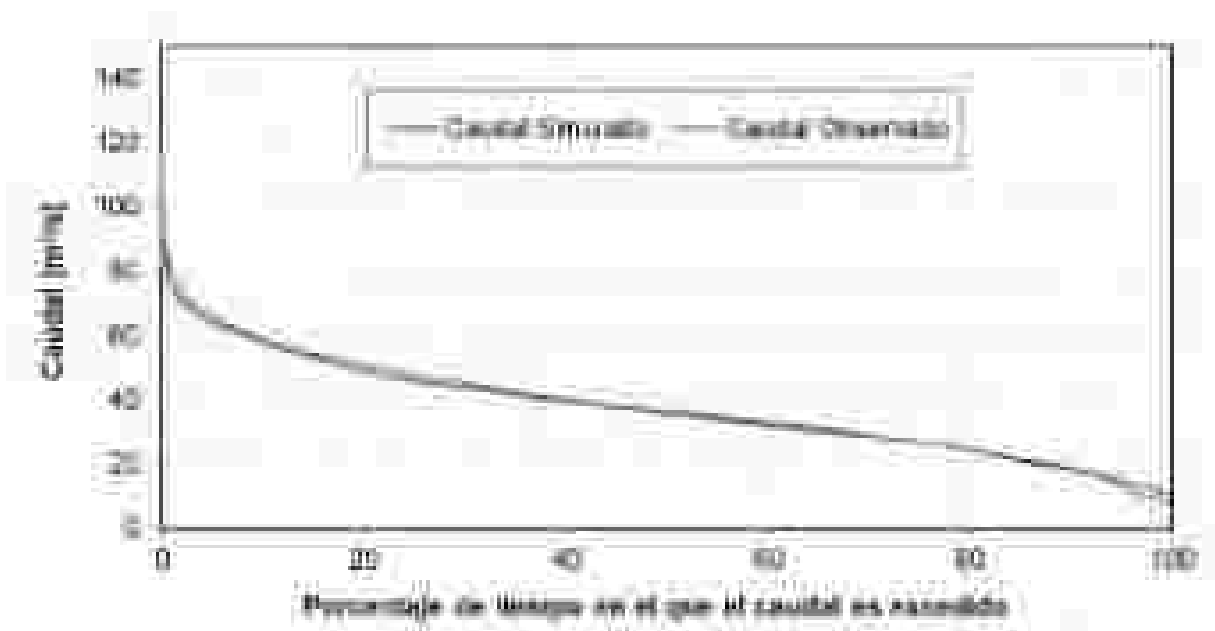


Figura 5.88 Curva de duración de la serie de caudal real y simulado. Estación ANIL EL [11117010]

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se logró un coeficiente Nash-Sutcliffe con un valor de 52,52%, este coeficiente se utiliza para determinar qué tan bien se ajusta el modelo a los datos de caudal observados. El valor se encuentra en la categoría de “Bueno” lo que indica un buen desempeño del modelo.

V. Validación del Modelo

El modelo de tanques fue validado, al realizar la comparación entre el caudal medio obtenido del balance hidrológico en el largo plazo en la cuenca del río Sucio a la altura de la estación ANIL EL [11117010], y el caudal medio de los valores obtenidos de la simulación, realizada desde el año 1993 al año 2003. La evapotranspiración real en la cuenca hasta la estación ANIL EL [11117010] fue calculada siguiendo la misma metodología presentada en el numeral 5.1.5.5. En la Figura 5.89 se presentan los resultados aplicando ambas metodologías.

Dado que los resultados obtenidos por ambas metodologías fueron comparables, en especial por el método de Cenicafé, se afirma que los resultados del modelo de tanques representan bien los caudales diarios en la cuenca de apoyo.

Figura 5.89 Caudales medios estimados a partir del balance hidrológico en el largo plazo y el modelo de tanques diario en la estación ANIL EL [11117010].

Nombre	Área [km ²]	Precipitación interpolación [mm/año]	Precipitación ponderada [mm/año]	Evapotranspiración real [mm/año]			Caudal medio largo plazo [m ³ /s]			Caudal Simulado [m ³ /s]
				Ccf	Turc	Reg	Ccf	Turc	Reg	
ANIL EL [11117010]	719,74	2.456,88	2.528,93	641,00	864,48	1.043,68	41,44	36,34	32,25	37,387
Ccf: Cenicafé, Reg: Regional										

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Adicionalmente se realizó una validación de la calibración, simulando los años de 2004 a 2017 de la misma serie de la estación ANIL EL [11117010], logrando valores en el coeficiente de Nash-Sutcliffe de 68,15% presentando un muy buen desempeño del modelo.

Teniendo en cuenta los buenos resultados del modelo de tanques, y dada la homogeneidad hidrológica y geológica presentadas entre las dos zonas, los parámetros de calibración fueron usados para la simulación de caudales diarios en las cuencas de interés con el objetivo de conocer la variabilidad mensual multianual de los caudales.

VI. Simulación de caudales diarios para las microcuencas de interés

Para las cuencas de los afluentes directos se generaron series sintéticas a partir del modelo calibrado, para esto se utilizó como información de entrada al modelo la serie de precipitación de la estación en las cuales se tenía influencia en cada una de las cuencas como se muestra en la Tabla 5.90 y los parámetros obtenidos para la cuenca del río Sucio (ANIL EL [11117010]), ya que se considera que los parámetros calibrados son hidrológicamente representativos para las cuencas analizadas.

Tabla 5.90 Estaciones con Influencia en las cuencas analizadas

ID	Nombre microcuenca	Porcentaje influencia Estaciones [%]
		VILLARTEAGA [12015010]
1	Río Mutatá	100
2	Drenaje Sin Nombre 1	

ID	Nombre microcuenca	Porcentaje influencia Estaciones [%]
		VILLARTEAGA [12015010]
3	Drenaje Sin Nombre 2	
4	Drenaje Sin Nombre 3	

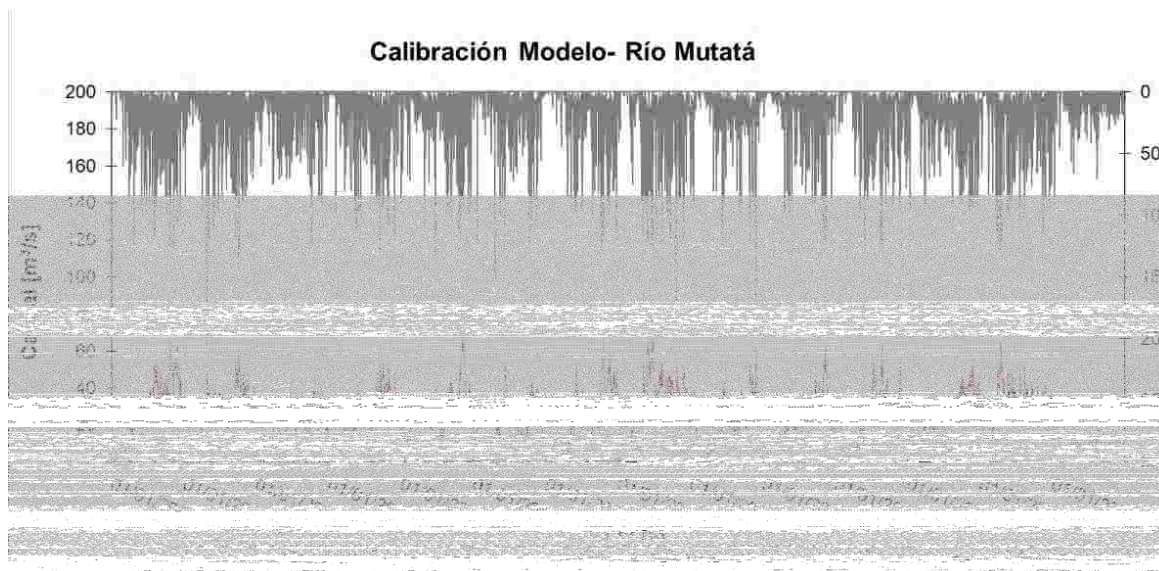
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Con el propósito de obtener caudales simulados con mayor calidad y confiabilidad, se utilizan los valores de precipitación registrados en la estación VILLARTEAGA [12015010] para el período comprendido entre los años 2010 y 2023, intervalo que presenta la menor cantidad de datos reconstruidos. Esta estación se ubica a 11,57 km del área de influencia del proyecto, siendo la más cercana con información de precipitación diaria disponible reportada por el IDEAM.

Aunque en el capítulo 5.1.10 del componente atmosférico se menciona el uso de datos de reanálisis global, como los proporcionados por METEOBLUE directamente en el área de influencia del proyecto, para la calibración y estimación de caudales medios y mínimos se considera más adecuado emplear los datos observados directamente en la estación VILLARTEAGA [12015010]. Esto se debe a que los valores medidos in situ ofrecen mayor representatividad y menor incertidumbre en comparación con los datos de reanálisis.

Por su parte, la información de METEOBLUE resulta útil para el análisis de variables meteorológicas complementarias, como temperatura, humedad relativa, radiación solar, brillo solar, nubosidad, entre otras. Esta fuente combina observaciones satelitales y terrestres con modelos meteorológicos y técnicas de asimilación de datos para representar el comportamiento climático. No obstante, dicha metodología implica ciertas simplificaciones y supuestos adicionales que pueden introducir ruido en los procesos de modelación hidrológica, especialmente en la estimación de caudales como los simulados en este apartado.

De la Figura 5.90 a la Figura 5.93 se presentan los resultados gráficos, las curvas de duración de caudal, y el ciclo medio anual para cada una de las cuencas.



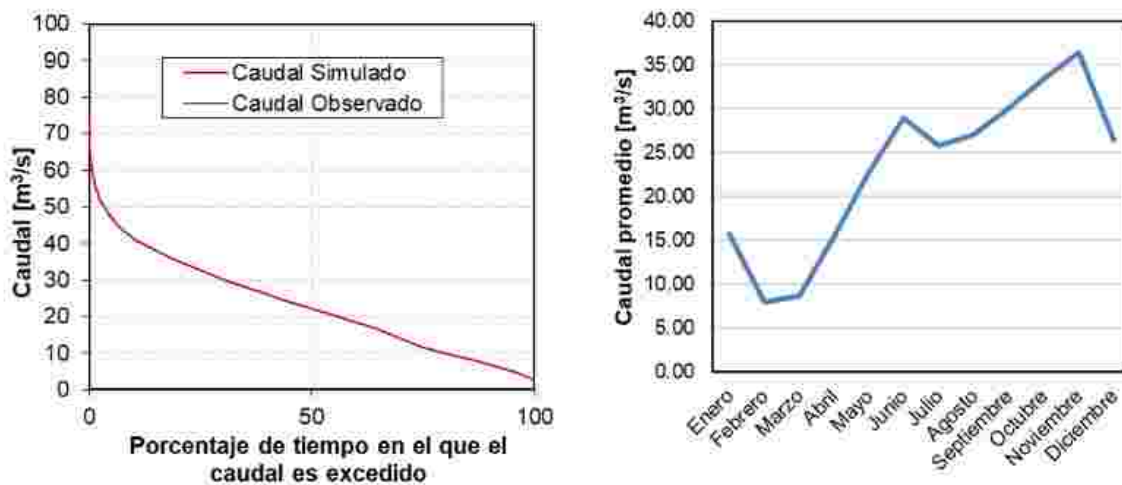
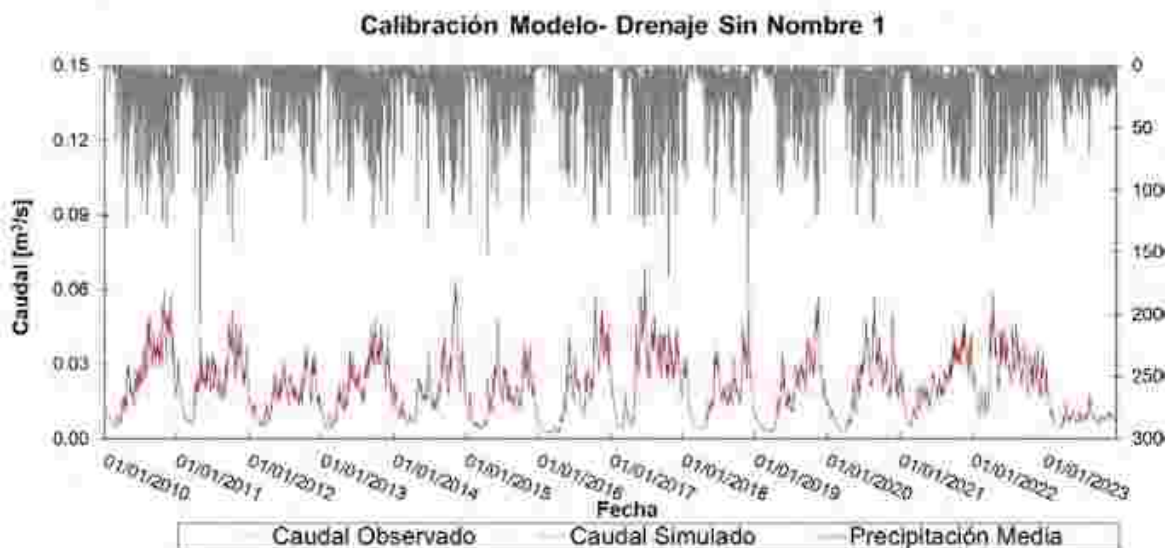


Figura 5.90 Resultados de la serie sintética generada para cuenca río Mutatá
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



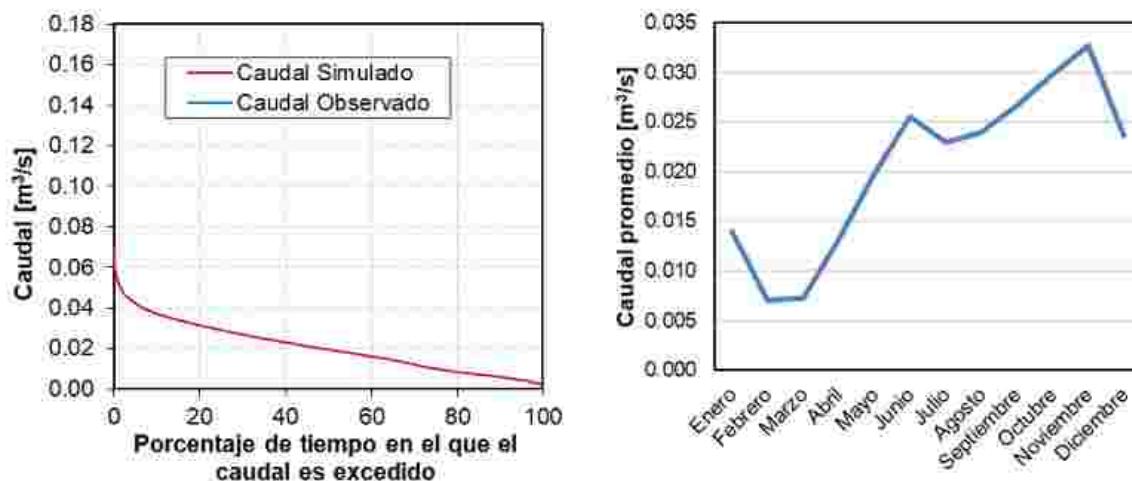
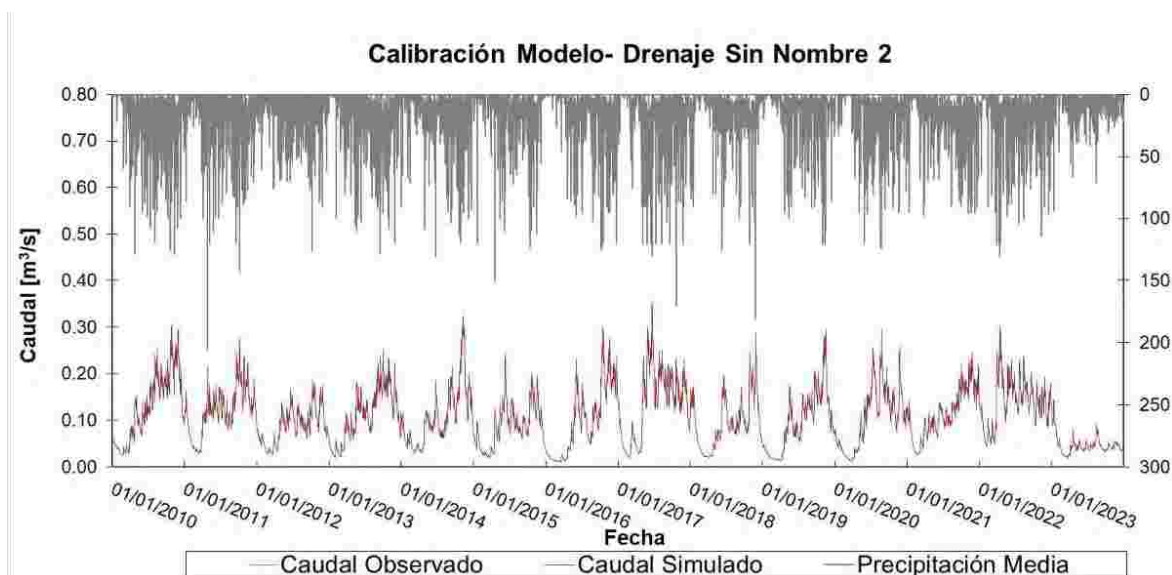


Figura 5.91 Resultados de la serie sintética generada para la microcuenca – Drenaje Sin Nombre 1

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



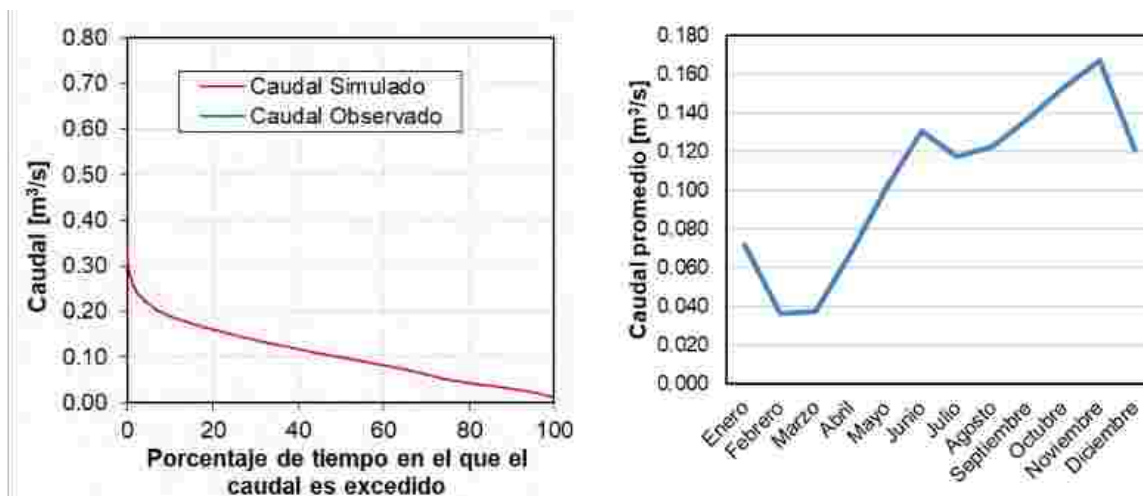
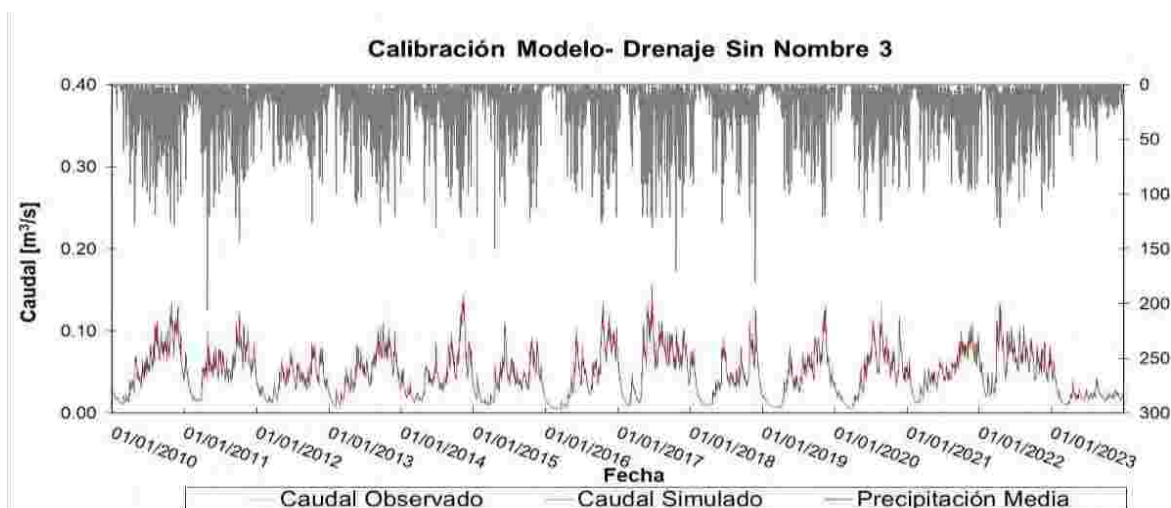


Figura 5.92 Resultados de la serie sintética generada para la microcuenca – Drenaje Sin Nombre 2

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



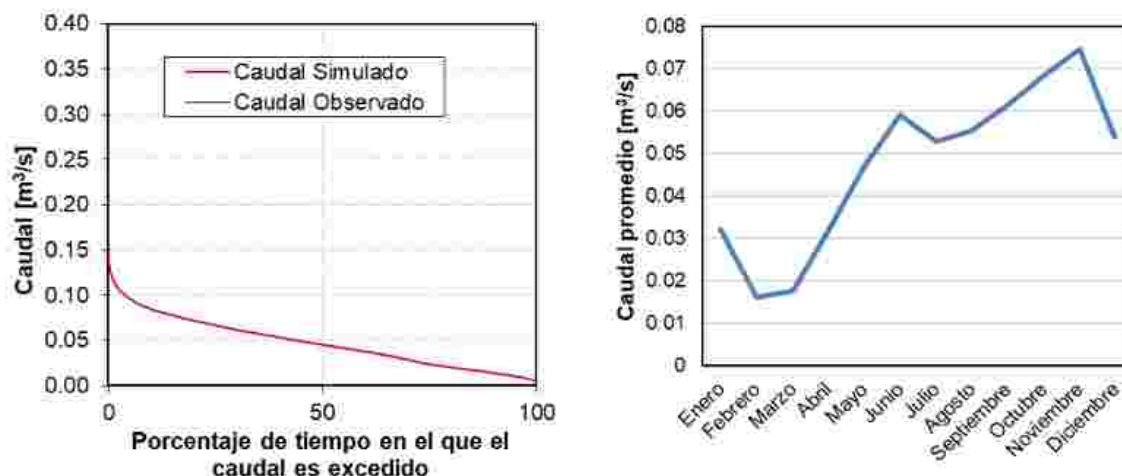


Figura 5.93 Resultados de la serie sintética generada para la microcuenca - Drenaje Sin Nombre 3

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.91 se presentan los resultados del caudal medio obtenido a partir de las series sintéticas de caudales generadas con el modelo de Tanques.

Tabla 5.91 Caudal medio simulado – Modelo de Tanques

ID	Nombre microcuenca	Caudales medios	
		[m³/s]	[L/s]
1	Río Mutatá	23,27	23.271,89
2	Drenaje 1	0,02	20,57
3	Drenaje 2	0,11	105,16
4	Drenaje 3	0,05	45,09

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.7.2 Índice de Aridez

El índice de aridez se evalúa a partir de la relación entre la diferencia de la evapotranspiración potencial y real en un periodo determinado, y permite evaluar la suficiencia o insuficiencia de la precipitación para los requerimientos de los ecosistemas (IDEAM, 2010). Como resultado se identifican áreas deficitarias o con excedentes de agua, utilizando la siguiente ecuación, donde *ETP* es la evapotranspiración potencial media (mm/año) y *ETR* evapotranspiración real media (mm/año) derivada del balance hídrico de largo plazo.

$$I = \frac{(ETP - ETR)}{ETP}$$

Mediante la ecuación ya descrita se obtienen valores entre los rangos mencionados en la Tabla 5.92, correspondientes a la clasificación del índice aridez.

Tabla 5.92 Categorías del índice de Aridez IA

Valor	Clasificación
< 0,15	Altos excedentes de agua
0,15- 0,19	Excedentes de agua

Valor	Clasificación
0,20-0,29	Moderado y excedentes de agua
0,30-0,39	Moderado
0,40-0,49	Moderado y deficitario de agua
0,50-0,59	Deficitario de agua
> 0,60	Altamente deficitario de agua

Fuente: IDEAM, 2010.

En la Tabla 5.93 se muestran los valores del índice de aridez para las microcuencas de interés. En ella se puede observar que todas las cuencas evaluadas cuentan con un índice alto con excedentes de agua.

Tabla 5.93 Cálculo de índice de Aridez para las microcuencas de interés

ID	Nombre microcuenca	IA	Clasificación
1	Río Mutatá	0,048	Altos excedentes de agua
2	Drenaje 1	0,053	Altos excedentes de agua
3	Drenaje 2	0,052	Altos excedentes de agua
4	Drenaje 3	0,052	Altos excedentes de agua

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.7.3 Índice de Retención y Regulación Hídrica

El Índice de Regulación Hídrica se utiliza para medir la capacidad de una cuenca para mantener un régimen de caudales, teniendo en cuenta su capacidad de retención de humedad y la interacción entre los factores bióticos y abióticos presentes, principalmente entre el sistema suelo-vegetación y el clima, y las características morfométricas.

Para su cálculo se tienen en cuenta la distribución de las frecuencias acumuladas para los caudales diarios, empleando la siguiente expresión, donde V_p corresponde al volumen representado por el área que se encuentra debajo de la línea de caudal medio y V_t es el volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diario²¹. La Tabla 5.94 presenta las categorías propias de este índice y sus rangos.

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Tabla 5.94 Categorías de IRH

Rango del valor	Categoría
0 – 0,50	Muy baja
0,50 – 0,65	Baja
0,65 – 0,75	Moderada
0,75 – 0,85	Alta
0,85 – 1	Muy alta

Fuente: IDEAM, 2010.

En la Tabla 5.95 se presentan los valores de índice de regulación hídrica para las microcuencas de interés. En ella se puede observar que cuencas cuentan con una capacidad de regulación Moderada.

Tabla 5.95 Cálculo del índice de regulación hídrica para las microcuencas de interés

ID	Nombre microcuenca	IRH	Clasificación
1	Río Mutatá	0,76	Alta
2	Drenaje 1	0,76	Alta

ID	Nombre microcuenca	IRH	Clasificación
3	Drenaje 2	0,76	Alta
4	Drenaje 3	0,76	Alta

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.7.4 Caudal ambiental

El caudal ambiental para las UAH se estimó a partir de la metodología propuesta en la resolución 865 de 2004 “Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones”, en la cual se establece que éste se estima como el 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.

Adicionalmente, también se estimó el caudal ambiental mediante la metodología propuesta en el ENA, 2010, donde el valor del caudal ambiental corresponde al Q85% de la curva de duración, cuando el Índice de Regulación Hídrica (IRH) es superior a 0.7 (alta retención y regulación). Para valores del IRH inferiores a 0.7, se adopta el valor Q75% de la curva de duración de caudales medios diarios. En la Tabla 5.96 se presentan los valores de caudal ambiental estimados por ambas metodologías.

Una vez calculados los caudales ambientales por ambas metodologías, se seleccionan los caudales obtenidos por el método establecido en la resolución 865 de 2004, ya que, son valores más cercanos a las condiciones de las corrientes analizadas, de acuerdo con los órdenes de magnitud de los caudales mínimos estimados.

Tabla 5.96 Caudal ambiental para cada microcuenca de interés

ID	Nombre microcuenca	Caudal ambiental			
		Resolución 865 de 2004		ENA, 2010	
		[m³/s]	[L/s]	[m³/s]	[L/s]
1	Río Mutatá	8,49	8485,70	1,98	1985,14
2	Drenaje 1	0,01	7,23	0,00	1,76
3	Drenaje 2	0,04	37,02	0,01	9,00
4	Drenaje 3	0,02	15,87	0,00	3,86

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.7.5 Caudales mínimos

Se realizó la estimación de los caudales mínimos asociados a los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, mediante un análisis de frecuencia. Las series de tiempo simuladas se ajustaron a las distribuciones de probabilidad de Valor Extremo Tipo I o Gumbel y Lognormal, mediante las expresiones mostradas en la Tabla 5.97.

Tabla 5.97 Distribuciones de probabilidad empleadas

Distribución	Función de densidad de probabilidad	Parámetros
Lognormal	$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$	$z = \frac{y - \bar{y}}{S_y}$
Gumbel	$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-u}{\alpha}\right)\right)$	$y = \ln(x)$ $u = \underline{x} - 0.5772\alpha$

Distribución	Función de densidad de probabilidad	Parámetros
		$\alpha = \frac{\sqrt{6 * S_x}}{\pi}$

Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994⁸³

Se empleó el factor de frecuencia (K_T) para determinar los caudales mínimos asociados a los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, así como el error estándar $S_e(T)$ para determinar las bandas de confianza de ambas distribuciones como se muestra en la Tabla 5.98 cabe resaltar que el análisis para la distribución Lognormal se realizó en el espacio de los logaritmos naturales con sus respectivos estadísticos.

Tabla 5.98 Expresiones para el cálculo del factor de frecuencia y el error estándar

Distribución	Expresiones para K_T y $S_e(T)$
Lognormal	$K_T = z$ donde z se estima a partir de una probabilidad de excedencia $p = \left(\frac{1}{Tr}\right)$ $S_e = S_x \sqrt{\frac{2 + z^2}{N}}$
Gumbel	$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} * \left\{ 0,5772 + \ln \left[-\ln \left(\frac{1}{Tr} \right) \right] \right\}$ $S_e(T) = S_x \sqrt{\frac{1 + 1,1396K_T + 1,1K_T^2}{N}}$

Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994⁸⁴

De esta manera, el caudal mínimo asociado a un período de retorno dado se obtiene usando la siguiente expresión:

$$Q_{Tr} = \mu + K_{Tr} * \sigma$$

Por su parte, las bandas de confianza se establecen como:

$$Limite superior = x_T + Z_{\frac{\alpha}{2}} * S_e$$

$$Limite inferior = x_T - Z_{\frac{\alpha}{2}} * S_e$$

En la Tabla 5.99 y la Tabla 5.100 se presentan los valores puntuales estimados con sus límites de confianza superiores e inferiores.

Tabla 5.99 Resultados de caudales mínimos distribución Gumbel con sus límites de confianza

ID	Nombre microcuencia	Dato [L/s]	Periodo de retorno [años]					
			2,33	5	10	25	50	100
1	Río Mutatá	Q min	4.368,47	3.458,59	2.952,01	2.478,17	2.202,32	1.971,59

⁸³ (Chow, 1994)

⁸⁴ (Chow, 1994)

ID	Nombre microcuenca	Dato [L/s]	Periodo de retorno [años]					
			2,33	5	10	25	50	100
		Lim inferior	3.546,50	2.605,51	1.965,42	1.319,16	929,10	597,28
		Lim Superior	5.190,44	4.311,67	3.938,60	3.637,18	3.475,54	3.345,90
		Q min	3,85	3,01	2,54	2,10	1,85	1,64
2	Drenaje Sin Nombre 1	Lim inferior	3,09	2,22	1,63	1,03	0,67	0,36
		Lim Superior	4,61	3,80	3,45	3,18	3,03	2,91
		Q min	19,70	15,40	13,01	10,77	9,46	8,38
3	Drenaje Sin Nombre 2	Lim inferior	15,81	11,37	8,35	5,29	3,45	1,88
		Lim Superior	23,58	19,43	17,67	16,24	15,48	14,87
		Q min	8,45	6,60	5,58	4,61	4,06	3,59
4	Drenaje Sin Nombre 3	Lim inferior	6,78	4,87	3,58	2,27	1,48	0,80
		Lim Superior	10,11	8,33	7,57	6,96	6,64	6,37

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.100 Resultados de caudales mínimos distribución LogNormal con sus límites de confianza

ID	Nombre microcuenca	Dato [L/s]	Periodo de retorno [años]					
			2,33	5	10	25	50	100
1	Río Mutatá	Q min	4.360,46	3.445,50	2.947,14	2.494,86	2.240,30	2.033,59
		Lim inferior	3.956,55	3.020,94	2.466,38	1.950,69	1.657,24	1.417,28
		Lim Superior	4.805,60	3.929,71	3.521,62	3.190,84	3.028,49	2.917,90
2	Drenaje Sin Nombre 1	Q min	3,84	3,00	2,55	2,15	1,92	1,74
		Lim inferior	3,47	2,62	2,12	1,67	1,41	1,20
		Lim Superior	4,24	3,44	3,07	2,77	2,62	2,52
3	Drenaje Sin Nombre 2	Q min	19,62	15,36	13,06	10,98	9,82	8,88
		Lim inferior	17,75	13,41	10,87	8,52	7,20	6,12
		Lim Superior	21,69	17,60	15,70	14,16	13,41	12,89
4	Drenaje Sin Nombre 3	Q min	8,41	6,59	5,60	4,71	4,21	3,81
		Lim inferior	7,61	5,75	4,66	3,65	3,08	2,62
		Lim Superior	9,30	7,54	6,73	6,07	5,75	5,53

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.7.6 Caudales máximos

En este numeral se presentan los caudales máximos en los sitios de interés, asociados a diferentes periodos de retorno. Debido a que las corrientes de las cuencas de interés en la zona de estudio corresponden a cuencas no instrumentadas, fue necesario recurrir a métodos indirectos como son los denominados modelos lluvia – escorrentía para estimar las crecientes a partir de la aplicación de hidrogramas sintéticos.

A continuación, se hace una síntesis de las consideraciones más importantes, utilizadas en el desarrollo de este tipo de modelos.

A. Curvas de intensidad Duración-Frecuencia (IDF)

Para la determinación de los caudales máximos a partir de modelos lluvia-escorrentía es necesario definir la profundidad de precipitación máxima que se espera tener con un determinado periodo de recurrencia, las curvas IDF permiten conocer el comportamiento de la precipitación y la intensidad máxima que se espera durante determinada duración para diferentes periodos de retorno. Dado que no existen unas curvas desarrolladas específicamente para las estaciones empleadas, se acudió a la metodología de Vargas y Díaz-Granados (1997) de la Universidad de Los Andes⁸⁵. Teniendo en cuenta la localización del proyecto, se tomó la Región Orinoquia como base para los parámetros de regionalización (Tabla 5.101). La ecuación de la intensidad por la metodología de Vargas y Díaz-Granados (1997) es la siguiente:

$$I = \frac{a * T^b * M^d}{t^c}$$

Dónde *I* Intensidad de precipitación (mm/h), *T* Periodo de retorno (años), *M* Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual, *t* Duración de la lluvia (min) y *a*, *b*, *c*, *d*: Parámetros de ajuste de la regresión correspondientes a la región.

Tabla 5.101 Parámetros regionalizados y precipitación para el cálculo de las curvas IDF

ID	Nombre microcuenca	P. máx 24 horas [mm]	Parámetros (Región Andina)			
			a	b	C	d
1	Río Mutatá	111,27	00,94	0,18	0,66	0,83
2	Drenaje Sin Nombre 1	111,27				
3	Drenaje Sin Nombre 2	111,27				
4	Drenaje Sin Nombre 3	111,27				

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Figura 5.94 se presentan las curvas de intensidad-duración-frecuencia IDF obtenidas para las estaciones de interés.

⁸⁵ (Vargas & Díaz-Granados, 1997)



Figura 5.94 Curvas IDF estaciones de interés

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

B. Precipitación de diseño

En la determinación de la precipitación de diseño se debe estimar la cantidad de masa precipitada para cierta duración de la lluvia, y cómo se distribuye temporalmente la lluvia. En ambos casos se usan las curvas IDF.

Con base en la curva IDF se calcula la cantidad de masa precipitada las cuencas de análisis, para cada período de retorno, mediante la ecuación:

$$P = I * D$$

Dónde P es la precipitación total del evento [mm], I es la intensidad de la precipitación [mm/h] y D es el tiempo de concentración [minutos].

Para obtener la precipitación en las cuencas se tomó en cuenta el factor de ponderación calculado a partir de los polígonos de Thiessen mostrados en la Tabla 5.88.

C. Distribución temporal de la lluvia

En los modelos lluvia-escorrentía, para determinar la tormenta de diseño, es necesario hallar la distribución de la lluvia en el tiempo. Para este propósito existen diferentes metodologías (Diagrama de Huff, Histograma triangular, Bloque alterno).

Para el presente estudio, los valores de distribución de la lluvia en el tiempo fueron tomados del Diagrama de Huff (Figura 5.95) para el primer cuartil (más severos) con una probabilidad de ocurrencia del 50%⁸⁶. En este caso, para incrementos correspondientes al 10% del tiempo de duración de la tormenta, se realizó una lectura de este valor en el diagrama de Huff y se determinó el valor de la lluvia para ese tiempo. En la Tabla 5.102, se presenta el porcentaje de la lluvia total para cada intervalo de tiempo.

⁸⁶ (Chow, 1994)

Tabla 5.102 Distribución de la lluvia en el tiempo según el método asumido

T acm [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Lluvia acm [%]	16	52	69	80	85	87	91	94	98	100

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

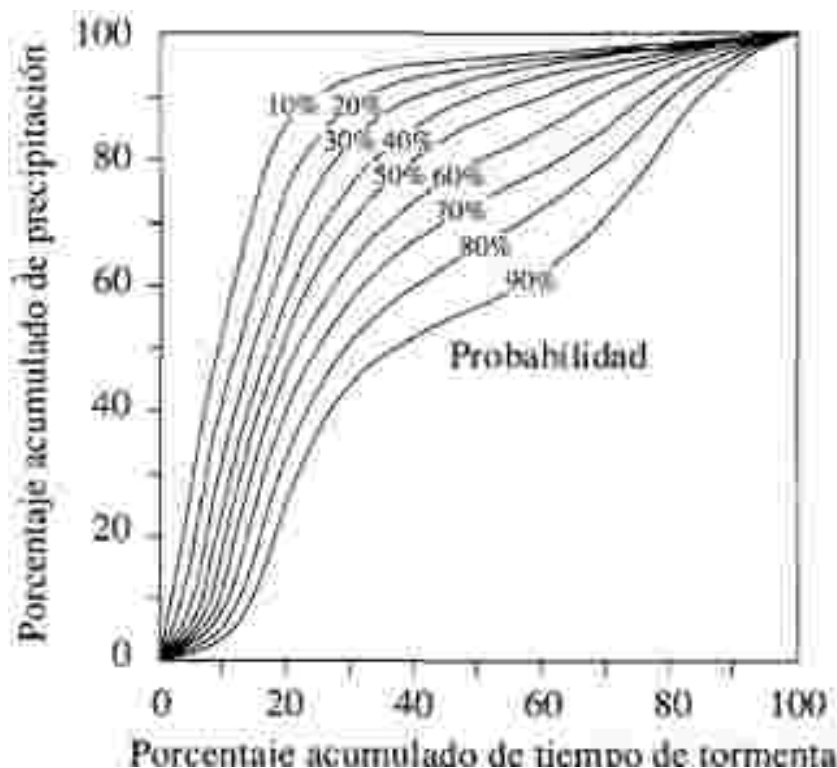


Figura 5.95 Diagrama distribución temporal de la lluvia, según Huff (1967)

Fuente: Chow, V. T., 1994

D. Precipitación efectiva

Para el cálculo de los hietogramas de precipitación efectiva se empleó la metodología del Soil Conservation Service, mediante la cual se sustrae del hietograma de profundidades, la retención y la infiltración estimada para cada período de retorno, a partir del Número de Curva. Con el número de curva (CN) se calcula la capacidad de almacenamiento (S) y la infiltración inicial del suelo (I_a), mediante las siguientes ecuaciones, cuyos resultados se presentan en la siguiente ecuación:

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25,4$$

$$I_a = 0,2 * S$$

Posteriormente, se realiza el cálculo de los hietogramas de precipitación efectiva para cada periodo de retorno, mediante la siguiente ecuación, donde P_e es la precipitación efectiva acumulada y P es la precipitación total acumulada.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P + 0.8 S}$$

I. Número de curva

De acuerdo con este método, la capacidad de la infiltración del suelo, representada con el número de curva, en una cuenca depende de:

i. Uso y tratamiento del suelo: Tierra cultivada, pastos, bosques, residencial, etc.

El uso y tratamiento del suelo para las cuencas de interés se estableció de acuerdo con el Mapa de Coberturas de la Tierra del año 2020, en escala 1:100.000, elaborado el IDEAM, disponible en el portal de información oficial del SIAC, adicionalmente, se utilizó la capa de coberturas generada para el área de influencia obteniendo los porcentajes mostrados en Tabla 5.103 y en la [Figura 5.96](#).

Tabla 5.103 Porcentaje de cobertura en las cuencas hidrográficas

Cobertura	Porcentaje cobertura vegetal (%)			
	Río Mutatá	Drenaje Sin Nombre 1	Drenaje Sin Nombre 2	Drenaje Sin Nombre 3
1.1.1. Tejido urbano continuo	0,09	69,78	45,53	11,52
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	0,02	--	--	0,80
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	--	--	--	0,32
1.2.2.1. Red vial y territorios asociados	--	3,72	3,42	3,37
1.4.1.2. Parques Cementerios	--	--	--	0,05
1.4.2.2. Áreas deportivas	--	--	--	6,81
2.3.1. Pastos limpios	0,30	25,21	15,66	59,95
2.3.3. Pastos enmalezados	--	--	4,77	10,58
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0,15	--	--	--
2.4.3. Mosaico de cultivos. pastos y espacios naturales	1,95	--	--	--
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	0,61	--	--	--
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	0,26	--	--	--
3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme	83,68	--	--	--
3.1.3.1. Bosque fragmentado con pastos y cultivos	1,81	--	--	--
3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria	7,62	--	27,14	--
3.1.4. Bosque de galería y ripario	--	1,28	0,85	0,33
3.1.5. Plantación forestal	--	--	0,31	--
3.2.3.1. Vegetación secundaria alta	--	--	2,28	6,28
3.2.3.2. Vegetación secundaria baja	3,27	--	--	--
5.1.1. Ríos	0,21	--	--	--
5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	--	0,01	0,05	--

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

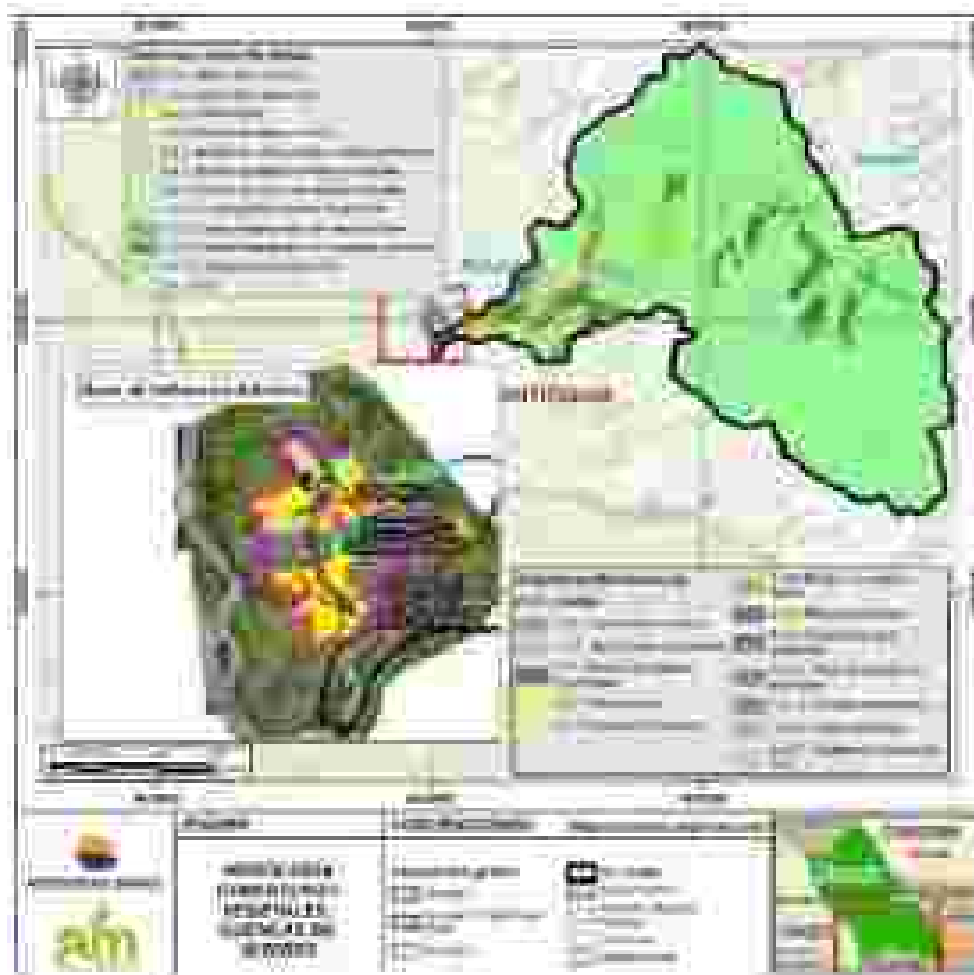


Figura 5.96 Coberturas vegetales, cuencas de interés.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

ii. Grupo hidrológico del suelo:

a. Suelos tipo A

Potencial del escurrimiento bajo. Suelos con altas capacidades de infiltración, cuando están completamente húmedos, principalmente arenas y gravas muy bien ordenadas, suelos con alta trasmisión de agua.

b. Suelos tipo B

Suelos con capacidades de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos, principalmente suelos medianamente profundos y drenados, con textura de sus agregados variando entre moderada y muy fina. Tiene velocidades medias de transmisión del agua.

c. Suelos tipo C

Suelos con capacidad de infiltración baja cuando están completamente húmedos, principalmente suelos que contienen una capa que impide el movimiento del agua hacia abajo o suelos con textura fina o moderadamente fina. Estos suelos tienen baja transmisión del agua.

d. *Suelos tipo D*

Suelos con capacidades de infiltración muy bajas cuando están completamente húmedos. Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. Suelos con transmisión del agua muy bajas.

iii. *Definición del grupo hidrológico*

El grupo hidrológico del suelo se definió de acuerdo con las características de éste, reportadas en el mapa Digital de Suelos del año 2014, en escala 1:100.000, elaborado por el IGAC, así como las características observadas en campo, como se muestra en la Tabla 5.104.

Tabla 5.104 Grupo hidrológico

Tipo suelo	Porcentaje Tipo de suelo – grupo hidrológico (%)			
	Río Mutatá	Drenaje Sin Nombre 1	Drenaje Sin Nombre 2	Drenaje Sin Nombre 3
B	99,70	70,16	75,48	98,66
D	0,30	29,84	24,52	1,34

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

iv. *Condiciones de humedad antecedente:*

Se relaciona con la cantidad de lluvia caída en la cuenca durante los días precedentes. Se definen tres (3) grupos así:

- AMC I: Suelos secos
- AMC II: Suelos intermedios
- AMC III: Suelos húmedos

Teniendo en cuenta la información reportada en el IGAC y lo observado en campo, se consideró apropiado trabajar con una condición de humedad antecedente del suelo AMC II (suelos intermedios).

A partir de los porcentajes de área y los CN determinados para cada uso y tipo del suelo, se ponderó el CN de la zona de estudio obteniendo los resultados de la Tabla 5.105

Tabla 5.105 Numero de curva microcuencas de interés

ID	Nombre microcuenca	Numero de curva [CN]
1	Río Mutatá	66,30
2	Drenaje Sin Nombre 1	78,74
3	Drenaje Sin Nombre 2	75,55
4	Drenaje Sin Nombre 3	76,13

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Adicionalmente se determinan los valores de coeficiente de escorrentía para cada microcuenca de interés y para cada periodo de retorno, como se muestra en la Tabla 5.106.

Tabla 5.106 Coeficientes de escorrentía

Periodo de retorno	Coeficiente de escorrentía (C)			
	Río Mutatá	Drenaje Sin Nombre 1	Drenaje Sin Nombre 2	Drenaje Sin Nombre 3
2.33	0,36	0,64	0,49	0,36

Periodo de retorno	Coeficiente de escorrentía (C)			
	Río Mutatá	Drenaje Sin Nombre 1	Drenaje Sin Nombre 2	Drenaje Sin Nombre 3
5	0,39	0,68	0,52	0,39
10	0,41	0,71	0,55	0,42
25	0,45	0,76	0,59	0,46
50	0,48	0,80	0,63	0,49
100	0,52	0,84	0,67	0,53

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

E. Hietogramas

Los hietogramas de precipitación total y efectiva se muestran en la [Figura 5.97](#) con periodo de retorno de 100 años.

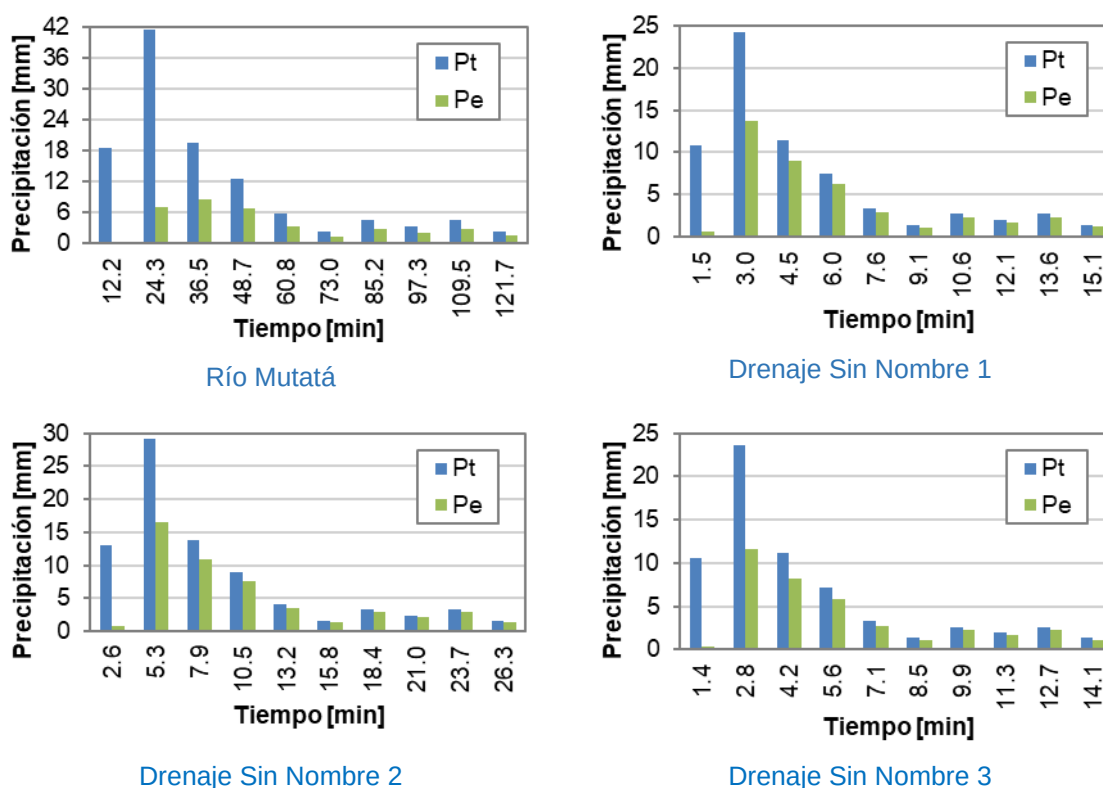


Figura 5.97 Hietogramas precipitación total y efectiva para el periodo de retorno de 100 años

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

F. Modelo hidrológico

I. Método de Snyder

El modelo propone calcular el caudal pico de la crecida por milla cuadrada u_p , mediante la siguiente expresión:

$$u_p = C_p \frac{640}{T_R}$$

Donde u_p es el caudal pico del Hidrograma Unitario por unidad de área en $\text{pie}^3/\text{s}.\text{mi}^2$, C_p es un coeficiente y T_R es el tiempo de rezago. El coeficiente C_p depende de la topografía de la cuenca variando entre 0,5 y 0,8, por ejemplo, para cuencas de alta pendiente se recomienda emplear valores cercanos a 0,8 (menor atenuación del hidrograma de respuesta). Este coeficiente puede ser obtenido si se tiene información simultanea de precipitación y caudal de la cuenca, lo cual solo es posible en cuencas instrumentadas.

Cuando el hidrograma unitario sintético a construir corresponda a una precipitación efectiva cuya duración coincide con el tiempo de concentración, el caudal pico del hidrograma unitario por unidad de área puede calcularse con la ecuación anterior, en caso contrario si la duración de la lluvia es diferente puede calcularse como:

$$U_p = C_p \frac{640}{[T_R + (T - t_s)/4]}$$

Donde T es la duración de la precipitación efectiva en horas y t_s es la duración de la lluvia efectiva en horas.

Una vez obtenido el caudal pico por unidad de área de la cuenca, el caudal pico total se obtiene como:

$$U_p = U_p A_c$$

Donde A_c es el área de la cuenca en mi^2 , y U_p es el caudal pico total del Hidrograma Unitario Sintético en $\text{pie}^3/\text{s}/\text{pul}$.

v. Tiempo al pico

El tiempo puede calcularse como:

$$T_p = \frac{T}{2} + T_R$$

Donde T_p es el tiempo al pico en horas, T es la duración de la lluvia en horas y T_R es el tiempo de rezago en horas.

i. Tiempo de rezago

El modelo emplea como definición de tiempo de rezago (T_R), el tiempo comprendido entre el centroide del hietograma de precipitación efectiva y el pico del hidrograma de escorrentía directa correspondiente. Se asume que el rezago es constante para una cuenca, ya que depende de algunas características físicas y no está determinado por el tipo de lluvia o sus variaciones. El tiempo de rezago se calcula mediante la siguiente ecuación de regresión:

$$T_R = \frac{L_c^{0,8} (S + 1)^{0,7}}{1.900 S_c^{0,5}}$$

Donde T_R es el tiempo de rezago en horas, L_c es la longitud del canal principal en pies, S es el factor de retención o almacenamiento calculado en términos del número de curva CN y S_c es la pendiente de la cuenca en porcentaje. Para las cuencas en donde se obtienen tiempos de rezago mayores que el tiempo de concentración se recomienda utilizar la siguiente expresión:

$$T_R = 0,6 T_c$$

ii. Duración de la lluvia

Snyder consideró lluvias que estuvieran de acuerdo con el tamaño de la cuenca, definiendo para ellas una duración de $(1/5,5)$ veces el tiempo de rezago de la cuenca, es decir:

$$t_s = \frac{T_R}{5,5}$$

Donde t_s es la duración de la lluvia efectiva en horas.

iii. Duración de la escorrentía superficial

Para el cálculo del tiempo base del Hidrograma Unitario se propone la siguiente ecuación:

$$t_b = 3 + 3 \frac{T_R}{24}$$

Donde t_b es el tiempo base en días con T_R en horas. Esta ecuación da una estimación razonable del tiempo base para cuencas grandes, pero produce valores excesivamente altos para cuencas pequeñas. En estas, el tiempo base puede calcularse (en forma aproximada) como 3 a 5 veces el tiempo al pico.

iv. Esquematización de la hidrógrafa

El Cuerpo de Ingenieros de los EEUU introdujo después de los estudios de Snyder dos ecuaciones adicionales a este modelo, con el objeto de obtener otros cuatro puntos del Hidrograma Unitario Sintético de Snyder que facilitan su definición. Estas ecuaciones son:

$$W_{50} = \frac{770}{U_p^{1,08}} \quad W_{75} = \frac{440}{U_p^{1,08}}$$

Dónde: U_p es el caudal pico por unidad de área en $\text{pie}^3/\text{s mi}^2$, W_{50} es el intervalo de tiempo en horas correspondiente al 50% del caudal pico y, W_{75} es el intervalo de tiempo en horas correspondiente al 75% del caudal pico.

En la Figura 5.98 se presenta cada intervalo de tiempo ubicado en la curva, de tal forma que su tercera parte quede a la izquierda de la vertical que pasa por el pico del Hidrograma Unitario y las otras dos terceras partes a la derecha de dicha línea.

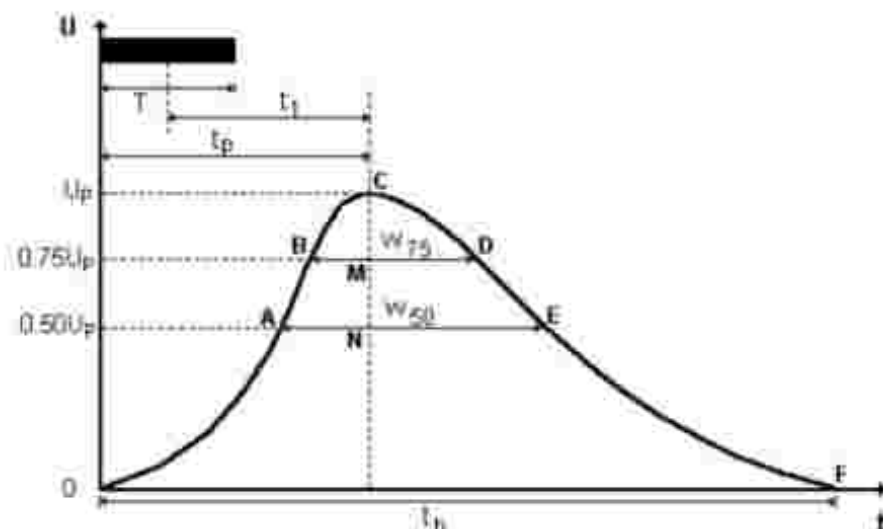


Figura 5.98 Esquematzación del hidrograma Unitario Sintético de Snyder

Fuente: CHOW et. al, 1994

II. Método de SCS

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service, SCS), actualmente conocido como El Servicio de Conservación de Recursos Naturales (Natural Resources Conservation Service - NRCS) desarrolló un Hidrograma Unitario Adimensional a partir de una serie de hidrógrafas observadas, correspondientes a cuencas de diversos tamaños y ubicadas en distintos sitios de los Estados Unidos.

i. Relación entre tiempos característicos

El Hidrograma Unitario adimensional curvilíneo del S.C.S puede ser representado por un Hidrograma Unitario Triangular equivalente, con las mismas unidades de tiempo y caudal, teniendo por consiguiente el mismo porcentaje del volumen en el lado creciente del Hidrograma como se presenta en la Figura 5.99.

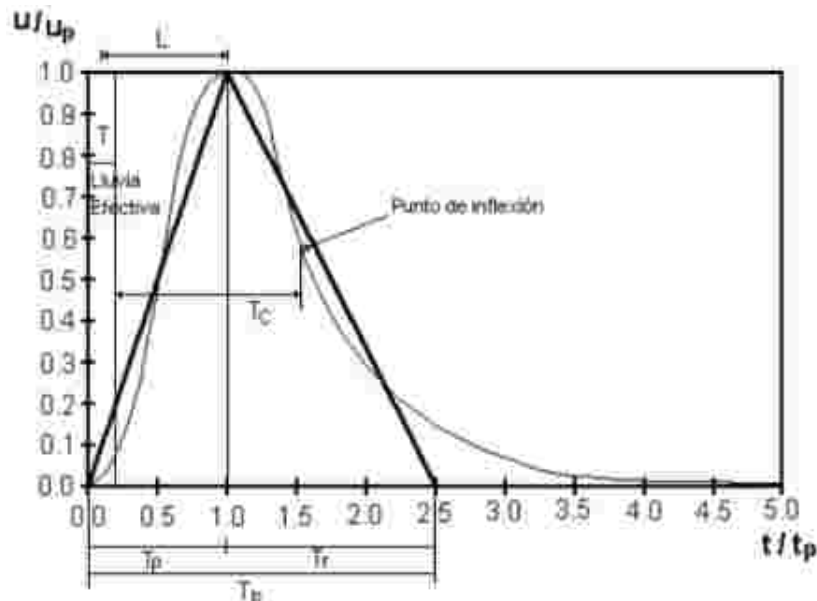


Figura 5.99 Hidrograma Unitario Adimensional del S.C.S

Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994

ii. Caudal pico

El caudal pico en pies cúbicos por segundo por pulgada se puede calcular como:

$$U_p = \frac{484A_c}{T_p}$$

Donde U_p es el caudal pico correspondiente a un Hidrograma Unitario, A_c es el área de la cuenca en millas cuadradas y T_p es el tiempo al pico en horas.

iii. Tiempo de concentración según SCS

El método del SCS utiliza el tiempo de concentración, definido como el tiempo que demora la escorrentía en llegar desde el punto más lejano de la cuenca hasta el punto de aforo, o de manera equivalente, el tiempo que transcurre desde el final de la lluvia efectiva hasta el punto de inflexión de la rama decreciente del Hidrograma Unitario. Con base en esto, el SCS propone una relación promedio entre el tiempo de rezago, T_R y el tiempo de concentración, T_c como:

$$T_c = \frac{5}{3T_R}$$

El tiempo de rezago, T_R definido como el tiempo en horas desde el centroide del hietograma de la precipitación efectiva hasta el caudal pico del hidrograma unitario, puede calcularse como:

$$T_R = \frac{L_c^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1,900S_c^{0.5}}$$

Donde L_c es la longitud del canal principal en pies, S_c es la pendiente promedio de la cuenca en porcentaje y S es el factor de retención o almacenamiento en pulgadas.

El factor de retención o almacenamiento S se obtiene del método del S.C.S para pérdidas mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Donde CN es el Número de Curva

iv. Duración hidrograma Unitario

El tiempo al pico, T_p está dado como:

$$T_p = \frac{T}{2} + T_R$$

En donde T es la duración de la lluvia efectiva en horas y T_R es el tiempo de rezago en horas.

La relación promedio entre el rezago y el tiempo de concentración, puede escribirse de la siguiente manera:

$$T_R = 0,6T_c$$

Los valores del tiempo de rezago según esta expresión son los mismos obtenidos para el Hidrograma Unitario de Snyder.

Se puede demostrar que la relación entre la duración T de la precipitación efectiva a la que se le va a construir el hidrograma unitario y el tiempo de concentración está dada por la siguiente expresión:

$$T = 0,13T_c$$

III. Método Williams y Hann

Este modelo calcula el hidrograma unitario sintético producido por una lluvia instantánea en una cuenca, a partir de sus principales características geomorfológicas.

Las características geomorfológicas de la cuenca están representadas por el modelo mediante las constantes de recesión K y el tiempo al pico T_p .

$$K = 27A_c^{0,231}S_{cp}^{-0,777}\left(\frac{L_c}{W_c}\right)^{0,124}$$

$$T_p = 4,63A_c^{0,422}S_{cp}^{-0,46}\left(\frac{L_c}{W_c}\right)^{0,133}$$

Donde, A_c = Área de la cuenca en (mi²), S_{cp} = Pendiente media del canal principal (pies/milla), L_c/W_c = Relación largo-ancho de la cuenca, K = Constante de recesión (h) y T_p = Tiempo al pico en (h).

El parámetro n se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$n = 1 + 2 \left\{ \frac{1}{2(K/T_p)} + \left[\frac{1}{4(K/T_p)^2} + \frac{1}{(K/T_p)} \right]^{1/2} \right\}^2$$

El parámetro B mediante la Tabla 5.96.

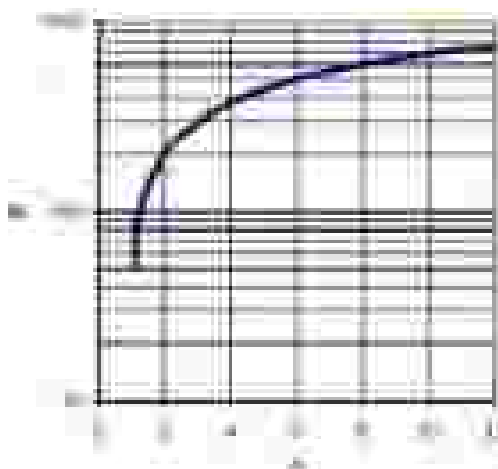


Figura 5.100 Curva parámetro B vs n
Fuente: Chow, Maidment, & Mays, 1994

El tiempo T_o y el tiempo T_1 están definidos por:

$$T_o = T_p \left[1 + \frac{1}{(n-1)^{0.5}} \right]$$

$$T_1 = T_o + 2K$$

U_p en $\text{pie}^3/\text{s}/\text{pul}$ con la siguiente expresión

$$U_p = \frac{BA}{T_p}$$

Cálculo de U_0 y U_1 correspondiente al tiempo T_o y T_1 respectivamente

$$U_0 = \left(\frac{T_o}{T_p} \right)^{n-1} e^{\left[(1-n) \left(\frac{T_o}{T_p} - 1 \right) \right]}$$

$$U_1 = U_0 e^{\left[\frac{T_o - T_1}{K} \right]}$$

Finalmente se determina la forma del hidrograma unitario sintético con las siguientes ecuaciones:

$$U(t) = U_p \left(\frac{t}{T_p} \right)^{n-1} e^{\left[(1-n) \left(\frac{t}{T_p} - 1 \right) \right]} \quad \text{Para } t \leq T_o$$

$$U(t) = U_0 e^{\left[\frac{t_o - t}{K} \right]} \quad \text{Para } T_o < t \leq T_1$$

$$U(t) = U_1 e^{\left[\frac{t_1 - t}{3K} \right]} \quad \text{Para } t > T_1$$

IV. Método Racional

La fórmula del Método Racional varía de acuerdo con el sistema de unidades utilizado. En la siguiente ecuación se presenta una de las expresiones más conocidas:

$$Q = \frac{CIA}{3,6}$$

Donde C es el coeficiente de escorrentía, I la intensidad de la lluvia y A, el área de la cuenca.

El método cuenta con algunas restricciones:

- El método proporciona solamente un caudal pico, no el hidrograma de creciente.
- El método racional asume que la escorrentía es directamente proporcional a la precipitación (si duplica la precipitación, la escorrentía se duplica también). En la realidad esto no es cierto, pues la escorrentía depende también de muchos otros factores tales como precipitaciones antecedentes, condiciones de humedad del suelo, etc.
- El método asume que el período de retorno de la precipitación y el de la escorrentía son los mismos lo que no es cierto. La precipitación es filtrada por la cuenca para producir escorrentía y ese filtro no es lineal. La transformación de precipitación en escorrentía se ve afectada por las características de la cuenca, el estado de la cuenca al momento de la lluvia y otros factores. Por ejemplo, precipitaciones con períodos de retorno pequeños pueden producir caudales con períodos de retorno mayores, debido a las condiciones de humedad de la cuenca en el momento en que ocurra la tormenta.
- El coeficiente de escorrentía depende en gran medida de las condiciones de humedad antecedente de la cuenca, que a su vez dependen de las tormentas que hayan ocurrido antes.

V. Resultados Caudales

En la Tabla 5.107 se presentan los caudales máximos estimados mediante los métodos de las hidrógrafas unitarias Snyder, SCS y Williams y Hann (WyH).

Tabla 5.107 Caudales máximos estimados método hidrógrafas unitarias

ID	Nombre microcuenca	Método	Periodo de retorno [años]					
			2,33	5	10	25	50	100
1	Río Mutatá	WyH	112,88	179,44	260,35	403,63	545,20	727,89
		Snyder	92,83	146,06	211,06	329,81	447,87	595,07
		SCS	111,65	175,85	252,98	392,31	533,51	709,77
2	Drenaje Sin Nombre 1	WyH	0,24	0,35	0,48	0,71	0,92	1,19
		Snyder	0,44	0,64	0,88	1,31	1,72	2,22
		SCS	0,52	0,77	1,05	1,55	2,02	2,61
3	Drenaje Sin Nombre 2	WyH	1,35	1,98	2,72	4,00	5,23	6,73
		Snyder	1,63	2,41	3,32	4,88	6,38	8,22
		SCS	1,97	2,88	3,96	5,82	7,62	9,81
4	Drenaje Sin Nombre 3	WyH	0,59	0,92	1,32	2,04	2,74	3,61
		Snyder	0,85	1,33	1,92	2,99	4,05	5,37
		SCS	1,07	1,68	2,40	3,68	4,99	6,61

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Adicionalmente el caudal estimado mediante el método racional se presenta en la Tabla 5.108.

Tabla 5.108 Caudales máximos estimados método racional

ID	Nombre microcuenca	Periodo de retorno [años]					
		2,33	5	10	25	50	100
1	Río Mutatá	418,36	531,58	637,39	832,29	1012,51	1250,39
2	Drenaje Sin Nombre 1	3,47	4,23	4,99	6,28	7,47	8,97
3	Drenaje Sin Nombre 2	9,33	11,49	13,70	17,39	20,96	25,43
4	Drenaje Sin Nombre 3	4,50	5,60	6,71	8,71	10,57	13,01

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.8 Oferta hídrica

A partir de los resultados obtenidos del modelo lluvia escurrentía, se realizó el cálculo de la oferta hídrica media anual para las condiciones de año hidrológico medio. La oferta hídrica se define como el volumen de agua disponible para satisfacer la demanda generada por las actividades sociales y económicas del hombre⁸⁷. De acuerdo con la resolución 865 de 2004 la cuantificación de la oferta hídrica total disponible surge de reducir la oferta hídrica total superficial (cuantificada por el caudal medio anual) por el caudal ambiental. La Tabla 5.109 resume los valores de oferta hídrica para cada microcuenca, durante las condiciones de año hidrológico medio.

Tabla 5.109 Oferta hídrica disponible media anual

ID	Nombre microcuenca	Oferta hídrica disponible [m³/s]	Oferta hídrica disponible [L/s]
1	Río Mutatá	14,78	14.786,195
2	Drenaje Sin Nombre 1	0,01	13,340
3	Drenaje Sin Nombre 2	0,07	68,140
4	Drenaje Sin Nombre 3	0,03	29,220

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.5.9 Análisis de inundabilidad

Debido a la cercanía del río Mutatá con el área de influencia del proyecto y con la cabecera municipal de Mutatá, se considera necesario realizar un análisis espacio-temporal de las inundaciones asociadas a este cuerpo hídrico. Para ello, se llevó a cabo una revisión de información secundaria proveniente de distintas entidades, tales como el IDEAM, Corpourabá y la Alcaldía de Mutatá.

Entre los registros disponibles a nivel nacional se encuentran las capas geoespaciales correspondientes a las áreas afectadas por inundaciones durante eventos del fenómeno de La Niña, específicamente en los años 1988, 2000, 2011 y 2012. Estas capas fueron generadas por el IDEAM con apoyo técnico del IGAC, mediante interpretación de imágenes de sensores remotos, y abarcan todo el territorio nacional a escala 1:100.000.

En la Figura 5.101 se presentan los polígonos de las áreas afectadas por inundaciones durante los eventos del fenómeno de La Niña en los años mencionados.

⁸⁷ (MAVDT, 2004)

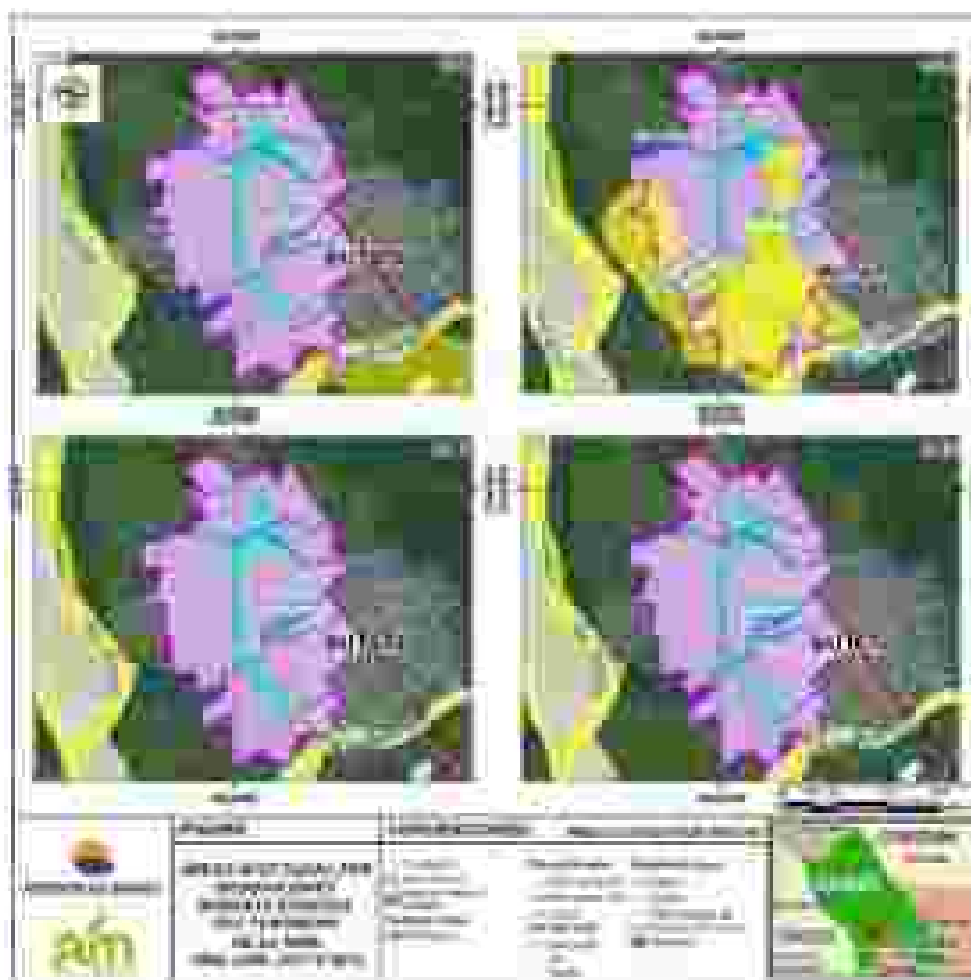


Figura 5.101 Áreas afectadas por inundaciones durante eventos del fenómeno de La Niña, 1988, 2000, 2011 y 2012

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Como se observa en la figura, el polígono correspondiente a la inundación del año 2000 se superpone parcialmente con el área de influencia del proyecto. Si bien estas capas permiten identificar zonas susceptibles a inundaciones bajo ciertos eventos climáticos, presentan algunas limitaciones, como se describe a continuación:

- Estas capas delimitan zonas inundadas en eventos históricos asociados al fenómeno de La Niña, mediante el análisis de imágenes satelitales y de radar. Sin embargo, debido a su escala (1:100.000), no ofrecen el nivel de detalle requerido para proyectos que demandan información más precisa, como aquellos que operan a escalas de 1:10.000 o superiores.
- La resolución espacial de las imágenes utilizadas (frecuentemente de 30 m/píxel o más) puede generar errores en áreas de menor extensión, lo que conlleva a generalizaciones en los polígonos, suavizado de curvas y simplificación de detalles topográficos finos. Relieves menores como lomas y terrazas pueden desaparecer, ocasionando que zonas no inundadas queden incluidas dentro del polígono general.

- La interpretación de imágenes satelitales se basa en diferencias espectrales para detectar cuerpos de agua. No obstante, suelos saturados o con alta humedad pueden reflejarse como agua, y sombras de nubes o relieves pueden confundirse con cuerpos hídricos. Es probable que se haya empleado un proceso de clasificación supervisada o no supervisada, que asigna categorías a los píxeles; por lo tanto, si los valores espectrales se asemejan al agua, aunque no lo sean, el algoritmo puede incluirlos erróneamente.
- Los mapas históricos más antiguos, como los de 1988 y 2000, tienden a sobreestimar las áreas de inundación (por generalización y baja resolución) o a subestimarlas (por ausencia de imágenes libres de nubes en el momento preciso). Actualmente, los satélites ofrecen mayor resolución y tecnología, lo que permite obtener información de mejor calidad y delimitar con mayor precisión las zonas inundadas, especialmente en áreas urbanas, llanuras aluviales complejas y zonas con vegetación densa.

En relación con lo anteriormente mencionado, se requiere la revisión de información más detallada en la zona, por lo que se consulta información perteneciente a los Planes de ordenamiento del municipio de Mutatá, donde para el Plan de Ordenamiento correspondiente al año 2011 se generaron diferentes mapas de amenaza por inundación a escala municipal (1:75.000) y más específicos para la cabecera municipal (1:25.000).

Debido a que no fue posible encontrar las capas específicas en formato editable shape, las capas fueron georreferenciadas tomando como base la información presente en los planos realizados para la Revisión y Ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Mutatá para el año 2011⁸⁸, específicamente el plano Zonificación de Amenazas por Inundación y Fenómenos De Remoción en Masa a escala 1:75.000. el cual presenta la clasificación de amenaza por inundación para todo el municipio de Mutatá. En la Figura 5.102 se presenta la capa de Amenaza de inundación en cercanías del área de influencia del proyecto, donde se observa que el área de influencia del proyecto se encuentra en una zona de amenaza media y las áreas con amenazas altas se asocian principalmente al río Socio al costado oeste del área de interés.

⁸⁸ (Municipio de Mutatá., 2011)



Figura 5.102 Amenaza por inundación a nivel municipal, POT 2011

Fuente: POT Municipio de Mutatá, 2011. Modificado por: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Igualmente, la zona urbana cuenta con una clasificación de amenaza más detallada, representada en una escala de mayor resolución. Esta información se encuentra en la Revisión y Ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Mutatá para el año 2011²⁶, específicamente el plano de Amenaza por Inundación a escala 1:25.000. En la Figura 5.103 se presenta la amenaza por inundación en las cercanías del área urbana de Mutatá. De acuerdo con esta fuente, en el área de influencia del proyecto se identifica una amenaza de inundación alta en el costado sur, asociada al río Mutatá, correspondiente a una franja de aproximadamente 150 metros desde la margen derecha del río. Por otro lado, algunos tramos del denominado Drenaje 2 (Quebrada Daira) presentan amenaza media, mientras que el resto del área superpuesta se clasifica como amenaza baja.



Figura 5.103 Amenaza por inundación a zona urbana, Cabecera Municipal Mutatá, POT 2011
Fuente: POT Municipio de Mutatá, 2011. Modificado por: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Adicionalmente, se incluye información de la Zonificación de Amenazas y Riesgos por Movimientos en Masa, Avenidas Torrenciales e Inundaciones en el Área Urbana del Municipio de Mutatá, herramienta clave para la planificación territorial y la gestión del riesgo (2017 Este estudio incorpora la modelación hidráulica del río Mutatá realizada por la empresa ICARO Consultores S.A.S., generando manchas de inundación para periodos de retorno de 2,33, 5, 10; 25, 50 y 100 años, en un tramo de aproximadamente 1,2 km de longitud. También se presentan perfiles de secciones transversales y cotas de inundación, lo cual complementa el análisis del área de influencia del Estudio De Impacto Ambiental Para La Modificación De Licencia Ambiental Del Proyecto “Construcción De La Variante Mutatá (UF4) De La Concesión Autopista Al Mar 2”.

En la Figura 5.104 se presenta la mancha de inundación del río Mutatá para el periodo de retorno de 100 años, la cual corresponde al escenario más crítico simulado.



Figura 5.104 Mancha de inundación Tr 100 años, Consorcio Ícaro – Urabá. (2016).
Fuente: Consorcio Ícaro – Urabá. (2016). Modificado por: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

De acuerdo con lo anterior, el área afectada por inundaciones del río Mutatá de acuerdo con estas modelaciones hidráulicas y respecto al área de influencia del proyecto, únicamente se presentaría inundaciones en la zona sur, con una extensión aproximada de 110 m desde la margen derecha del río Mutatá. Lo anterior se asemeja con lo observado en la Figura 5.103, donde se observa que la amenaza de inundación se extiende en cercanías del Drenaje 1.

Como complemento al análisis, se presentan dos secciones transversales trazadas desde el río Mutatá, cruzando los drenajes y el área proyectada para la vía. En la Figura 5.104 se presentan dichos perfiles en su vista en planta, los cuales tienen una longitud de 1,5 km aproximadamente.



Figura 5.105 Sección de transversal de terreno
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Figura 5.106 se presentan las secciones transversales en perfil longitudinal, donde se puede observar la diferencia de cotas que presenta el terreno respecto al río Mutatá, para las dos secciones transversales mencionadas anteriormente.

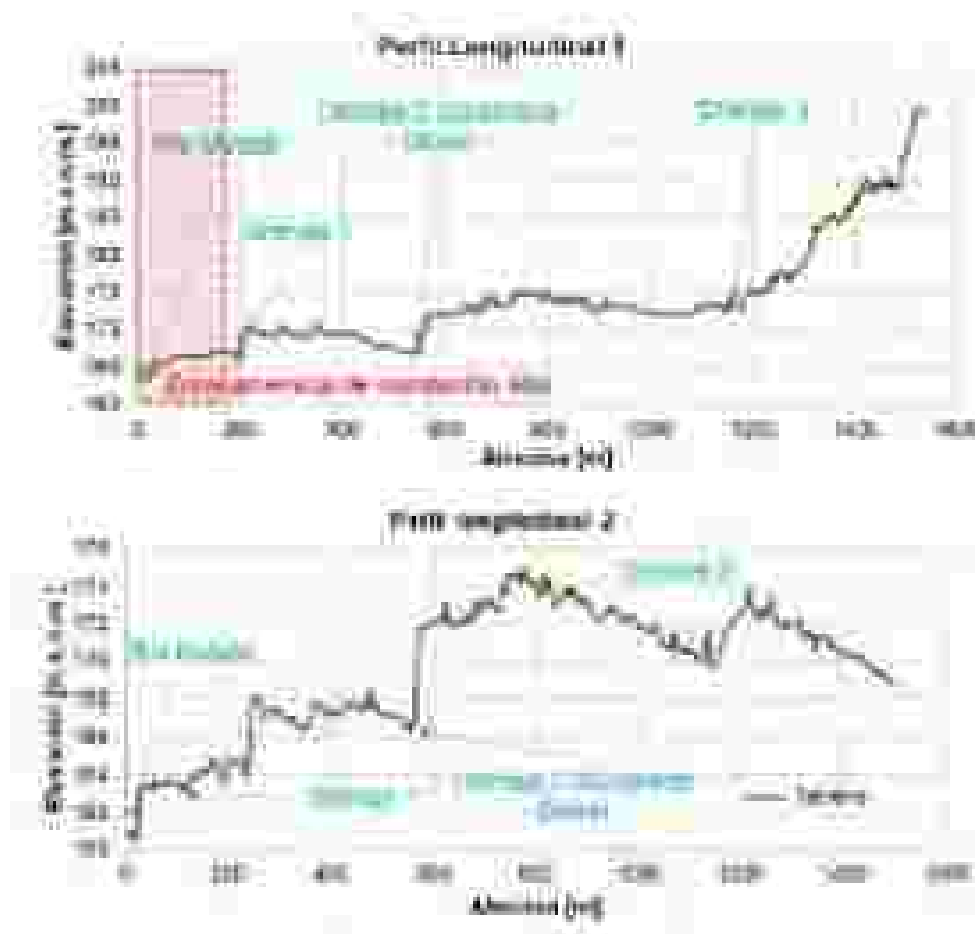


Figura 5.106 Perfiles longitudinales, secciones transversales

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

Los perfiles están organizados desde un punto aguas arriba hacia uno aguas abajo, y el Perfil Longitudinal 1 no sigue un trazado recto, como se observa en la Figura 5.105. Esta configuración busca representar de forma más similar el perfil del terreno en el área de implantación de la vía. El perfil se encuentra dentro del área delimitada por la zonificación de amenaza por inundación (Figura 5.103) y por la mancha de inundación correspondiente al período de retorno de 100 años (Figura 5.104), lo que permite estimar la cota alcanzada por crecientes extraordinarias. En este caso, el punto hasta donde se extiende la amenaza por inundación corresponde a una cota de 164,9 m.s.n.m., por lo que se puede inferir que las zonas cercanas al trazado de los perfiles y en inmediaciones del río Mutatá que se encuentren por debajo de dicha cota presentan una mayor probabilidad de ser inundadas ante eventos de crecientes máximas. El resto del terreno estaría libre de riesgo o clasificado con riesgo medio o bajo.

El Perfil Longitudinal 2 presenta un trazado rectilíneo, lo que permite observar con mayor claridad las variaciones del terreno asociadas a los drenajes. El inicio del perfil se ubica en la zona más cercana al río Mutatá, que también presenta la cota más baja. Este perfil se intersecta únicamente con la capa de amenaza por inundación en la zona clasificada con amenaza baja. Sin embargo, de acuerdo con lo observado en el Perfil 1, se puede inferir

que la zona más susceptible a ser inundada corresponde a los primeros 200 metros aproximadamente del perfil, es decir, el tramo que se encuentra por debajo de la cota 164,9 m.s.n.m.

Adicionalmente, aunque la cota del resto del terreno es superior a la cota de inundación, en las zonas cercanas al Drenaje 2 (quebrada Daira) y al Drenaje 3 podrían presentarse eventos de inundación debido a las características topográficas del terreno (plano y con pendientes suaves). Por lo tanto, aunque no se cuente con registros específicos de estos eventos, se recomienda considerar como zona susceptible a inundación una franja adyacente a los drenajes mencionados.

5.1.5.10 Dinámica fluvial

De acuerdo con la información recopilada y los estimativos realizados en capítulos anteriores, se realiza un análisis general de la dinámica fluvial de los cauces propensos a intervención. Estos drenajes presentan bajas pendientes y principalmente patrón de drenaje dendrítico, con profundidades principalmente someras. A continuación, se presenta de manera detallada las características de los drenajes en el área de influencia.

En la Fotografía 5.40 se presentan las características del drenaje llamado Drenaje Sin Nombre 1, este cauce presenta bajo caudal y se encuentra intervenido antrópicamente aguas arriba del área de influencia del proyecto. Actualmente se presenta una obra de paso bajo el tramo existente de la vía de la variante Mutatá, la cual corresponde a una tubería de 0,9 m de diámetro en buenas condiciones. La vegetación cercana al cauce es principalmente de pastos y no se presenta material de arrastre de grandes diámetros, lo que indica bajas velocidades y poca energía.



Fotografía 5.40 Características del cauce – Drenaje Sin Nombre 1

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

El denominado Drenaje Sin Nombre 2 o llamado por la comunidad Quebrada Daira, se caracteriza por tener un drenaje definido, donde se puede observar el nivel de banca llena de forma clara, además se presenta material de diámetros inferiores a los 15 cm, lo que indica transporte moderado de material en eventos de crecientes como se observa en la Fotografía 5.41. De acuerdo con lo evidenciado en campo los niveles de lámina de agua alcanzan las cercas o vallas construidas por la comunidad para el manejo del ganado,

dejando residuos sólidos de carácter antrópico como plásticos y textiles, sin embargo, no se identifican crecientes repentinos o con carácter de avenida torrencial, sino que presenta características más acordes a crecientes lentas. La vegetación cercana consta principalmente de pastos y otra vegetación de menor tamaño.



Fotografía 5.41 Características del cauce – Drenaje Sin Nombre 2 – Quebrada Daira

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

El denominado Drenaje Sin Nombre 3, está conformado por dos (2) drenajes que confluyen y que presentan magnitudes similares. En la Fotografía 5.42 se presenta el drenaje mencionado aguas arriba de la confluencia, el cual corresponde al afluente izquierdo, más cercano al casco urbano de Mutatá. Este drenaje presenta una conformación de cauce evidente, con profundidad moderada y bajas velocidades, además la pendiente del drenaje es baja, favoreciendo la acumulación de sedimentos finos y materia orgánica en algunos tramos. La vegetación cercana consta principalmente de pastos y vegetación de menor tamaño.



Fotografía 5.42 Características del cauce – Drenaje Sin Nombre 3 – Aguas arriba, Brazo izquierdo

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Fotografía 5.43 se observa el drenaje ubicado aguas arriba de la confluencia, correspondiente al afluente derecho del denominado Drenaje Sin Nombre 3. Este afluente presenta características hidráulicas y morfológicas similares al afluente izquierdo previamente descrito; no obstante, se diferencia por la presencia de tramos con mayor cobertura vegetal en sus márgenes. Además, este drenaje muestra un menor grado de intervención antrópica debido a su localización más alejada del casco urbano de Mutatá, lo que contribuye a la preservación de su condición natural y reduce las alteraciones asociadas a actividades humanas



Fotografía 5.43 Características del cauce - Drenaje Sin Nombre 3 – Aguas arriba, brazo derecho

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Fotografía 5.44. se presenta el Drenaje Sin Nombre 3 en el tramo posterior a la confluencia de los dos afluentes previamente descritos, evidenciando un cauce de mayor magnitud y ancho. En este tramo, se observa un incremento en la sinuosidad del cauce, caracterizado por la formación de meandros, debido a las condiciones de baja pendiente y la reducción en la velocidad del flujo. La cobertura vegetal cercana está dominada por pastos y vegetación de menor porte. Asimismo, se identifica la presencia de interferencia antrópica asociada al tránsito de ganado, lo cual podría estar contribuyendo a la compactación del suelo y a la alteración de las dinámicas naturales del drenaje.



Fotografía 5.44. Características del cauce - Drenaje Sin Nombre 3 – Aguas abajo

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.6 Calidad del agua

En este apartado se presenta la información correspondiente a la evaluación de calidad del agua en cuatro (4) puntos de muestreo seleccionados sobre los drenajes ubicados en la zona de influencia del proyecto. El análisis incluye la interpretación de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos e indicadores de calidad del agua y contaminación, correspondientes a las campañas de monitoreo realizadas en diciembre de 2024 y enero de 2025.

5.1.6.1 Cuerpos de agua continentales

5.1.6.1.1 Información general

El día 5 de diciembre de 2024 y el 21 de enero de 2025 se llevaron a cabo las campañas de monitoreo para el proyecto, ambas jornadas comprendieron cuatro (4) puntos de muestreo distribuidos en un (1) jagüey y tres (3) fuentes superficiales (Tabla 5.110 y [Figura 5.107](#)).

Debe tenerse en consideración que el alcance del proyecto no contempla actualmente la solicitud de concesiones o permisos de vertimiento, sin embargo, el monitoreo de calidad busca la correcta identificación de las condiciones actuales al interior del área de influencia física contemplada para el proyecto.

Tabla 5.110 Puntos de monitoreo de calidad del agua

Código	Coordenadas - Magna Colombia Origen Nacional		Tipo de Cuerpo hídrico
	X [m]	Y[m]	
D3_AR	4620225,05	2360358,86	Lótico

Código	Coordenadas - Magna Colombia Origen Nacional		Tipo de Cuerpo hídrico
	X [m]	Y[m]	
D3_AB	4620033,32	2360247,19	Lótico
D2_AB	4620020,44	2359639,79	Lótico
JY	4620260,13	2359489,33	Léntico

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.



Figura 5.107 Puntos de monitoreo de calidad del agua

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

5.1.6.1.2 Información del monitoreo

A. Responsable de toma y análisis de muestras

El laboratorio encargado de la toma de las muestras fue Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, el cual está acreditado según la Resolución 2114 del 23 de septiembre de 2022 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La recolección, manipulación, preservación, transporte y almacenamiento de muestras se realizó teniendo

en cuenta lo establecido en el Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del agua 2021 del IDEAM.

El análisis de las muestras estuvo a cargo de Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, Hidrolab, y Agualimsu S.A.S, aplicando las metodologías establecidas por el Standard Methods Ed. 23th, 2017⁸⁹.

El desarrollo de la campaña de monitoreo consideró las adecuadas prácticas para el almacenamiento y transporte de las muestras. Para todas las muestras se garantizó la correcta preservación hasta su procesamiento.

Los soportes correspondientes a los reportes de laboratorio, las resoluciones de acreditación y los formatos de campo se incluyen en Anexos_C5_1/Anexo 5_1_6_Calidad del agua.

A continuación, en la Tabla 5.111 se muestran los distintos parámetros, laboratorios y resoluciones de acreditación para la toma y procesamiento de las muestras.

Tabla 5.111 Laboratorios involucrados en la toma de muestras y análisis

Parámetro	Laboratorio	Resolución de acreditación
pH	Alta Biotecnología Colombiana S.A.S	Resolución 2114 del 23 de septiembre de 2022
Temperatura		
Conductividad		
Oxígeno Disuelto		
Saturación de Oxígeno		
Sólidos Suspendidos Totales		
Sólidos Sedimentables		
Sólidos Disueltos Totales		
Turbidez		
Demanda Química Oxígeno	Agualimsu S.A.S	Resolución 2866 del 22 de diciembre de 2022
Demanda Bioquímica Oxígeno		
Coliformes Totales		
Coliformes Fecales		
Coliformes Termotolerantes		
Grasas y Aceites	Hidrolab Colombia LTDA	Resolución 0420 del 10 de mayo de 2024
Arsénico		
Bario		
Cadmio		
Cinc		
Cobre		
Coeficiente de absorción espectral 436 nm		
Coeficiente de absorción espectral 525 nm		
Coeficiente de absorción espectral 620 nm		
Cromo		
Fenoles		
Fosforo Total		
Mercurio		
Níquel		
Nitrógeno Kjeldahl		
Plata		

⁸⁹ (APHA. A, 1995)

Parámetro	Laboratorio	Resolución de acreditación
Plomo		
Selenio		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

B. Fecha y tipo de muestreo

En la Tabla 5.112 se presenta la información relacionada con la logística para el desarrollo de la campaña. La obtención de las muestras se realizó de forma puntual.

Tabla 5.112 Fecha y tipo de monitoreo

Punto	Campaña 1			Campaña 2		
	Fecha de monitoreo	Hora	Tipo de muestreo	Fecha de monitoreo	Hora	Tipo de muestreo
D3_AR	5/12/2024	13:00	Simple	21/01/2024	11:30	Simple
D3_AB	5/12/2024	08:40	Simple	21/01/2024	10:00	Simple
D2_AB	5/12/2024	08:40	Simple	21/01/2024	12:45	Simple
JY	5/12/2024	07:11	Simple	21/01/2024	14:30	Simple

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

De acuerdo con la información en el capítulo 5.1.5 de hidrología, la zona donde se ubican los puntos de monitoreo tiene precipitación que sigue un ciclo anual bimodal, con una temporada seca entre diciembre-febrero y junio-agosto, una temporada de lluvias entre los meses marzo-mayo y septiembre-octubre. Según esto, el mes de diciembre representa típicamente una época de bajas precipitaciones.

En la Figura 5.108 se presentan los datos de precipitación para la estación con influencia directa en la zona de estudio.

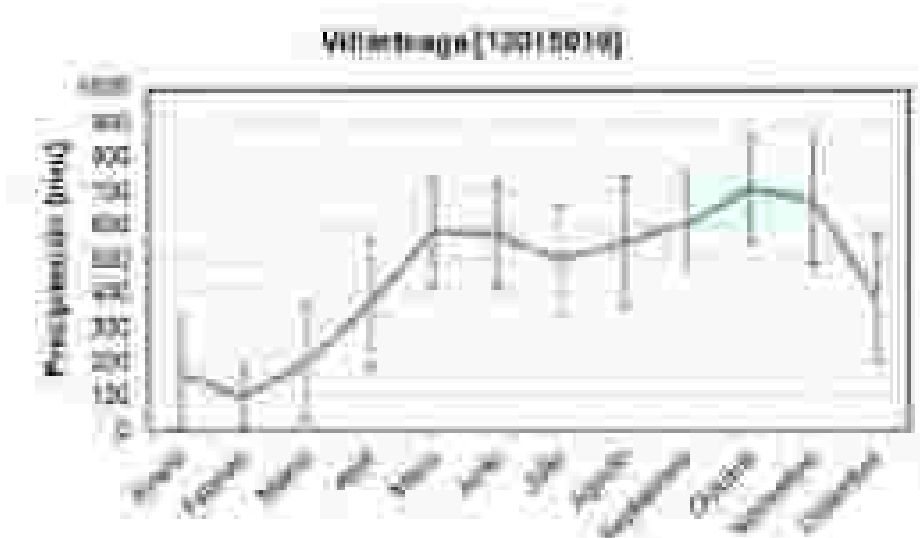


Figura 5.108 Ciclo anual de precipitaciones en la zona de estudio

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

C. Método de análisis

En la Tabla 5.113 se presentan los parámetros in situ y los parámetros de laboratorio medidos en la campaña de monitoreo, así como la referencia del método de análisis empleado.

Tabla 5.113 Métodos de análisis para los parámetros de calidad del agua evaluados

Parámetro	Método de análisis
pH	SM 4500-H+B
Temperatura	SM 2550 B
Conductividad Eléctrica	SM 2510 B
Oxígeno Disuelto	SM 4500-O, G
Saturación de Oxígeno	SM 4500-O, G
Turbidez	SM 2130 B
Demanda Química Oxígeno	SM 5220 D
Demanda Bioquímica Oxígeno	SM 5210 B, ASTM D888-18 Método C
Sólidos Suspendidos Totales	SM 2540 D
Sólidos Sedimentables	SM 2540 F
Sólidos Disueltos Totales	SM 2540 C
Grasas y Aceites	SM 5520 C
Fósforo Total	SM 4500 P, B4, C, D
Nitrógeno Kjeldahl	SM 4500 Norg C Modificado, 4500 NH3 B, C
Coliformes Totales	SM 9221 B
Coliformes Fecales	SM 9221 E
Fenoles Totales	SM 5530 B, D
Arsénico	SM 3030 K, SM 3114 C Modificado
Bario	EPA 3015 A SM, 3120 B
Cadmio	EPA 3015 A SM, 3120 B
Cinc	EPA 3015 A SM, 3120 B
Cobre	EPA 3015 A SM, 3120 B
Cromo	EPA 3015 A SM, 3120 B
Mercurio	EPA 3015 A SM, 3120 B
Níquel	EPA 3015 A SM, 3120 B
Plata	EPA 3015 A SM, 3120 B
Plomo	EPA 3015 A SM, 3120 B
Selenio	EPA 3015 A SM, 3120 B
Alcalinidad Total	SM 2320 B
Dureza Cálrica	SM 3500-Ca B
Color Real a 436 nm	ISO 7887:2011 Método B
Color Real a 525 nm	ISO 7887:2011 Método B
Color Real a 620 nm	ISO 7887:2011 Método B

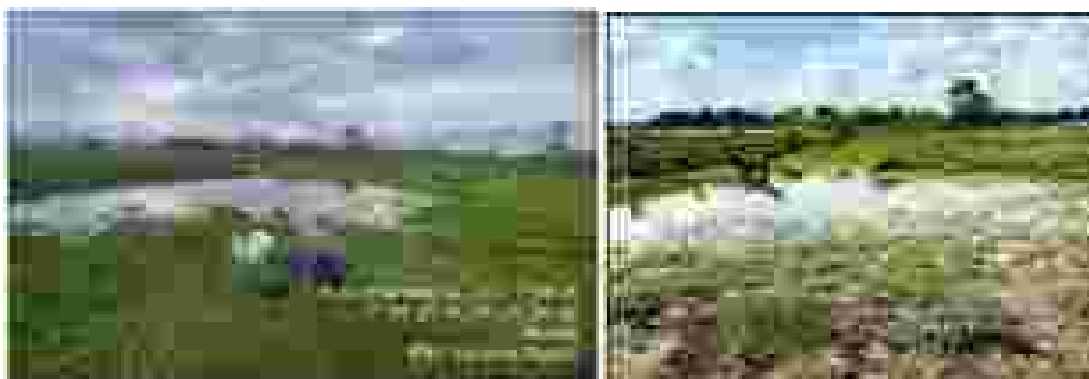
Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

5.1.6.1.3 Descripción de los puntos de monitoreo

A. Punto de monitoreo JY

Este punto corresponde a un pequeño cuerpo de agua léntico, situado junto a la carretera principal (Variante Mutatá). Se caracteriza por encontrarse en una zona de inundación, donde se recarga constantemente debido a las lluvias. La vegetación circundante es de tipo arbustiva, pastos, y macrófitas como el buchón de agua (*Eichhornia crassipes*).

El agua tiene una tonalidad marrón, debido a la abundancia de detritos en el sistema acuático, lo que está relacionado con la alta concentración de vegetación en la zona. Durante la primera jornada, se observó un cielo nublado, lo que redujo la incidencia de luz solar. No se detectaron olores durante el proceso.



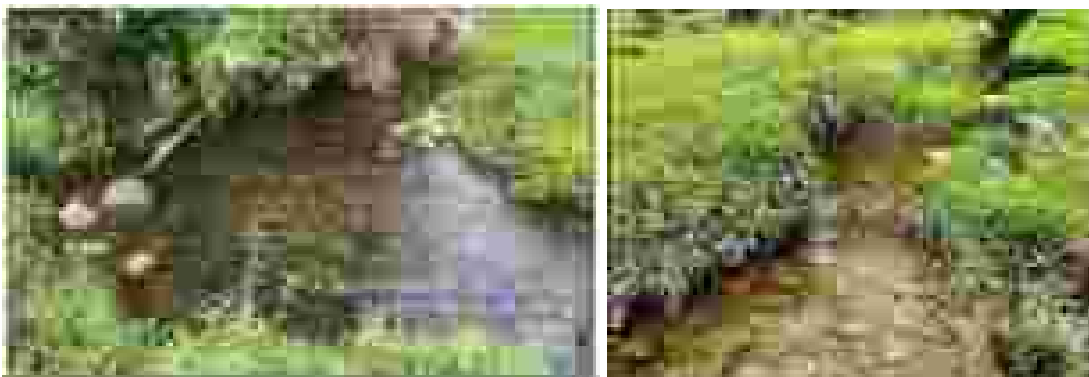
Fotografía 5.45 Punto de monitoreo JY

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

B. Punto de monitoreo D2 AB

Este es un cuerpo de agua lótico, específicamente un pequeño arroyo, cuyas aguas son claras y translúcidas. La vegetación circundante está compuesta principalmente por gramíneas (pastos) y algunos árboles de tamaño mediano dispersos en la zona. La cobertura del suelo está dominada por pastos sin vegetación densa.

Durante ambas jornadas de muestreo, el cielo estaba despejado y no se percibió ningún tipo de olor asociado al agua.



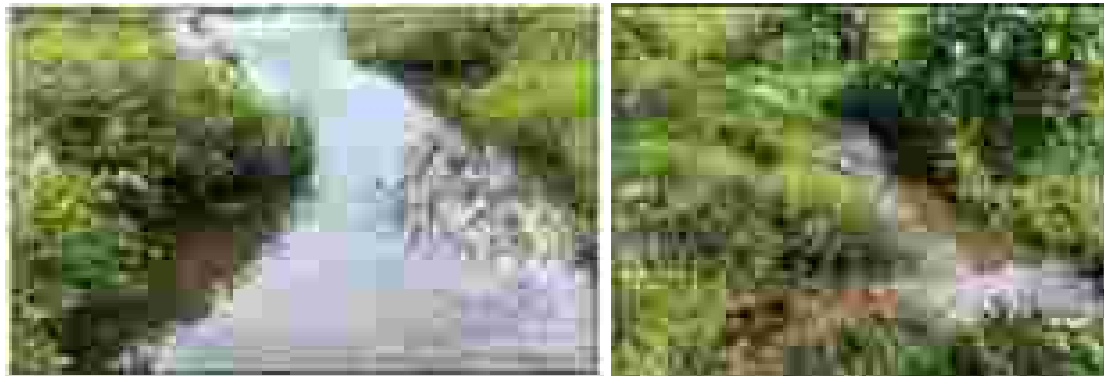
Fotografía 5.46 Punto de monitoreo D2 AB

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

C. Punto de monitoreo D3 AB

Cuerpo de agua lótico, tipo arroyo. Sin evidencia de abundantes sólidos o partículas en suspensión. La vegetación circundante está compuesta por gramíneas (pastos), arbustos y algunos árboles dispersos. La cobertura del suelo está dominada por pastos.

Durante las actividades de muestreo, el cielo estaba despejado y no se percibió ningún olor relacionado con el agua.

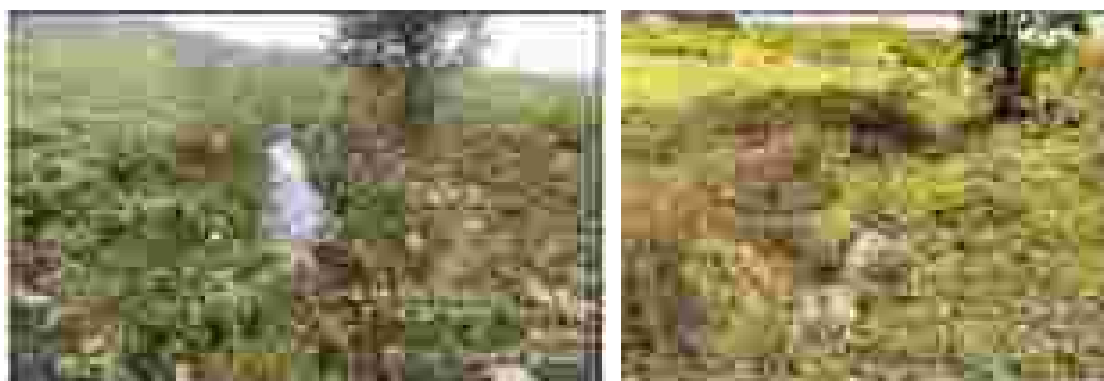


Fotografía 5.47 Punto de monitoreo D3 AB
Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

D. Punto de monitoreo D3 AR

Este punto corresponde a un cuerpo de agua superficial tipo arroyo, sin evidencia de vertimientos, turbiedad u olores. La vegetación que rodea el área está compuesta principalmente por gramíneas (pastos) y algunos árboles. El suelo está cubierto mayormente por pastos limpios y una considerable cantidad de hojarasca. Para el monitoreo actual el sistema presentó mucho menos agua en comparación con la campaña 1.

Durante ambas campañas de muestreo, el cielo estaba despejado y se presentó tiempo seco.



Fotografía 5.48 Punto de monitoreo D3 AR
Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

5.1.6.1.4 Resultados y análisis de monitoreo de calidad del agua

A continuación, se presentan los resultados de los monitoreos de calidad del agua, así como su análisis pertinente.

A. Parámetros in situ

En la Tabla 5.114 se presentan los valores obtenidos para los parámetros in situ medidos en cada uno de los puntos de muestreo.

Tabla 5.114 Parámetros in situ de los puntos de monitoreo

Parámetro	Unidades	Campaña 2024				Campaña 2025			
		JY	D2 AB	D3 AB	D3 AR	JY	D2 AB	D3 AB	D3 AR
pH	Unid. de pH	6,43	7,18	6,90	6,68	6,70	7,50	7,00	6,90
Temperatura	°C	27,80	34,10	27,80	31,30	30,80	30,50	26,50	29,10
Conductividad	μS/cm	23,00	77,00	89,00	69,00	50,00	130,00	90,00	60,00
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	2,83	7,74	8,16	7,27	2,90	7,01	7,63	7,11
Saturación de Oxígeno	%	36,60	112,10	112,10	100,50	33,20	100,50	101,20	101,70

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

B. Temperatura

La temperatura es considerada un parámetro clave para evaluar la calidad del agua, ya que influye en diversas propiedades fisicoquímicas del agua, como el pH, la densidad y la solubilidad de los gases, además de afectar a los organismos acuáticos.

Como parámetro de calidad s condiciona la cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua, la tasa de fotosíntesis de las algas y otras plantas acuáticas, así como la velocidad metabólica de los organismos. Además, influye en la sensibilidad de los organismos frente a contaminantes, parásitos y enfermedades, y también marca las épocas de reproducción, migración y estivación de estos organismos⁹⁰.

En la Figura 5.109 se muestra la variación de la temperatura en diferentes puntos de muestreo dentro del área de influencia del proyecto. Para la primera campaña se observa que la temperatura mínima registrada fue de 27,8 °C en los puntos JY y D3 AB, mientras que la temperatura máxima alcanzó los 34,10 °C en el punto D2 AB. En contraste, para la campaña ejecutada en enero de 2025 la mayor temperatura se presentó en JY con 30,80°C. Estos valores están dentro del rango esperado según la hora del muestreo y la época sobre la cual se desarrollaron las actividades de campo.

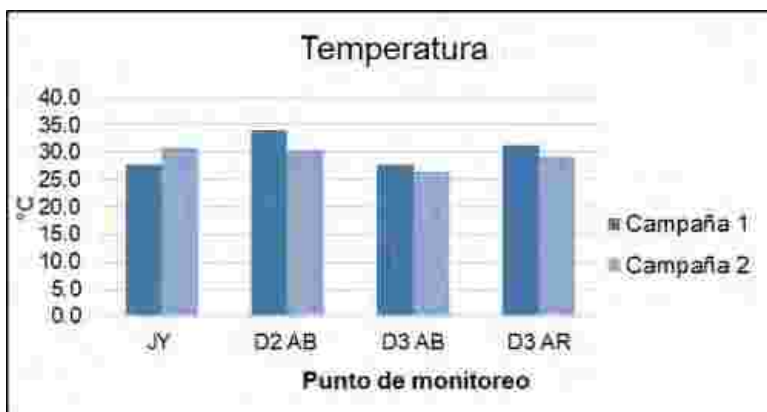


Figura 5.109 Variación de la temperatura

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

⁹⁰ (IDEAM, 2021)

C. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es un parámetro crítico en la evaluación de la calidad del agua, ya que es indispensable para los procesos metabólicos de los organismos acuáticos. Su concentración está influenciada por varios factores, entre ellos, la temperatura del agua, la cual afecta directamente su solubilidad. A temperaturas más altas, la capacidad del agua para disolver oxígeno disminuye, lo que puede generar condiciones de hipoxia que impactan negativamente la fauna acuática.

El oxígeno disuelto es esencial para los procesos de oxidación y descomposición de materia orgánica en el sistema acuático. Por lo tanto, el monitoreo del oxígeno disuelto, junto con las variaciones térmicas, proporciona información clave para la gestión y monitoreo de los ecosistemas acuáticos, permitiendo evaluar el equilibrio del entorno frente a posibles alteraciones ambientales.

Según se muestra en la Figura 5.110 para la primera campaña las concentraciones de oxígeno disuelto en los puntos monitoreados variaron entre 2,83 mg O₂/L en el punto JY y 8,16 mg O₂/L en el punto D3 AB. La concentración de oxígeno en el punto JY variante, con valores cercanos a los 2,83 mg O₂/L, se clasifica como aguas hipoxias, lo que sugiere un nivel de contaminación moderado y condiciones desfavorables para organismos aeróbicos. En contraste, los demás puntos monitoreados presentan concentraciones que indican aguas con niveles de contaminación bajos, lo que sugiere un menor nivel de intervención.

Con respecto a los resultados de la segunda campaña, se aprecia una tendencia similar en los niveles de oxígeno para cada uno de los puntos estudiados, con una concentración mínima de oxígeno de 2,90 mg/l igualmente para el punto JY.

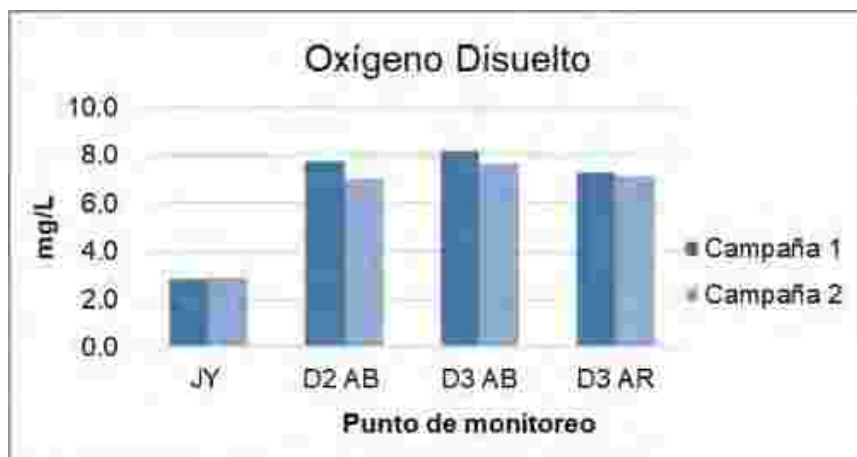


Figura 5.110. Variación del oxígeno disuelto
Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

D. pH

El pH es un parámetro fundamental utilizado globalmente para cuantificar la acidez o alcalinidad del agua. Este valor refleja la concentración de iones hidrógeno presentes en la muestra, proporcionando información clave sobre las condiciones químicas en la fuente. Los datos obtenidos para el pH permiten evaluar el grado de acidez o basicidad, lo que

tiene implicaciones directas sobre la capacidad del agua para sostener vida acuática y los procesos biogeoquímicos presentes en el sistema⁹¹.

En la Figura 5.111 se presentan los valores del pH obtenidos en las cuatro estaciones de muestreo para las dos campañas de monitoreo. Se observa que los resultados fluctúan entre 6,43 unidades de pH en el punto JY (campaña 1) y 7,5 unidades en el punto D2 AB (Campaña 2), indicando que el agua en la zona se mantiene dentro de un rango ligeramente ácido a neutro. Estos valores son indicativos de un entorno acuático relativamente equilibrado, lo resultado de la estabilidad del ecosistema acuático y la biodisponibilidad de nutrientes para los organismos presentes.

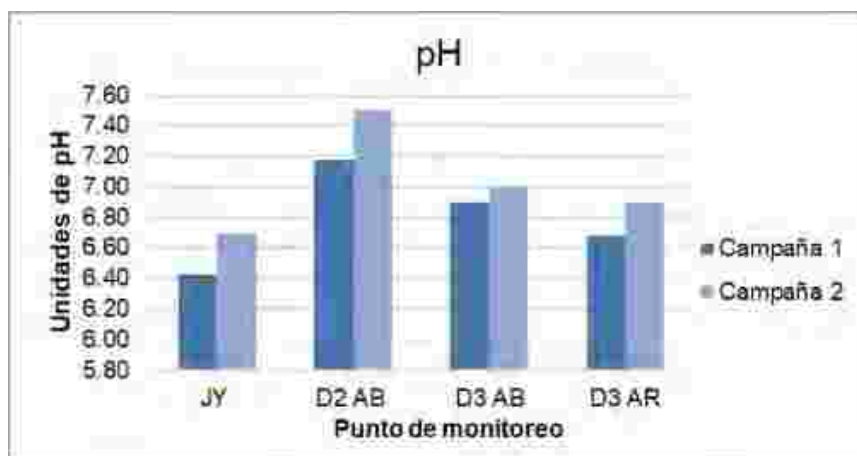


Figura 5.111 Variación del pH

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

E. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica permite medir la capacidad de una solución para conducir electricidad, lo cual está directamente relacionado con la concentración de iones disueltos, tales como sales, minerales y otros compuestos iónicos. A mayor concentración de estos iones, mayor será la conductividad del agua. Este parámetro proporciona una indicación indirecta de la salinidad y la carga iónica en el agua, lo que puede influir en las propiedades fisicoquímicas del sistema acuático y en la salud de los organismos que habitan en él.

En el contexto de la gestión de recursos hídricos, la medición de la conductividad es esencial para detectar posibles fuentes de contaminación, evaluar la calidad del agua para múltiples usos, y monitorear los cambios en los ecosistemas acuáticos.

La conductividad permite evaluar de manera aproximada la mineralización global del agua; en la Tabla 5.115, se presenta la clasificación de las aguas en términos de conductividad propuesta por Rodier⁹².

Tabla 5.115 Clasificación de las aguas en términos de conductividad

Conductividad	Grado de mineralización
<100 $\mu\text{S/cm}$	Muy débil
100<200 $\mu\text{S/cm}$	Débil

⁹¹ (Wetzel, R. G., 2001)

⁹² (Rodier J, Legube B, Merlet N. , 1998)

Conductividad	Grado de mineralización
200<333 $\mu\text{S/cm}$	Media acentuada
333<666 $\mu\text{S/cm}$	Media
666<1000 $\mu\text{S/cm}$	Mineralización importante
>1000 $\mu\text{S/cm}$	Mineralización excesiva

Fuente: Rodier, 1998.

A continuación, en la Figura 5.112 se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la conductividad eléctrica en los puntos de muestreo para las dos campañas, los cuales ofrecen una visión detallada sobre la variabilidad de este parámetro en la zona de estudio.



Figura 5.112 Variación de la conductividad
Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los puntos de monitoreo, se registró un valor mínimo de conductividad de 23,00 $\mu\text{S/cm}$ en el punto JY (primera campaña) y un valor máximo de 130,00 $\mu\text{S/cm}$ en el punto D2 AB (segunda campaña), como se muestra en la Figura 5.112. Los valores reportados para todos los puntos caracterizados se clasifican dentro de un rango de baja mineralización, lo que indica una concentración relativamente baja de iones disueltos en el agua, correspondiente con entornos acuáticos que poseen bajo nivel de contaminación o influencia externa de fuentes salinas.

5.1.6.1.5 Resultados de laboratorio

Los resultados obtenidos a partir de los muestreos fisicoquímicos y microbiológicos proporcionan una estimación del estado actual de la calidad del agua en los cuerpos de agua ubicados dentro del área de influencia del proyecto. A continuación, en la Tabla 5.116 y la Tabla 5.117 se detallan los resultados de obtenidos en los puntos de monitoreo para las campañas ejecutadas en diciembre de 2024 y enero de 2025 respectivamente.

Tabla 5.116 Resultados de análisis fisicoquímicos y microbiológicos Campaña 1

Parámetro	Unidades	JY	D2_AB	D3_AB	D3_AR
pH	Unid. de pH	6,43	7,18	6,90	6,68
Temperatura	°C	27,80	34,10	27,80	31,30
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$	23,00	77,00	89,00	69,00
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	2,83	7,74	8,16	7,27
Saturación de Oxígeno	%	36,6	112,1	112,1	100,5

Parámetro	Unidades	JY	D2_AB	D3_AB	D3_AR
Turbidez	NTU	8,20	1,80	1,02	2,40
Demanda Química Oxígeno	mg O ₂ /L	10,00	16,94	10,00	10,00
Demanda Bioquímica Oxígeno	mg O ₂ /L	10,00	10,00	10,00	10,00
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	11,60	<10	<10,00	<100
Grasas y Aceites	mg/L	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Fenoles Totales	mg/L	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15
Fósforo Total	mg/L	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00
Nitrógeno Kjeldahl	mg N/L	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
Arsénico	mg As/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Bario	mg Ba/L	0,013	0,024	0,022	0,021
Cadmio	mg Cd/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cinc	mg Zn/L	0,010	0,033	0,015	0,006
Cobre	mg Cu/L	0,018	0,011	0,009	0,008
Cromo	mg Cr/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Mercurio	mg Hg/L	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Níquel	mg Ni/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Plata	mg Ni/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Plomo	mg Pb/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Selenio	mg Se/L	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	<20	36,36	36,36	20,20
Dureza Cálrica	mg CaCO ₃ /L	20,00	30,00	26,00	10,00
Color Real a 436 nm	m ⁻¹	4,60	0,40	0,40	0,30
Color Real a 525 nm	m ⁻¹	1,10	<0,0062	0,10	0,20
Color Real a 620 nm	m ⁻¹	<0,0033	<0,0033	<0,0033	<0,0033
Coliformes Totales	NMP/100mL	2.300,00	68,00	260,00	790,00
Coliformes Fecales	NMP/100mL	780,00	12,00	17,00	8,00

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025

Tabla 5.117 Resultados de análisis fisicoquímicos y microbiológicos Campaña 2

Parámetro	Unidades	JY	D2 AB	D3 AB	D3 AR
pH	Unid. de pH	6,70	7,50	7,00	6,90
Temperatura	°C	30,80	30,50	26,50	29,10
Conductividad	μS/cm	50,00	130,00	90,00	60,00
Oxígeno Disuelto	mg O ₂ /L	2,90	7,01	7,63	7,11
Saturación de Oxígeno	%	33,20	100,50	101,20	101,70
Turbidez	NTU	25	1,2	3,1	<1
Demanda Química Oxígeno	mg O ₂ /L	55,76	10	10	26,94
Demanda Bioquímica Oxígeno	mg O ₂ /L	10	10	10	10
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	57,2	<10,0	<10,0	< 10,0
Grasas y Aceites	mg/L	< 0,5	<0,5	<0,5	< 0,5
Fenoles Totales	mg/L	< 0,15	< 0,15	< 0,15	< 0,15
Fósforo Total	mg/L	< 1	< 1	< 1	< 1
Nitrógeno Kjeldahl	mg N/L	< 5	< 5	< 5	< 5
Arsénico	mg As/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Bario	mg Ba/L	0,007	0,02	0,023	0,019
Cadmio	mg Cd/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Cinc	mg Zn/L	0,014	0,02	0,015	0,019
Cobre	mg Cu/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cromo	mg Cr/L	0,008	0,007	0,009	0,006

Parámetro	Unidades	JY	D2 AB	D3 AB	D3 AR
Mercurio	mg Hg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Níquel	mg Ni/L	< 0,01	0,01	0,01	0,01
Plata	mg Ni/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Plomo	mg Pb/L	< 0,01	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Selenio	mg Se/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	<20,0	44	28	44
Dureza Cálrica	mg CaCO ₃ /L	11,47	32,5	<10,0	32,5
Color Real a 436 nm	m ⁻¹	1,1	0,5	0,7	0,4
Color Real a 525 nm	m ⁻¹	0,5	0,2	0,4	0,2
Color Real a 620 nm	m ⁻¹	0,3	0,1	0,2	0,1
Coliformes Totales	NMP/100mL	230	14.0000	11	49
Coliformes Fecales	NMP/100mL	79	79000	11	23

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025

A. Demanda Bioquímica y Demanda Química de oxígeno disuelto

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) se refiere a la cantidad de oxígeno que requieren ciertos organismos, en su mayoría bacterias, para descomponer la materia orgánica en condiciones aeróbicas. Este parámetro se utiliza para evaluar el nivel de contaminación en los cuerpos de agua, ya que indica la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica disuelta. De esta manera, la DBO₅ proporciona una estimación de la carga orgánica presente en el agua, a través de mediciones de oxígeno consumido⁹³.

En el caso de las fuentes superficiales localizadas en Mutatá, los resultados obtenidos para la DBO₅ fueron inferiores al límite de cuantificación del método utilizado (<10,0 mg/L) para las dos campañas ejecutadas, como se muestra en la Figura 5.113. Estos valores sugieren que los cuerpos de agua en la zona presentan una baja concentración de materia orgánica.

Por otro lado, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) como indicador de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar tanto la materia orgánica como inorgánica, refleja el contenido total de sustancias susceptibles de ser oxidadas, proporcionando una evaluación más completa de la carga contaminante en el agua⁹⁴.

En cuanto a los resultados de DQO obtenidos en las fuentes superficiales de Mutatá se aprecian cambios notorios entre las concentraciones reportadas para ambas campañas. Según los resultados en el punto JY se alcanzó un valor máximo de DQO de 55,76 mg/l seguido del punto D3 AR con una concentración de 26,4 mg/l ambos datos para se obtuvieron para la campaña ejecutada en el año 2025 (Figura 5.113). Según estos hallazgos se espera que sobre ambas fuentes se estén presentando aportes de contaminantes, posiblemente favorecidos por la presencia de aguas residuales.

Para los puntos con valores por debajo del límite de cuantificación, se considera que la cantidad de materia orgánica que consume oxígeno en el proceso de oxidación es baja, indicador de un bajo nivel de contaminación. Sin embargo, el punto D2 AB, con un valor de DQO ligeramente superior, aún determina buena calidad, con un bajo contenido de materia orgánica tanto biodegradable como no biodegradable (Ver Tabla 5.118)

⁹³ (Roldán, 1992)

⁹⁴ (García, 2022)

Tabla 5.118 Criterios de clasificación para DBO y DQO en aguas superficiales

Concentración DQO	Concentración DBO5	Criterio	Descripción
Menor o igual a 10 mg/L	Menor o igual a 3 mg/L	Excelente	No contaminada
Mayor a 10 mg/L y menor o igual a 20 mg/L	Mayor a 3 mg/L y menor o igual a 6 mg/L	Buena calidad	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable
Mayor a 20 mg/L y menor o igual a 40 mg/L	Mayor a 6 mg/L y menor o igual a 30 mg/L	Aceptable	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descarga de aguas residuales tratadas biológicamente
Mayor de 40 mg/L y menor o igual a 200 mg/L	Mayor de 30 mg/L y menor o igual a 120 mg/L	Contaminada	Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal.
Mayor a 200 mg/L	Mayor a 120 mg/L	Fuertemente contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales

Fuente: (Sánchez, Herzing, Peters, Marquez, & Zambrano, 2007)⁹⁵

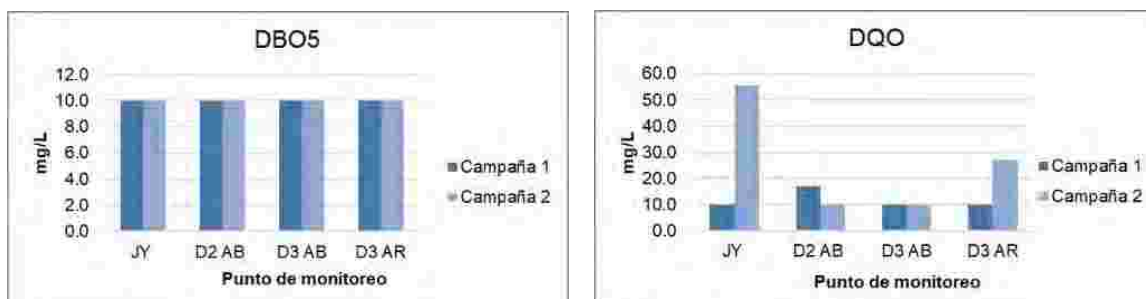


Figura 5.113 Resultados de DBO5 y DQO

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

B. Sólidos Suspendidos Totales y Turbidez

Los sólidos suspendidos totales (en adelante "SST") son partículas de diversas naturalezas que, debido a sus características físicas y eléctricas, permanecen en suspensión en el agua. Estas partículas pueden provenir de fuentes naturales, como la erosión de suelos, o de actividades antropogénicas, como la contaminación industrial y doméstica.

Los SST son importantes en la evaluación de la calidad del agua porque influyen en varias propiedades del sistema acuático, tales como la turbidez, el transporte de nutrientes, y la capacidad de los organismos acuáticos para obtener luz, lo cual afecta la fotosíntesis y los procesos biológicos⁹⁶.

En los resultados obtenidos para los SST (Figura 5.114), los valores oscilaron entre concentraciones inferiores al límite de detección del método empleado para su evaluación

⁹⁵(Sánchez, Herzing, Peters, Marquez, & Zambrano, 2007)

⁹⁶ (Bilotta, 2018)

(10,00 mg/L) y 57,20 mg/L, estando esta concentración sobre el punto JY en la segunda campaña. Estas concentraciones categorizan los puntos monitoreados como aguas no contaminadas, dado que la concentración máxima de referencia para cuerpos de agua no contaminados es de 150 mg/L⁹⁷.

En cuanto a la turbidez, este parámetro refleja la capacidad del agua para permitir el paso de luz a través de ella, siendo esencial en la evaluación de la calidad del agua, ya que afecta directamente la producción primaria en el ecosistema acuático. La turbidez se encuentra directamente relacionada con los sólidos suspendidos en el agua, es decir, a mayor concentración de SST, mayor turbidez. Aunque su presencia se puede dar por origen natural, como partículas de arcilla, algas y otros microorganismos también puede presentarse por origen antropogénico, proveniente de actividades como la erosión o vertimientos industriales.

En los puntos de muestreo para la primera campaña, los valores de turbidez variaron entre 1,20 NTU en el punto D3 AR y 8,20 NTU en el punto JY. En contraste, sobre el punto JY sobre la segunda campaña se obtuvo el mayor registro de Turbidez con 25 NTU. A pesar de esto, los registros indican una turbidez moderada, lo cual es consistente con una baja carga de sólidos suspendidos en el agua, sin niveles que afecten gravemente la producción primaria ni las condiciones para la vida acuática en la zona.



Figura 5.114 Resultados de Sólidos suspendidos totales

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

⁹⁷ (Ramírez & Viña, 1998)

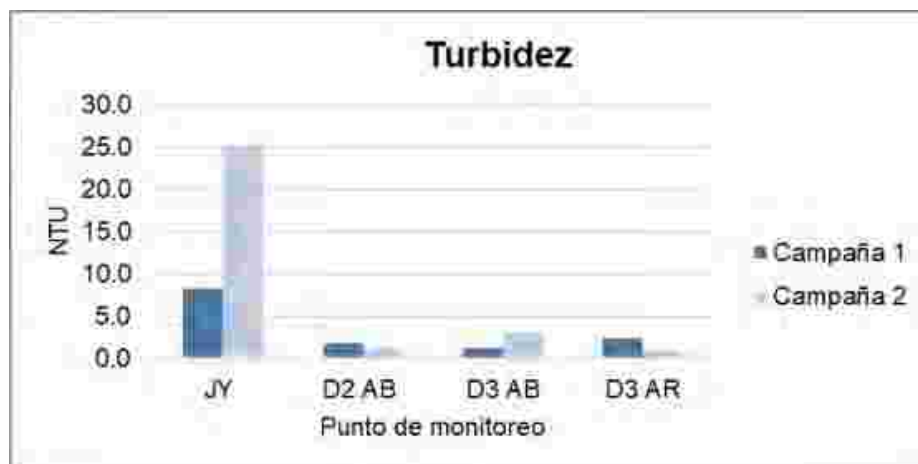


Figura 5.115 Resultados de turbiedad
Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

C. Grasas y Aceites

Las grasas y aceites son compuestos orgánicos que se encuentran comúnmente en los cuerpos de agua como resultado de actividades humanas, como el vertido de aguas residuales industriales, domésticas y de actividades agrícolas. Estos compuestos incluyen lípidos, aceites vegetales, animales y sus derivados, que tienen la capacidad de formar una capa superficial sobre el agua, afectando negativamente la calidad del ecosistema acuático.

La medición de grasas y aceites en las fuentes hídricas es crucial, ya que su presencia puede indicar una contaminación significativa, alterando parámetros como la oxigenación del agua, la biodiversidad acuática y la capacidad de los organismos para desenvolverse en el medio. Además, la acumulación de estos compuestos puede interferir con los procesos naturales de filtración y el equilibrio biológico del cuerpo de agua. Monitorear las concentraciones de grasas y aceites es esencial para garantizar la salud de los ecosistemas acuáticos y el cumplimiento de los estándares de calidad del agua.

Las concentraciones de grasas y aceites en todos los puntos monitoreados sobre ambas campañas estuvieron por debajo del límite de cuantificación del método utilizado, que fue de 0,5 mg/L. Durante el muestreo, también se observó que no se formaron películas visibles de grasas y aceites en los puntos analizados, lo que indica la ausencia de una acumulación significativa de estos compuestos en el agua de los cuerpos monitoreados.

D. Fenoles

Los fenoles son compuestos orgánicos derivados de productos químicos como los derivados del petróleo, pesticidas y procesos industriales, que pueden ingresar a los cuerpos de agua a través de descargas de aguas residuales o actividades antropogénicas. En el contexto del monitoreo de aguas superficiales, la presencia de fenoles sugiere un aspecto relevante, ya que incluso en bajas concentraciones pueden ser tóxicos para la fauna acuática y afectar la calidad del agua⁹⁸.

⁹⁸ (IDEAM, 2015)

Estos compuestos tienen la capacidad de interferir con el equilibrio biológico del ecosistema acuático, alterando la salud de los organismos y comprometiendo el uso del agua para múltiples usos.

Los resultados obtenidos en todos los puntos de monitoreo sobre ambas jornadas estuvieron por debajo del límite de detección del método utilizado (0,15 mg/l), lo que indica que los cuerpos de agua en la zona de estudio no están siendo impactados por niveles de fenoles que puedan comprometer su calidad o representar un riesgo para los ecosistemas acuáticos.

E. Fósforo Total

El fósforo total representa la cantidad total de fósforo presente en el agua, tanto en su forma inorgánica como orgánica. Este elemento es esencial para el crecimiento de plantas y organismos acuáticos, ya que es un nutriente fundamental en los ecosistemas acuáticos⁹⁹. Sin embargo, cuando se encuentra en concentraciones elevadas, puede generar problemas como la eutrofización, un proceso en el que el exceso de nutrientes provoca un crecimiento desmesurado de algas, lo que reduce la calidad del agua y afecta negativamente la fauna acuática.

El fósforo puede ingresar a los cuerpos de agua a través de fuentes naturales como la descomposición de materia orgánica o, más comúnmente, por actividades humanas, como el uso excesivo de fertilizantes agrícolas, vertimientos industriales o aguas residuales. Por esta razón, su monitoreo se considera crucial para detectar posibles fuentes de contaminación y evaluar el riesgo de eutrofización, lo que permite tomar medidas preventivas para proteger la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos.

De acuerdo con los resultados obtenidos entre 2025 y 2025 para fósforo total en los puntos de monitoreo se tuvieron concentraciones menores al límite de cuantificación del método (<1,0 mg/L) indicando que las fuentes de agua no tienen un nivel de contaminación considerable por compuestos de fósforo.

F. Nitrógeno Total Kjeldahl

El nitrógeno total Kjeldahl (NTK) es un parámetro que mide la concentración total de nitrógeno orgánico e inorgánico presente en el agua, incluyendo tanto las formas de amoníaco como los compuestos orgánicos que contienen nitrógeno. El análisis de este tipo de nitrógeno es fundamental porque el nitrógeno es un nutriente esencial para los organismos acuáticos, pero en concentraciones excesivas puede contribuir a procesos de eutrofización, donde el crecimiento descontrolado de algas afecta la calidad del agua y reduce la oxigenación, afectando negativamente a la fauna acuática.

El nitrógeno total Kjeldahl se utiliza principalmente para evaluar la carga de nutrientes en los cuerpos de agua, ya que muchas fuentes de contaminación aportan grandes cantidades de nitrógeno en sus distintas formas. Por lo tanto, su determinación en el agua es crucial para la evaluación de la calidad del agua.

Según los resultados de laboratorio los valores en todos los puntos para ambas campañas fueron menores al límite de cuantificación del método (5,0 mg/L), esto valores indican que

⁹⁹ (United Nations Environment Programme – UNEP, 2005)

no se presentan una contaminación considerable por este nutriente en los cuerpos de agua analizados¹⁰⁰.

G. Metales Pesados

En la actualidad, la creciente preocupación a nivel global por el aumento significativo de la contaminación de efluentes industriales se debe principalmente a la presencia de metales pesados, como cromo, níquel, cadmio, plomo y mercurio. Estas sustancias químicas tienen la capacidad de persistir en el medio ambiente durante largos períodos, lo que amenaza tanto la biodiversidad de los ecosistemas como la salud humana. Su acumulación en el suelo, agua y organismos vivos puede alterar el equilibrio de la fauna y la flora locales y, al ingresar a la cadena trófica, afectar directamente a las poblaciones humanas cercanas¹⁰¹.

Por otro lado, durante la primera campaña se observó que metales como el arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plata, plomo y selenio presentaron concentraciones por debajo de los límites de cuantificación establecidos para cada método de medición para los cuatro puntos de muestreo evaluados. Sin embargo, el Bario, Cinc y el Cobre mostraron valores superiores a los límites de cuantificación con valores máximos de 0,024 mg/L de Ba y 0,033 mg/L de Zn para D2 AB y 7 0,01 mg/L de Cu para JY (Figura 5.116).

De forma similar, en la segunda campaña, los metales que reportaron concentraciones por encima del límite de detección fueron el Bario, Cinc y el Cromo con registros máximos de 0,023mg/l de Ba (D3 AB), 0,02 mg/l de Zn (D2 AB) y 0,009 mg/l de Cr (D3 AB) respectivamente.

En cuanto a la presencia de Arsénico en el agua, los distintos puntos monitoreados en ambas campañas reportan valores por debajo del límite de cuantificación correspondiente a 0,001 mg/L.

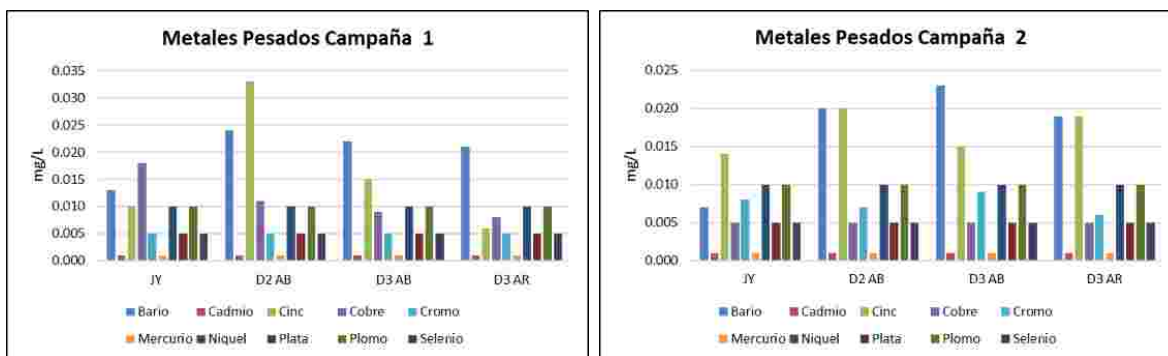


Figura 5.116 Variación de metales

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

H. Alcalinidad

La alcalinidad del agua, también conocida como su capacidad buffer, se refiere a la habilidad del agua para resistir cambios en su pH, lo cual es fundamental para el mantenimiento de procesos biológicos y la productividad de los ecosistemas acuáticos. Este

¹⁰⁰ (Ayora, 2010)

¹⁰¹ (Castro, 2021)

parámetro está principalmente influenciado por la presencia de carbonatos y bicarbonatos disueltos, compuestos que se encuentran comúnmente en aguas subterráneas. La alcalinidad de un cuerpo de agua depende de varios factores, incluyendo las características geológicas del área, como el tipo de rocas y su interacción con el agua¹⁰².

En los resultados obtenidos durante el monitoreo de alcalinidad, se observó que los valores fluctuaron entre concentraciones inferiores a 20,0 mg/L en el punto JY y hasta 44,00 mg/L en los puntos D2 AB y D3 AR (Segunda campaña), como se detalla en la Figura 5.117. Estos valores indican que las aguas de la zona presentan una alcalinidad moderada, lo que sugiere una capacidad razonable para mantener la estabilidad en los procesos biológicos dentro de los cuerpos de agua monitoreados.



Figura 5.117 Variación de la alcalinidad

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

I. Color Real

El monitoreo del color real en cuerpos de agua permite evaluar la presencia de compuestos disueltos como materia orgánica, metales pesados, y otros contaminantes que afectan la transparencia y el ecosistema acuático. El color real del agua es influenciado por diversas fuentes, como la descomposición de materia orgánica, la presencia de metales en suspensión, o incluso la actividad humana en las cercanías de fuentes hídricas.

Tal como se muestra en la Figura 5.118 para las fuentes monitoreadas se encontraron registros de color por encima del límite de detección únicamente para las longitudes de onda de 436 y 525 nm. Siendo los mayores resultados los obtenidos para JY con 4,60 m⁻¹ y 1,10 m⁻¹ en 436 y 525 nm respectivamente.

En contraste, se aprecia que la evaluación del color real en la segunda campaña presenta una disminución sobre todas longitudes de onda para el punto JY, mientras que para el punto D2 AB se presentaron leves incrementos que rondan los 0,3 nm para todas las longitudes de onda consideradas. Los otros puntos de análisis permanecieron constantes o con registros muy similares a la campaña inicial.

¹⁰² (Roldán, 1992)

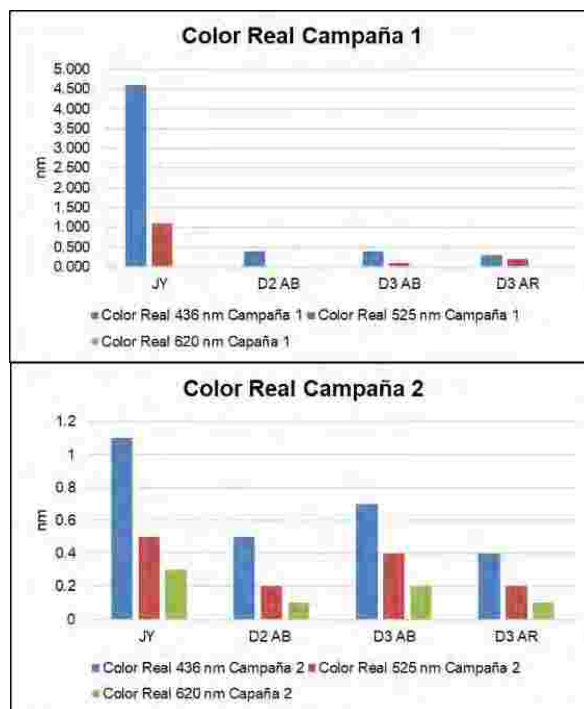


Figura 5.118 Variación del color real

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

J. Coliformes Totales y Fecales

El monitoreo de coliformes totales y fecales en el agua es crucial para evaluar su calidad y garantizar la salud pública. Estos microorganismos, aunque no son patógenos directos, sirven como indicadores de la presencia de agentes patógenos que pueden causar enfermedades transmitidas por el agua, como diarreas, infecciones gastrointestinales y enfermedades respiratorias.

La presencia de coliformes fecales en particular, que provienen de heces animales o humanas, sugiere una contaminación reciente del agua y un riesgo potencial de transmisión de enfermedades infecciosas. El seguimiento regular de estos indicadores permite detectar rápidamente problemas de contaminación relacionados con posibles vertimientos de agua residual¹⁰³.

En cuanto al comportamiento de los puntos monitoreados, las concentraciones de coliformes totales y fecales variaron significativamente entre los puntos de muestreo para la primera campaña. Los valores más altos se presentaron en el punto JY, donde se detectaron concentraciones de 2.300 NMP/100 mL para coliformes totales y 780 NMP/100 mL en cuanto a coliformes fecales (Figura 5.119).

Por otro lado, los valores más bajos se observaron en el punto D2 AB, con concentraciones de 68,00 NMP/100 mL para coliformes totales y 12 NMP/100 mL para coliformes fecales, lo que indica una menor carga de contaminación microbiana en comparación con otros puntos.

¹⁰³ (Larrea-Murrell, 2013)

En contraste, durante la segunda campaña de monitoreo los resultados reflejan una mayor concentración de patógenos (Fecales y totales) en el punto D2 AB con registros de 140.000 NMP/100ml y 79.000 NMP/100ml respectivamente.

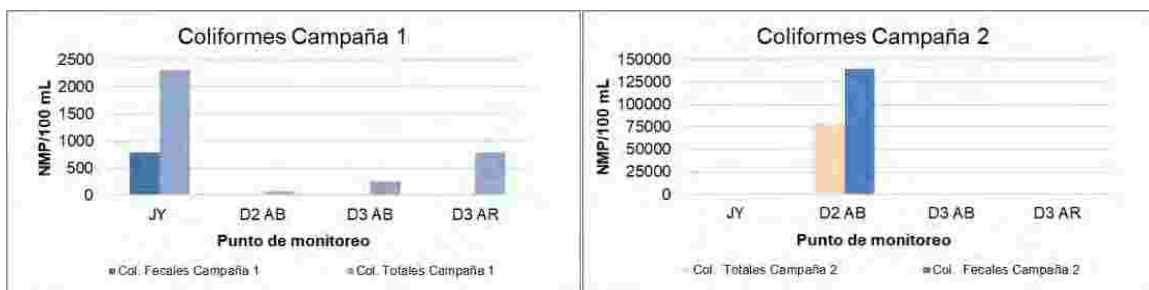


Figura 5.119 Variación de Coliformes
Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S., 2025.

5.1.6.1.6 Índice de calidad del agua – ICA

El Índice de Calidad del Agua (ICA) en corrientes superficiales corresponde a una expresión numérica agregada y simplificada, surgida de la sumatoria aritmética equiponderada de los valores que se obtienen al medir la concentración de cinco o seis variables fisicoquímicas básicas. Para este caso se desarrolló la metodología para 5 variables: Oxígeno Disuelto, Sólidos Suspendidos Totales, Demanda Química de Oxígeno, Conductividad y pH; la fórmula de cálculo se presenta a continuación (IDEAM, 2023).

$$ICA_{njt} = \sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt}$$

Donde ICA_{njt} es el Índice de Calidad del Agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t , evaluado con base en n variables; W_i es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i , el cual tiene un valor de 0.2 para todas las variables; I_{ikjt} es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j , registrado durante la medición realizada k , del período de tiempo t .

Las curvas funcionales o ecuaciones correspondientes adoptadas son las propuestas por Ramírez y Viña (1998)¹⁰⁴ para oxígeno disuelto (OD), sólidos suspendidos totales (SST), y conductividad eléctrica (CE), la propuesta por la Universidad Politécnica de Catalunya (2006) para demanda química de oxígeno (DQO), y la propuesta por el laboratorio del Departamento de Calidad Ambiental de Oregón (Estados Unidos)¹⁰⁵ para pH, mostradas a continuación.

Oxígeno Disuelto:

El subíndice del oxígeno disuelto I_{OD} se calcula con la fórmula.

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0,01 * PS_{OD})$$

¹⁰⁴ (Ramírez & Viña, 1998)

¹⁰⁵ (Department of Environmental Quality, 1994)

Cuando el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (PS_{OD}) es mayor al 100%, se calcula de la siguiente manera.

$$I_{OD} = 1 - (0,01 * PS_{OD} - 1)$$

Sólidos Suspendedos Totales:

$$I_{SST} = 1 - (-0,02 + 0,003 * SST)$$

Si $SST \leq 4.5$, entonces:

$$I_{SST} = 1$$

Si $SST \geq 320$, entonces:

$$I_{SST} = 0$$

Demanda Química de Oxígeno:

Si $DQO \leq 20$, entonces: $I_{DQO} = 0,91$

Si $20 < DQO \leq 25$, entonces: $I_{DQO} = 0,71$

Si $25 < DQO \leq 40$, entonces: $I_{DQO} = 0,51$

Si $40 < DQO \leq 80$, entonces: $I_{DQO} = 0,26$

Si $DQO > 80$, entonces: $I_{DQO} = 0,125$

Conductividad eléctrica:

$$I_{CE} = 1 - 10^{(-3,26 + 1,34 * \log_{10} CE)}$$

Cuando $CE < 0$, entonces: $I_{CE} = 0$

pH:

Si $pH < 4$, entonces: $I_{pH} = 0,1$

Si $4 < pH \leq 7$, entonces: $I_{pH} = 0,02628419e^{(pH * 0,520025)}$

Si $7 < pH \leq 8$, entonces: $I_{pH} = 1$

Si $8 < pH \leq 11$, entonces: $I_{pH} = 0,02628419e^{((pH - 8) * -0,5187742)}$

Si $pH > 11$, entonces: $I_{pH} = 0,1$

Los valores que puede llegar a tomar el indicador han sido clasificados en categorías. De acuerdo con ellos se califica la calidad del agua de las corrientes superficiales, a la cual se le ha asociado un color como señal de alerta. En la Tabla 5.119 se registra la relación entre valores y calificación.

Tabla 5.119 Calificación de la calidad del agua según los valores que tome el ICA

Descripción	Ámbito numérico	Color
Bueno	0,91 – 1	Blue
Aceptable	0,71 – 0,9	Green
Regular	0,51 – 0,7	Yellow
Malo	0,26 – 0,5	Orange
Muy malo	0 – 0,25	Red

Fuente: (IDEAM, 2023)¹⁰⁶.

En la Tabla 5.120 se presentan los resultados obtenidos del índice de calidad del agua (ICA). En la primera campaña, se observa que el punto denominado JY tiene una clasificación de "Aceptable", ya que su valor de ICA se encuentra en el rango de 0,7 - 0,9.

Por otro lado, los demás puntos de muestreo analizados se clasifican como "Buenos", ya que sus valores de ICA oscilan entre 0,91 y 1,0. Estos resultados indican que la calidad del agua en esos puntos es razonablemente buena y apta para múltiples usos.

En contraste, la evaluación del ICA para la segunda campaña la estación JY varía su clasificación hasta calidad "Regular" (0,64) y D3 AR hasta la categoría "Aceptable" (0,86).

Tabla 5.120 Resultados del Índice de Calidad del Agua – ICA 5 Variables

Punto	Campaña 1		Campaña 2	
	ICA- Valor	ICA - Descripción	ICA- Valor	ICA - Descripción
JY	0,79	Aceptable	0,64	Regular
D2_AB	0,92	Bueno	0,90	Bueno
D3_AB	0,90	Bueno	0,93	Bueno
D3_AR	0,92	Bueno	0,86	Aceptable

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

5.1.6.1.7 Índices de contaminación

Considerando la naturaleza de los impactos que se pueden generar por el proyecto, se escogieron cuatro de los índices disponibles para el análisis de la contaminación. A continuación, se describen las metodologías de cálculo y los resultados obtenidos.

5.1.6.1.8 Índice de contaminación por mineralización – ICOMI

Se expresa en numerosas variables; de ellas se eligieron: conductividad como reflejo de los sólidos disueltos, dureza por cuanto recoge los cationes calcio y magnesio y alcalinidad por que hace lo propio con los aniones carbonatos y bicarbonatos¹⁰⁷.

$$ICOMI = 1/3(I_{CONDUCTIVIDAD} + I_{DUREZA} + I_{ALCALINIDAD})$$

Donde $I_{CONDUCTIVIDAD}$, I_{DUREZA} e $I_{ALCALINIDAD}$ corresponden a los índices de cada una de las variables, los cuales se calculan de la siguiente manera.

Conductividad

- $\log_{10} I_{Conductividad} = -3,26 + 1,34 \log_{10} * Conductividad(\mu S/cm)$
- $I_{Conductividad} = 10^{\log I_{Conductividad}}$
- Conductividades mayores a 270 $\mu S/cm$, tienen un índice de conductividad = 1

Dureza

- $\log_{10} I_{Dureza} = -9,09 + 4,40 \log_{10} * Dureza(g/m^3)$
- $I_{Dureza} = 10^{\log I_{Dureza}}$
- Durezas mayores a 110 g/m^3 , tienen un índice de dureza = 1

¹⁰⁶ (IDEAM, 2023)

¹⁰⁷ (Ramírez & Viña, 1998)

- Durezas menores a 30 g/m³, tienen un índice de dureza = 0

Alcalinidad

- $I_{Alcalinidad} = -0,25 + 0,005 * Alcalinidad(g/m^3)$
- Alcalinidades mayores a 250 g/m³, tienen un índice de alcalinidad = 1
- Alcalinidades menores a 50 g/m³, tienen un índice de alcalinidad = 0

Los valores que puede llegar a tomar el indicador han sido clasificados en categorías, como se muestra en la Tabla 5.123, las cuales indican el estado de contaminación en el cuerpo de agua.

Tabla 5.121. Calificación de la contaminación según los valores que tomen los ICOMI

Descripción	Ámbito numérico	Color
Ninguna contaminación	0 – 0,2	Blue
Contaminación baja	0,2 – 0,4	Green
Contaminación media	0,4 – 0,6	Yellow
Contaminación alta	0,6 – 0,8	Orange
Contaminación muy alta	0,8 – 1	Red

Fuente: Ramírez y Villa¹⁰⁸

En la Tabla 5.122 se presentan los resultados del índice de contaminación por mineralización (ICOMI) para los puntos monitoreados. Donde se observa que no se presenta ningún grado de contaminación por mineralización para ninguno de los puntos analizados.

Tabla 5.122 Resultados del cálculo de índice ICOMI

Punto	Campaña 1		Campaña 2	
	ICOMI – Valor	ICOMI - Descripción	ICOMI – Valor	ICOMI - Descripción
JY	0,01	Ninguna contaminación	0,03	Ninguna contaminación
D2 AB	0,06	Ninguna contaminación	0,13	Ninguna contaminación
D3 AB	0,08	Ninguna contaminación	0,08	Ninguna contaminación
D3 AR	0,05	Ninguna contaminación	0,05	Ninguna contaminación

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

5.1.6.1.9 Índice de contaminación por materia orgánica – ICOMO

El índice ICOMO cuantifica la contaminación por materia orgánica presente en el agua a partir de variables como oxígeno, DBO, Coliformes Totales y Fecales, y el Porcentaje de Saturación de Oxígeno. Este índice se define en un rango de 0 a 1, en el cual los valores cercanos a cero indican baja contaminación por materia orgánica, y los valores cercanos a uno indican una alta contaminación por materia orgánica.

El índice ICOMO se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$ICOMO = \frac{1}{3} (I_{DBO} + I_{Coliformes\ Totales} + I_{Oxígeno\ \%})$$

¹⁰⁸ (Ramírez & Viña, 1998)

Donde I_{DBO} , $I_{Coliformes\ Totales}$ e $I_{Oxígeno\ \%}$, corresponde a los índices de cada una de las variables, los cuales se calculan de la siguiente manera.

Demanda Bioquímica de Oxígeno:

$$I_{DBO} = -0,05 + 0,70 \log_{10}[DBO]$$

Coliformes Totales:

$$I_{Coliformes\ Totales} = -1,44 + 0,56 \log_{10}[Coliformes\ Totales]$$

Oxígeno:

$$I_{Oxígeno} = 1 - 0,01 Oxígeno$$

Los valores que puede llegar a tomar el indicador han sido clasificados en categorías, como se muestra en la Tabla 5.123, las cuales indican el estado de contaminación en el cuerpo de agua.

Tabla 5.123. Calificación de la contaminación según los valores que tomen los ICO

Descripción	Ámbito numérico	Color
Ninguna contaminación	0 – 0,2	Blue
Contaminación baja	0,2 – 0,4	Green
Contaminación media	0,4 – 0,6	Yellow
Contaminación alta	0,6 – 0,8	Orange
Contaminación muy alta	0,8 – 1	Red

Fuente: (Jiménez & Vélez, 2006) ¹⁰⁹.

En la Tabla 5.124 se presentan los resultados del índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) para los puntos monitoreados. En este caso, se observa que en el punto JY variante Mutatá se registra una contaminación media por materia orgánica en la primera campaña, mientras que en los demás puntos muestreados se clasifica la contaminación como baja, lo que sugiere un menor impacto de la materia orgánica en estos últimos.

Este comportamiento se mantiene similar en la segunda campaña, excepto por la clasificación del punto D2 AB que pasa un nivel de contaminación media por materia organiza.

Tabla 5.124 Resultados del cálculo de índice ICOMO

Punto	Campaña 1		Campaña 2	
	ICOMO – Valor	ICOMO - Descripción	ICOMO – Valor	ICOMO - Descripción
JY	0,58	Media	0,44	Media
D2 AB	0,22	Baja	0,55	Media
D3 AB	0,22	Baja	0,22	Baja
D3 AR	0,28	Baja	0,22	Baja

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

5.1.6.1.10 Índice de contaminación por Sólidos Suspendidos – ICOSUS

¹⁰⁹ (Jiménez & Vélez, 2006)

Este índice trabaja con la concentración de sólidos suspendidos. Este índice se define en un rango de 0 a 1, en el cual los valores cercanos a cero indican baja contaminación por sólidos, y los valores cercanos a uno indican una alta contaminación, se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$ICOSUS = -0.02 + 0.003 * SST$$

Si $SST > 340 \text{ g/m}^3$, entonces: $ICOSUS = 1$

Si $SST < 10 \text{ g/m}^3$, entonces: $ICOSUS = 0$

Los valores que puede llegar a tomar el indicador se encuentran clasificados bajo las mismas categorías descritas en la Tabla 5.123.

En la Tabla 5.125 se presentan los resultados, los cuales indican que no se presenta ningún tipo de contaminación en los puntos evaluados debido a que la concentración de sólidos suspendidos medida en los diferentes puntos fue baja.

Tabla 5.125 Resultados del cálculo del índice ICOSUS

Punto	Campaña 1		Campaña 2	
	ICOSUS – Valor	ICOSUS - Descripción	ICOSUS – Valor	ICOSUS - Descripción
JY	0,01	Ninguna	0,15	Ninguna
D2 AB	0,01	Ninguna	0,01	Ninguna
D3 AB	0,01	Ninguna	0,01	Ninguna
D3 AR	0,01	Ninguna	0,01	Ninguna

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana S.A.S, 2025.

5.1.6.1.11 Índice de contaminación por potencial de hidrógeno – ICOpH

Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO₂ disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo.

$$ICOpH = \frac{e^{-31,08+3,45 \cdot pH}}{1 + e^{-31,08+3,45 \cdot pH}}$$

En la Tabla 5.126 se presenta el resultado del cálculo para el ICOpH, de acuerdo con los cual no se presenta contaminación por pH en ninguno de los puntos evaluados en ambas campañas.

Tabla 5.126 Resultados del cálculo del índice ICOpH

Punto	Campaña 1		Campaña 2	
	ICOpH – Valor	ICOpH - Descripción	ICOpH – Valor	ICOpH - Descripción
JY	0,001	Ninguna	0,000	Ninguna
D2 AB	0,001	Ninguna	0,005	Ninguna
D3 AB	0,001	Ninguna	0,001	Ninguna
D3 AR	0,001	Ninguna	0,001	Ninguna

Fuente: Alta Biotecnología Colombiana

5.1.6.2 Cuerpos de agua marino-costeros

La ubicación del proyecto Variante Mutatá no interfiere con cuerpos de agua marino-costeros, al estar localizado en el municipio de Mutatá departamento de Antioquia, el cual es zona continental.

5.1.7 Usos del agua

La identificación de los usos y usuarios en el desarrollo del EIA para la modificación de la licencia ambiental del proyecto vial "Construcción de la Variante Mutatá (UF4)", es un componente clave para determinar los impactos sobre los recursos hídricos y las comunidades que dependen de ellos. A través de este proceso, es posible desarrollar estrategias de manejo y mitigación en caso de que se presenten efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos y las actividades productivas de las comunidades locales.

Para ello, es importante tener en cuenta que las corrientes hídricas localizadas en la zona de influencia definida para el proyecto actualmente no han sido objeto de un proceso de reglamentación por uso o por vertimientos por parte de la autoridad ambiental. Únicamente el tramo adyacente al casco urbano del río Mutatá fue regulado según lo establecido en la Resolución 01502 de 2017, que define los objetivos de calidad para la cuenca de los ríos Sucio y Mutatá en los municipios de Cañasgordas, Uramita, Dabeiba y Mutatá. Acorde con esto y con los datos disponibles se presenta la relación de usuarios y la estimación de la demanda hídrica.

Dada la importancia de medir y evaluar de manera cuantitativa el estado y la presión sobre las fuentes de agua en la zona de interés, se realizó la estimación de los indicadores asociados al recurso hídrico, como el Índice de Uso de Agua (IUA) y el Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH), adoptando los caudales obtenidos en el apartado correspondiente a la oferta hídrica y los datos disponibles sobre la demanda hídrica para las cuencas de interés.

5.1.7.1 Identificación de fuentes hídricas

Considerando el alcance del proyecto en la presente etapa y su naturaleza, no se espera realizar captaciones de agua y ni descarga de vertimientos de aguas residual. Sin embargo, por su cercanía a algunos drenajes y fuentes superficiales representativas de la zona, se tuvieron en consideración todas cuencas que conforman los drenajes en influencia del polígono de la zona de influencia abiótica, biótica y social, correspondientes al Drenaje 1, Drenaje 2, Drenaje 3 y Río Mutatá.

Bajo esta delimitación, a continuación, se presentan los distintos usos actuales y proyectados, así como la estimación de la demanda hídrica para los usuarios localizados en dichas cuencas.

5.1.7.2 Usos actuales y proyectados

Para la definición de usos actuales y proyectados en la zona de interés debe recordarse que las fuentes de interés para la zona de influencia definida no se encuentran inmersas dentro un proceso de reglamentación que asigne las condiciones de calidad del agua necesarias para su utilización en algún fin en particular. Sin embargo, para el caso del río Mutatá se tomó en cuenta la información correspondiente a la definición de usos establecida

en la determinación de los objetivos de calidad para la cuenca de los ríos Sucio y Mutatá, conforme la resolución 01502 de 2007 emitida por la corporación CORPOURABA. De acuerdo a la cual, se distinguen dos clases de cuerpos de agua.

Clase I: Cuerpos de aguas que no admiten vertimientos

Clase II: Cuerpos de aguas que admiten vertimiento con algún tratamiento

Pertenecen a la clase I:

- Las cabeceras de las fuentes de agua
- Las aguas subterráneas
- Los cuerpos de agua de zonas costeras, utilizadas actualmente para recreación
- Un sector aguas arriba de las bocatomas para agua potable
- Aquellos que se declaren como especialmente protegidos de acuerdo con lo dispuesto por los artículos 70 y 137 del decreto ley 2811 de 1974.

Pertenecen a la clase II los demás cuerpos de agua no incluidos en la clase I.

En consecuencia, con esta normativa, para el tramo urbano del río Mutatá se establecen los usos del agua mostrados en la Tabla 5.127 para el tramo del río Mutatá adyacente a la zona urbana y los objetivos de calidad presentados en la Tabla 5.128.

Tabla 5.127 Usos del agua – Río Mutatá Tramo Urbano

Tramo	Uso	Real	Potencial
Río Mutatá Tramo Urbano	Doméstico		
	Contacto Primario	x	x
	Contacto secundario	x	x
	Transporte fluvial		
	Recreativo	Predominante	Predominante
	Preservación y reproducción d flora y fauna	x	x
	Pesca artesanal, deportiva e industrial	x	x
	Riego		
	Agroindustrial		
	Paisajístico	x	x
	Transporte de aguas residuales		

Fuente: CORPOURABA, 2007.

Tabla 5.128 Objetivos de calidad tramo urbano Río Mutatá

Parámetro	Unidad	Objetivos de Calidad
Oxígeno disuelto	mg/L	≥7,00
DBO5	mg/L	≤2,00
SST	mg/L	10
pH	Unidades de pH	5,0 - 9,0
T	°C	±5
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	≤200

Fuente: CORPOURABA, 2007

5.1.7.3 Usuarios actuales y proyectados

La identificación de usuarios en la zona de interés se llevó a cabo mediante los registros suministrados por la corporación ambiental en el año 2024, correspondientes a las

concesiones y los permisos de vertimiento vigentes y otorgados en las fuentes superficiales ubicadas en los polígonos de influencia para el componente físico-biótico y social.

A continuación, en [Figura 5.120](#) se muestran los usuarios identificados en las zonas de interés para el proyecto.



Figura 5.120 Usuarios del recurso hídrico presentes en la zona de interés
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

De acuerdo con de la región que comprende las cuencas de interés, se identifican cinco (5) usuarios con concesiones vigentes. En la Tabla 5.129 se presenta la relación de los usuarios con concesiones vigentes sobre la zona de influencia.

Tabla 5.129 Usuarios del recurso hídrico en la zona de influencia – Concesiones superficiales

Usuario	Fuente	Municipio	X [m]	Y [m]	Uso	Caudal [L/s]
Aguas de Urabá SA ESP	Quebrada sabaletas	Mutatá	4620947,38	2360422,85	Doméstico	20,00

Usuario	Fuente	Municipio	X [m]	Y [m]	Uso	Caudal [L/s]
Consorcio Vial 2012	Rio Mutatá	Mutatá	4620280,82	2359179,40	Industrial	6,00
Jaime de Jesús Ballesteros Loaiza	Rio Mutatá	Mutatá	4620912,76	2357058,96	Pecuario	2,70
Jaime De Jesús Ballesteros Loaiza	Rio Mutatá	Mutatá	4620912,76	2357058,96	Piscícola	2,70
Aguas De Urabá SA ESP	Rio Mutatá	Mutatá	4621270,36	2357240,77	Doméstico	17,30

Fuente: CORPOURABA, 2024.

Teniendo en cuenta la información disponible, es posible identificar que el uso más representativo en la zona de influencia es el uso doméstico y el uso industrial.

En cuanto a los usuarios del recurso hídrico con permiso de vertimiento en la zona de influencia, se identifican tres (3) usuarios con permiso de vertimientos sobre el río sucio. En la Tabla 5.130 se presentan la información correspondiente al tipo de vertimiento y localización.

Tabla 5.130 Vertimientos puntuales identificados en la zona de influencia

Usuario	Tipo de Vertimiento	Fuente	Municipio	X [m]	Y [m]
Hacienda Mutatá (Peaje)	Residual Doméstico	Río Sucio	Mutatá	4620870,45	2357760,71
Finca Pirú	Residual Doméstico	Río Sucio	Mutatá	4619678,49	2358716,55
Predio Pirú 007- 47236	Residual Doméstico	Río Sucio	Mutatá	4619729,23	2358928,35

Fuente: CORPOURABA, 2024.

5.1.7.4 Demanda hídrica real y potencial

De acuerdo con el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), la demanda hídrica se define como la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de los diferentes usos en un determinado territorio o cuenca hidrográfica. Esto incluye las necesidades de agua para consumo humano, agrícola, industrial, así como las necesidades ecológicas para el mantenimiento de los ecosistemas acuáticos.

La estimación de la demanda es esencial para la asignación eficiente del recurso, previniendo su sobreexplotación y garantizando su disponibilidad en situaciones de escasez. Además, la estimación precisa de la demanda hídrica es clave para la formulación de políticas públicas, la implementación de estrategias de manejo integrado del agua y la protección de los ecosistemas acuáticos.

En el contexto del proyecto, la estimación de la demanda hídrica pretende la identificar la utilización del recurso hídrico en las áreas definidas como zona de influencia y que podrían verse afectadas por su desarrollo. Para esto se utilizaron los caudales correspondientes a las concesiones de agua superficial otorgadas en cada una de las fuentes superficiales.

5.1.7.4.1 Demanda hídrica real

De acuerdo con la información suministrada por CORPOURABA, a continuación, en Tabla 5.131 y la Tabla 5.132 se presenta la demanda hídrica total de la cuenca del río Mutatá por demandas (doméstico, pecuario, agrícola e industrial).

Tabla 5.131 Demandas hídricas sectoriales para la cuenca del río Mutatá

Sector	Demanda hídrica [l/s]	Demanda hídrica [%]
Doméstico	37,30	86,00
Industrial	6,00	14,00
Total	43,30	100,00

Fuente: CORPOURABA, 2024.

Tabla 5.132 Demandas hídricas sectoriales para la cuenca de la quebrada Daira

Sector	Demanda hídrica [l/s]	Demanda hídrica [%]
Doméstico	4,01	100%

Fuente: CORPOURABA, 2024.

De acuerdo con la información disponible sobre los usuarios en las cuencas identificadas, la cuenca del río Mutatá requiere de 43,30 l/s y la cuenca de la quebrada Daira requiere de 4,01 l/s de agua como mínimo para satisfacer las necesidades de los sectores mencionados, donde el que mayor participación tiene es el sector doméstico con el 86,00% de la demanda total para cuenca del río Mutatá y el 100% para la quebrada La Daira.

5.1.7.4.2 Demanda hídrica potencial

Según la información recopilada de las fuentes disponibles, no se cuenta con datos sobre concesiones proyectadas, ni existe información sobre concesiones en evaluación para aguas superficiales. Además, no se han solicitado concesiones de agua para la ejecución del proyecto. Por lo tanto, al momento de elaborar el presente documento, no se considera la demanda hídrica potencial en las cuencas analizadas.

5.1.7.4.3 Demanda hídrica total

Teniendo en cuenta que no se tienen registros para la demanda hídrica potencial en las UAH, y que el proyecto para su ejecución no requiere aprovechamiento de agua de las fuentes superficiales o subterráneas, la demanda hídrica total es igual a la real y por tanto la distribución de la demanda hídrica total corresponde con lo presentado en el apartado 5.1.7.4.1.

5.1.7.4.4 Demanda hídrica por vertimientos

La demanda hídrica asociada a vertimientos se relaciona con una reducción por la calidad del agua de las corrientes, correspondiente a una afectación del 25% sobre la oferta hídrica total disponible. Sin embargo, sobre las cuencas y drenajes de interés para la zona de influencia no se identifican usuarios que realicen vertimientos. En este caso los usuarios que realizan vertimientos descargan directamente sobre el río Sucio.

5.1.7.5 Indicadores del recurso hídrico

Para explicar el estado en cuanto a la disponibilidad del agua en el área de influencia del proyecto, se estimaron los índices de Uso del Agua – IUA y el Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento- IVH. Con esto se pretende evaluar la disponibilidad y la presión sobre las fuentes de agua en la zona de influencia, así como identificar riesgos potenciales relacionados con su escasez.

5.1.7.5.1 Índice de Uso del Agua – IUA

El IUA permite determinar la cantidad de agua que utilizan los diferentes sectores en un periodo de tiempo y una unidad espacial específicos, frente a la oferta hídrica disponible neta a la misma escala. De esta manera se establece la presión que ejerce la demanda sobre la oferta disponible. Para calcular el IUA se utiliza la siguiente ecuación, donde D_h es la demanda hídrica total y O_h es la oferta hídrica superficial disponible. Los valores del índice se clasifican según lo descrito en la Tabla 5.133.

$$IUA = \frac{D_h}{O_h} * 100$$

Tabla 5.133 Clasificación para los valores del Índice de Uso de Agua

Rango	Categoría	Descripción
0,00 – 1,00	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta
1,00 – 10,00	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta
10,01 – 20,00	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta
20,01 – 50,00	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta
50,01 – 100,00	Muy alto	La presión demanda es muy alta con respecto a la oferta
> 100,0	Crítico	La presión de la demanda es más alta que la oferta

Fuente: (IDEAM, 2010)¹¹⁰

Según el Estudio Nacional del Agua (ENA) 2010, se define como la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores de usuarios en un periodo determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales. Esta información da cuenta de la demanda que tienen las actividades productivas y la demanda por uso doméstico en la cuenca. Para este caso específico se presentan los datos del índice del uso del agua (IUA) para las cuencas Río Mutatá y Drenaje 2 - Quebrada Daira, dentro de las cuales se encuentran las microcuencas de interés del proyecto como se muestra en la Tabla 5.134.

Tabla 5.134 Índice y categoría del Uso del Agua

Cuenca	IUA [%]	IUA Categoría
Río Mutatá	0,29	Muy Bajo
Drenaje 2 - Quebrada Daira	5,90	Bajo

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.7.5.2 Índice de Vulnerabilidad Hídrica por desabastecimiento

¹¹⁰ (IDEAM, 2010)

El IVH mide el grado de fragilidad del sistema ante eventos que puedan amenazar su capacidad para mantener la oferta hídrica. Se determina a partir de una matriz de decisión entre la relación de rangos de los resultados del IRH y el IUA, mostrada en la Tabla 5.135.

Tabla 5.135 Matriz de relación entre IUA e IRH para la estimación del IVH

Índice de Uso del Agua (IUA)		Índice de Regulación Hídrica (IRH)			
Rango	Categoría	Alta	Moderado	Baja	Muy Baja
<1	Muy bajo	Muy Baja	Baja	Media	Media
1-10	Bajo	Baja	Baja	Media	Media
10-20	Moderado	Media	Media	Alta	Alta
20-50	Alto	Media	Alta	Alta	Muy Alta
50-100	Muy Alto	Media	Alta	Alta	Muy Alta
>100	Critico	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: (IDEAM, 2010)¹¹¹

Haciendo uso de los valores de IRH reportados en el apartado 5.1.5.7.3 y de los resultados del IUA indicados en la Tabla 5.136 se estimó el Índice de Vulnerabilidad Hídrica para las UAH del proyecto.

Tabla 5.136 Índice de Vulnerabilidad Hídrica para las microcuencas de interés

Cuenca	IVH
Mutatá	Muy Bajo
Drenaje 2 - Quebrada Daira	Bajo

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S, 2025

De acuerdo con los resultados obtenidos para la cuenca del río Mutatá se obtuvo un IUA muy bajo y un IRH Alto, lo cual define que la vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento es muy baja, según la clasificación establecida por el IDEAM. Para el IVH determinado en la cuenca del Drenaje 2 correspondiente a la quebrada Daira se obtuvo que la vulnerabilidad al desabastecimiento es Baja según la misma regla de decisión.

5.1.7.6 Conflictos sobre la disponibilidad

De forma general, se tiene que, aunque en la zona de estudio el uso de agua es bajo (según los datos disponibles no existe una sobreexplotación del recurso), el alto riesgo hídrico no necesariamente genera una vulnerabilidad alta, dado que se podría estar manejando adecuadamente el recurso disponible. Con lo cual, la región aún no enfrenta una presión crítica que ponga en peligro el abastecimiento y que pueda generar conflictos.

Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que para el desarrollo del proyecto no se espera solicitar concesiones para el aprovechamiento de agua superficial.

5.1.8 Hidrogeología

El objetivo de la caracterización hidrogeológica es definir el potencial de las rocas y sedimentos para almacenar y transmitir agua subterránea, la productividad de los acuíferos, su geometría y la extensión, la calidad del agua; la recarga, tránsito y descarga, y describir el funcionamiento del sistema hidrogeológico, para valorar la posible afectación del recurso hídrico subterráneo frente a las actividades que se deriven de la ejecución del proyecto.

¹¹¹ (IDEAM, 2010)

La elaboración de este informe incluye la recopilación, análisis y validación de información existente y levantamiento de información en campo, que contempla el inventario de puntos de agua subterránea, siempre y cuando dichos puntos se encuentren localizados dentro del área de influencia del proyecto.

Para la elaboración de la cartografía hidrogeológica y caracterización de las unidades, se siguen los lineamientos propuestos en los estándares internacionales, adoptando la nomenclatura de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos – IAH (Leyenda internacional de los Mapas Hidrogeológicos¹¹², que se basa en la asignación de categorías hidrogeológicas de acuerdo con el potencial de las rocas y sedimentos para almacenar y transmitir agua subterránea, en función de la composición, permeabilidad y capacidad específica de cada unidad geológica.

Para la caracterización hidrogeológica se presentan además los resultados de los recorridos de campo realizados en el área de influencia abiótica. Con base en esto y en la información disponible consultada y revisada, se definen las unidades hidrogeológicas locales para plantear el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), que corresponde a la determinación de la dinámica del agua subterránea en la zona, incluyendo el análisis de los parámetros fisicoquímicos tomados in situ. Este modelo es una aproximación inicial de las condiciones del agua subterránea en el área de interés, que puede ser refinado en la medida que se cuente con más información.

Vale la pena mencionar que un Modelo Hidrogeológico Conceptual se basa en una serie de hipótesis y asunciones que reducen el problema del flujo del agua subterránea y el dominio real del medio subterráneo a una versión simplificada de la realidad para representar de manera adecuada los mecanismos de recarga, almacenamiento, tránsito y descarga de agua subterránea.

Un Modelo Hidrogeológico Conceptual tiene en cuenta aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrogeoquímicos, hidrológicos, hidrogeológicos y climáticos. Estos modelos son dinámicos y a medida que se disponga de información nueva, este se debe reevaluar y ajustar. En la Figura 5.121 se puede observar un esquema adaptado de la teoría de círculos crecientes¹¹³ para el análisis hidrogeológico, en donde se menciona la importancia de saber que un modelo es dinámico y que a medida que se aumente el conocimiento este puede ser refinado o incluso cambiado.

¹¹² (Clarke, 1983)

¹¹³ (IDEAM, 2010)

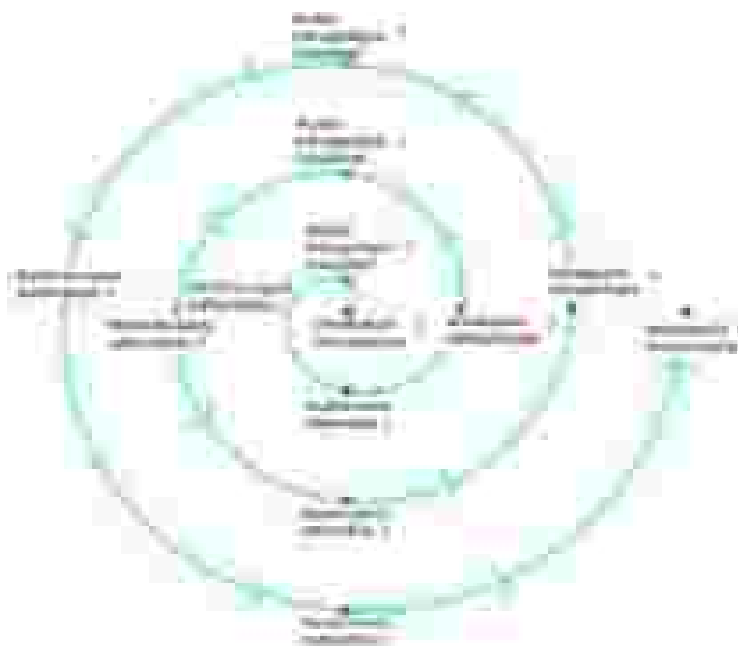


Figura 5.121 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas.

Fuente: adaptado de IDEAM¹¹⁴.

Este modelo es un esquema lógico, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, que trata de predecir el comportamiento del flujo del agua, determinar recursos explotables y prever posibles impactos ambientales sobre el sistema de aguas subterráneas. Su objetivo es ser una herramienta de diseño que represente el estado hidrogeológico de un área definida de una manera simplificada y que describa la posible distribución del agua subterránea incluyendo las zonas de recarga, almacenamiento, tránsito y descarga; éste tiene un valor predictivo muy útil al momento de manejar el recurso de agua subterránea y a medida que se disponga de nueva información de las investigaciones hidrogeológicas el modelo se irá refinando.

En la Figura 5.122 se presenta de manera esquemática la metodología de trabajo que se desarrollará de acuerdo con los términos de referencia, iniciando con la recopilación y revisión de información secundaria, además del reconocimiento del área, geoformas y pendientes observadas en campo. A partir de esto, se definen las unidades hidrogeológicas locales para plantear el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC).

¹¹⁴ Ibid.

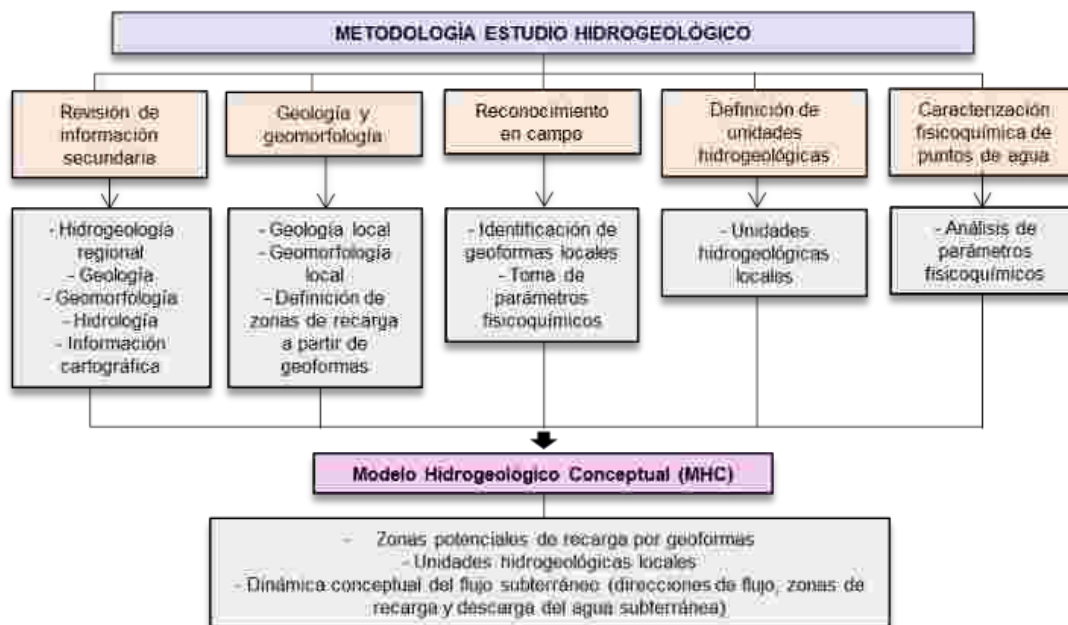


Figura 5.122 Metodología de trabajo para la caracterización hidrogeológica del área de estudio

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.8.1 Contexto hidrogeológico regional

A nivel nacional, la zonificación hidrogeológica se define con base en los conceptos de provincias hidrogeológicas y sistemas acuíferos. Las provincias hidrogeológicas corresponden a unidades mayores referidas a escalas menores, delimitadas con base en unidades tectonoestratigráficas; estas se encuentran separadas entre sí por rasgos estructurales regionales que coinciden con cuencas geológicas mayores, que desde el punto de vista hidrogeológico corresponden a barreras impermeables, representadas por fallas regionales y altos estructurales. Por otra parte, están los sistemas acuíferos, que pueden constituir una fuente de recursos de ámbito regional (OMM, 2012); son dominios espaciales, limitados en superficie y en profundidad, en los que existen uno o varios acuíferos relacionados o no entre sí, pero que sontrityen una unidad práctica para la investigación o la explotación (IGME, 1987). De esta manera, se definieron 16 Provincias Hidrogeológicas entre costeras, intramontanas y pericratónicas, en las cuales se han caracterizado 66 sistemas acuíferos, como se presenta en la Figura 5.123¹¹⁵. El área de influencia del proyecto se localiza en el área hidrográfica del Caribe, provincia hidrográfica de Urabá, zona hidrográfica Atrato-Daroén y subzona hidrográfica Río Sucio (ver Figura 5.122 y Figura 5.123).

¹¹⁵ (IDEAM, 2023)

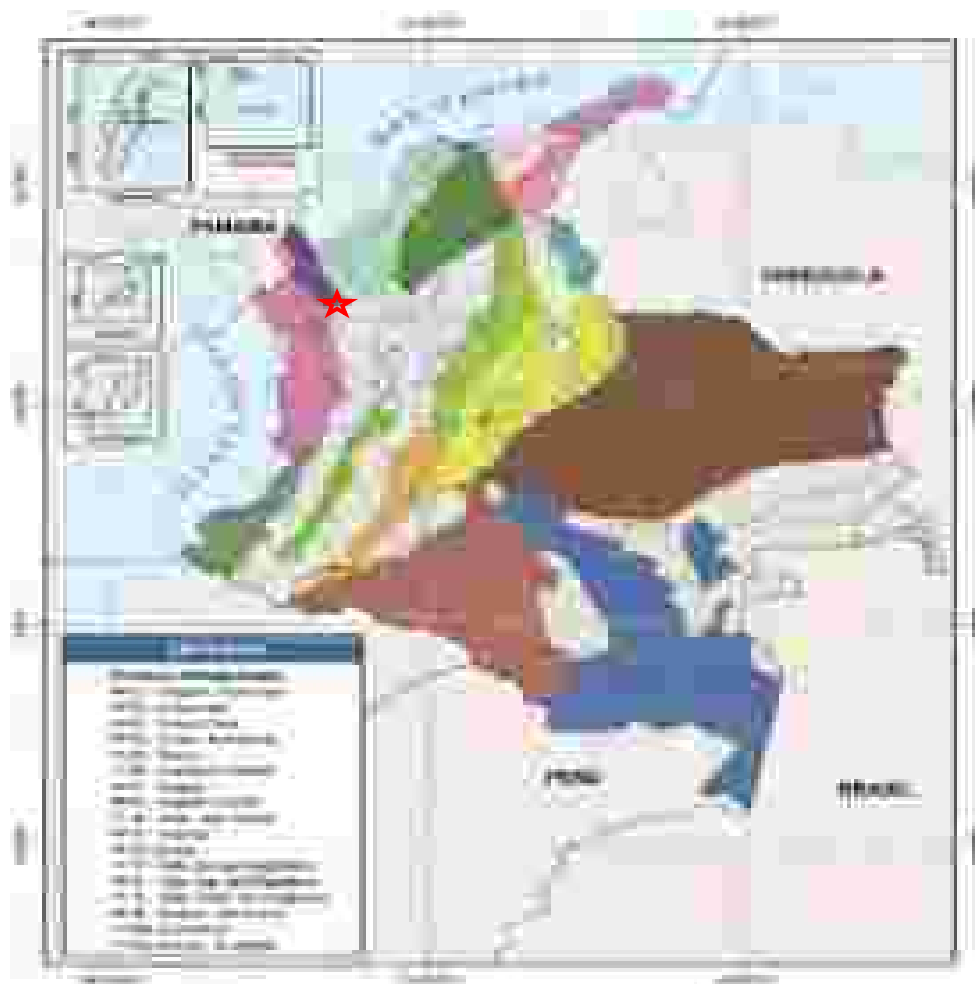


Figura 5.123 Provincias hidrogeológicas de Colombia
Fuente: IDEAM¹¹⁶

*La estrella roja señala la zona de interés

¹¹⁶ (IDEAM, 2023)



Figura 5.124 Mapa de los sistemas acuíferos de Colombia

Fuente: IDEAM¹¹⁷

*La estrella roja señala la zona de interés

En el Estudio Nacional del Agua 2022 se identificaron 67 sistemas acuíferos¹¹⁸. De manera detallada, el 36 % del área de influencia del proyecto se encuentra sobre la provincia del Urabá, como se observa en la [Figura 5.125](#).

¹¹⁷ Íbid., pg.178

¹¹⁸ Íbid., pg.175



Figura 5.125 Unidades hidrogeológicas a nivel regional (escala 1:500.000) en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, 2025.

La provincia del Urabá limita por el noroccidente con la frontera colombo-panameña; por el norte con el mar Caribe, en el Oriente está delimitada por el sistema de fallas de Uramita (UFS). Las rocas cretáceas de la cordillera Occidental la delimitan por el sur, y el Batolito de Mandé por el suroccidente. Al noroccidente está delimitada por la Serranía del Darién. La provincia de Urabá está hidrogeológicamente delimitada al noroccidente por rocas volcánicas de la Serranía del Darién; al norte tiene continuidad en la plataforma del mar Caribe, al oriente está delimitada por el sistema de fallas de Uramita; al suroriente por las rocas volcánicas cretáceas de la cordillera Occidental; y al suroccidente, por el Batolito de Mandé y la falla de Murindó (ver Figura 5.126)¹¹⁹.

¹¹⁹ (IDEAM, 2010)

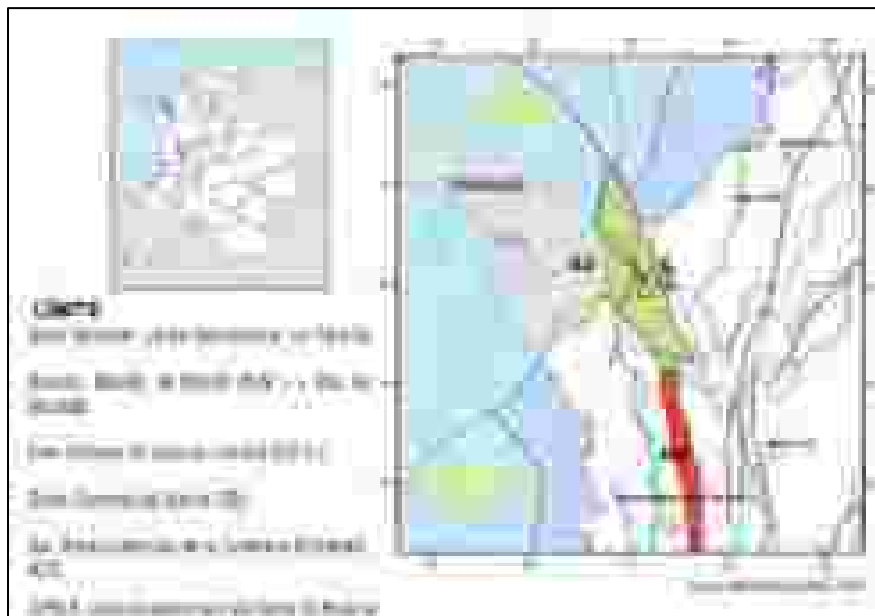


Figura 5.126 Ubicación de la provincia hidrogeológica de Urabá

Fuente: IDEAM, 2010

De acuerdo con las características hidrogeológicas en la zona de Urabá se distingue el tipo de unidad roca-sedimento:

5.1.8.1.1 Acuíferos en los cuales la porosidad primaria es intergranular

En este grupo se encuentran los sedimentos de la Llanura Aluvial Mutatá-Turbo y la unidad T2b. En los sedimentos de la Llanura Aluvial Mutatá se desarrollan acuíferos libres con extensión variable. La importancia hidrogeológica de estos acuíferos se ha clasificado como moderada¹²⁰.

5.1.8.1.2 Rocas granulares o fisuradas que forman acuíferos insignificantes con recursos limitados o sin recursos

Hacia el occidente de la cuenca se presentan rocas volcánicas terciarias de composición intermedia, básica y ultrabásica y rocas sedimentarias de ambiente marino que tienen porosidades primarias y secundarias bajas. Las unidades de carácter lutítico no incluidas en las categorías anteriores se comportan como acuícludos¹²¹.

A partir de las condiciones geológicas se llevó a cabo la caracterización hidrogeológica para el área de estudio, enfocada en la identificación de las unidades hidrogeológicas del sector, las zonas de recarga y descarga, y direcciones generales de flujo.

5.1.8.2 **Identificación de acuíferos**

El Mapa Hidrogeológico del área de influencia es el resultado de la caracterización de las Unidades Geológicas allí presentes según sus condiciones hidrogeológicas, referente a sus características litológicas y estructurales, al grado y tipo de porosidad y a la capacidad de

¹²⁰ (INERCO Consultoría Colombia, 2019)

¹²¹ Ibid., pg.213

almacenamiento de agua subterránea¹²², siendo estos factores que controlan la capacidad de almacenamiento y movimiento del agua subterránea, ejerciendo así el mayor control en la ocurrencia del recurso hídrico subterráneo¹²³, por lo que la geología es la base para la definición de las unidades hidrogeológicas.

Así, los depósitos presentes en la zona de clasificaron como acuíferos de porosidad primaria, debido a las condiciones hidrogeológicas favorables para el almacenamiento y tránsito de agua subterránea.

Como se detalla en el capítulo de geología del presente estudio, las unidades geológicas que pueden conformar sistemas de acuíferos en el área de influencia se describen brevemente a continuación:

5.1.8.2.1 Depósitos de Terraza (Qalt)

Corresponde a depósitos inconsolidados del Cuaternario de gran extensión que desarrollan varios niveles de depositación a partir del piedemonte, donde el más antiguo aparece sobre rocas de Formación Nutibara (K2cn) del Grupo Cañas Gordas de edad Cretácica. Estos depósitos están litológicamente constituidos desde limos hasta arenas de grano grueso a fino, gravas compuestas por fragmentos de rocas sedimentarias y volcánicas que pueden alcanzar tamaño hasta cantos y algunos bloques, desarrollando espesores hasta de 10 m, envueltos en una matriz areno limosa¹²⁴.

5.1.8.2.2 Depósitos aluviales recientes (Q2al)

Estos depósitos ocupan las llanuras de inundación de los cauces actuales, conformados por material no consolidado como bloques y gravas de rocas volcánicas básicas, plutónicas y sedimentarias en diferentes proporciones, embebidas en una matriz de tamaño arena, destacándose los que se encuentran a lo largo del Río Mutatá y el Río Sucio, con espesores que no sobrepasan los 10 m¹²⁵.

5.1.8.3 **Identificación y caracterización de las unidades hidrogeológicas**

La unidad hidrogeológica, definida como el conjunto de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico conviene considerar conjuntamente; se definió a partir de las características físicas y mecánicas de las rocas y el suelo, independiente de su génesis, por lo cual, la distribución espacial de estas unidades puede diferir de la distribución espacial de las unidades lito-estratigráficas. A partir de la información geológica, se presenta a continuación la información de unidades hidrogeológicas.

La definición de las unidades hidrogeológicas locales, en el sector de interés, es el resultado de la diferenciación de las unidades geológicas de acuerdo con sus condiciones hidrogeológicas, soportada en sus características litológicas, estructurales y potencialidad en cuanto al almacenamiento de agua subterránea y capacidad de permitir el flujo. Geológicamente el área de estudio está definida por unidades del Cuaternario.

¹²² (AHG GROUP, 2023)

¹²³ (Fetter, 1988)

¹²⁴ (AHG GROUP, 2023)

¹²⁵ Ibid., p.53

Para la caracterización de las unidades hidrogeológicas y la elaboración de la cartografía hidrogeológica, se realizó una clasificación de las unidades geológicas según su comportamiento hidrogeológico (definición de Acuíferos, Acuicludos, Acuitardos o Acuífugos), para esto se siguieron los lineamientos propuestos en los estándares internacionales, siguiendo la nomenclatura de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH)¹²⁶ adoptada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el “Atlas de aguas subterráneas de Colombia. Mapa de unidades hidrogeológicas. Plancha 5-04”; esta se basa en la asignación de categorías hidrogeológicas según la cobertura de los acuíferos, si son regionales o locales, el potencial de rocas y/o sedimentos para almacenar y transmitir agua subterránea en función de la composición, edad, permeabilidad y capacidad específica de cada unidad litológica evaluada (Tabla 5.137).

Tabla 5.137 Clasificación General para la definición de unidades hidrogeológicas

Tonalidad	Unidad hidrogeológica	Características
A. SEDIMENTOS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR		
A4	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional y local, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial. Acuíferos de tipos libres a semiconfinados, que localmente pueden ser confinados, con aguas recomendables para cualquier uso	Acuíferos de muy alta productividad, capacidad específica promedio mayor de 5,0 l/s/m
A3	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional, depositados en ambiente fluvial, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados que desarrollan acuíferos de tipos libres a semiconfinados y por rocas terciarias poco consolidadas con acuíferos confinados. Aguas recomendables para cualquier uso.	Acuíferos de alta productividad, capacidad específica entre 2,0 y 5,0 l/s/m
A2	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial y coluvial. Acuíferos libres y localmente confinados con aguas recomendables para cualquier uso.	Acuíferos de mediana productividad, capacidad específica entre 1,0 y 2,0 l/s/m
A1	Sistemas acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial y litoral, generalmente de tipo libre y por rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente marino, que desarrollan acuíferos de tipo confinados. Almacenan aguas que requieren tratamientos previos para algunos usos.	Acuíferos de baja productividad, capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/s/m
B. ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE A TRAVÉS DE FRACTURAS (ROCAS FRACTURADAS Y/O CARSTIFICADAS)		
B2	Sistemas acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por rocas sedimentarias carbonatadas cretácicas, consolidadas, de ambiente marino. Acuíferos generalmente confinados con aguas recomendables para cualquier uso.	Acuíferos de muy alta productividad, capacidad específica promedio mayor de 5,0 l/s/m
B1	Sistemas acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por rocas sedimentarias terciarias a	Acuíferos de baja productividad,

¹²⁶ (Struckmeier & Margat, 1995)

Tonalidad	Unidad hidrogeológica	Características
	cretácicas, consolidadas de ambiente continental y marino. Acuíferos generalmente de tipo confinado con aguas que requieren tratamientos previos para algunos usos.	capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/s/m
C. SEDIMENTOS Y ROCAS CON LIMITADO A NINGÚN RECURSO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.		
C2	Complejo de sedimentos constituidos por depósitos cuaternarios no consolidados de ambiente lacustre, deltaicos y marinos, que en las regiones costeras almacenan agua salada y por rocas sedimentarias terciarias a paleozoicas poco consolidadas de origen marino y continental.	Capacidad específica promedio < de 0,005 l/s/m condiciones que pueden ser variables en las regiones costeras
C1	Complejo de rocas ígneo-metamórficas muy compactas y en ocasiones fracturadas, de edades cretácicas a precámbricas	Capacidad específica promedio Menor de 0,05 l/s/m

Fuente: (INGEOMINAS, 2000)¹²⁷

A partir de lo anterior, en la zona de estudio se puede diferenciar una unidad hidrogeológica: UHG1 – Sedimentos con flujo esencialmente intergranular, conformado por depósitos aluviales recientes y de terrazas (tonalidad A3) como se observa en la Tabla 5.138. La distribución espacial de esta unidad hidrogeológica local se presenta en la [Figura 5.127](#), y se describe a continuación.

¹²⁷ (INGEOMINAS, 2000)

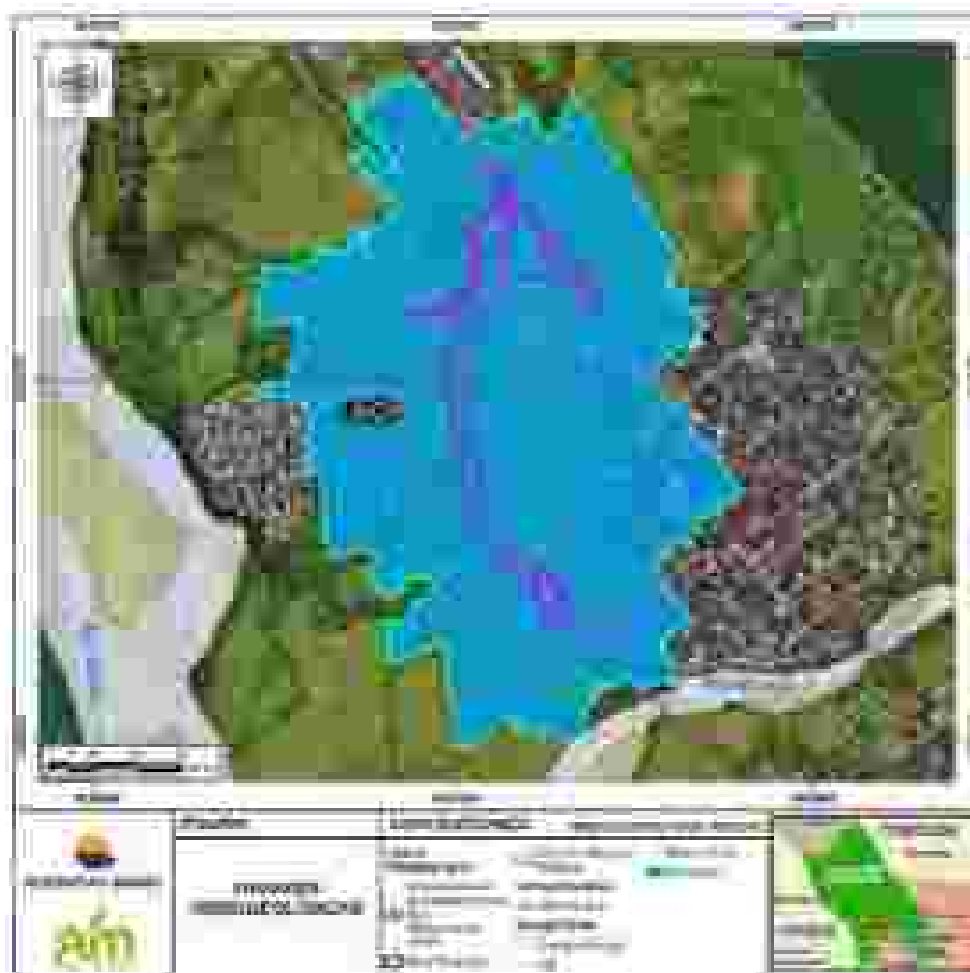


Figura 5.127 Mapa de unidades hidrogeológicas del área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025.

5.1.8.3.1 UHG1 – Sedimentos con porosidad primaria (flujo intergranular) (A3)

Como se menciona anteriormente, el trazado del proyecto se localiza en un depósito de terraza y aluviales no consolidado, y se comporta como un acuífero libre. En los depósitos la profundidad del nivel freático está controlada por la presión atmosférica, la topografía y períodos de lluvia o sequía durante el año.

Esta unidad se encuentra compuesta por depósitos aluviales recientes y de terraza, que se caracterizan por su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua, definiéndola como un acuífero libre. Su principal característica es que está conformada por fragmentos de roca depositados por procesos de sedimentación, lo que resulta en una estructura poco consolidada. Esta composición genera espacios significativos entre los fragmentos, incrementando la porosidad y, por ende, su potencial acuífero.

Tabla 5.138 Unidad hidrogeológica en el área de influencia

Tonalidad	Unidad hidrogeológica	Características
A. SEDIMENTOS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR		
A3	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional, depositados en ambiente fluvial, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados que desarrollan acuíferos de tipos libres a semiconfinados y por rocas terciarias poco consolidadas con acuíferos confinados. Aguas recomendables para cualquier uso.	Acuíferos de alta productividad, capacidad específica entre 2,0 y 5,0 l/s/m

Fuente: (INGEOMINAS, 2000)¹²⁸

5.1.8.4 Inventario de puntos de agua subterránea

Es ideal realizar el inventario de puntos de agua para analizar el agua subterránea de una región específica, donde se caracteriza el tipo de acceso que se tiene desde la superficie hasta el agua dependiendo de la forma para llegar a esta, ya sea a través de manantiales, nacimientos, perforaciones, aljibes o pozos.

En el interior del área de influencia del estudio no se encontraron manantiales, nacimientos, perforaciones, aljibes o pozos para el registro de las características del agua subterránea. Se consultaron también otras fuentes de información secundaria como la Corporación Autónoma Regional CORPOURABÁ, sin obtener datos relacionados. Adicionalmente, se consultó el portal del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) a través del Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH); sin embargo, no fue posible acceder a la información requerida.

5.1.8.5 Identificación de zonas de recarga

La recarga de acuíferos es la cantidad de agua que entra en la zona saturada y que comienza a formar parte de las reservas subterráneas. La recarga de estos acuíferos se produce por precipitación e infiltración de las aguas lluvias y las aguas de escorrentía, con lo cual se alimentan los niveles inferiores. La descarga artificial la conforman los aljibes y pozos, y la descarga natural la conforman los manantiales y los caños del área. Se debe tener en cuenta que el sistema hidrogeológico de los depósitos se extiende por varios kilómetros, lo cual supera en extensión y límites el área correspondiente a las microcuencas dentro del área del proyecto.

La representación esquemática de las zonas de recarga y descarga del agua subterránea se puede entender a partir de la representación de los sistemas de flujo (Figura 5.128). En el esquema se identifican sistemas de flujos locales en los cuales el área de recarga y descarga están cerca, y el tiempo de residencia del agua desde que entra hasta que sale del subsuelo es corto. Los sistemas de flujos intermedios y regionales tienen áreas de recarga y descarga distantes por lo que el tiempo de recorrido del agua es mucho mayor¹²⁹.

¹²⁸ (INGEOMINAS, 2000)

¹²⁹ (Tóth, 2000)

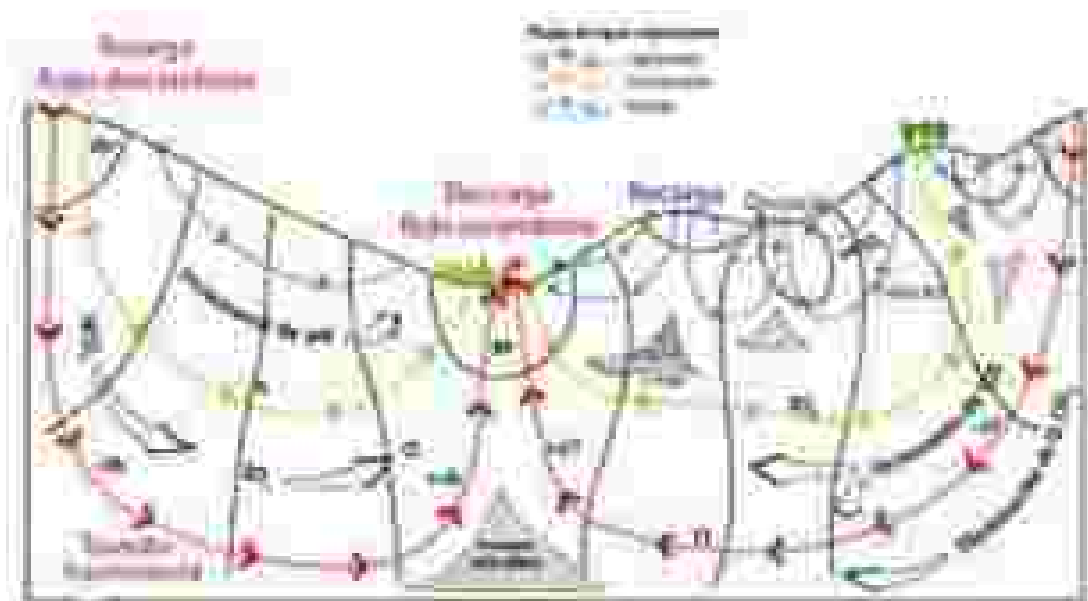


Figura 5.128 Esquema de distribución de zonas de recarga, descarga y sistemas de flujo

Fuente: Modificada de Toth¹³⁰

Para este caso, donde se busca delimitar las zonas potenciales de recarga, los factores específicos analizados para evaluar el favorecimiento de la recarga fueron los tipos de cobertura e inclinación de la pendiente, la textura del suelo, y desde el punto de vista geológico, la litología (porosidad primaria y disolución), y aspectos estructurales como porosidad secundaria, fracturamiento por fallas principales, si es el caso.

Así, teniendo en cuenta la información consultada, se definen como zonas potenciales de recarga de aguas subterráneas aquellas áreas que, por sus características intrínsecas o atributos físicos mayoritariamente, poseen una serie de factores que permiten que el agua esté en contacto con la superficie del terreno y, eventualmente, se infiltre y se percole a través del suelo y subsuelo, para hacer parte de la recarga o flujo del agua subterránea.

Para los depósitos de terraza y aluviales recientes, que son los localizados en el área de influencia, la recarga es producida directamente por los ríos próximos y por la red de drenaje en época de alta precipitación.

5.1.8.5.1 Identificación de zonas de recarga y descarga hídrica

Para identificar las zonas de recarga se debe partir de que estas son zonas que presentan características que favorecen la infiltración del agua hasta llegar al nivel freático, teniendo como base las características litológicas que favorecen la infiltración de aguas lluvias, las cuales transitan a través de los poros o fisuras de la superficie.

Para calcular las zonas de recarga en el área de influencia, se implementó la metodología de análisis multi criterio según la Teoría de los Sistemas de Flujo planteada por Tóth¹³¹, que

¹³⁰ (Alconada Magliano, Damiano, & Fagundo Castillo, 2016)

¹³¹ (Tóth, 2000)

propone una integración de diferentes factores condicionantes: geología, geomorfología, pendiente, suelo y cobertura vegetal, realizando una superposición ponderada para determinar las zonas de potencial de agua subterránea por medio de operaciones por celdas utilizando álgebra de mapas con pesos ponderados, resultando en un mapa de recarga con cinco valoraciones: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja.

Cabe resaltar que el modelo se realiza sin tener en cuenta la precipitación, y que las capas temáticas implementadas se encuentran en los componentes descritos anteriormente, los cuales se generaron a partir de procesamiento en SIG.

El método implementado consiste en realizar una categorización del peso de los factores de manera global y luego se realiza una categorización de las clases dentro de cada factor condicionante, asignándole ambos valores con criterio de expertos según las características de cada factor como se muestra en la Tabla 5.139.

Tabla 5.139 Peso ponderado de los factores para el análisis de recarga

Factor	Peso (W) [%]
Litología	35
Geomorfología	8
Pendiente	21
Suelo	32
Coberturas	4
Total	100

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Para los valores de cada una de las clases se obtuvo la información de este proyecto (a partir de la cartografía temática como se mencionó anteriormente) y se convirtió a formato ráster para el posterior procesamiento mediante álgebra de mapas.

El álgebra de mapas se realizó a partir de una categorización de cada factor en un rango de uno (1) a cinco (5), según su influencia en la recarga de acuíferos: uno (1) siendo la más baja y cinco (5) la más alta, como se muestra en la Tabla 5.140.

Tabla 5.140 Valores utilizados en la evaluación del potencial de recarga

Categoría	Valor
Geología	
Depósitos de terraza	5
Depósitos aluviales recientes	5
Geomorfología	
Terraza de acumulación	5
Escarpe de terraza	2
Planicie o llanura de inundación	5
Meandro abandonado	5
Jaguey	5
Laguna	2
Planos y campos de llenos antrópicos	1
Cobertura de la tierra	
Áreas deportivas	1

Categoría	Valor
Tejido urbano continuo	1
Tejido urbano discontinuo	1
Zonas industriales o comerciales	1
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	1
Pastos limpios	3
Pastos enmalezados	3
Bosque de galería y ripario	5
Cuerpos de agua artificiales	2
Parques cementerio	1
Plantación forestal	3
Pendiente	
0-1%	5
1-3%	5
3-7%	4
7-12%	3
12-25%	3
25-50%	2
50-75%	1
75-100%	1
>100%	1
Suelo	
Fluvaquentic Endoaquepts; Typic Udorthents; Aquic Eutrudepts	4
Typic Udorthents; Fluventic Dystrudepts; Fluventic Eutrudepts; Oxic Dystrudepts; Typic Dystrudepts; Aquic Eutrudepts	4
Cuerpos de agua	2
Zona urbana	1

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

La integración de los criterios y sus prioridades se realizó mediante el método de combinación lineal ponderada. El modelo para evaluar el potencial de recarga se muestra en la ecuación:

Potencial de recarga (PR) =

Geología(0.35) + Geomorfología(0.08) + Suelo(0.32) + Pendiente(0.21)
+ Coberturas(0.04)

Posteriormente, se utilizó la herramienta de superposición ponderada en el software ArcGIS para integrar los criterios y pesos y obtener como resultado el mapa de recarga hídrico con cinco clases: 1) muy bajo, 2) bajo, 3) moderado, 4) alto y 5) muy alto para interpretarlo con mayor facilidad.

La zonificación del mapa de recarga resultante se muestra en la [Figura 5.129](#) y sus áreas correspondientes en la Tabla 5.141.



Figura 5.129 Mapa de recarga en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Tabla 5.141 Recarga en el área de influencia

Recarga	Área (ha)	Área (%)
Muy baja	35,30	35,78
Baja	1,64	1,67
Moderada	2,29	2,32
Alta	11,42	11,58
Muy alta	47,99	48,65
Total	98,64	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Según los resultados encontrados, el 35,78% del área de influencia presenta un muy bajo potencial de recarga; 1,67% potencial bajo, 2,32% potencial moderado, 11,58% potencial alto y 48,65% potencial muy alto de recarga.

Más de la mitad del área de influencia se localiza en zona de recarga muy alta y alta, esto debido a que la geología de la zona es relativamente homogénea, correspondiente a depósitos fluviales, los cuales presentan alta porosidad y favorecen la infiltración del agua, proporcionando así una alta capacidad de recarga. Además, las geoformas de llanura de inundación y de terrazas de acumulación, que poseen bajas pendientes y ayudan también a la recarga, dan más peso a este resultado.

Las zonas con potencial moderado de recarga se ubican donde las pendientes son moderadamente inclinadas; mientras que las zonas de bajo y muy bajo potencial se encuentran en las coberturas antrópicas, pues la capacidad de recarga de los acuíferos se ve significativamente reducida debido a la transformación del terreno natural en superficies impermeables, formando una barrera física que impide que el agua penetre el suelo y llegue hacia los acuíferos; y por el contrario, el agua superficial se acumula en forma de escorrentía siendo canalizada hacia sistemas de drenaje.

5.1.8.6 Direcciones de flujo

De acuerdo con los resultados y análisis presentados en los numerales anteriores, se infiere que el flujo de agua subterránea en el área de estudio se da principalmente de las partes relativamente más altas que permiten la infiltración, hacia zonas más bajas siguiendo el gradiente topográfico local, comenzando desde el nororiente de la zona de influencia y fluyendo hacia el suroccidente de esta.

Es importante resaltar que la circulación del agua subterránea puede conformar en una cuenca tres tipos de sistemas de flujo: local, intermedio y regional¹³² (ver Figura 5.128)

Para determinar las direcciones de flujo regional se analizaron las trayectorias de los drenajes regionales en el software ArcGis, teniendo como base el Modelo de Elevación Digital de Alos Palsar con tamaño de celda 12,5 x 12,5 metros, esto para obtener una visión regional de la dirección de flujo. De este DEM se extrae el Hillshade o mapa de sombras que se presenta en la Figura 5.130, donde la flecha azul indica la dirección general de los flujos de agua es en sentido Este – Oeste.

¹³² (Toth, 1963)



Figura 5.130 Dirección de flujo de carácter regional

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Por otro lado, se utiliza el software ArcMap para analizar la dirección de flujo de escala local. Así, como se observa en la [Figura 5.131](#) en el área de influencia del proyecto se identifican flujos de carácter local provenientes de la zona montañosa al oriente, presentando así una dirección predominante Este-Oeste, similar a la dirección de flujo regional. Para una mejor comprensión, se presenta en la figura el hillshade o mapa de sombras elaborado a partir del DEM elaborado para este estudio.



Figura 5.131 Dirección de flujo de carácter intermedio

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.8.7 Modelo hidrogeológico conceptual

De acuerdo con los resultados encontrados, en el área de influencia se identifica una unidad hidrogeológica definida como UHG1, compuesta por sedimentos poco consolidados, caracterizados por poseer porosidad primaria y un flujo intergranular. Estas propiedades permiten clasificarla como un acuífero tipo A3, correspondiente a un acuífero libre.

Adicionalmente, se determinó que, debido principalmente a sus características geológicas, casi el 50% del área se encuentra en una zona de muy alta recarga. Por otro lado, las zonas con baja y muy baja recarga se caracterizan por presentar intervención antrópica, lo cual dificulta la infiltración del agua hacia el acuífero.

La dirección de flujo del agua es principalmente de Oriente – Occidente, esto de acuerdo con el sistema de flujo local analizado, tal como se presenta en la Figura 5.132.



Figura 5.132 Modelo hidrogeológico conceptual del área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.8.8 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

La vulnerabilidad intrínseca de un acuífero a la contaminación se refiere a la susceptibilidad de este a ser afectado negativamente por una carga contaminante. Este tipo de vulnerabilidad representa una propiedad exclusiva del medio acuífero, en la que se tienen en cuenta diferentes características dependiendo de la disponibilidad de la información, tales como: tipo de material que conforma el acuífero, profundidad del nivel freático, espesor de la zona no saturada, recarga, conductividad hidráulica del medio poroso, topografía, entre otros.

La determinación de la vulnerabilidad de una unidad hidrogeológica permite tener un mejor criterio para implementar políticas de protección de las aguas subterráneas y para un manejo óptimo del recurso. La evaluación de su vulnerabilidad puede realizarse mediante diferentes metodologías, siendo los métodos de puntuación y ponderación los más utilizados. Sin embargo, la selección de la metodología a utilizar depende inicialmente del tipo de acuífero y de la información disponible.

Al tener en el presente estudio una zona que en su gran mayoría está representada por depósitos fluviales y con una limitada cantidad de información, se determinó la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos mediante el método GOD que se describe a continuación.

5.1.8.8.1 Método GOD

Según el documento "Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación" del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial del año 2010¹³³, este método fue propuesto por Foster¹³⁴ y es aplicable a zonas

¹³³ (Vargas Quintero, 2010)

¹³⁴ (Foster & Hirata, 1988)

con escasa información, con irregular distribución de datos o con incertidumbre de la información. Este método comprende tres parámetros. G, O D, cuyos valores son asignados de acuerdo con la contribución en la defensa a la contaminación de los acuíferos:

G (Groundwater occurrence): Se refiere al grado de confinamiento hidráulico, el cual depende de la identificación del tipo de acuífero. El rango de valores va entre cero (0) cuando hay ausencia de acuífero y uno (1.0) cuando hay presencia de acuífero libre o no confinado.

O (Overall aquifer class): Corresponde a la caracterización de la zona no saturada del acuífero, haciendo referencia al grado de consolidación, características litológicas y texturales. Los índices más bajos (0.4) corresponden a los materiales no consolidados, mientras que los más altos (0.9-1.0) corresponden a rocas compactadas fracturadas o karstificadas.

D (Depth): Este parámetro está asociado a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o a la profundidad del techo en los confinados. Los índices más bajos (0.6) están relacionados con acuíferos con profundidades mayores a 50 m, mientras que los índices altos (1.0) están asociados con acuíferos que, independientemente de la profundidad, se encuentran en medios fracturados.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el índice de vulnerabilidad se obtiene del producto de los valores correspondientes a cada parámetro, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$iV_{GOD} = G * O * D$$

Así, en la Tabla 5.142 se presentan los grados de vulnerabilidad en el área de influencia según la metodología GOD.

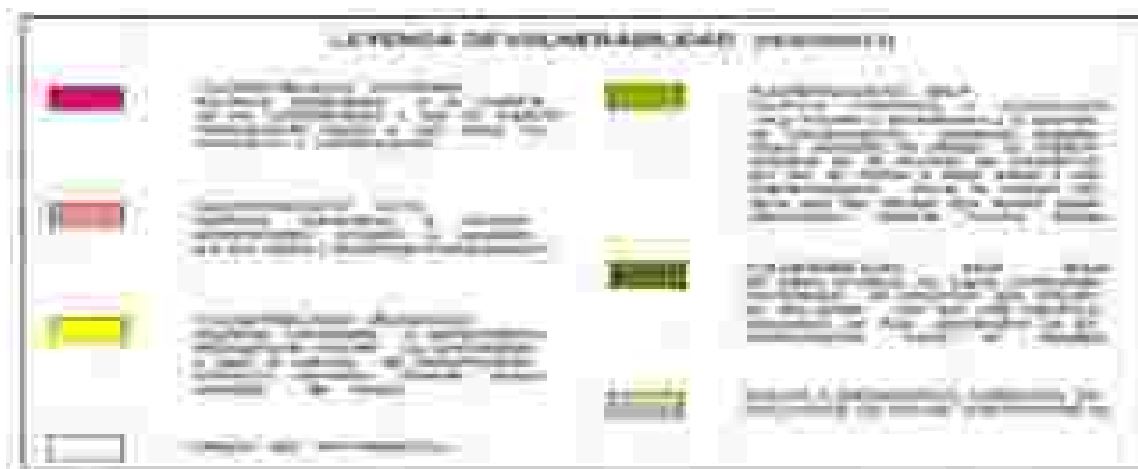
Tabla 5.142 Grado de vulnerabilidad según el método GOD

Grado	Vulnerabilidad
Muy alta	0.7 - 1.0
Alta	0.5 - 0.7
Moderada	0.3 - 0.5
Baja	0.1 - 0.3
Muy Baja	<0.1

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

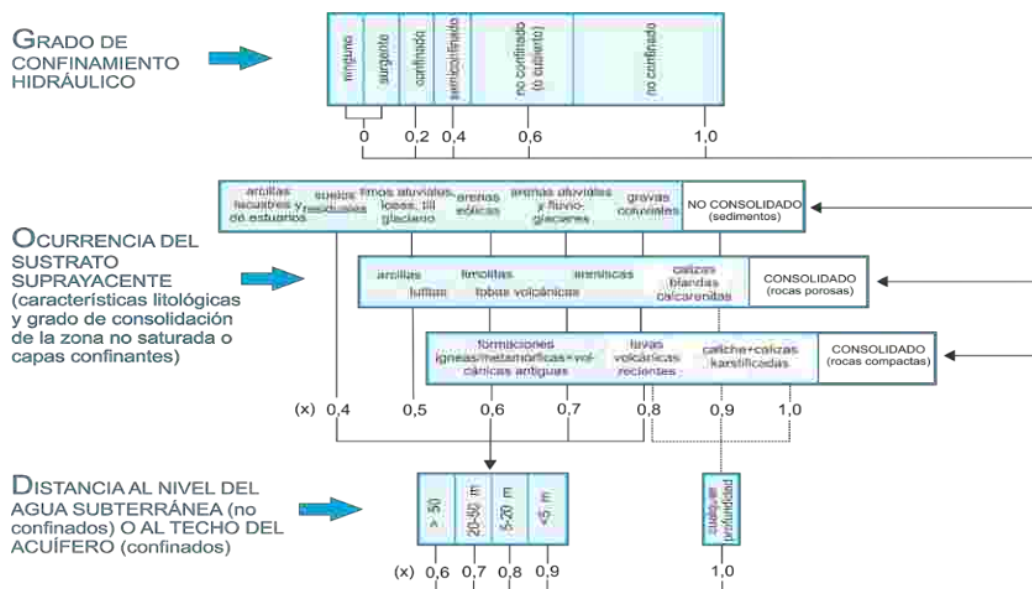
La simbología se utiliza de acuerdo con la leyenda del SGC¹³⁵, así:

¹³⁵ (SGC, 2003)



Fuente: SGC (antes INGEOMINAS), 2003.

En la Figura 5.134 se presenta la guía para la asignación de los valores correspondiente a cada parámetro según el caso.



Fuente: Vargas Quintero¹³⁶.

Para la aplicación del método GOD en el presente estudio se utilizaron los siguientes valores en cada parámetro en la unidad geológica presente en el área de influencia (ver Tabla 5.143).

¹³⁶ (Vargas Quintero, 2010)

Tabla 5.143 Valores asignados a los parámetros de estimación del método GOD

NOMBRE	G	O	D	GOD	CLASIFICACIÓN VULNERABILIDAD
Depósitos aluviales recientes	1	0.7	1	0.7	Muy alta
Depósitos de terraza	1	0.7	1	0.7	Muy alta

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

En este orden de ideas, el resultado obtenido con la aplicación del método GOD para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se muestra en la [Figura 5.135](#). De allí se puede destacar que el área de influencia del presente estudio se clasifica dentro de la categoría de vulnerabilidad muy alta, esto determinado principalmente por los materiales que componen los depósitos fluviales (terrazas y llanura de inundación), los cuales presentan porosidad primaria y altos valores de transmisividad debido a su configuración granulométrica. Lo anterior sumado a bajas pendientes hace que la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación sea muy alta.



Figura 5.135 Mapa de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación en el área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.9 Geotecnia

La metodología para la zona de influencia debe estar orientada a la caracterización de procesos morfodinámicos y a las características geotécnicas del área de estudio con relación al proyecto a realizar. En este caso se busca caracterizar los factores de seguridad con un método determinístico de capacidad de carga utilizando parámetros de resistencia de las unidades geológicas superficiales en el área de estudio para posteriormente determinar el factor de seguridad de cada unidad de geología para ingeniería.

5.1.9.1 Unidades geológicas superficiales

En el capítulo de geología se describen las unidades geológicas superficiales basado en las características vistas en campo y sus condiciones de meteorización, apoyándose en la información disponible en los estudios regionales mencionados anteriormente. En este análisis, se clasificaron dos unidades geológicas superficiales: las dos corresponden a suelos transportados.

En el marco del estudio se realizaron sondeos exploratorios descritos con mayor detalle los anexos de este capítulo, sin embargo, en los recorridos de campo no fue posible identificar los depósitos antrópicos que fueron descritos en los sondeos P1, P3, P4 y P5, debido a que no se encontraron afloramientos de dichos depósitos, pueden ser depósitos puntuales menores a la unidad mínima cartografiable, que igualmente comparten descripción geológica (mostrada en los registros de perforación) muy similares a los de los depósitos aluviales. La discontinuidad de esta unidad de depósitos antrópicos y la falta de afloramientos de estos depósitos determina la identificación de unidades geológicas superficiales solo como 2, que se describen en la Tabla 5.144.

Tabla 5.144 Áreas de las unidades geológicas superficiales

Unidad Geológica Superficial	Área (ha)	Área (%)
UGS1	7,97	8,08
UGS2	90,67	91,92
Total	98,64	100

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.



Figura 5.136 Mapa de unidades geológicas superficiales 1:10.000

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.9.1.1 UGS1

Esta unidad representa una franja al sur de la zona de influencia abiótica, correspondiente a los depósitos aluviales más recientes generados por el río adyacente. Está compuesto esencialmente por arenas y gravas, su granulometría es variable presentando tamaños de arenas finas hasta gravas de 50 cm de diámetro. Estos depósitos presentan una topografía suavizada característica de su génesis.



Figura 5.137 Columna estratigráfica UGS1

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.9.1.2 UGS2

Estos suelos cubren la mayor parte del área de estudio y se forman a partir de depósitos aluviales subcrecientes. Están compuestos por arenas, lodos y gravas, con cantos de rocas sedimentarias e ígneas. La granulometría de estos suelos varía desde materiales finos acompañados de gravas con bloques de hasta 40 cm de diámetro.

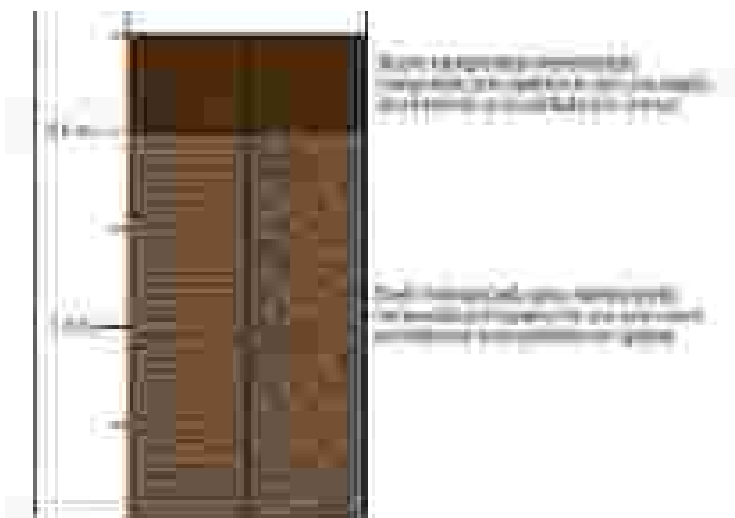


Figura 5.138 Columna estratigráfica UGS2

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Las dos unidades geológicas superficiales tienen características de depósitos aluviales, lo que geológicamente puede tener un comportamiento similar de bloques en matriz, esto se detallará más adelante en la descripción del capítulo de Unidades Geológicas para Ingeniería.

5.1.9.2 Exploración Directa

Para el proyecto Variante Mutatá se han realizado varias campañas de exploración geotécnica, el inicial realizado por el consorcio entre AECOM y Consultoría Colombiana S.A en el año 2016¹³⁷ en donde se caracterizaron las unidades geológicas de toda la UF4 a través de ensayos de laboratorio e insitu.

Tabla 5.145 Parámetros de resistencia en suelos y depósitos

Unidad Geológica Superficial	g [kN/m ³]	c' [kPa]	φ' [°]	E [kPa]
Relleno antrópico	19.0	13.0	31.0	9000
Depósito Aluvial	19.0	10.0	32.0	24981
Depósito Coluvial	20.0	22.0	28.0	14500
Terraza Aluvial	20.0	18.0	31.0	15700
Depósito fluvio-torrencial	19.8	1.0	25.0	8960

Fuente: Tomado de AECOM y ConCol, 2016¹³⁸.

Estos valores son tomados como referencias comparativas a los actualizados.

Adicionalmente, para este estudio se realizó una campaña adicional de exploración geotécnica en octubre del año 2023 (presentado en 2024¹³⁹) en donde se realizaron 8 ensayos SPT con recuperación de muestras y 5 apiques a lo largo del trazado de la vía.

Tabla 5.146 Relación de la exploración directa realizada.

Nombre	Profundidad (m)	Nivel Freático (m)	Coordenada Este	Coordenada Norte
P-1	9,0	2,1	4620229,157	2359483,253
P-2	10,0	3,9	4620130,011	2359573,658
P-3	10,0	3,8	4620046,534	2359682,845
P-4	10,5	2,0	4620019,098	2359806,827
P-5	7,5	2,3	4620011,021	2359911,089
P-6	10,0	2,9	4620009,266	2360085,021
P-7	10,0	2,9	4620055,721	2360179,219
P-8	10,0	1,3	4620187,260	2360289,592
Ap-1	1,5	Seco	4620096,038	2360215,664
Ap-2	1,5	Seco	4619988,559	2360030,398
Ap-3	1,5	Seco	4620012,539	2359857,244
Ap-4	1,5	Seco	4620055,412	2359664,260
Ap-5	1,5	Seco	4620167,635	2359540,546

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

En todas las perforaciones se encontraron estratos de origen aluvial con un espesor variable desde 4 a más de 9 metros, en las perforaciones P-2, P-3, P-4 y P-5 se encontr

¹³⁷ (AECOM, 2016)

¹³⁸ (AECOM, 2016)

¹³⁹ (Inteinsa, 2024)

el basamento como un Horizonte V de Basalto-andesita a profundidades mayores a 8 metros en promedio, sin embargo, los estratos de depósitos aluviales se consideran los más representativos para el análisis de estabilidad.

En la [Figura 5.139](#) se muestra la ubicación de la exploración realizada.



Figura 5.139 Ubicación de exploración directa
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.9.3 Resultados de Ensayos de Laboratorio y Ensayos Insitu

Uno de los problemas que se tiene cuando se realizan muestreos y perforaciones sobre suelos granulares compuestos por matriz y roca, como en el caso del proyecto Variante Mutatá, es la toma de muestras inalteradas para parámetros de resistencia, debido a que no es posible por los muestreadores shelby y el análisis instrumental no está diseñado para este tipo de suelos (corte directo, compresión uniaxial, edométrico, triaxial, entre otros). Por esta razón el análisis instrumental del proyecto se centró en ensayos insitu como correlaciones del Standard Penetration Test.

En cuanto a las propiedades índice se realizó con normalidad utilizando análisis de granulometría por tamizado, límites de consistencia y humedad natural.

5.1.9.3.1 Propiedades Índice

En la Tabla 5.147 se resumen los ensayos de laboratorio realizados, específicamente ensayos de propiedades índice.

Tabla 5.147 Resumen de ensayos de laboratorio realizados

Muestra	w [%]	▬	▬	▬	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P1-M1	24.5	90	66	24	59.0	26.0	15.0	GM
P1-M2	4.9	27	22	5	59.0	33.0	8	GW-GM
P2-M4	8.0							
P2-M7	14.1							
P2-M9	12.5				45.0	33.5	22	-
P2-M12	36.3	48	29	19	7.7	33.4	59	ML
P3-M1	36.3							
P3-M6	33.5							
P3-M11	39.3	50	36	14	8.9	22.8	68	ML
P3-M12	41.4	51	36	15	0.0	20.1	80	MH
P4-M2	24.3							
P4-M3	20.7							
P4-M7	19.1	45	32	13	44.9	20.3	35	GM
P4-M12	13.9				53.3	25.7	21	
P5-M1	31.5							
P5-M10	40.9	43	31	12	30.7	27.1	42	GM
P5-M11	18.3							
P5-M12	26.4	98	54	44	35.7	46.1	18	SM
P6-M6	7.8							
P6-M8	45.2							
P6-M9	41.1	56	37	19	15.0	6.0	79	MH
P6-M10	36.6							
P7-M1	62.2							
P7-M2	18.1	59	39	20	52.0	24.0	24	GM
P7-M3	7.7	28	22	6	56.0	34.0	10	GP-GC
P7-M4	9.5							
P8-M1	31.3	88	54	34	47.0	19.0	34	GM
P8-M3	14.4							
P8-M4	11.9	24	21	3	49.0	38.0	12	GM
P8-M7	21.8							

Fuente: Inteinsa, 2024¹⁴⁰.

¹⁴⁰ (Inteinsa, 2024)

Los suelos asociados a los depósitos aluviales de la zona se caracterizan por ser grueso-granulares, con una proporción aproximada de 36.2% de gravas, 27.5% de arenas y 36% de finos. En cuanto a las propiedades de plasticidad, presentan límites líquidos cercanos al 40.0% y un límite plástico promedio de 28.0%, con índices de plasticidad que oscilan entre 3 y 19. Además, la humedad promedio observada en estas muestras es del 21.3%. En términos de clasificación, estos depósitos se identifican principalmente como grava limosa (GM).

De igual manera, los suelos de los depósitos recientes destacan por ser también grueso-granulares, con una composición promedio de 49.5% de gravas, 21.5% de arenas y 29% de finos. Sus características de plasticidad muestran límites líquidos alrededor del 74.0% y un límite plástico medio de 47.0%, con índices de plasticidad que varían entre 20 y 34. La humedad en estos materiales es relativamente alta, con un valor medio de 37.8%. Según la clasificación unificada de suelos, estos depósitos se describen como grava limosa (GM).

5.1.9.3.2 Parámetros de Resistencia

El ensayo de resistencia a la penetración estándar puede utilizarse para estimar, a partir de correlaciones, propiedades de los materiales tales como el módulo de elasticidad, la cohesión efectiva y el ángulo de fricción interna efectivo. En este caso se utilizó la metodología de González, 1999¹⁴¹ para la estimación del ángulo de fricción interna ϕ y la cohesión c .

La metodología parte del ángulo de fricción interna equivalente ϕ'_{eq} , correspondiente a un valor determinado del NSPT, luego, a cada valor de ϕ'_{eq} , se le calcula el esfuerzo normal efectivo σ' en función de la profundidad a la cual se haya realizado el ensayo de resistencia a la penetración estándar (densidad x profundidad). Para dicho valor de esfuerzo normal σ' , se determina el esfuerzo de corte (T) como el producto del esfuerzo normal σ' por la tangente del ángulo de fricción interna equivalente ϕ'_{eq} . Finalmente, se hace una regresión de T contra σ' y se obtienen c y ϕ .

En la Figura 5.140 y Figura 5.141 se muestra la variabilidad del Nspt vs profundidad en los sondeos del P1 al P8.

¹⁴¹ (Gonzalez, 1999)

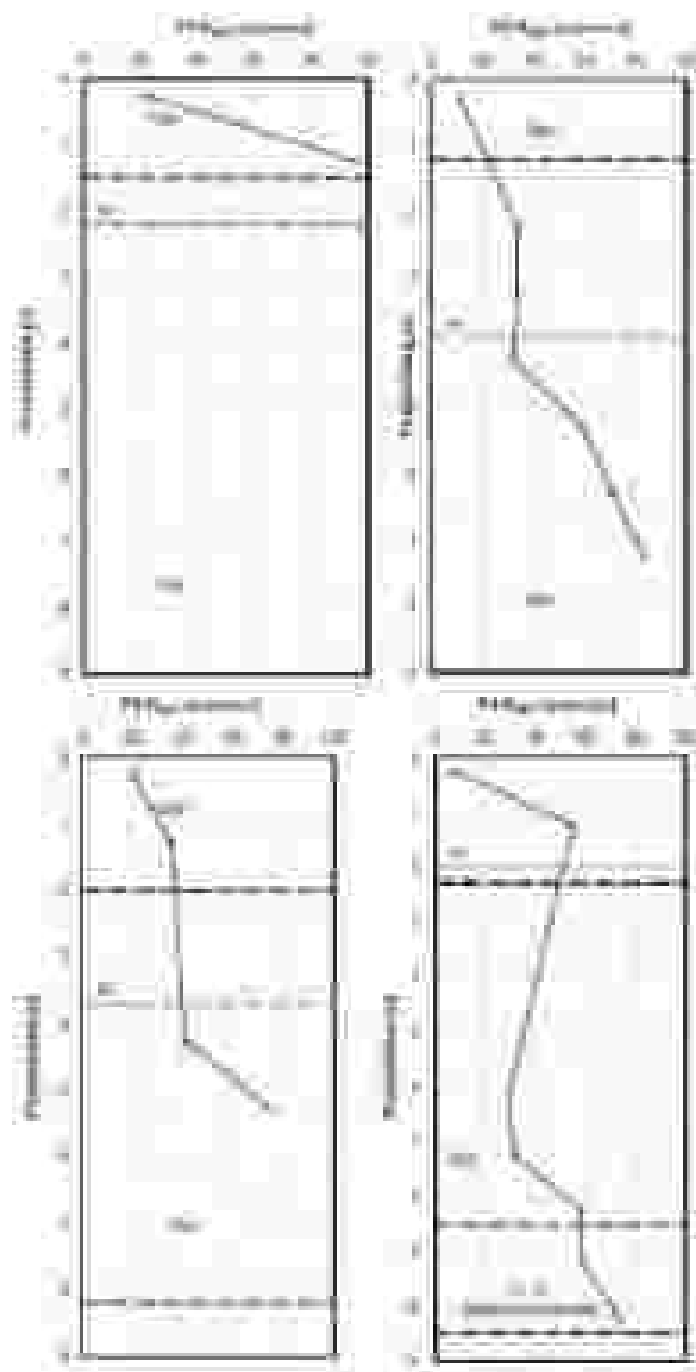


Figura 5.140 Variabilidad de Nspt de los sondeos P1, P2, P3 y P4
Fuente: Inteinsa, 2024¹⁴².

¹⁴² (Inteinsa, 2024)

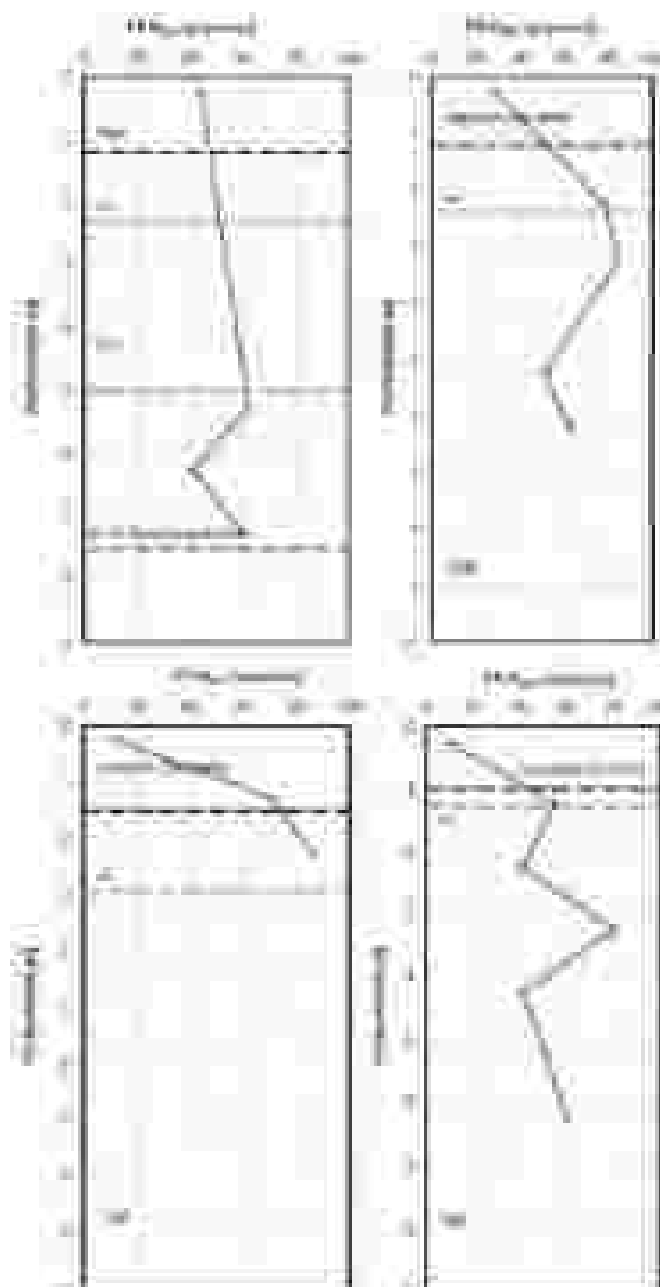


Figura 5.141 Variabilidad de Nspt en los sondeos P5, P6, P7 y P8

Fuente: Inteinsa, 2024¹⁴³.

De acuerdo a los resultados de correlación SPT y resumen de los estudios anteriores mostrados en la Tabla 5.145 se puede dar un estimativo de las propiedades de resistencia de cada unidad geológica superficial.

¹⁴³ (Inteinsa, 2024)

Tabla 5.148. Parámetros geotécnicos para las UGS en el área de influencia

Estrato	Unidad Geológica Superficial	C (kPa)	Φ (°)
Depositos de terraza (Qalt)	UGS2	10	32
Depósito aluvial reciente (Q2al)	UGS1	4	30

Fuente: Modificado de Inteinsa, 2024¹⁴⁴.

5.1.9.4 Unidades de Geología para Ingeniería

Los parámetros de resistencia de diseño fueron definidos teniendo en cuenta las correlaciones con el ensayo de penetración estándar, de los ensayos de laboratorio y estudios preliminares que ejecutados en la zona.

La densidad del suelo es requerida para los análisis determinísticos de capacidad portante del suelo, el cual se utilizará en este capítulo para determinar la estabilidad geotécnica en el área de influencia, para calcular este parámetro se usaron los resultados de los ensayos de campo efectuados, además de valores recomendado en referencias especializadas. En la Tabla 6 se presentan valores típicos de peso unitario con base en Bowles, J. (1997)¹⁴⁵, basados en el número de golpes con una energía del 70% del ensayo de penetración estándar y el tamaño del grano de los suelos.

Description	Very loose	Loose	Medium	Dense	Very Dense
Moisture Content (%)	0 - 10	11 - 15	16 - 20	21 - 25	26 - 30
NPT (kg/cm²)	0 - 2	2 - 4	4 - 10	10 - 20	20 - 40
Unit Weight (kN/m³)	14 - 16	16 - 18	18 - 20	20 - 22	22 - 24
Grain Size (mm)	0.075 - 0.425	0.425 - 0.850	0.850 - 2.000	2.000 - 4.750	4.750 - 20.000
Soil Type	CL, OL	CL, OL	CL, OL	CL, OL	CL, OL
Soil Color	Light	Light	Light	Light	Light
Soil Texture	Very fine	Very fine	Very fine	Very fine	Very fine
Soil Structure	Very loose	Loose	Medium	Dense	Very Dense

Figura 5.142. Correlación N70 SPT y densidad

Fuente: Bowles, 1997¹⁴⁶.

Por lo que la Tabla 5.148 puede modificarse con la densidad del suelo y se puede establecer las características geotécnicas de las unidades geológicas superficiales, es decir, las unidades de geología para ingeniería.

Tabla 5.149. Parámetros geotécnicos para unidades de geología para ingeniería

Estrato	UGS	Unidades de Geología para Ingeniería (UGI)	C (kPa)	Φ (°)	γ (kN/m³)
Depositos de terraza (Qalt)	UGS2	UGI2	10	32	19

¹⁴⁴ (Inteinsa, 2024)

¹⁴⁵ (Bowles, 1997)

¹⁴⁶ (Bowles, 1997)

Estrato	UGS	Unidades de Geología para Ingeniería (UGI)	C (kPa)	Φ (°)	γ (kN/m ³)
Depósito aluvial reciente (Q2al)	UGS1	UGI1	4	30	17

Fuente: Modificado de Inteinsa, 2024¹⁴⁷.

5.1.9.4.1 Sectorización de Aptitud Geológico-Geotécnica

En los términos de referencia de carreteras se solicita la sectorización geológico-geotécnica a lo largo del proyecto y su homogenización de zonas de importancia para la evaluación de la estabilidad por procesos morfodinámicos u otros fenómenos geológico-geotécnicos que sean importantes para realizar la zonificación geotécnica.

En el capítulo de geomorfología se realizó un análisis multitemporal y de identificación de procesos morfodinámicos actuales, en donde no se encontraron procesos significativos para la estabilidad del área de influencia.

¹⁴⁷ (Inteinsa, 2024)



Figura 5.143. Morfodinámica de todo el trazado del proyecto

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.9.5 Zonificación Geotécnica

Para este caso se realizará utilizando el método del talud infinito modificado para que sea evaluada la capacidad de carga del trazado de la vía debido a que la zona de intervención del proyecto no presenta pendientes medias-altas en la cual se pueda generar procesos de inestabilidad de laderas de importancia, ni procesos morfodinámicos importante y las unidades geológicas superficiales son similares.

El método del talud infinito es un método determinístico que involucra las particularidades de parámetros de resistencia en un área específica, por lo que se puede realizar la zonificación de aptitud geotécnica de acuerdo con la capacidad de carga general de Terzaghi¹⁴⁸, ya que la zona de intervención del proyecto no presenta pendientes altas en la cual se pueda generar procesos de inestabilidad de laderas de importancia.

¹⁴⁸ (Terzaghi, 1943)

Para esto se debe evaluar el factor de seguridad según la ecuación general de carga de Terzaghi¹⁴⁹.

$$FS_{(capacidad\ de\ carga)} = \frac{q_u}{q_{m\acute{a}x}}$$

Figura 5.144. Factor de seguridad según capacidad de carga

Fuente: Das, 2015¹⁵⁰.

La metodología a utilizar se muestra en la Figura 5.145.

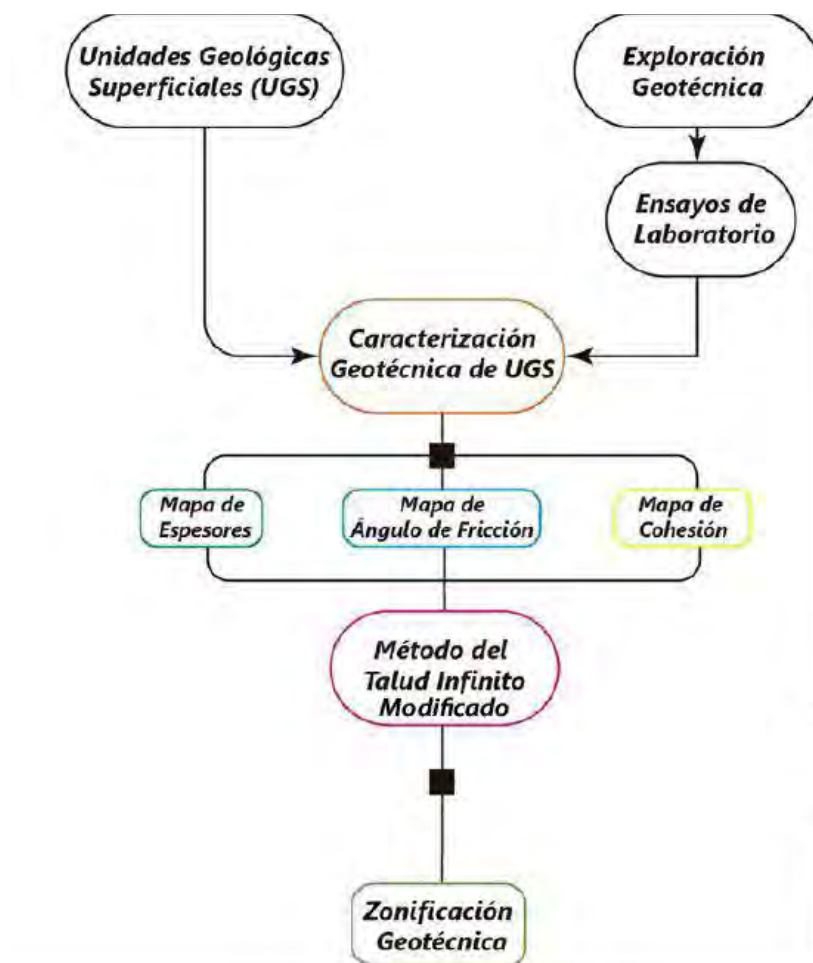


Figura 5.145. Método de evaluación en área con unidades de geología para ingeniería

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

El método del talud infinito permite determinar mediante álgebra de mapas (raster) los factores de seguridad en una zona utilizando la zonificación de unidades de geología para

¹⁴⁹ (Terzaghi, 1943)

¹⁵⁰ (Das, 2015)

ingeniería con la variable morfométrica del terreno. Este método presenta varios tipos de aplicaciones en función de sus condiciones, seco, saturado y con sismo.

La fórmula para obtener el factor de seguridad utilizando el método del talud infinito se muestra a continuación:

$$FS = \frac{(c' b \sec \alpha + (ybh \cos \alpha - kybh \sin \alpha - y_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \Phi')}{ybh \sin \alpha + kybh \cos \alpha}$$

Donde:

c' y Φ' son los parámetros de resistencia del suelo en la base de la columna de suelo, en términos de esfuerzos efectivos.

y es el peso unitario del suelo.

b es el ancho de la tajada (ancho de la celda que está definido por el tamaño del pixel en el DEM).

h es la altura de suelo por encima de la superficie potencial de deslizamiento.

y_w es el peso unitario del agua.

h_w es la altura de la lámina de agua, determinada a partir del nivel freático correspondiente a una lluvia de 20 años de periodo de retorno.

α es el ángulo de inclinación de la superficie de falla.

k es el coeficiente de aceleración horizontal para un periodo de retorno de 100 años.

Sin embargo, para la realización de la zonificación por capacidad de carga se debe modificar el método del talud infinito a una ecuación que involucre la capacidad de carga de Terzaghi¹⁵¹.

¹⁵¹ (Terzaghi, 1943)

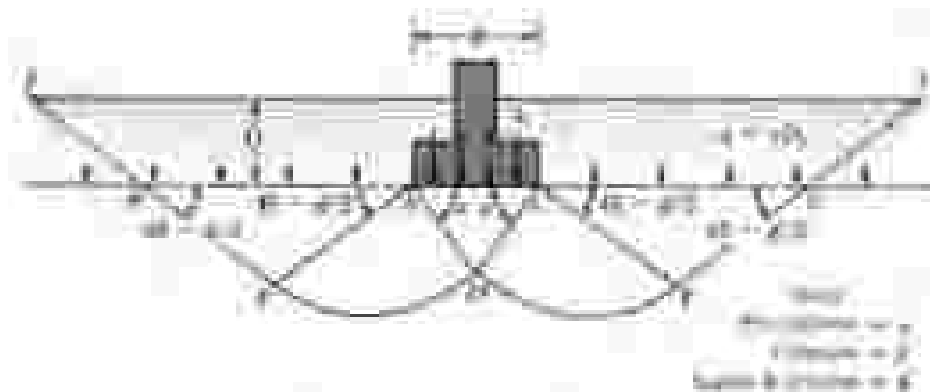


Figura 5.146. Mecanismo de Falla propuesto por Terzaghi¹⁵²

Fuente: Das, 2015¹⁵³.

Para utilizar la ecuación mostrada en la Figura 5.146 se utilizan los siguientes datos.

C : Cohesión términos de kN/m².

q: esfuerzo efectivo a nivel del fondo de la cimentación, igual a la multiplicación del nivel de empotramiento y la densidad del estrato, en valores de kN/m².

y: peso específico del suelo, en valores de kN/m³

Nc, Nq, Ny : factores de capacidad portante asociados al ángulo de fricción.

Y se involucran algunos factores de pendiente, forma, profundidad. La ecuación general de carga propuesta por Terzaghi¹⁵⁴ se muestra a continuación.

$$q_u = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma} F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

Figura 5.147. Ecuación general de capacidad de carga

Fuente: Das, 2015¹⁵⁵.

Los factores de forma, pendiente, profundidad son:

Fcs, Fqs, Fys = Factores de Forma

Fcd, Fqd, Fyd = Factores de profundidad

Fci, Fqi, Fyi = Factores de pendiente de la carga.

¹⁵² (Terzaghi, 1943)

¹⁵³ (Das, 2015)

¹⁵⁴ (Terzaghi, 1943)

¹⁵⁵ (Das, 2015)

Para resolver el FS mostrado en la Figura 5.144 se requiere además el factor de Q_{max} , el cual es el valor de cargas totales (vivas y muertas del tipo de obra) que para el caso específico de las obras del proyecto Variante Mutatá, estas cargas se consultan en los diseños técnicos y evaluadas en el estudio de Suelos para el Diseño de Fundaciones de Obras de Drenaje y Box Vehicular, presentado en Anexos_C5_1/5_1_9_Geotecnia.

Las obras de mayor peso en las contempladas son los Box, se contemplarán 4 de los 6 en total, en donde se tomará el valor máximo como el q_{max} mostrado en la Figura 5.144, el valor máximo es de 104,55 kN/m², mostrado en el Box culvert 2 en la Tabla 5.150.

Tabla 5.150. Cargas estructurales al suelo

Box	Carga (kN/m ²)
Box culvert 1	32,97
Box culvert 2	104,55
Box culvert 4	85,30
Box culvert 4	76,23

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Para realizar la zonificación se debe realizar la clasificación de parámetros geotécnicos según la clasificación de unidades de geología para ingeniería, utilizando la ecuación general de capacidad de carga.

$$FS = \frac{c'NcFcsFcdFci + qNqFqsFqdFqi + \frac{1}{2}yBNyFysFydFyi}{104.55 \text{ kN/m}^2}$$

Donde:

C: Cohesión términos de kN/m².

q: esfuerzo efectivo a nivel del fondo de la cimentación, igual a la multiplicación del nivel de empotramiento y la densidad del estrato, en valores de kN/m².

y: peso específico del suelo, en valores de kN/m³

Nc, Nq, Ny: factores de capacidad portante asociados al ángulo de fricción.

Fcs, Fqs, Fys = Factores de Forma

Fcd, Fqd, Fyd = Factores de profundidad

Fci, Fqi, Fyi = Factores de pendiente de la carga.

Tabla 5.151. Valores de análisis para el Qu

UGI	Valores de qu		Qu (kN/m)
UGI 1	Factor	Valor	614,55
	Nc	35,49	
	Fcs	1,13	
	Fcd	1,2	

UGI	Valores de qu		Qu (kN/m)
	Fci	1	
	Nq	23,18	
	Fqs	1,62	
	Fqd	1,14	
	Fqi	1	
	Nr	30,21	
	Frs	0,6	
	Frd	1	
	Fri	1	
UGI 2	Factor	Valor	366,8
	Nc	30,14	
	Fcs	1,13	
	Fcd	1,2	
	Fci	1	
	Nq	18,4	
	Fqs	1,58	
	Fqd	1,14	
	Fqi	1	
	Nr	22,4	
	Frs	0,6	
	Frd	1	
	Fri	1	

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Se debe dividir el qu entre el qmax para poder tener el valor del factor de seguridad de cada UGI, en la Tabla 5.152 se muestra junto con el resumen de parámetros utilizados.

Tabla 5.152. Resumen de Factor de seguridad por UGI

Unidad de Geología para Ingeniería	Ángulo de Fricción (°)	γ (kN/m ³)	Cohesión (kN/m ²)	Qu (kN/m ²)	Qmax (kN/m ²)	Factor de Seguridad
UGI 1	30	17	4	614,55	104,55	5,87
Depósitos aluviales recientes						
UGI 2	32	19	10	366,80	104,55	3,50
Depósitos aluviales						

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Ambos factores de seguridad de las UGI son mayores a 2 e incluso 3, lo cual es muy estable para capacidad portante del terreno ante las cargas más altas esperadas de acuerdo con el planteamiento constructivo del proyecto.

En cuanto a las zonas inestables no fueron identificadas en el capítulo de geomorfología, y los procesos morfodinámicos no son indicativos de zonas inestables, por lo que se considera que la zonificación geotécnica es representada por los factores de seguridad de la capacidad de carga del área de intervención. El mapa de zonificación geotécnica se muestra en [Figura 5.148](#).



Figura 5.148 Zonificación geotécnica del área de influencia

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

5.1.9.6 Zonificación geotecnia con factores geoambientales

Con el propósito de dar cumplimiento a los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en proyectos de construcción de carreteras y/o túneles con sus accesos, adoptados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante la Resolución No. 0751 del 26 de marzo de 2015, se llevó a cabo la zonificación geotécnica considerando las variables geoambientales con incidencia en la estabilidad del terreno.

En este sentido, la zonificación integra las siguientes variables: geología, geomorfología, coberturas de la tierra, pendiente, isoyetas y amenaza sísmica, de acuerdo con la NSR-10.

Para cada una de las variables y sus clases particulares, se asignaron pesos de acuerdo con las características de estabilidad geotécnica. No obstante, algunas variables, como las isoyetas y la amenaza sísmica, presentan una baja variabilidad dentro del área de influencia. Por ejemplo, en el caso de la variable isoyeta, la precipitación anual oscila entre 5.600 y 5.400 mm/año, lo que refleja una diferencia poco significativa; por su parte, la amenaza sísmica se clasifica como alta en toda el área de estudio, con una aceleración pico efectiva de 0,30 g y una aceleración horizontal de 0,25 g. No obstante, es de aclarar que estas se incluyen en el análisis, con el fin de evaluar su influencia en el territorio, a través de un análisis heurístico de zonificación geotécnica.

En atención a lo anterior, en la Tabla 5.153 se presentan los pesos asignados a los factores condicionantes identificados.

Tabla 5.153 Pesos asignados a los factores condicionantes

Factor	Peso (W) [%]
Geología	15,00
Geomorfología	15,00
Cobertura	15,00
Pendiente	35,00
Isoyetas	10,00
Amenaza Sísmica	10,00
Total	100,00

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Adicionalmente, en la Tabla 5.154 se presentan los valores asignados a las clases de cada factor.

Tabla 5.154 Valores asignados a las clases de cada factor

Categoría	Valor
Coberturas (Cobe)	
Áreas deportivas	1
Tejido urbano continuo	1
Tejido urbano discontinuo	1
Zonas industriales o comerciales	1
Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	1
Pastos limpios	2
Pastos enmalezados	2
Bosque de galería y ripario	1
Cuerpos de agua artificiales	1
Parques cementerio	1
Plantación forestal	1
Geomorfología (Geom)	
Terraza de acumulación	1
Escarpe de terraza	2

Categoría	Valor
Planicie o llanura de inundación	1
Laguna	1
Meandro abandonado	1
Planos y campos de llenos antrópicos	1
Jagüey	1
Geología (Geol)	
Depósitos aluviales recientes	1
Depósitos de terraza	1
Pendiente (Pend)	
0-1%	1
1-3%	1
3-7%	1
7-12%	1
12-25%	2
25-50%	2
50-75%	3
75-100%	3
>100%	3
Isoyeta (Isoy)	
5200 mm/año	2
5400 mm/año	2
5600 mm/año	2
Amenaza Sísmica (Sism)	
Alta (Aa 0.25)	3

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

De esta manera, el valor de estabilidad geotécnica se obtiene a partir de los valores y pesos ponderados asignados en las tablas anteriores, aplicando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 & \text{Estabilidad Geotécnica} \\
 & = \text{Geol} * 0.15 + \text{Geom} * 0.15 + \text{Pend} * 0.35 + \text{Cobe} * 0.15 + \text{Isoy} * 0.10 \\
 & + \text{Sism} * 0.10
 \end{aligned}$$

La zonificación geotécnica resultante se muestra en la Figura 5.23, el área y el porcentaje que estas susceptibilidades representan en el área de influencia en la Tabla 5.9.



Figura 5.149 Zonificación geotécnica
Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Tabla 5.155 Susceptibilidad a procesos erosivos y remoción en masa

Estabilidad Geotécnica	Área (ha)	Área (%)
Alta	98,09	99,44
Media	0,22	0,22
Baja	0,32	0,32
Total	98,64	100

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

La zonificación realizada en el área de influencia revela que la mayor parte de esta región presenta una estabilidad alta en términos geotécnicos, tal como se describió en la primera zonificación, abarcando aproximadamente el 99% de la superficie total. Esta alta estabilidad es una característica intrínseca de áreas con pendientes suaves o casi planas, las cuales se encuentran asociadas predominantemente a geoformas de origen fluvial. Estas condiciones favorecen una menor propensión a fenómenos de remoción en masa, debido a que suelen ofrecer estabilidad sin efectos de procesos gravitacionales o fallos en la estabilidad del terreno ante cargas.

Las zonas de estabilidad en categoría “media” son zonas con condiciones similares a las áreas designadas en categoría “baja”, no obstante, estas se diferencian por registrar pendientes más pronunciadas, principalmente en el rango entre 12 y 75 %. Estas pendientes se encuentran conformadas principalmente por coberturas que favorecen la estabilidad, tales como pastos limpios y enmalezados. En conjunto, las áreas con estabilidad media representan únicamente el 0,71 % del área de influencia, localizándose principalmente en terrenos donde la topografía comienza a mostrar una mayor variación en la pendiente.

Las zonas caracterizadas como de estabilidad baja representan menos del 0.2% del total del área de influencia, y se encuentra asociada a pendientes mayores a 75% ubicadas en unidades geomorfológicas que pueden ser consideradas como inestables, tal como los escarpes de terraza. Sin embargo, algunas de estas zonas no son inestables según se contrasta en la ortofotografía del área de influencia, pero que pueden serlo según lo considerado en este análisis.

5.1.10 Atmósfera

Para el análisis se tomó como referencia la información de la estación VILLARTEAGA [12015010], ubicada en zona rural del municipio de Mutatá, la cual se encuentra localizada a una distancia de aproximadamente 11,37 km del área de del proyecto. Esta se encuentra relativamente cerca de la zona, pero solo registra datos de la variable precipitación, y para el análisis meteorológico se requiere de datos de variables adicionales como son temperatura, humedad relativa, radiación solar, brillo solar, nubosidad, etc., por tanto, la información meteorológica fue adquirida de datos de re-análisis global, obtenidos directamente de internet, de una fuente confiable como es METEOBLUE, la cual cuenta con los modelos de clima o tiempo requeridos como son: CFRS, ERA 40, CAM, WRF, MM5, etc.

Para la caracterización de las diferentes variables meteorológicas de interés se tuvo en cuenta los promedios climatológicos existentes para el periodo de años comprendido ente 2015 y 2024 (10 años), datos meteorológicos simulados suministrados por el proveedor de datos meteorológicos METEOBLUE, este se presenta como anexos en la carpeta denominada Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Calidad_Aire/ Inf_Meteorologia.

Los monitoreos de calidad de aire se desarrollaron en el periodo comprendido entre los días 15 de noviembre al 02 de diciembre del 2024 en dos (2) puntos localizados en el área de influencia del proyecto, donde se determinaron las concentraciones para los siguientes contaminantes: Material Particulado menor a 10 micrómetros (PM10), Material Particulado menor a 2.5 micrómetros (PM2.5), Dióxido de Azufre (SO2), Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Nitrógeno (NO2). Los resultados del monitoreo de calidad de aire se comparan con la Resolución 2254 del 2017. Los soportes del plan de muestreo, cadenas de custodia, certificado de calibración, datos meteorológicos, datos de campo, resolución de acreditación resultados de laboratorio de análisis e informe, se presenta como anexos en la carpeta denominada Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Calidad_Aire.

Con respecto al monitoreo de ruido ambiental, se realizaron mediciones en tres (3) puntos en los horarios diurno y nocturno, en día hábil y no hábil, donde los primeros dos se realizaron entre los días los días 17 y 19 de noviembre de 2024, en tanto el tercero, se realizó entre los días 06 y 07 de septiembre de 2025. Durante estos periodos se tomaron lecturas para verificar los Niveles de Presión Sonora (NPS) y posteriormente, los resultados

del monitoreo de ruido ambiental se comparan con los límites permisibles de la Resolución No. 0627 del 7 de abril de 2006. Los soportes del plan de muestreo, datos de campo, certificados de calibración, resoluciones de acreditación e informe puede evidenciarse en la carpeta Anexos_C5_1/ 5_1_10_Atmosfera/[Ruido_Amb](#).

Para el cálculo del modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos (PM10, PM2.5, SO2, NO2 y CO) se utilizó el modelo AERMOD, para la corrida de este se acogió el escenario actual, correspondiente a zona donde se desarrollarán las actividades de construcción de la Variante, esta incluye retornos, calzada, cunetas, box culvert, drenajes, [diez \(10\)](#) ejes viales trazados y el centro poblado, también se proyectó un escenario 1 construcción proyecto sin control y escenario 2 construcción proyecto con control. Los resultados generados se presentan en la carpeta Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Dis.

Finalmente, para el modelo de ruido ambiental se utilizó el software SoundPLAN Essential, dentro del área de influencia, se tomaron cinco (5) puntos de para la calibración del modelo (tres de CM1 a CM5). Estos correspondientes a [los tres \(3\)](#) puntos de monitoreo realizados. Para el desarrollo del modelo de ruido, se acoge un escenario 1, bajo las condiciones de medición, las cuales se caracterizaron por el flujo vehicular de las vías ingresadas, adicionalmente se incluye las fuentes asociadas a los ríos Mutatá y Caño Bijara o Riosucio y un escenario 2, que incluye las fuentes del escenario 1, más las asociadas a la construcción de la variante. Los resultados pueden evidenciarse en la carpeta Anexos_C5_1/ 5_1_10_Atmosfera/ Mod_Ruido.

5.1.10.1 Meteorología

Debido que no se cuenta con información completa disponible de estaciones meteorológicas del IDEAM dentro del área de influencia del proyecto, la información meteorológica fue adquirida de datos de re-análisis global, obtenidos directamente de internet, de una fuente confiable como es METEOBLUE, la cual cuenta con los modelos de clima o tiempo requeridos como son: CFRS, ERA 40, CAM, WRF, MM5, etc.

Como para este estudio no se cuenta con estaciones del IDEAM con series completas dentro del área de influencia de un radio de 5 km, resulta imposible realizar el proceso de re-análisis solicitado, donde se comparan los resultados obtenidos con los datos de algunas estaciones localizadas en la zona de estudio.

Todos estos requisitos solicitados en cuanto a modelos de clima y reanálisis son desarrollados por los datos de simulación meteorológica de METEOBLUE, para dar mayor claridad a lo anterior se puede visitar la siguiente dirección, donde se da una explicación detallada al respecto¹⁵⁶.

Las simulaciones de meteoblue pueden reemplazar las mediciones en la mayoría de las áreas. Una simulación será más precisa para un lugar dado, en comparación con las mediciones tomadas para 20 o más km de distancia (en las zonas de montaña, la simulación ya es más precisa que una medición para una distancia de 3 a 10 km). Lo anterior soporta la elección de trabajar con datos simulados en contraparte de los de las estaciones de IDEAM, por encontrarse algunas como la de datos de precipitación más cercana que constituye la de VILLARTEAGA [12015010], ubicada en zona rural del municipio de Mutatá,

¹⁵⁶ (METEOBLUE, 2023)

la cual se encuentra localizada a una distancia de aproximadamente 11.37 km del área de del proyecto.

La cual se encuentra relativamente cerca de la zona del proyecto, pero solo registra datos de la variable precipitación (ver Figura 5.151), pero se requiere de datos de variables adicionales como son temperatura, humedad relativa, radiación solar, brillo solar, nubosidad, etc. La ubicación de la estación VILLARTEAGA [12015010] con relación a la ubicación del proyecto se muestra en la [Figura 5.150](#).

Para la caracterización de las diferentes variables meteorológicas de interés se tuvo en cuenta los promedios climatológicos existentes para el periodo de años comprendido entre 2015 y 2024 (10 años), datos meteorológicos simulados suministrados por el proveedor de datos meteorológicos METEOBLUE, lo anterior debido a la ausencia de estaciones operadas por el IDEAM dentro del área de influencia del proyecto con series de datos completas de las variables requeridas para la modelación. Para el análisis de la meteorología se modelaron datos de la ubicación que se tabula en la Tabla 5.156 y se muestra en la [Figura 5.152](#).



Figura 5.150 Ubicación de la estación más próxima para descargar datos de precipitación del IDEAM.

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

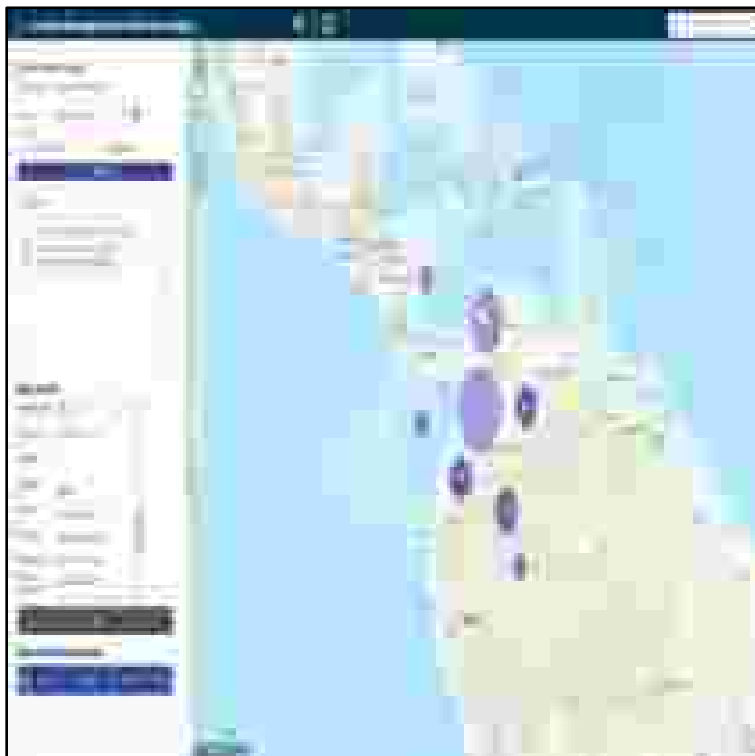


Figura 5.151 Fuente de datos meteorológicos IDEAM.

Fuente: Google Earth, 2025.

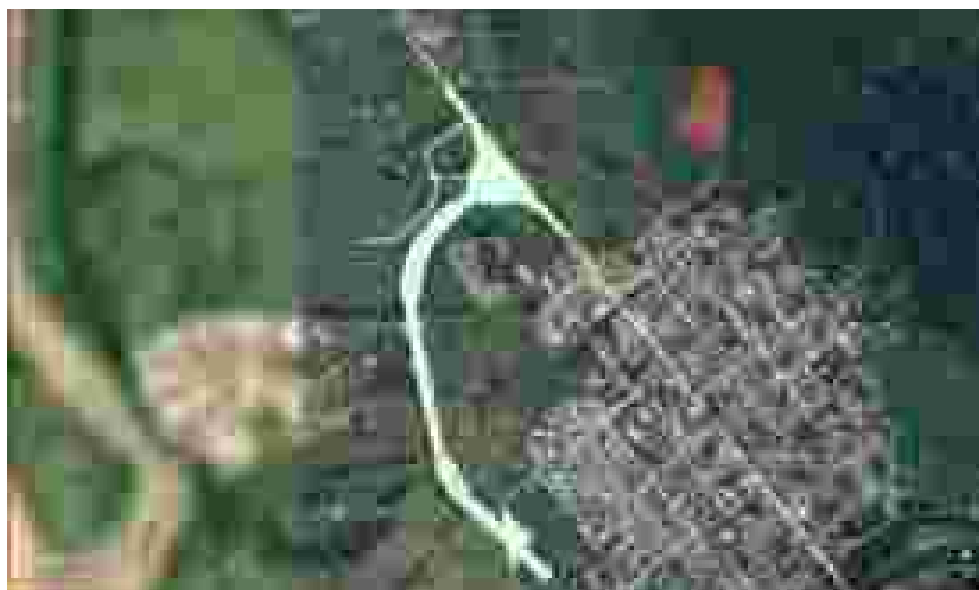


Figura 5.152 Ubicación del punto para el análisis meteorológico.

Fuente: Alternativa Ambiental, S.A.S., 2025.

Tabla 5.156 Ubicación del punto utilizado para descargar datos meteorológicos

ESTACIÓN	Coordenadas MAGNA-SIRGAS CTM 12 ORIGEN UNICO NACIONAL		Elevación (m)	m.s.n.m (m)
	X	Y		
P1-MET1 – METEOBLUE	4620215.363	2359629.768	10	121

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Cabe aclarar que debido a la ausencia de modelos que permitan realizar la predicción espacial de la precipitación, se debió consultar datos suministrados por el IDEAM para estaciones con información de precipitación (pluviométricas, pluviográficas o de climática ordinaria) para el periodo 2019-2024, con el fin de obtener el modelo de precipitación espacial. Mientras para los mapas espaciales de temperatura y presión se hace uso de modelos que relacionan la altura con dichas variables, como se explica más adelante en este documento.

5.1.10.1.1 Precipitación

La precipitación es un fenómeno meteorológico de gran importancia dentro del ciclo hídrico del cual dependen diversos procesos biológicos que se desarrollan en el planeta. Este factor está relacionado en buena medida con la presión atmosférica, la temperatura y de la humedad.

En la [Figura 5.153](#), se muestra el comportamiento mensual de la precipitación en la ubicación seleccionada, la cual presenta una homogeneidad en el comportamiento de las precipitaciones locales. Se observa que el régimen de lluvia, en el tiempo presenta una distribución unimodal, caracterizado por un periodo seco, entre los meses de diciembre marzo. Por otro lado, el periodo de lluvia se presenta entre los meses de abril a noviembre.

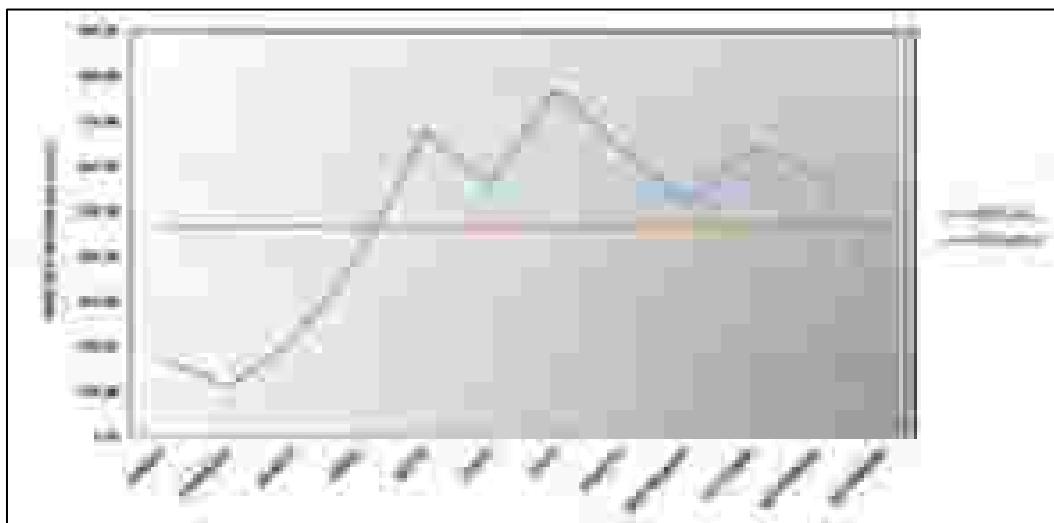


Figura 5.153 Precipitación media mensual.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para concluir la caracterización temporal, se consideró el parámetro del número de días con lluvia, información que también se obtuvo de los promedios climatológicos.

En la [Figura 5.154](#), se observa que los meses en los cuales se presentan mayores días con lluvia son los de abril a noviembre, aunque entre diciembre y enero también se presentan muchos días con lluvia, pero con la característica que son de menor intensidad. La menor cantidad de días con precipitación se presentó en febrero (mes de tiempo seco), con lo cual se constata cierta relación existente entre los días de lluvia con la cantidad de precipitación que se genera en la zona.

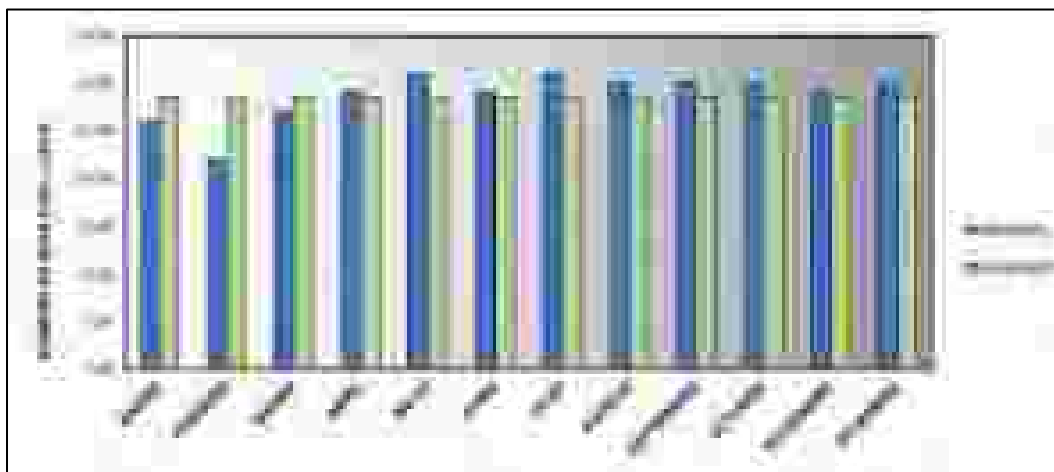


Figura 5.154 Número de días con lluvia.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para ver la variabilidad temporal de la precipitación en la zona, se debe tener en cuenta los diferentes factores tales como los biogeográficos, estacionales y las dinámicas atmosféricas locales y regionales a las cuales este fenómeno se encuentra asociado, ya que son fundamentales para la modelación de la precipitación. Para obtener resultados de esta variable se realizó una representación mensual de los diez (10) años bajo estudio, y los acumulados mensuales se muestran en la [Figura 5.155](#).

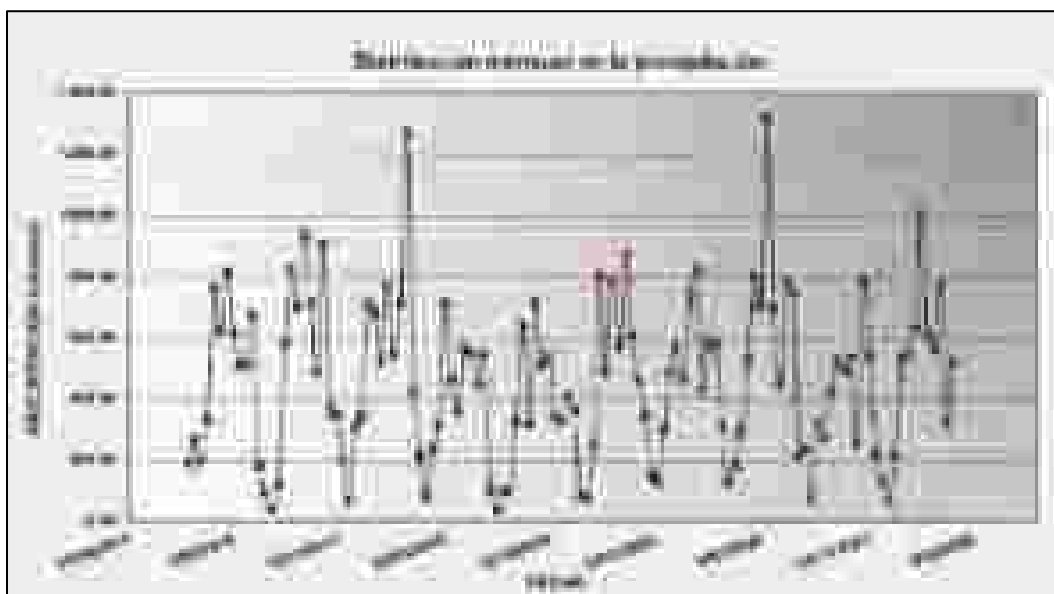


Figura 5.155 Distribución temporal de la precipitación mensual en [mm/mes].

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

A. Distribución espacial de la precipitación

Con el fin de poder determinar la distribución espacial de la precipitación en cercanías del proyecto, se consultaron los niveles de precipitación anual en la plataforma de Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos del IDEAM, y adicionalmente, se adiciono el punto de datos adquiridos de METEOBLUE, y la información de las estaciones se tabulan en la Tabla 5.157, mientras en la Figura 5.156 se muestra la salida grafica resultante de la interpolación espacial aplicando el método de kriging. Los valores de precipitación se promediaron para los años 2019 a 2024.

Tabla 5.157 Distribución espacial de estaciones pluviométricas

Estación	ID	CTM12 ORIGEN UNICO NACIONAL		P (mm/año)	Periodo de registro de datos
		X	Y		
METEOBLUE [MET1]	P1	4620215,36	2359629,77	5508.2	2019-2024
VILLARTEAGA [12015010]	P2	4615168,16	2369966,49	5899.4	2019-2022
FUEMIA [11110030]	P3	4640625,39	2317004,25	1416.4	2019-2024
MUSINGA AUT [11115040]	P4	4653687.53	2306452.79	2088.3	2019-2024
NORMAL SANTA TERESA AUT [11110010]	P5	4645985.05	2308123.18	3286.6	2019-2024
SANTA RITA [26220110]	P6	4711186.57	2368105.34	3023.3	2019-2024

Fuente: IDEAM y METEOBLUE., 2025

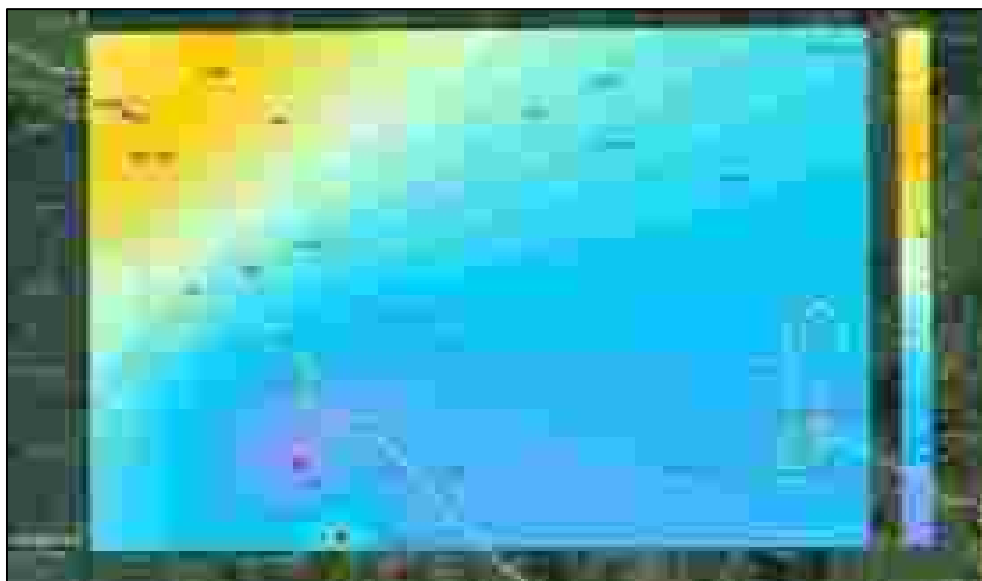


Figura 5.156 Distribución espacial de la precipitación anual en [mm/año].

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.1.2 Temperatura media anual

La temperatura es un factor climatológico de gran importancia que permite conocer la energía calórica presente en un lugar determinado, de igual manera, ésta posibilita la

caracterización de muchos factores hidrológicos de una determinada región. Referente a la temperatura atmosférica en el trópico, como bien es conocido, se encuentra fuertemente influenciada por la altura sobre el nivel del mar, además ésta se ve alterada por los efectos de la orografía y por los vientos alisios del nordeste y el sureste.

A fin de caracterizar esta variable y su distribución tanto temporal como espacial en la zona de estudio de la explotación, se emplean los promedios de temperatura. En la Figura 5.157, se presenta los valores de la temperatura media, máxima y mínima mensual multianual.

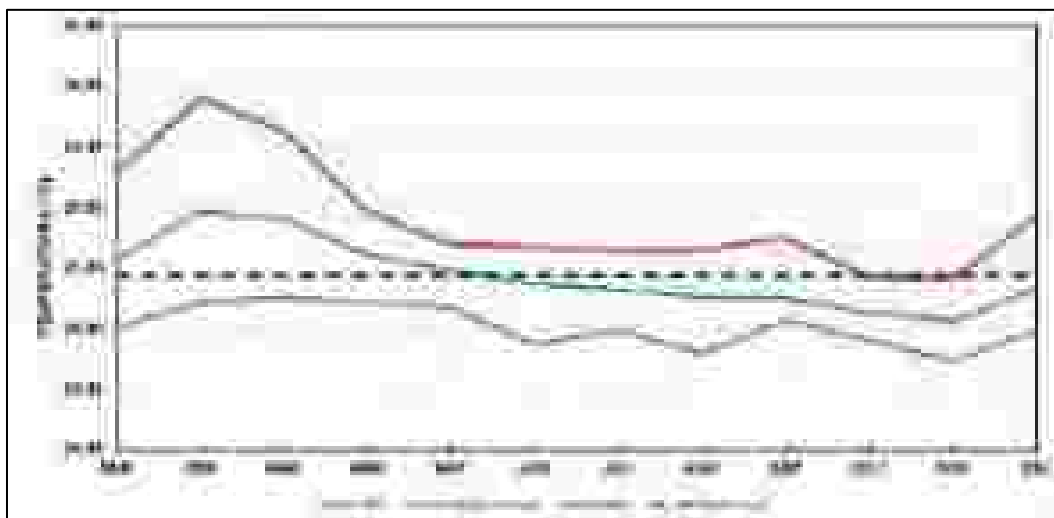


Figura 5.157 Temperatura media, máxima y mínima mensual multianual.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Con el fin de identificar la variación temporal de la temperatura, dentro del área de influencia del proyecto, se estima el promedio mensual del periodo de estudio y el resultado se muestra en la Figura 5.158, donde es posible apreciar el comportamiento de la variable.

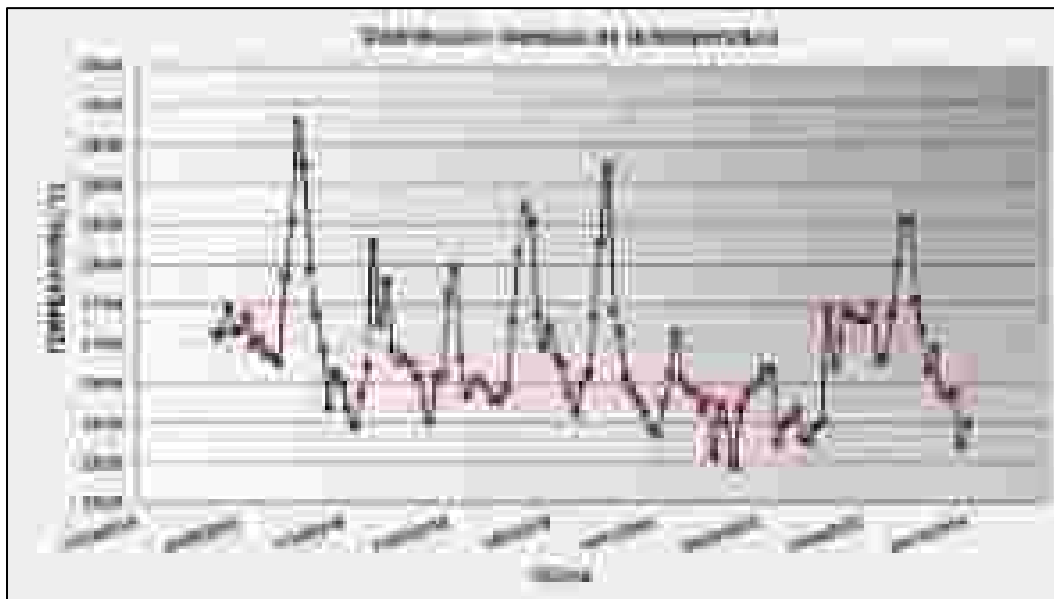


Figura 5.158 Distribución temporal de la temperatura media mensual.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, para conocer la distribución espacial de la temperatura media, a partir de los valores medios multianuales registrados en la zona de influencia del proyecto, se consideró la hipótesis que la temperatura en el trópico depende de la variación altitudinal, para este caso se utiliza el método de regionalización propuesto por Cenicafé¹⁵⁷, el cual describe en buena medida el comportamiento espacial de la temperatura media multianual en las diferentes regiones del país. Dicha regionalización fue elaborada para las regiones del país tomando como información básica los registros de temperatura media mensual del aire en superficie de 1002 estaciones. Los resultados obtenidos permitieron obtener las relaciones para las regiones biogeográficas en las cuales se subdivide el país. La zona de extracción se encuentra ubicada en la región andina, por lo cual la ecuación de regionalización para la temperatura que se usó es la siguiente:

$$T = 29.42 - 0.0061 * H$$

Donde, T es la temperatura media anual en [°C] y H es la altura sobre el nivel del mar en [m]. Relacionando la ecuación anterior con el relieve de la zona de estudio se construyó el mapa de la distribución espacial de la temperatura media multianual (ver Figura 5.159) donde es posible apreciar el comportamiento de la variable.

¹⁵⁷ (Chávez y Jaramillo, 1998)

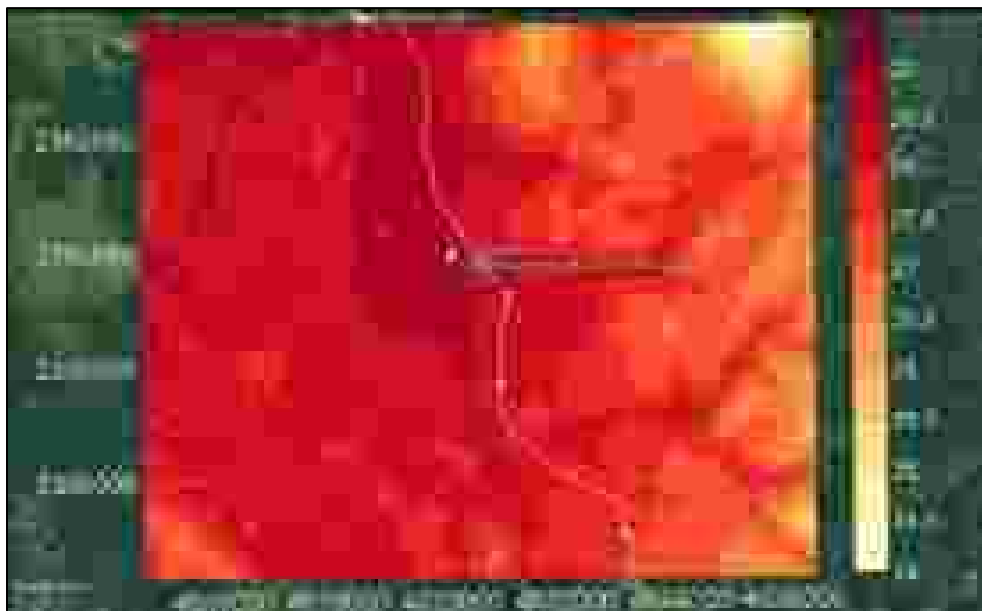


Figura 5.159 Distribución de la temperatura media multianual a partir de ecuación de Cenicafé

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

De la Figura 5.159, se puede concluir que la temperatura media multianual tiene una variabilidad espacial que está relacionada de manera directa con el cambio del relieve, lo cual concuerda con el decrecimiento de la temperatura con la altura sobre el nivel del mar en condiciones adiabáticas. De igual manera al analizar el área de influencia del proyecto, se puede apreciar que la distribución de la temperatura presenta un máximo de 28.88°C y un mínimo de 24.09°C, con un promedio multianual de 27.88°C.

5.1.10.1.3 Evapotranspiración potencial (ETP)

La evapotranspiración es la acción conjunta de factores físicos (evaporación) y biológicos (transpiración), que representa la cantidad de agua que se entrega a la atmósfera en forma de vapor. Esta variable depende en gran medida de otros factores climáticos como la radiación, la humedad relativa del aire, el viento, de igual manera depende de factores edáficos como la composición y estructura del suelo, y de factores netamente biológicos como la cobertura vegetal. Por su parte la Evapotranspiración Potencial (ETP) hace referencia a la evapotranspiración que se produciría con la humedad del suelo y la cobertura vegetal en condiciones óptimas y depende fundamentalmente de la temperatura.

Para conocer la viabilidad temporal de la ETP en el área de influencia se usaron los promedios climatológicos, datos que dan un acercamiento al comportamiento de la variable, ya que al estar ubicadas dentro del área de influencia presentan condiciones de humedad, cobertura vegetal y temperatura replicable y extrapolables al resto del área de interés. Los datos obtenidos, se muestran en la [Figura 5.160](#).

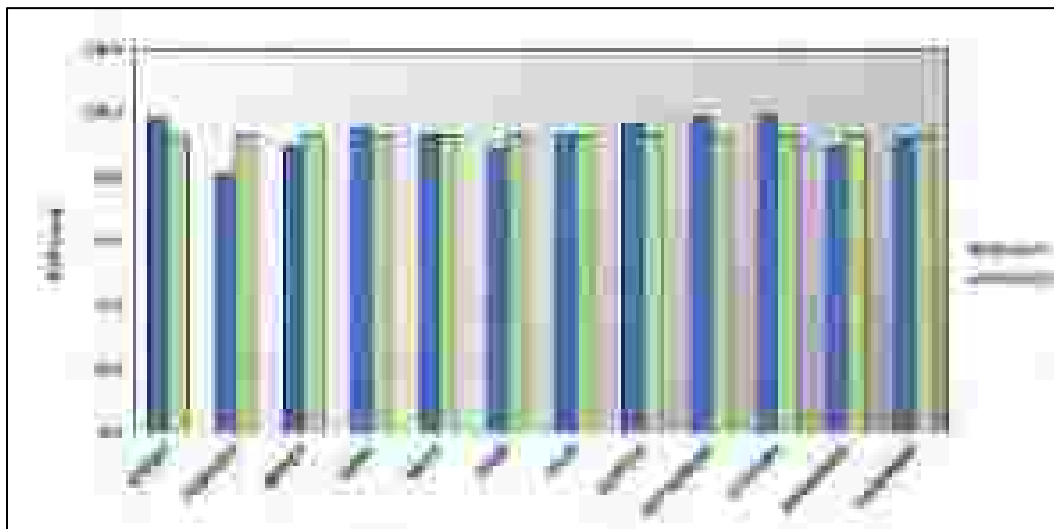


Figura 5.160 ETP mensual para la ubicación seleccionada.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025

La evapotranspiración potencial media anual es de 1117.7 mm y la media mensual es de 93.1 mm, donde se presenta un máximo de 99.5 en el mes de octubre, el valor mínimo se presenta en el mes de febrero con un valor de 81.2 mm.

Para conocer la variabilidad temporal del parámetro en la zona de estudio, de igual manera que en los parámetros anteriores se tuvieron en cuenta los promedios mensuales, y se generó la gráfica que se muestra en la Figura 5.161.

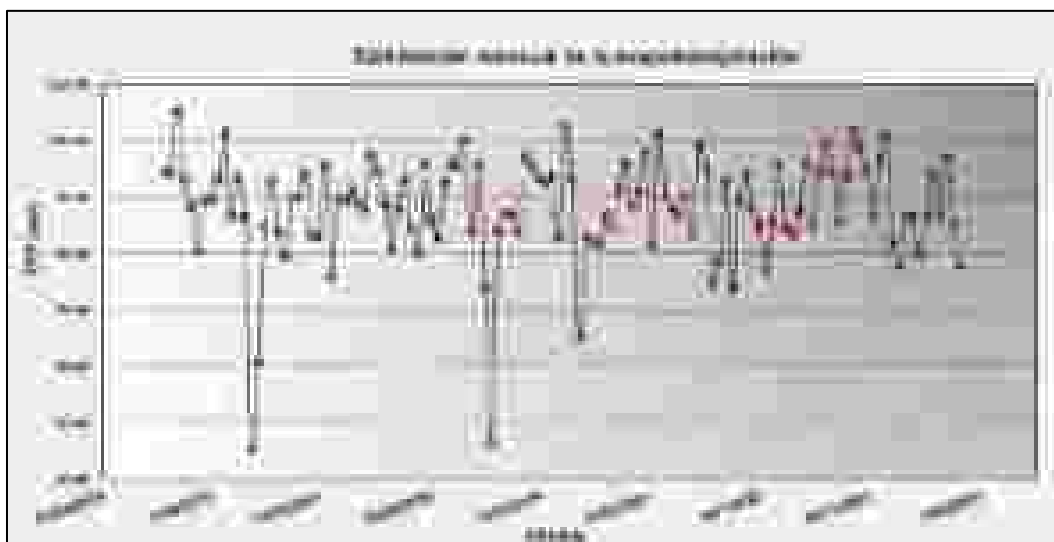


Figura 5.161 Variación temporal de la evapotranspiración potencial mensual.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

La evapotranspiración potencial mensual en el área de influencia presenta un máximo mensual de 110.19 mm y un mínimo de 50.44 mm.

5.1.10.1.4 Humedad relativa

Esta variable hace referencia a la relación porcentual de vapor de agua de un volumen de aire determinado a una temperatura específica y el porcentaje que tendría si estuviese saturado. Esta variable depende de la presión atmosférica y de la temperatura.

Los valores que para esta variable se tienen en el área de estudio del proyecto, para la ubicación modelada a partir de los datos descargados del proveedor de datos meteorológicos METEOBLUE para el periodo de 2015 a 2024, se muestran en la [Figura 5.162](#), que servirán para caracterizar la variabilidad temporal de la humedad relativa en el área de influencia.

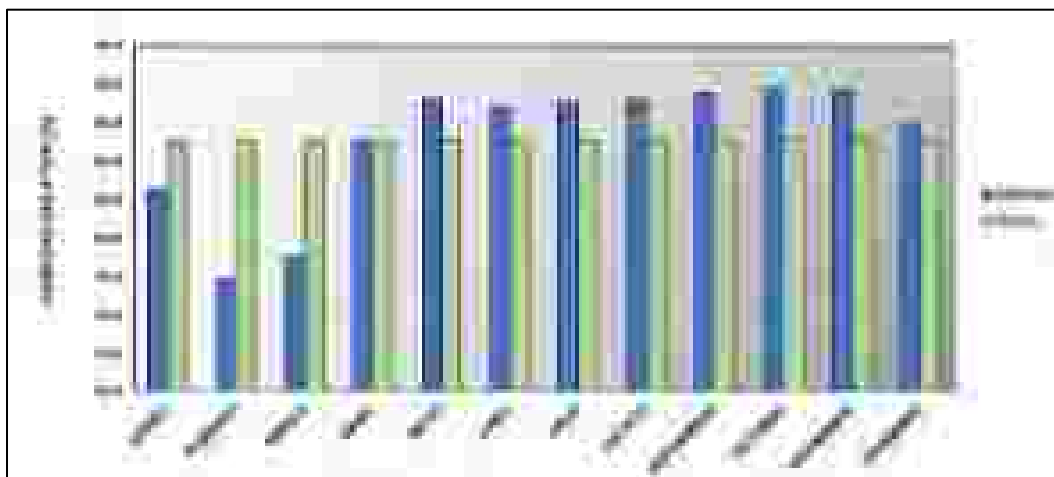


Figura 5.162 Variación mensual de la humedad relativa

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

El valor máximo para este parámetro climático se registró en el mes de octubre con un valor de 87,8% y el valor mínimo en febrero con 77,9%, la media mensual es del 85.2%.

Para conocer los valores de la humedad relativa en toda el área de influencia del proyecto (Variabilidad temporal) se estimaron los promedios mensuales de 2015 a 2024. La gráfica obtenida se muestra en la Figura 5.163.

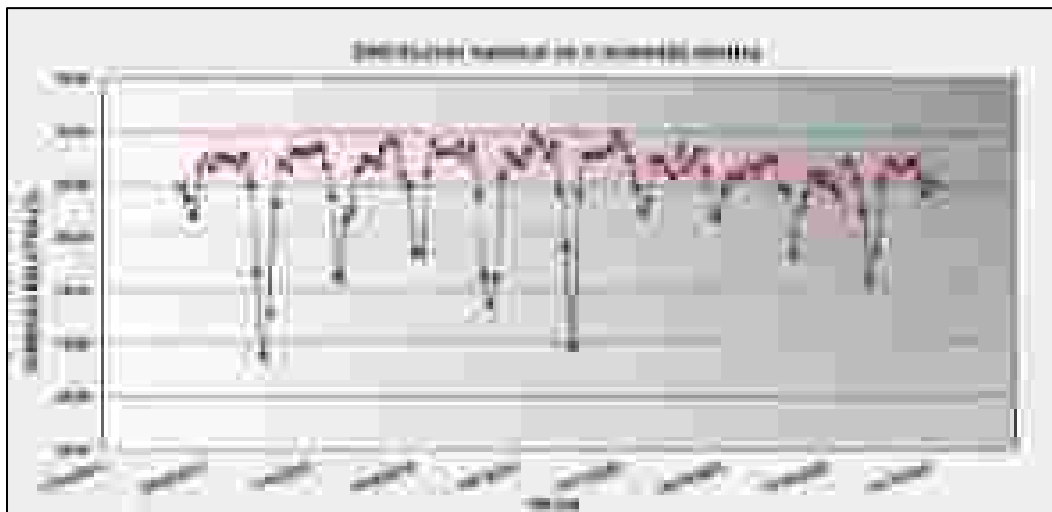


Figura 5.163 Variación temporal mensual de la humedad relativa
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.1.5 Brillo solar

El brillo solar se define como el número de horas de incidencia de luz solar sobre la superficie terrestre. Esta variable afecta directamente la temperatura del aire y, por lo tanto, cumple un papel fundamental en los procesos de dispersión de los contaminantes.

Para la caracterización temporal de esta variable dentro del área de influencia del proyecto se recurrió a los promedios climatológicos de 2015 – 2024 de la ubicación P1-MET1, la cual se encuentra en el área de influencia del proyecto, los resultados se muestran en la [Figura 5.164](#), donde se observa que esta variable presenta una distribución a lo largo del año variable, con meses de mayor insolación que la media multianual entre los meses de diciembre enero y marzo a abril, y dos periodos con menor horas de insolación que la media multianual de mayo a junio y de septiembre a diciembre, coincidiendo con el periodos de mayor nivel de precipitación.

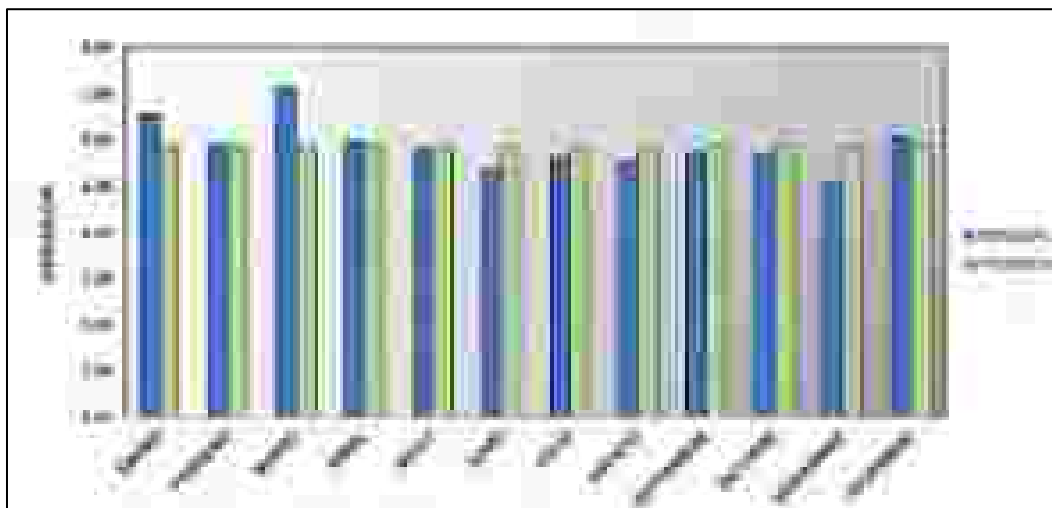


Figura 5.164 Variación media diaria mensual del brillo solar en la ubicación P1-MET1
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

A partir de los datos de los promedios climatológicos de METEOBLUE de 2015-2024, se estimó el promedio temporal diario mensual de la variable brillo solar, y los resultados obtenidos se muestran en la [Figura 5.165](#).

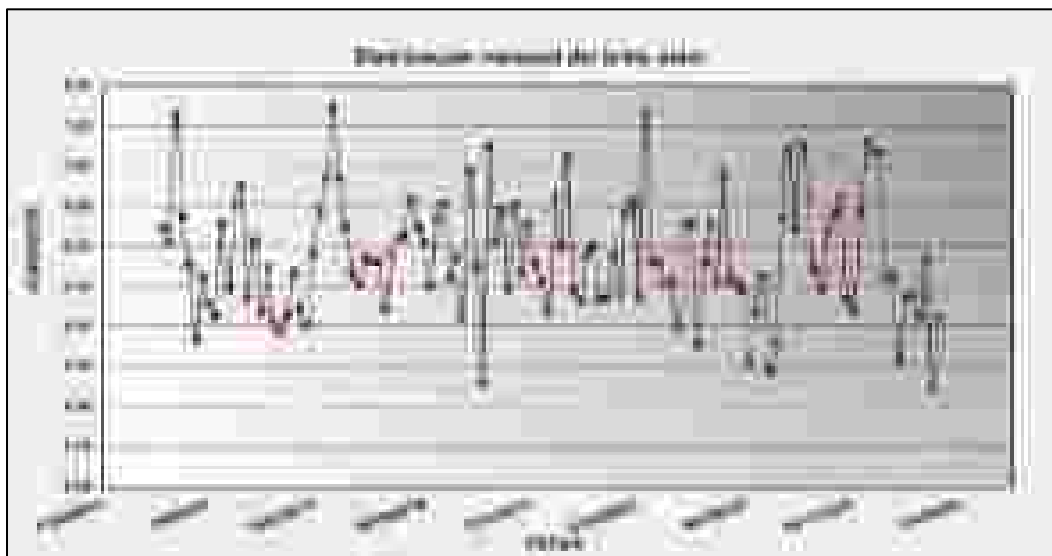


Figura 5.165 Variación temporal mensual del brillo solar.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Se puede apreciar que el brillo solar en el área de influencia modelada presenta un máximo de 7.73 horas y un mínimo de 4.22 horas, con un promedio de 5.88 horas.

5.1.10.1.6 Presión atmosférica (Pbar)

La presión atmosférica es la fuerza por unidad de superficie que ejerce el aire que forma la atmósfera sobre la superficie terrestre. La presión atmosférica en un lugar determinado experimenta variaciones asociadas con los cambios meteorológicos. Por otra parte, en un lugar determinado, la presión atmosférica disminuye con la altitud, como se ha dicho.

Para la caracterización temporal de esta variable dentro del área de influencia del proyecto se recurrió a los promedios climatológicos de 2015 – 2024 de la ubicación P1-MET1, la cual se encuentra en el área de influencia del proyecto, los resultados se muestran en la [Figura 5.166](#), donde se muestra que esta variable presenta una distribución a lo largo del año tipo unimodal, con una temporada de menor presión multianual entre los meses de noviembre a abril, mientras la temporada con mayor presión media multianual es de mayo a octubre.

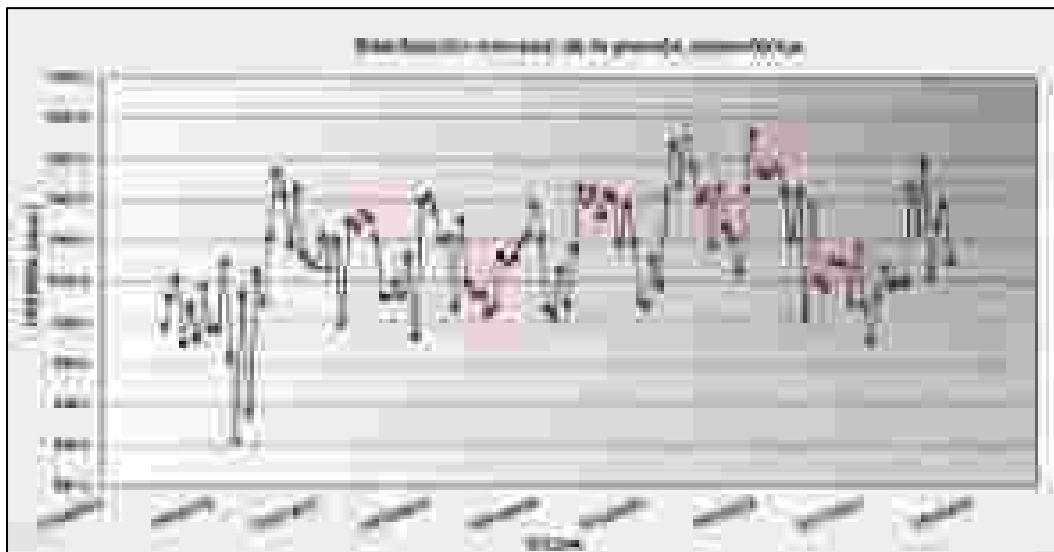


Figura 5.166 Variación media mensual de la presión atmosférica

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, para conocer la distribución espacial de la presión, a partir de los valores medios multianuales registrados en las ubicaciones, se sabe que la presión depende de la variación altitudinal, para este caso se utiliza la siguiente ecuación.

$$P = P_0 * \left(1 - \alpha * \frac{z}{(T_0 + z/k)} \right)^{\left(\frac{g*M}{\alpha*R} \right)_{158}}$$

Donde:

P₀: presión atmosférica a 0 m.s.n.m = 1013.25 mbar

T₀: Constante = 293.15 K

z: es la altura sobre el nivel del mar en [m]

α: gradiente adiabático = 0.00982 K/m

g: es la constante de aceleración gravitacional = 9.80665 m/s²

M: peso molecular = 0.02897 kg/gmol

R: es la constante de los gases ideales = 8.314472 J/(gmol*K)

k: constante = 130 K/m.

Relacionando la ecuación anterior con el relieve de la zona de estudio se construyó el mapa de la distribución espacial de la presión media multianual (ver [Figura 5.167](#)) donde es posible apreciar el comportamiento de la variable.

¹⁵⁸ (Monografías, 2024)



Figura 5.167 Variación de la presión atmosférica en la zona de estudio.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Se puede apreciar que la presión atmosférica en el área de influencia modelada presenta un máximo de 1002.9 mbar y un mínimo de 914.6 mbar, con un promedio de 983.9 mbar. Como se puede observar la variación de la presión es media indicando un terreno con bajas diferencias de altura, equivalente a una topografía predominantemente plana o con bajas pendientes.

5.1.10.1.7 Nubosidad

La nubosidad es la fracción de cielo cubierto con nubes, en un lugar en particular. Según las normas meteorológicas actuales, la nubosidad se expresa en octas, u octavos de la bóveda celeste. Ésta es dividida en 8 partes por el operador, quien evalúa entonces el número de esas partes que están cubiertas por las nubes. De este modo se puede estimar el rango de visibilidad del observador.

Para la caracterización temporal de esta variable dentro del área de influencia del proyecto se recurrió a los promedios climatológicos de 2015 – 2024 de la ubicación P1-MET1, la cual se encuentra en el área de influencia del proyecto, los resultados se muestran en la [Figura 5.168](#), [Figura 5.169](#) y [Figura 5.170](#) para los periodos diario, mensual y anual.

En la [Figura 5.169](#), se muestra que esta variable presenta una distribución a lo largo del año tipo unimodal, con temporada de mayor nubosidad entre los meses de abril a noviembre, mientras la temporada con menor nubosidad media multianual se ubican entre los meses de diciembre a marzo.

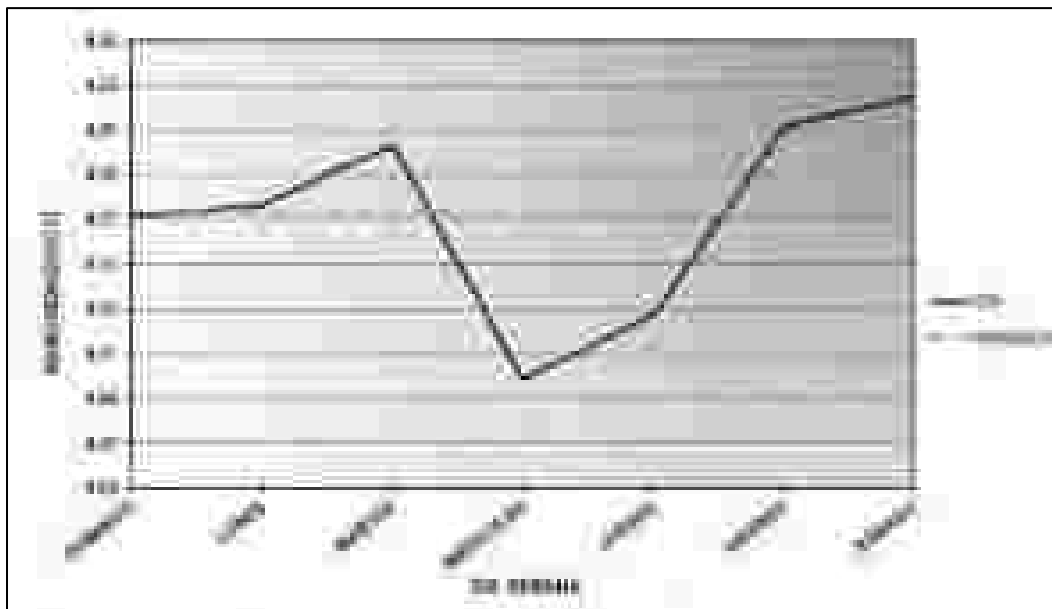


Figura 5.168 Variación media diaria de la nubosidad

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

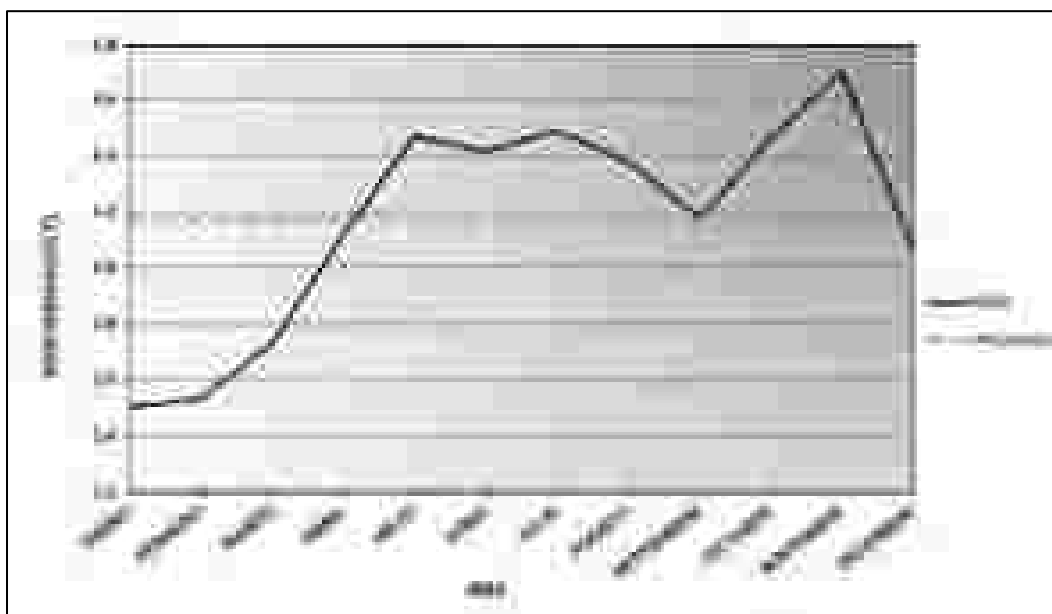


Figura 5.169 Variación media mensual de la nubosidad

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

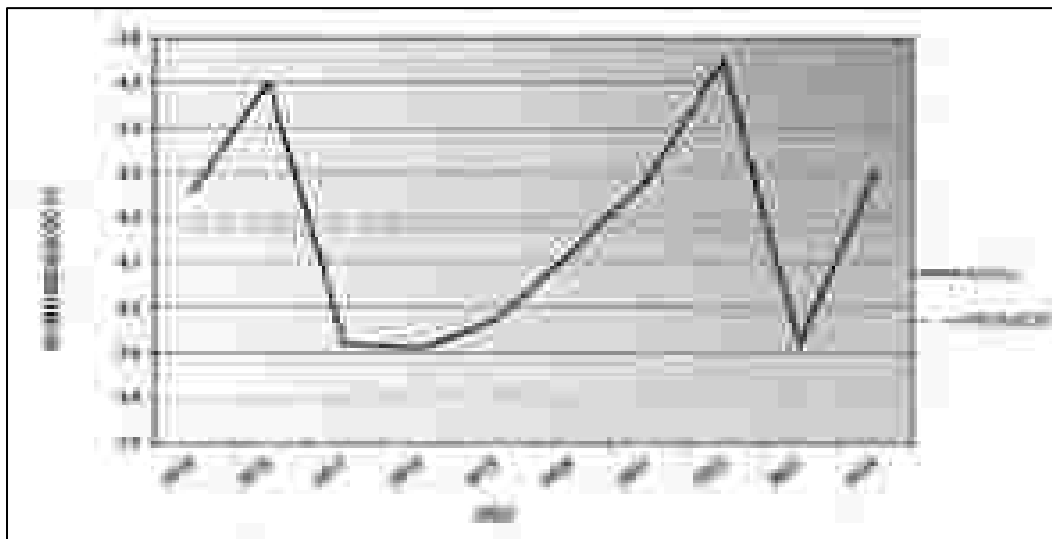


Figura 5.170 Variación media anual de la nubosidad

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

De la [Figura 5.168](#), se observa que en promedio la nubosidad no presenta gran variación entre los días de la semana, estando en el rango entre 4.10 y 4.23, lo cual evidencia una variación del orden del 3%, lo que permite afirmar que el nivel de nubosidad no depende del día de la semana y si del periodo del año. En cuanto al promedio anual de nubosidad mostrado en la [Figura 5.170](#), se puede ver como este presenta un comportamiento aleatorio entre ascensos y descensos presentado su valor mínimo el año 2018, mientras el valor máximo se da en el año 2022.

5.1.10.1.8 Radiación solar

La radiación solar es la energía que emite el Sol en el espacio interplanetario. La radiación solar que llega a la Tierra se cuantifica mediante la irradiación solar, que es la energía recibida por unidad de superficie. Esta variable afecta directamente la temperatura del aire y, por lo tanto, cumple un papel fundamental en los procesos de dispersión de los contaminantes.

Para la caracterización temporal de esta variable dentro del área de influencia del proyecto se recurrió a los promedios climatológicos de 2015 – 2024 de la ubicación P1-MET1, la cual se encuentra en el área de influencia del proyecto, los resultados se muestran en la [Figura 5.171](#), donde se muestra que esta variable presenta una distribución a lo largo del año tipo unimodal, con una temporada de mayor irradiación multianual entre los meses de enero a abril y las de menor irradiación que la media multianual entre mayo a diciembre, presentándose los niveles mínimos en los meses con mayores niveles de precipitación y nubosidad.

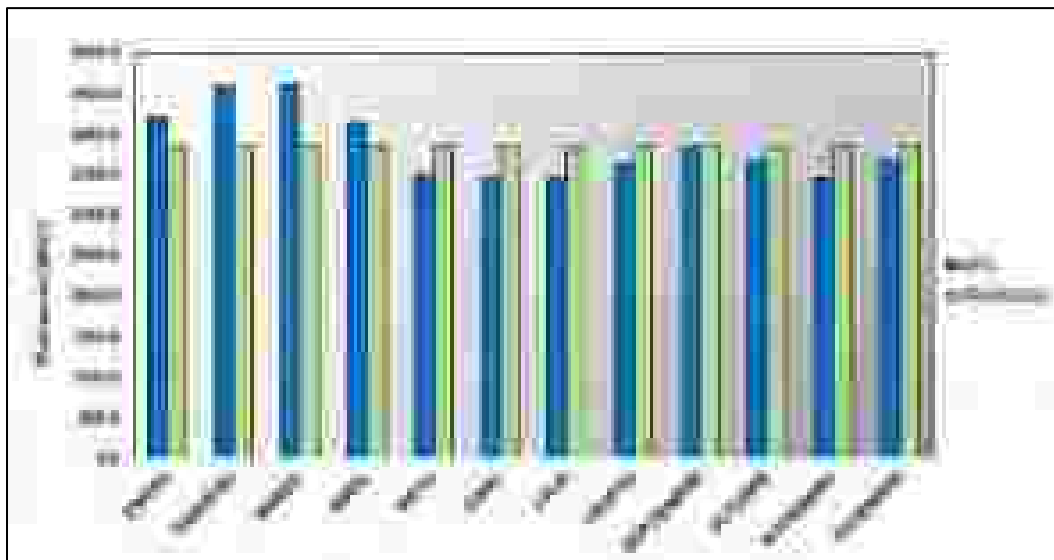


Figura 5.171 Variación media diaria mensual de la radiación solar en la ubicación P1-MET1
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

A partir de los datos de los promedios climatológicos de METEOBLUE de 2014-2023, se estimó el promedio temporal diario mensual de la variable radiación solar, y los resultados obtenidos se muestran en la [Figura 5.172](#).

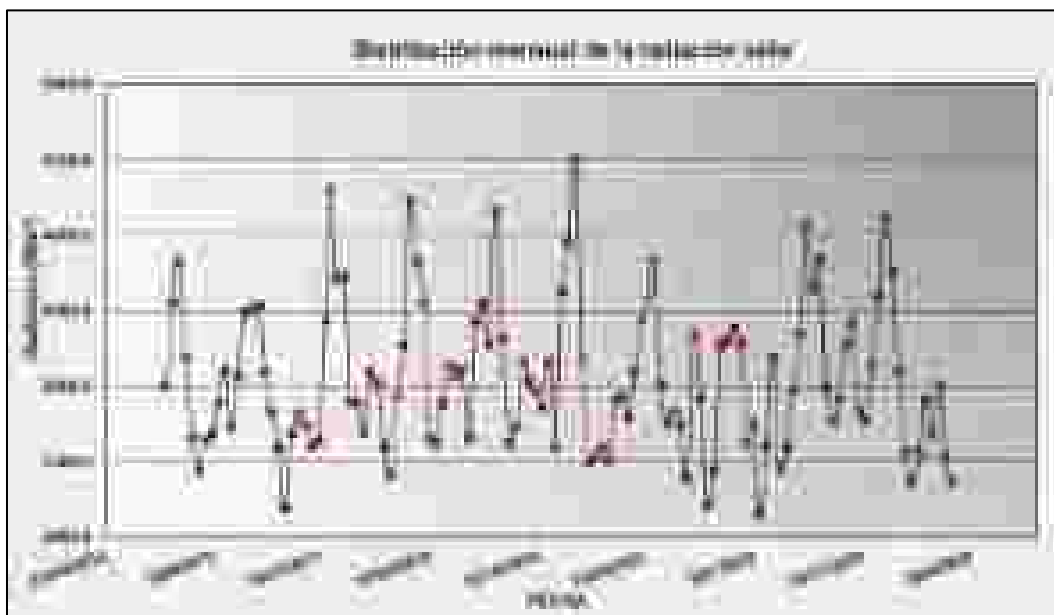


Figura 5.172 Variación temporal mensual de la radiación solar (W/m²-día).
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la [Figura 5.173](#) se muestra el comportamiento horario de la radiación solar, donde se puede evidenciar como esta variable presenta un comportamiento tipo campana,

donde los mayores niveles se presentan en el periodo diurno específicamente entre las 9 y 16 horas.

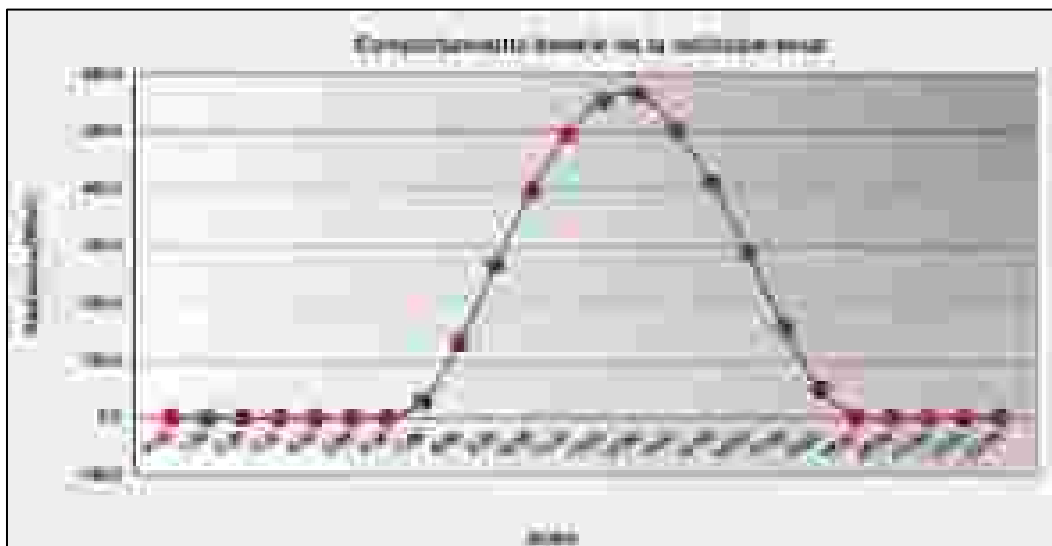


Figura 5.173 Variación horaria de la radiación solar.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.1.9 Relación entre temperatura y precipitación

En la [Figura 5.174](#), se muestra la relación mensual entre las variables de temperatura versus precipitación, donde se puede apreciar como para los meses de diciembre a febrero se presentan los niveles más altos de temperatura coincidiendo con los niveles más bajos de precipitación mientras en los restantes meses del año el comportamiento es contrario, lo que permite inferir a que a medida que incrementan las lluvias las temperaturas tienden a disminuir y viceversa.

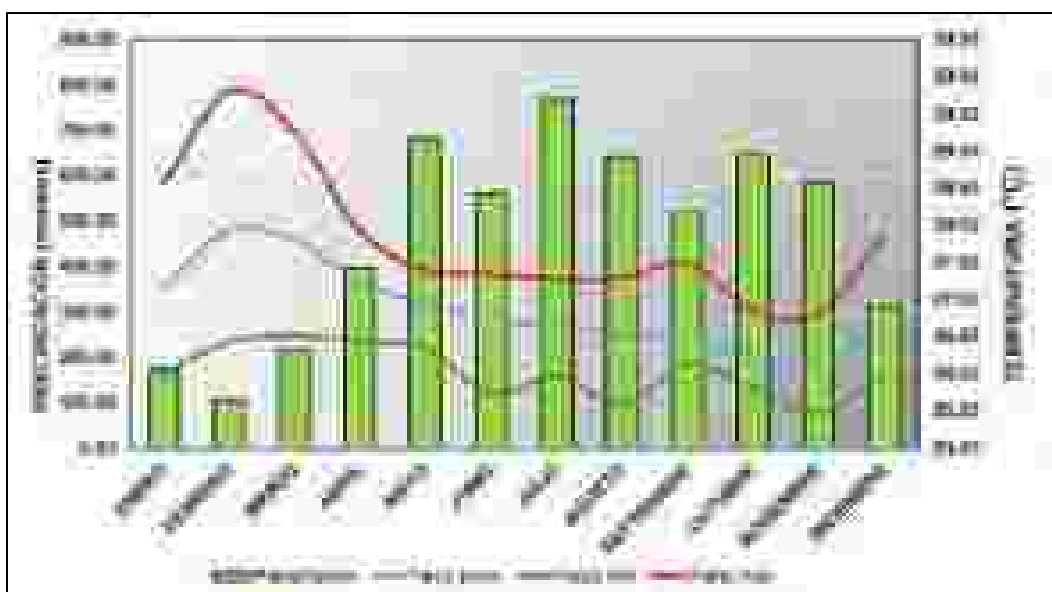


Figura 5.174 Relación entre temperatura y precipitación

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.1.10 Rosa de vientos

En la [Figura 5.175](#) y [Figura 5.176](#), se muestra la rosa de vientos para la zona de influencia del proyecto para el periodo completo de 2015 a 2024.



Figura 5.175 Rosa de vientos del sector del proyecto, global.
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.176 Geoposición de la Rosa de vientos del proyecto Variante Mutatá
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para el sitio se registraron velocidades entre los 0.5 y 5.7 m/s, con un porcentaje de vientos en calma del 10.63%, el vector resultante indica que los vientos durante el periodo evaluado predominan "Blowing from" de la dirección S, SSE y SE (aunque también hay aportes significativos de las direcciones ESE, WSW y WSW), para un promedio de velocidad del viento de 1.30 m/s.

En la [Figura 5.177](#), se muestra la distribución de frecuencias de velocidad, donde se puede ver que el mayor tiempo la velocidad de los vientos se encuentra entre 0.6 m/s y 3.6 m/s con una participación de 91,9%, y que los vientos arriba de 5.7 m/s son nulos.

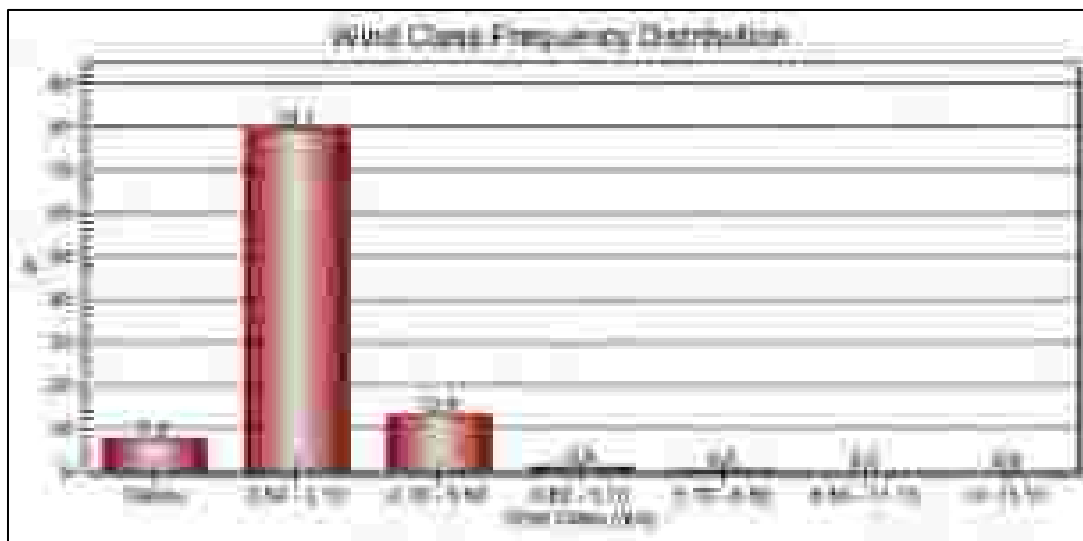


Figura 5.177 Diagrama de frecuencia de distribución de las clases de velocidad
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la [Figura 5.178](#) y [Figura 5.179](#), se muestran la rosa de vientos para los periodos diurno y nocturno respectivamente para el periodo acumulado de 2015 a 2024, como se puede apreciar las direcciones predominantes son vientos viniendo ("blowing from") de la dirección S (máxima frecuencia) en periodo diurno, mientras en periodo nocturno es la dirección SSE. Al comparar el periodo diurno con respecto al nocturno se encuentra, que las mayores velocidades se presentan en la rosa de vientos para el periodo diurno con valor promedio de 1.39 m/s, valor que supera en un 15.8% el valor promedio del periodo nocturno (comparadas con este último).



Figura 5.178 Rosa de vientos del sector del proyecto, periodo diurno
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

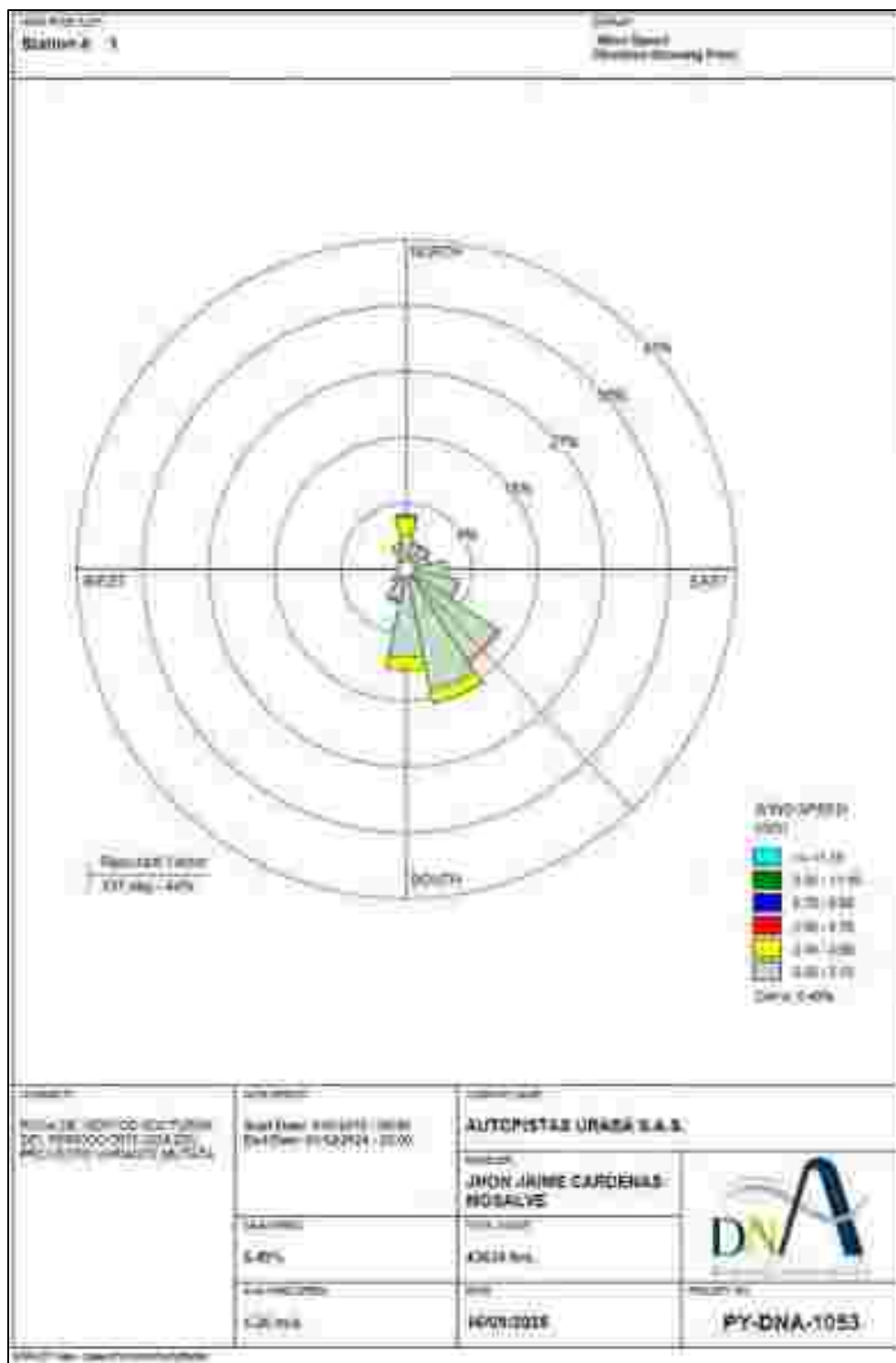


Figura 5.179 Rosa de vientos del sector del proyecto, periodo nocturno
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Figura 5.180, Figura 5.181 y Figura 5.182 se muestran las rosas de vientos mensuales para el periodo total de 2015 a 2024. Al analizar las diferentes rosas para los 12 meses, se observa que para las rosas de los meses de enero a abril el comportamiento es similar con direcciones predominantes N y S mientras los meses restantes, presentan unas similares con direcciones distribuidas de la dirección SW hasta la SE en sentido contrario a las manecillas del reloj.

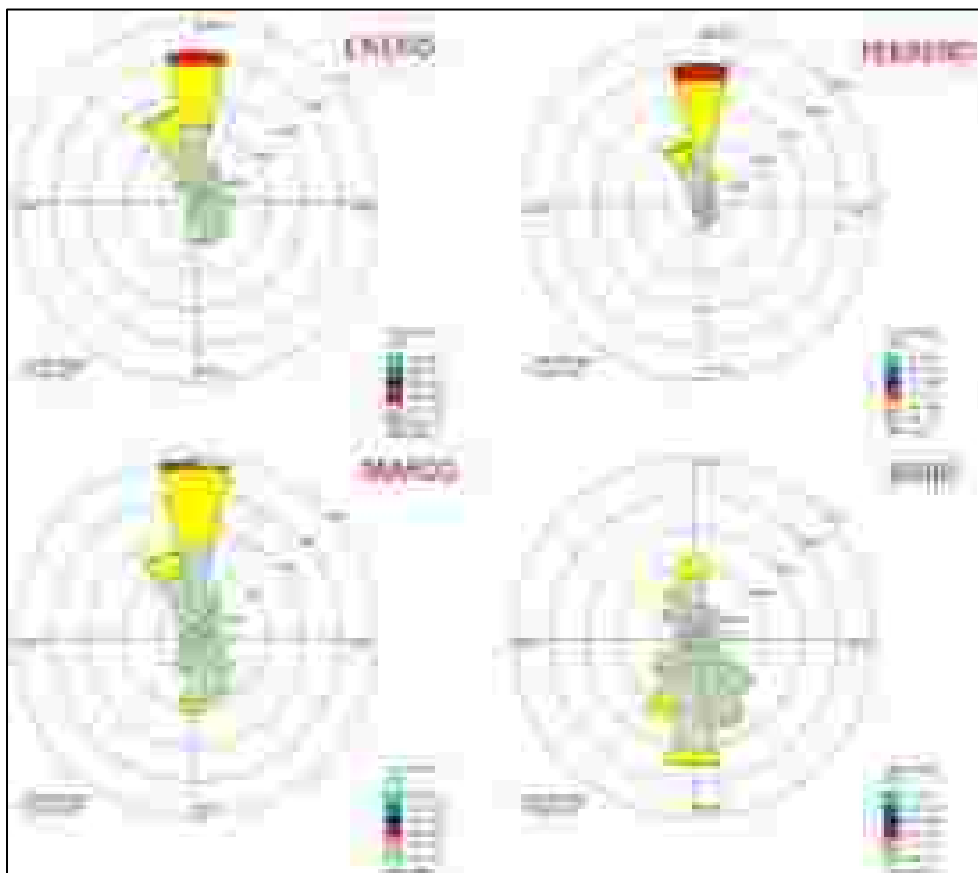


Figura 5.180 Rosa de vientos del sector del proyecto, para el primer cuatrimestre

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

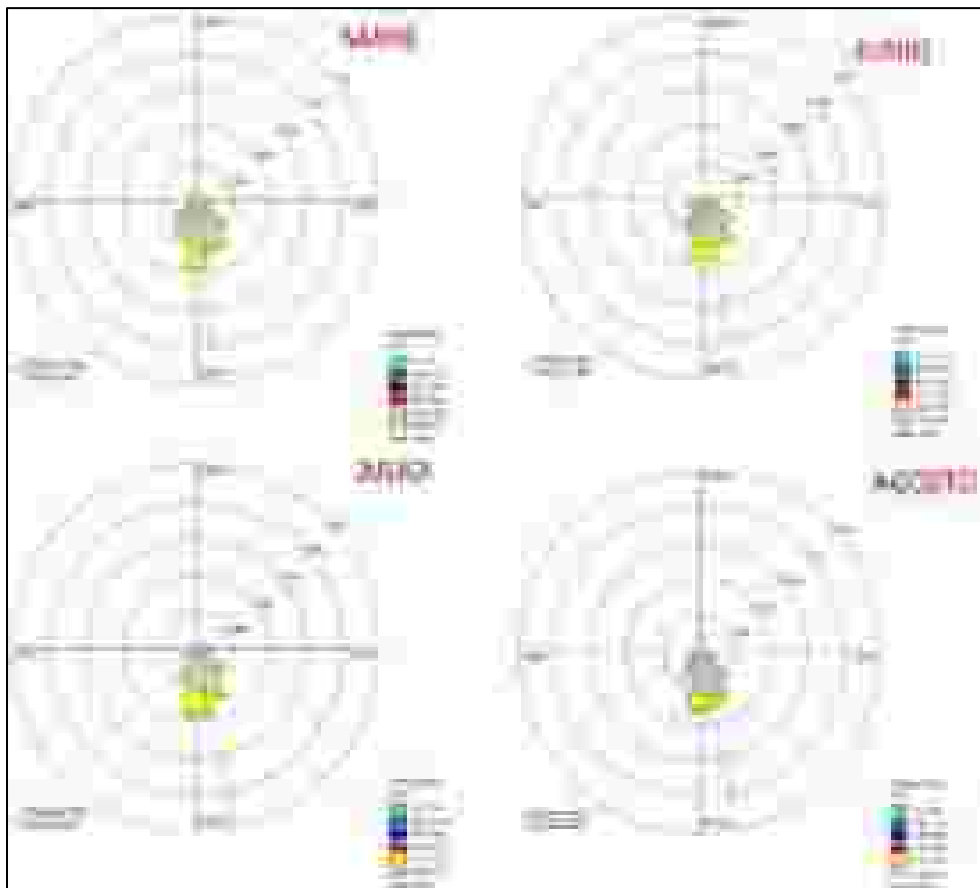


Figura 5.181 Rosa de vientos del sector del proyecto, para el segundo cuatrimestre
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

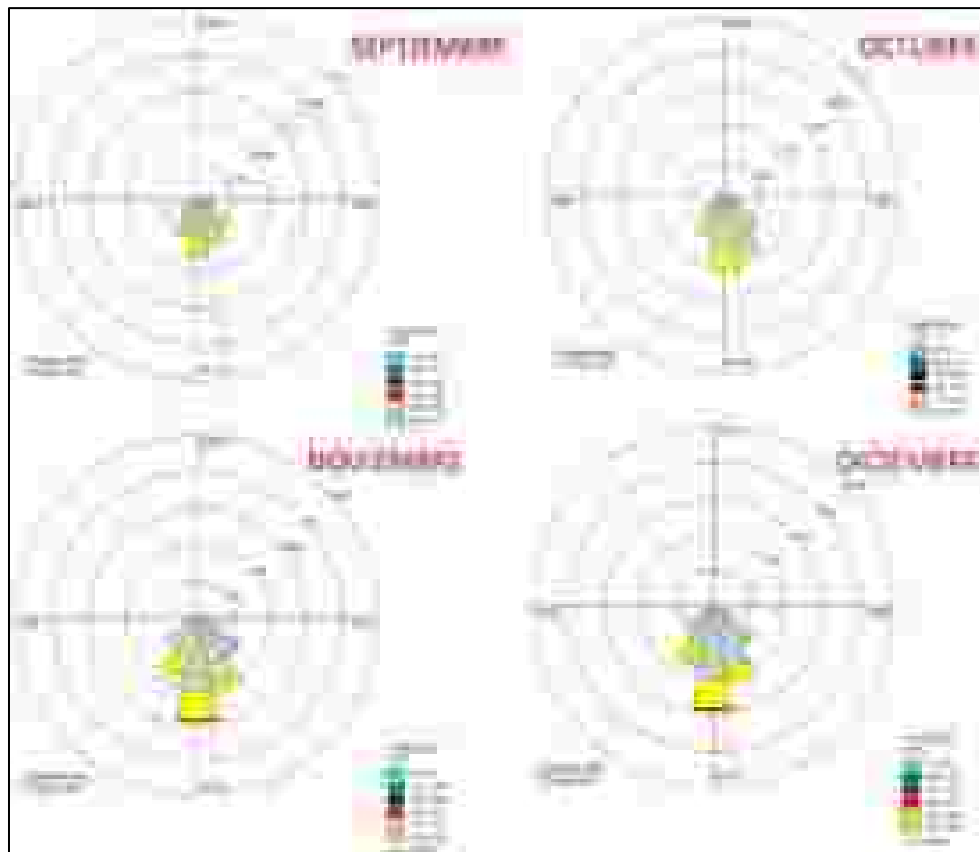


Figura 5.182 Rosa de vientos del sector del proyecto, para el tercer cuatrimestre
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.2 Validación de los datos meteorológicos adquiridos

Tomando como referencia los resultados de medición en la zona de estudio, el análisis de validación se realiza para las variables meteorológicas precipitación (no se encontraron series de datos para ninguna otra variable en la estación del IDEAM consultada, para reconstruir las series mensuales) con datos mensuales para el periodo 2019-2024, la estación de análisis tomada, corresponde a la operada por el IDEAM e identificada como VILLARTEAGA [12015010], cuya ubicación en el sistema de coordenadas en el Sistema Origen Único Nacional CTM12 es E4615168.157; N2369966.487.

5.1.10.2.1 Estadísticos de análisis para la validación

Con el fin de determinar la validación de los datos simulados versus los datos medidos, se determinan los siguientes índices estadísticos del análisis¹⁵⁹

Coefficiente de correlación (r):

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (V_{med,i} - \bar{V}_{med})(V_{simul,i} - \bar{V}_{simul})}{\sigma_{V_{med}} \sigma_{V_{simul}}}$$

¹⁵⁹ (Air quality model performance evaluation, Meteorol. Atmos. Phys., vol. 87, 2004)

Error cuadrático promedio normalizado (NMSE):

$$NMSE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (V_{med,i} - V_{simul,i})^2}{\bar{V}_{med} * \bar{V}_{simul}}$$

Sesgo fraccional (FB):

$$FB = 2 * \frac{(\bar{V}_{med} - \bar{V}_{simul})}{(\bar{V}_{med} + \bar{V}_{simul})}$$

Factor de razón de 2 observaciones (FAC2):

$$FAC2 = \frac{\bar{V}_{simul}}{\bar{V}_{med}}, 0.5 \leq FAC2 \leq 2$$

Donde:

V_{med} : Variable medida con una estación fija

V_{simul} : Variable simulada o estimada

$\sigma_{V_{med}}$: Número de datos medidos disponibles

$\sigma_{V_{med}}$: Desviación estándar de las concentraciones

5.1.10.2.2 Criterios para estadísticos de análisis para la validación

El modelo se considera valido si se cumplen los requisitos mostrados en la Tabla 5.158, cuyos valores fueron tomados de las siguientes referencias, ¹⁶⁰, ¹⁶¹, ¹⁶² y ¹⁶³

Tabla 5.158. Criterios para índices estadísticos para validación modelos

CLASIFICACIÓN	Índices estadísticos			
	SB	NMSE	r*	FAC2
Excelente	$\leq \pm 0.15$	≤ 0.35	$\geq \pm 0.7$	$0.5 \leq FAC \leq 2$
Bueno	$\leq \pm 0.30$	≤ 0.50	$\geq \pm 0.5$	$0.5 \leq FAC \leq 2$
Promedio	$\leq \pm 0.6$	≤ 0.75	$\geq \pm 0.3$	$0.5 \leq FAC \leq 2$
No satisfactorio**	$> \pm 0.6$	> 0.75	$< \pm 0.3$	$0.5 \leq FAC \leq 2$

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

* Debido a que en la literatura no hay consenso marcado sobre cual es un buen criterio para este índice, ya que la revisión de la literatura solo se encuentra la referencia dada por Graška Gora para el cual parece satisfactorio un valor > 0.30 , por lo cual basado en lo

¹⁶⁰ (Air quality model performance evaluation, Meteorol. Atmos. Phys., vol. 87, 2004)

¹⁶¹ (R. E. Morris, D. E. Mc Nally, T. W. Tesche, G. Tonnesen, J. W. Boylan, and P. Brewer, "Preliminary Evaluation of the Community Multiscale Air Quality Model for 2002 over the Southeastern United States," J. Air Waste Manag. Assoc., vol. 55, no. 11, pp. 169, 2005)

¹⁶² (D. A. Sanchez and D. R. Wilcken, "Evaluación de tres modelos de micro-escala (AERMOD, CALINE4 y R-LINE) en su aplicación a las vías principales de la Ciudad de Bogotá," Univ. la Salle, p. 102, 2016)

¹⁶³ (B. Grašič, M. Zlata Božnar, P. Mlakar, and G. Tinarelli, "Re-evaluation of the Lagrangian particle modelling system on an experimental campaign in complex terrain," Nuovo Cim. della Soc. Ital. di Fis. C, vol. 30, no. 6, pp. 557–575, 2007).

anterior y por similitud con las referencias dadas para SB y NMSE, se construye la escala mostrada.

** Se declara como no satisfactorio cuando alguno o varios de los estadísticos cumplen con el criterio dado en la [Figura 5.183](#), se muestra el resultado de la validación para las variables Precipitación, e indica que es excelente, lo que equivale a que los parámetros de validación cumplan los siguientes requisitos: $SB \leq \pm 0.15$, $NMSE \leq 0.35$, $r \geq 0.7$ y $0.5 \leq FAC \leq 2$.



Figura 5.183 Resultados validación para la variable precipitación

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.3 Modelos de cálculo

Para el análisis de los datos descargados de METEOBLUE, se desarrollaron rutinas en Visual Basic for Applications (VBA), las cuales facilitaron la manipulación del gran volumen de datos, en la [Figura 5.184](#), se muestran algunas de las rutinas implementadas.



Figura 5.184 Rutinas implementadas para el análisis de datos

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.4 Identificación de fuentes de emisiones

El área de influencia delimitada para el componente atmosférico se proyectó realizando la identificación de potenciales afectaciones por la alteración a la calidad del aire y alteración en los niveles de presión sonora, producto del desarrollo de las actividades constructivas del proyecto. Estas se establecieron en función del área a ser intervenida y la trascendencia de los impactos, hasta límites físicos o naturales, así como el análisis de los posibles receptores aledaños.

En este sentido, se realizó la identificación de las principales fuentes de contaminación en la zona, las cuales corresponden a fuentes lineales asociadas los ejes viales como el primer tramo de la variante de Mutatá, vías pavimentadas y vías sin pavimentar, como fuentes dispersar asociadas al centro urbano de Mutatá y sector El Regalo.

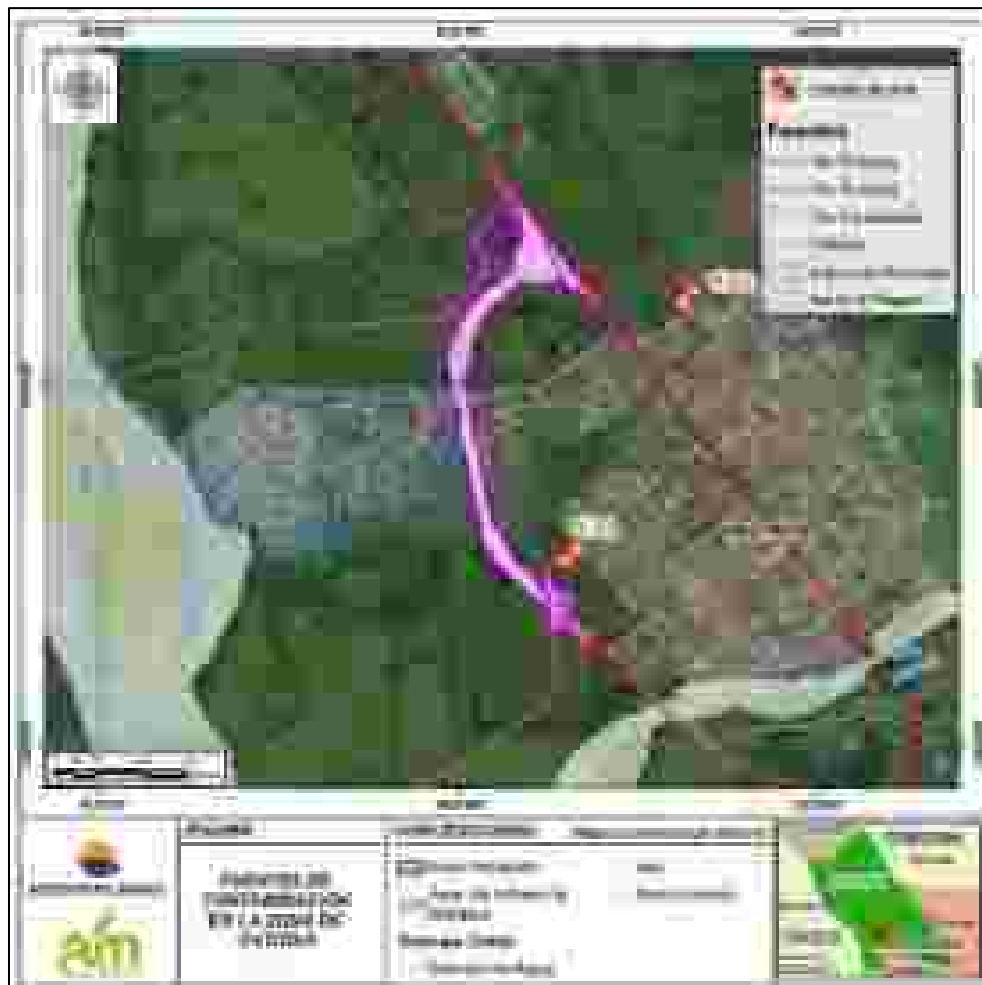


Figura 5.185 Fuentes de contaminación en la zona de estudio

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Adicionalmente, la localización de los puntos se realizó a partir de criterios técnicos de representatividad y cobertura espacial, priorizando tanto la presencia de población expuesta como la cercanía a las áreas de intervención del proyecto.

En el caso de los monitoreos de calidad del aire y ruido, la selección se efectuó considerando un radio de acción máximo de 500 metros, de manera que se garantizara la cobertura de los principales focos de emisión y ruido asociadas al proyecto y de las zonas habitadas del casco urbano. Con este criterio se buscó abarcar la mayor cantidad posible de población susceptible, como instituciones educativas, hospital, hogares geriátricos y áreas residenciales, en coherencia con la normatividad que establece límites diferenciales para este tipo de zonas (Resolución 627 de 2006). Así como zonas de permanencia prolongada de personas. Asimismo, se tuvo en cuenta la dirección predominante de los vientos (sur-norte), lo que permite evaluar con mayor precisión la dispersión de contaminantes hacia las zonas pobladas.

En este sentido, el Punto 1 se localizó en el sector sur del municipio, cercano a escuelas y colegios, con el fin de evaluar la posible afectación a una población altamente sensible (niños y jóvenes). El Punto 2, por su parte, integra la dinámica de la zona céntrica al abarcar viviendas cercanas al parque principal, el hospital municipal y la residencia de ancianos, permitiendo evaluar el ruido sobre los grupos poblacionales con mayor vulnerabilidad.

Es importante señalar que, si bien se analizaron sitios adicionales, algunos no pudieron ser utilizados debido a la imposibilidad de acceder a los predios o a la ausencia de condiciones de seguridad para la instalación de los equipos, lo cual fue registrado en los informes de campo. No obstante, los puntos seleccionados cumplen con los criterios de cobertura espacial, representatividad de la población y exposición potencial a los impactos, por lo que garantizan la validez técnica del monitoreo.

Finalmente, en la figura correspondiente se presentan las ubicaciones seleccionadas, evidenciando cómo estas abarcan tanto el área de obras como los principales sectores de la cabecera municipal, lo que permite un análisis integral y representativo de la calidad del aire y el ruido en el marco del proyecto.



Figura 5.186 Análisis espacial puntos de monitoreo

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S, 2025

5.1.10.4.1 Fuentes lineales existente

Para la identificación de fuente de emisión se realizó la cuantificación de las vías del área de influencia. Los resultados se presentan en la Tabla 5.159, en la cual se relacionan los flujos vehiculares para los siete (7) tramos de las vías correspondientes, las cuales se pueden visualizar en la [Figura 5.187](#).

Tabla 5.159 Inventario de vías de acceso

ID_VIA *	MATERI_VI	TIPO_VIA	TRAFICO	ANCHO_M
VIA_1	Pavimento	1	168	7,5
VIA_2	Pavimento	1	60	7,5
VIA_3	Arena compactada (vía no pavimentada)	3	126	7,5
VIA_4	Losa de concreto	3	42	6
VIA_5	Pavimento	1	42	6
VIA_6	Pavimento	1	66	7,5
VIA_7	Pavimento	1	168	7,5

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

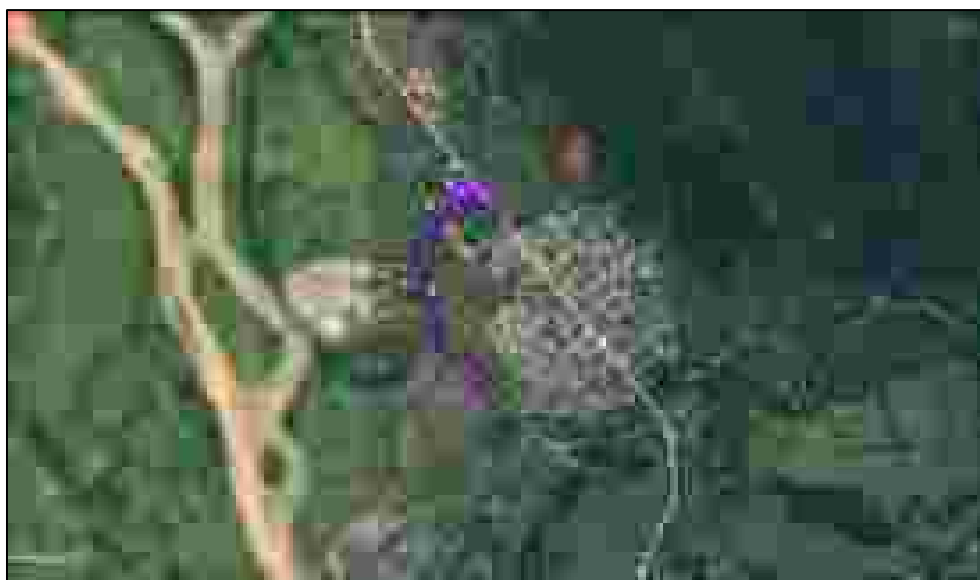


Figura 5.187 Inventario de vías de acceso

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.4.2 Potenciales receptores en el área de influencia

Dentro del área de influencia abiótica, se tomaron trescientos noventa y seis (396) receptores. En la [Figura 5.188](#), se muestran los receptores distribuidos en dos arreglos de receptores rectangulares espaciados uniformemente, los cuales se describen a continuación: los primeros ciento veintiuno (121) se identifican como REC1 a REC121 hacen parte de una red mayor (mostrados con círculos verdes espaciados en 400 m en ambas direcciones), seguidos de una segunda red compuesta por ciento veintiuno (121), que se identifican como REC123 a REC242 (receptores mostrados con círculos amarillos en un arreglo espaciado en 75 m horizontales por 150 m en vertical).

Por otro lado, se ubican ciento cuarenta y dos (142) receptores distribuidos a lo largo de los ejes viales principales (representados por círculos de color rojo, REC243 a REC384), más dos (2) ubicaciones donde se realizaron las mediciones de calidad del aire (CA1 a CA2), y por último (10) ubicaciones identificadas como receptores sensibles, que incluye parques, canchas, iglesias y colegios (RS1 a RS10).

Estos receptores potenciales corresponden a los asentamientos humanos presentes en el área de influencia abiótica la cual acoge parte del casco urbano de Mutatá, sector El Regalo y viviendas dispersas, ver Figura 5.188.

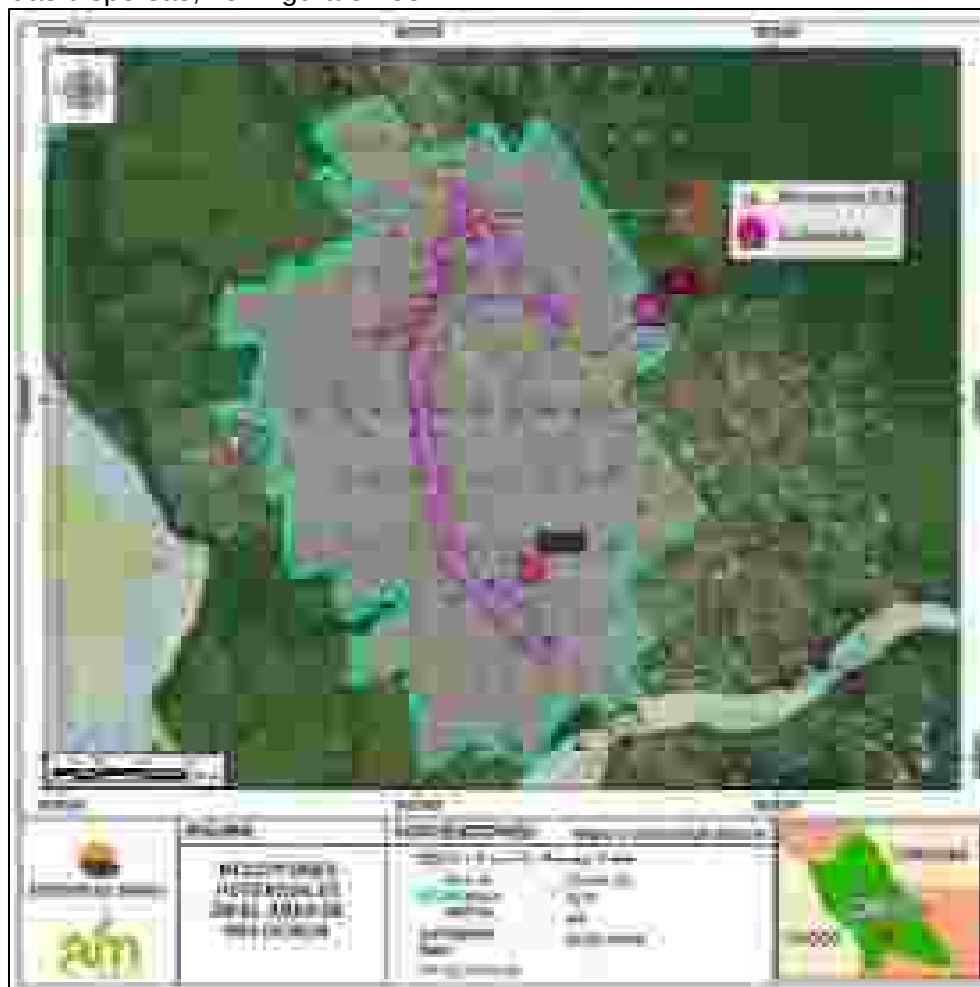


Figura 5.188 Receptores potenciales en el AI
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.5 Calidad del aire

El monitoreo fue desarrollado entre los días 15 de noviembre al 02 de diciembre del 2024, en dos (2) puntos localizados en el área de influencia del proyecto, donde se determinaron las concentraciones para los siguientes contaminantes: Material Particulado menor a 10 micrómetros (PM10), Material Particulado menor a 2.5 micrómetros (PM2.5), Dióxido de Azufre (SO2), Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Nitrógeno (NO2). Las mediciones

se realizaron de manera continúa dando cumplimiento a lo establecido en la normativa ambiental vigente.

Se realizó de acuerdo con los lineamientos del Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire Resolución 2154 de 2010; el cual fue adoptado por medio de la Resolución 0650 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, numeral 5,7 del Manual de Diseño, el cual indica que para el diseño de un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire Industrial SVCAI, se deben considerar aspectos tales como:

- Condiciones meteorológicas de la zona de estudio, tal como direcciones predominantes y velocidades promedio de los vientos.
- Estudio de los procesos de la empresa, entorno de esta, y cartografía de la zona.
- Inventario de emisiones, relativo a las fuentes pertenecientes al proceso como tal y a otras fuentes del entorno de la obra.
- Necesidad de la Compañía y revisión de mediciones históricas.

Estas mediciones fueron realizadas por la empresa Diagnóstico Ambiental S.A.S, la cual se encuentra acreditada para realizar los muestreos, análisis y cálculos de calidad de aire. Las Resoluciones de acreditación, plan de muestreo, datos de campo, cadena de custodia, certificados de calibración, resultados de los laboratorios de análisis, meteorología, y registro fotográfico se presentan en el Anexos_C5_1/ 5_1_10_Atmosfera/ Calidad_Aire.

5.1.10.5.1 Metodología empleada para las mediciones y análisis

Los métodos de medición y análisis empleados fueron los recomendados en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire Resolución 2154 de 2010, adoptado por la Resolución 650 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, los cuales se tabulan en la Tabla 5.160.

Tabla 5.160 Parámetros medidos y métodos de medición empleados

Contaminante evaluado	Método de medición
PM ₁₀	US-EPA CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice J. Alto volumen.
PM _{2.5}	US-EPA CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice L. Bajo volumen. Método de referencia manual.
SO ₂	U.S.A EPA CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice A1. (Fluorescencia Ultravioleta).
NO ₂	US EPA CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice F. Quimioluminiscencia Fase Gaseosa.
CO	U.S. EPA CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice C. Infrarrojo No Dispersivo.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.5.2 Procedimiento de medición

Las evaluaciones de calidad del aire se basan en la metodología del Protocolo del Monitoreo y Seguimiento de Calidad de Aire Resolución 2154 de 2010¹⁶⁴; el cual fue adoptado por medio de la Resolución 650 de 2010¹⁶⁵; y los parámetros de comparación se establecerán

¹⁶⁴ (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,. Resolución 2154, 2010)

¹⁶⁵ (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,. Resolución 650, 2010)

de acuerdo con lo relacionado en los estándares de Calidad de Aire establecidos en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible¹⁶⁶

Para actividades industriales se acoge la referencia de los SVCAI, que establece:

Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire Industrial: Aplicado a actividades a las que la autoridad ambiental establezca la obligación de implementar un SVCA. Podrá contar con estaciones indicativas o fijas.

Para la realización de las mediciones se aplicaron los métodos US EPA, y los métodos de referencia o equivalentes aplicados se consultaron en el documento "Reference and Equivalent Methods, December 15, 2023"¹⁶⁷

- Toma de muestras para la determinación de material particulado como PM10: US-EPA CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice J: Alto volumen. Método de referencia manual: RFPS-0202-141¹⁶⁸
- Toma de muestras para la determinación de material particulado como PM2.5: US-EPA CFR título 40, Capítulo I, Subcapítulo C Parte 50 Apéndice L: Bajo volumen. Método de referencia manual: RFPS-1014-219¹⁶⁹
- Determinación directa en campo en la atmósfera de dióxido de azufre (SO₂): US-EPA CFR título 40, Capítulo I, Subcapítulo C Parte 50 Apéndice A-1. Método Equivalente Automatizado: EQSA-0495-100¹⁷⁰.
- Determinación directa en campo en la atmósfera de dióxido de nitrógeno (NO₂): US-EPA CFR título 40, Capítulo I, Subcapítulo C Parte 50 Apéndice F: Quimioluminiscencia Fase Gaseosa. Método equivalente Automático: RFNA-1194-099 RFNA-1289-074¹⁷¹.
- Determinación directa en campo en la atmósfera de monóxido de carbono (CO): US-EPA CFR título 40, Capítulo I, Subcapítulo C Parte 50 Apéndice C. Método equivalente Automatizado: RFCA-0981-054¹⁷².

5.1.10.5.3 Tiempo de monitoreo

De acuerdo con el numeral 5.7.4 del Manual de Diseño del Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire¹⁷³, se establece un tiempo de monitoreo de 18 días, teniendo presente que, si al analizar los resultados de las primeras 15 muestras se obtiene

¹⁶⁶ (Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible,. Resolución 2254, 2017)

¹⁶⁷ (US EPA, "List of Designated Reference and Equivalent Methods," , 2023)

¹⁶⁸ (United States Environmental Protection Agency, "40 CFR Appendix J to Part 50 - Reference Method for the Determination of Particulate Matter as PM10 in the Atmosphere," , 1987)

¹⁶⁹ (ibid)

¹⁷⁰ (United States Environmental Protection Agency, "40 CFR Appendix A-1 to Part 50 - Reference Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Ultraviolet Fluorescence Method)," , 2010)

¹⁷¹ (E. P. A. (EPA), "Appendix F to Part 50—Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Nitrogen Dioxide in the Atmosphere (Gas Phase Chemiluminescence), 1983)

¹⁷² (United States Environmental Protection Agency, "40 CFR Appendix C to Part 50 - Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Carbon Monoxide in the Atmosphere (Non-Dispersive Infrared Photometry), 2011)

¹⁷³ (Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial, Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire, octubre, 2010)

un promedio igual o mayor al 80% del valor de la norma anual de calidad del aire o nivel de inmisión, se deberá prolongar el monitoreo hasta completar 24 muestras.

5.1.10.5.4 Selección y sitios de medición

La toma de muestras correspondientes a los contaminantes PM10, PM2.5, SO2, NO2 y CO se realiza en los sitios definidos en conjunto por la empresa Autopistas Urabá S.A.S y el Laboratorio Diagnóstico Ambiental S.A.S, y en la Tabla 5.161, se tabula la ubicación y georreferenciación de los puntos de medición seleccionados.

Tabla 5.161 Identificación y georreferenciación de los puntos de monitoreo calidad del aire

Punto (ID)	Coordenada CTM12	
	X	Y
CA1	4620249,32	2359620,87
CA2	4620511,73	2360200,19

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Figura 5.189 se muestra la georreferenciación de los puntos de monitoreo realizados, en la cual se destaca los centros poblados que se podrán ver afectados por la dispersión de los contaminantes; casco urbano de Mutatá barrios La Paz, Nuevo Horizonte, La Iglesia, El Ortiz, La Ladilla, El Pirú, Las Palmas y El obrero, correspondientes al casco urbano del municipio y el sector conocido como El Regalo.



Figura 5.189 Ubicación de puntos de monitoreo de calidad de aire en el Área de Influencia
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.5.5 Descripción de método de medición

A continuación, en la Tabla 5.162 se realiza una descripción del principio de medición utilizado para la toma de muestra de los diferentes contaminantes muestreados.

Tabla 5.162 descripción de los métodos de medición empleados

Contaminante	Método	Descripción
Material particulado menor a 10 micrómetros	EPA e- CFR 40, Capítulo 1, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice J-Alto volumen.	Un muestreador de aire extrae aire ambiental a una velocidad de flujo constante en una entrada de forma especial donde el material particulado suspendido se separa por inercia en una o más fracciones de tamaño dentro del rango de tamaño de PM ₁₀ . Luego, cada fracción de tamaño en el rango de tamaño de PM ₁₀ se recolecta en un filtro separado durante el período de muestreo especificado. Las características de discriminación del tamaño de partículas (efectividad de muestreo y punto de corte del 50 por ciento) de la entrada del muestreador se prescriben como especificaciones de rendimiento en la parte 53 del Capítulo 1. El caudal del

Contaminante	Método	Descripción
		muestreador debe estar entre 1.02 m ³ /min y 1.24 m ³ /min y la geometría del muestreador favorecen la recolección de partículas inferiores a 10µm (diámetro aerodinámico). Cada filtro es pesado (después de estabilizar la humedad y la temperatura) antes y después de la recolección de la muestra para determinar el peso neto ganado debido al PM ₁₀ colectado. El volumen total de aire muestreado es determinado por la medida del flujo a temperatura y presión ambiente y el tiempo total de muestreo. La concentración másica de PM ₁₀ en el aire ambiente es calculada como la masa total de partículas en el rango de PM ₁₀ dividido en el volumen total de aire muestreado y es expresado en microgramos por metro cúbico de aire (µg/m ³).
Material particulado menor a 2.5 micrómetros	EPA e- CFR 40, Capítulo 1, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice L	Un motor eléctrico succiona aire ambiente a una tasa de volumen constante de 16.67 l/min hacia la entrada del equipo (cabezal) y a través de un separador de partículas inerciales (impactador), donde el material particulado suspendido en el rango de PM _{2.5} es separado para su recolección en un filtro de politetrafluoroetileno (PTFE) durante el tiempo de muestreo. Cada filtro es pesado (después de estabilizar la humedad y la temperatura) antes y después de la recolección de la muestra para determinar el peso neto ganado debido al PM _{2.5} colectado. El volumen total de aire muestreado es determinado por la medida del flujo a temperatura y presión ambiente y el tiempo total de muestreo. La concentración másica de PM _{2.5} en el aire ambiente es calculada como la masa total de partículas en el rango de PM _{2.5} dividido en el volumen total de aire muestreado y es expresado en microgramos por metro cúbico de aire (µg/m ³).
Dióxido de azufre (SO ₂)	EPA e- CFR 40, Capítulo 1, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice A1	Este método de referencia se basa en la medición automatizada de la intensidad de la fluorescencia característica liberada por el SO ₂ en una muestra de aire ambiental contenida en una celda de medición de un analizador cuando la muestra de aire es irradiada por luz ultravioleta (UV) que pasa a través de la celda. La luz fluorescente liberada por el SO ₂ también se encuentra en la región ultravioleta, pero en longitudes de onda más largas que la luz de excitación. Normalmente, la medición instrumental óptima de las concentraciones de SO ₂ se obtiene con una longitud de onda de excitación en una banda entre aproximadamente 190 y 230 nm, y la medición de la fluorescencia de SO ₂ en una banda ancha alrededor de 320 nm, pero estas longitudes de onda no son necesariamente limitaciones de este método de referencia.
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	EPA e- CFR 40, Capítulo 1, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice F	Las concentraciones atmosféricas de dióxido de nitrógeno (NO ₂) se miden indirectamente midiendo fotométricamente la intensidad de la luz, a longitudes de onda superiores a 600 nanómetros, resultante de la reacción quimioluminiscente del óxido nítrico (NO) con el ozono (O ₃). El NO ₂ se reduce primero cuantitativamente a NO mediante un convertidor. El NO, que

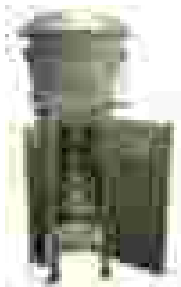
Contaminante	Método	Descripción
		comúnmente existe en el aire ambiente junto con el NO ₂ , pasa a través del convertidor sin cambios, lo que provoca una concentración total de NO _x resultante igual a NO + NO ₂ . También se mide una muestra del aire de entrada sin haber pasado por el convertido. Esta última medición de NO se resta de la medición anterior (NO + NO ₂) para producir la medición final de NO ₂ . Las mediciones de NO y NO + NO ₂ se pueden realizar simultáneamente con sistemas duales o cíclicamente con el mismo sistema siempre que el tiempo del ciclo no exceda 1 minuto.
Monóxido de carbono (CO)	EPA e- CFR 40, Capítulo 1, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice C	La medición de este parámetro se hace por fotometría infrarroja no dispersiva. La incidencia de radiación infrarroja (IR) atraviesa una rueda rotatoria filtrante de gas (una mitad contiene CO y la otra mitad contiene nitrógeno) antes de ingresar a la celda de muestra. Cuando la radiación infrarroja pasa a través de la mitad de la rueda que contiene CO, todas las longitudes de onda absorbidas por el CO son completamente removidas de la radiación, creando un rayo de "referencia" el cual no resulta afectado por el CO en la muestra que se mide. Cuando la energía IR atraviesa la mitad de la rueda que contiene nitrógeno, las longitudes de onda específicas de CO no son removidas de la radiación, y un rayo de "medición" será atenuado por CO en la muestra. La rotación de la rueda de filtro de gas crea un haz que alterna entre fases de "referencia" y "medición". La energía infrarroja que atraviesa el filtro y la celda de muestra es detectada por un sensor de estado líquido y es convertida a un valor de concentración.

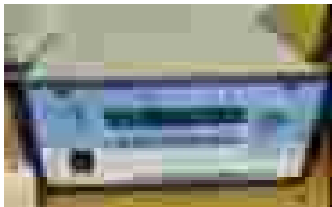
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

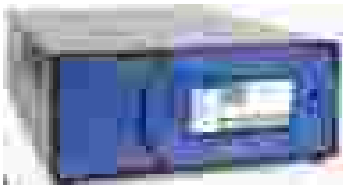
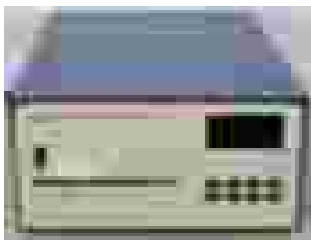
5.1.10.5.6 Identificación de los puntos y quipos

A continuación, en la Tabla 5.163 se realiza una descripción de los equipos empleados para toma de muestra de los diferentes contaminantes monitoreados en el estudio.

Tabla 5.163 Descripción de los equipos de medición empleados

Contaminante	Imagen	Descripción
Material particulado menor a 10 micrómetros		Muestreadores de aire modelos TISCH HI - VOL. Estos instrumentos han sido diseñados específicamente para cumplir o exceder con los requisitos operacionales de un Método de Referencia para dispositivos de muestreo bajo las Regulaciones: CFR 40 Parte 50 para material particulado PM ₁₀ en los Apéndice J. En la imagen se muestra una de la configuración de estos. El PM ₁₀ es el instrumento designado por la US EPA para la medición de partículas de 10 micrones y menores. Las partículas son clasificadas por medio de un separador Aerodinámico y después son colectadas en un filtro de

Contaminante	Imagen	Descripción
		Cuarzo para su cuantificación y análisis. Los instrumentos pueden controlar el flujo muestreado por Masa o por Volumen.
Material particulado menor a 2.5 micrómetros		Muestreador ambiental para material particulado para medición de, PM ₁₀ y PM _{2.5} con aprobación US EPA para PM _{2.5} y PM ₁₀ . Muestreador de flujo bajo con 16.7 L/min ajustable en rango 1-25 L/min de bajo costos de operación y consumibles. Ideal para mediciones de calidad de aire, medición de áreas de contaminación, mediciones perimetrales, proyectos de remediación, posee características como las siguientes: Pantalla táctil de 5.7" para un manejo intuitivo, soporte de varios idiomas incluyendo español, posibilidad de descarga de datos mediante puerto USB o MODBUS o puerto Ethernet, guía integrada paso a paso para calibración del equipo y batería de respaldo para operación autónoma, etc.
Dióxido de azufre (SO ₂)		Los analizadores Teledyne de la serie 100 utilizan el principio de fluorescencia UV probado, junto con la tecnología de microprocesador de última generación para proporcionar mediciones precisas y confiables de niveles bajos de SO₂. Se logra una estabilidad excepcional con el uso de un obturador óptico para compensar la deriva de PMT y un detector de referencia para corregir los cambios en la intensidad de la lámpara UV. Un "pateador" de hidrocarburos y un diseño óptico avanzado se combinan para evitar imprecisiones debidas a interferencias. El software multitarea proporciona una indicación en tiempo real de una gran cantidad de parámetros operativos y proporciona alarmas automáticas si se superan los límites de diagnóstico. Los analizadores Teledyne de la serie 100 combinan un peso más ligero, una construcción resistente, facilidad de uso, diagnósticos potentes, un diseño modular y un rendimiento excepcional para producir la herramienta ideal para los requisitos actuales de control del aire

Contaminante	Imagen	Descripción
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)		La serie Teledyne 200 utiliza el principio de quimioluminiscencia probado, junto con la tecnología de microprocesador de última generación para proporcionar mediciones precisas y confiables de niveles bajos de NO, NO₂ y NOX. El analizador Teledyne Modelo 200A y T200U están diseñados para medir la concentración de óxido nítrico [NO], óxidos totales de nitrógeno [NOX] y, mediante cálculo la de dióxido de nitrógeno [NO₂]. El instrumento mide la intensidad de la luz de la reacción quimioluminiscente en fase gaseosa del óxido nítrico [NO] y el ozono [O₃].
Monóxido de carbono (CO)		El analizador de CO de correlación de filtro de gas (GFC) de la serie THERMO 48 (donde se encuentran los modelos 48, 48C, 48i y 48iQ) mide concentraciones bajas de CO. Combina tecnología de detección probada, software basado en menús fácil de usar y diagnósticos avanzados para ofrecer una flexibilidad y confiabilidad insuperables. El principio de que el monóxido de carbono (CO) absorbe la radiación infrarroja en una longitud de onda de 4.6 micrones. Debido a que la absorción de infrarrojos es una técnica de medición no lineal, es necesario que la electrónica del instrumento transforme la señal básica del analizador en una salida lineal. El equipo utiliza una curva de calibración exacta para linealizar con precisión la salida del instrumento en cualquier rango hasta una concentración de 10000 ppm. La muestra se introduce en el analizador a través del puerto SAMPLE. La muestra fluye a través del banco óptico. La radiación de una fuente infrarroja se corta y luego se pasa a través de un filtro de gas alternando entre CO y N₂. La radiación luego pasa a través de una interferencia de paso de banda estrecha y entra en el banco óptico donde ocurre la absorción por el gas de muestra. La radiación infrarroja sale del banco óptico y cae sobre un detector de infrarrojos.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.5.7 Identificación de los puntos y equipos de medición

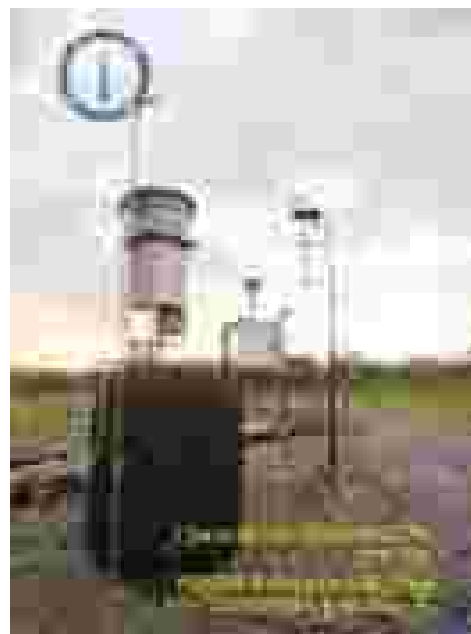
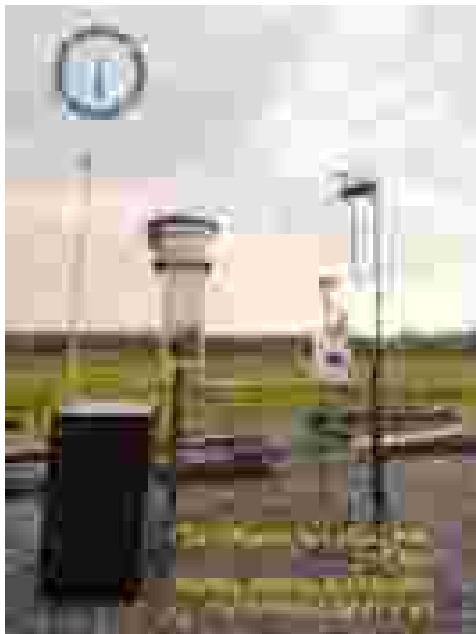
En la Tabla 5.164, se presenta el registro fotográfico, ubicación e identificación de los equipos utilizados para el monitoreo de los contaminantes establecidos en el estudio, para la ubicación de monitoreo identificada como Punto 1. "CA1".

Tabla 5.164 Descripción del sitio de muestreo del Punto 1 "CA1"

INFORMACIÓN GENERAL									
Estación	Punto 1	Nombre	CA1	Departamento	Antioquia	Municipio	Mutatá	Vereda	N/A
Altitud (m.s.n.m.)		121	COORD WGS 84	N	7°14'29.65"		Entorno local	Punto de monitoreo de calidad de aire ubicado en zona plana con presencia de gravilla y pastos bajos, a su alrededor, con una vivienda familiar localizada a 13 metros en sentido noreste y a 96 metros en sentido suroeste de la finalización del primer tramo de la variante Mutatá que actualmente es usada solo por las volquetas que ingresan a una cantera aledaña de la zona	
				W	76°26'21.63"				
				X	4620249.32				
Altura del suelo (m)		2.7	MAGNA SÍRGAS CTM12	Y	2359620.87				
TIPO DE ESTACIÓN									
Nivel I Área	Rural		Nivel II Tiempo		Indicativa		Nivel III Dominantes	Emisiones	Tráfico
INFORMACION DE FUENTES Y PERIODO DE MUESTREO									
Tráfico	Distancia al borde (m)	13	Industrial	Tipo de industria	N/A	Información muestreo	Tiempo de muestreo (días)	18	
	Ancho de la vía (m)	7							
	Tráfico diario	-----		Distancia fuentes (m)	N/A		Seco/Húmedo	Húmedo	
	Vel. Promedio (Km/h)	-----		Dirección	N/A		Fecha inicio	15/11/2024	
	Estado de la vía	Pavimentada					Fecha finalización	02/12/2024	
INFORMACIÓN ADICIONAL									
Objetivo de la estación	Monitorear las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en el área de influencia del Proyecto construcción de la variante al caso urbano del municipio de Mutatá.				Descripción fuentes de emisión	• Tráfico vehicular • Vías sin pavimentar • Cocina de leña			
CONFIGURACIÓN DE LA ESTACIÓN									
Parámetro	Equipo de muestreo		Marca	Modelo	Equipo verificación	Marca	Modelo	Serie	Fecha vencimiento
PM ₁₀	Muestreador Hi-Vol		Tisch	TE-6070	Varyflow	Tisch	TE5028A	3981	22/11/2024
PM _{2.5}	Muestreador Low-Vol		Tisch	TE-WILBUR	Caudalímetro	TSI	4040F	40400452012	04/01/2025
SO ₂	Analizador Teledyne		Teledyne	M100E	Gas patrón	COASTAL	CGS-10-27228	FF533989	19/03/2026
CO	Analizador Thermo		Thermo	48i	Gas patrón	COASTAL	CGS-10-27228	FF533989	19/03/2026

NO ₂	Analizador Teledyne	Teledyne	T200U	Gas patrón	COAST AL	CGS-10- 27228	FF533989	19/03/20 26

REGISTRO FOTOGRAFICO



Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.165, se presenta el registro fotográfico, ubicación e identificación de los equipos utilizados para el monitoreo de los contaminantes establecidos en el estudio, para la ubicación de monitoreo identificada como Punto 2. "CA2".

Tabla 5.165 Descripción del sitio de muestreo del Punto 2 "CA2".

INFORMACIÓN GENERAL									
Estación	Punto 2	Nombre	CA2	Departamento	Antioquia	Municipio	Mutatá	Vereda	N/A
Altitud (m.s.n.m.)		138	COORD. WGS 84	N	7°14'48.55"		Entorno local	Punto de monitoreo de calidad de aire ubicado en zona plana con presencia de pastos bajos, localizado en cercanías a vía pavimentada de poco flujo vehicular entre la carrera 8 y calle 13 del centro poblado de Mutatá a 28 metros en sentido sur.	
				W	76°26'13.23"				
				X	4620511,73				
Altura del suelo (m)		2.37	MAGNA SIRGAS CTM12	Y	2360200.19				
TIPO DE ESTACIÓN									
Nivel I Área	Rural		Nivel II Tiempo		Indicativa		Nivel III Emisiones Dominantes		Tráfico
INFORMACION DE FUENTES Y PERIODO DE MUESTREO									

Tráfico	Distancia al borde (m)	21	Industrial	Tipo de industria	N/A	Información muestreo	Tiempo de muestreo (días)	18			
	Ancho de la vía (m)	9		Distancia fuentes (m)	N/A		Seco/Húmedo	Húmedo			
	Tráfico diario	-----					Fecha inicio	15/11/2024			
	Vel. Promedio (Km/h)	-----									
	Estado de la vía	Sin Pavimentar							Dirección	N/A	Fecha finalización
INFORMACIÓN ADICIONAL											
Objetivo de la estación	Monitorear las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en el área de influencia del Proyecto construcción de la variante al caso urbano del municipio de Mutatá.				Descripción fuentes de emisión	• Tráfico vehicular • Vías sin pavimentar • Cocina de leña					
CONFIGURACIÓN DE LA ESTACIÓN											
Parámetro	Equipo de muestreo	Marca	Modelo	Equipo verificación	Marca	Modelo	Serie	Fecha vencimiento			
PM ₁₀	Muestreador Hi-Vol	Tisch	TE-6070	Varyflow	Tisch	TE5028A	3981	22/11/2024			
PM _{2.5}	Muestreador Low-Vol	Tisch	TE-WILBUR	Caudalímetro	TSI	4040F	40400452012	04/01/2025			
SO ₂	Analizador Teledyne	Teledyne	100E	Gas patrón	COASTAL	CGS-10-27228	FF533989	19/03/2026			
CO	Analizador Thermo	Thermo	48C	Gas patrón	COASTAL	CGS-10-27228	FF533989	19/03/2026			
NO ₂	Analizador Thermo	Thermo	42C	Gas patrón	COASTAL	CGS-10-27228	FF533989	19/03/2026			
REGISTRO FOTOGRAFICO											



Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.5.8 Análisis de condiciones meteorológicas

A continuación, se describen las condiciones meteorológicas registradas durante ambos periodos de muestreo. Cabe aclarar que los momentos de muestreo corresponden a la temporalidad húmeda.

A. Temperatura ambiente

El comportamiento de la temperatura ambiente promedio diaria, se presenta en la Figura 5.190, en la cual se puede observar que el comportamiento de esta variable es estable durante las fechas de toma de muestras. Los datos se presentan en el rango entre 24.7 y 26.9 °C.

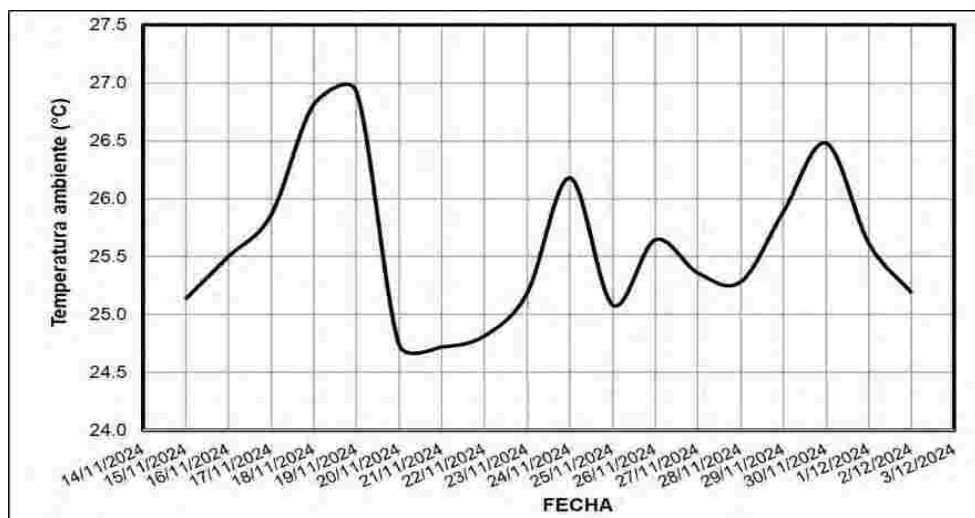


Figura 5.190 Registros de temperatura para periodo de medición

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

B. Presión atmosférica

El comportamiento de la presión ambiente promedio diaria se presenta en la Figura 5.191, en la cual se puede observar que el comportamiento de esta variable es estable durante las fechas de toma de muestras. Los datos se presentan en el rango entre 746.6 y 748.9 mmHg.

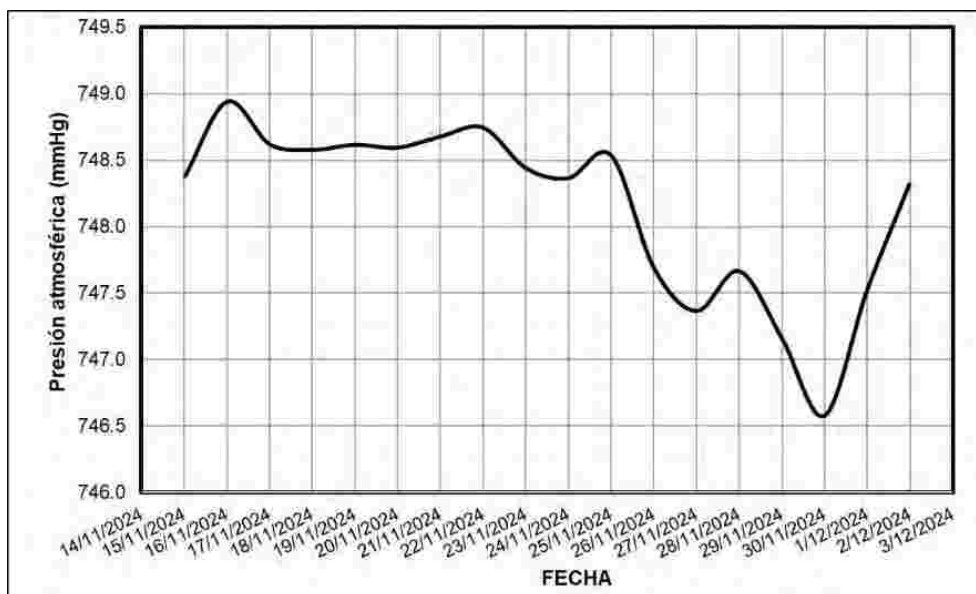


Figura 5.191 Registros de presión atmosférica para periodo de medición.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

C. Precipitación

El comportamiento de la precipitación acumulada diaria se presenta en la Figura 5.192 para el periodo de medición, en la cual se puede observar que el comportamiento de esta variable es estable durante las fechas de toma de muestras. Los datos se presentan en el rango entre 0 y 76 mm.

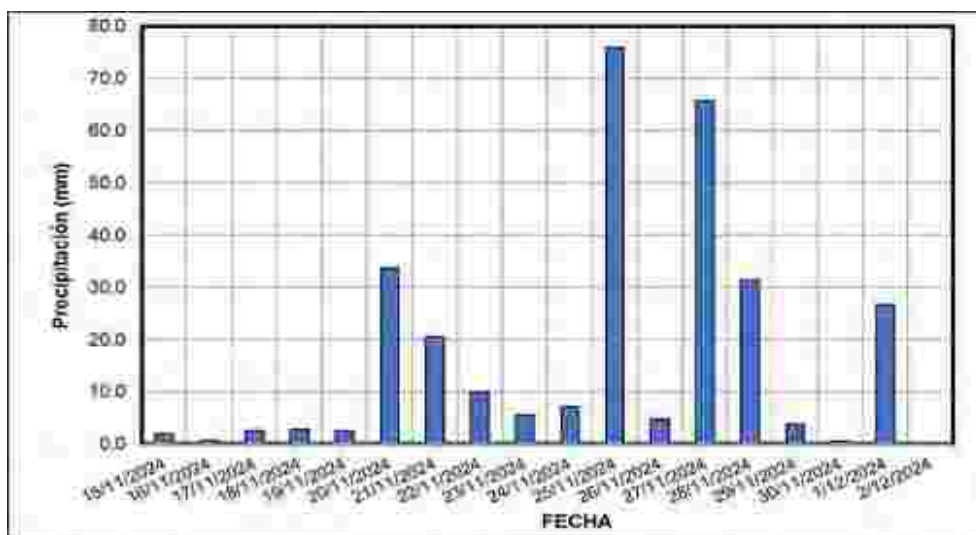


Figura 5.192. Registros de precipitación para periodo de medición.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

D. Humedad relativa

El comportamiento de la humedad relativa promedio diaria se presenta en la Figura 5.193 para el periodo de medición, en el cual se puede observar que el comportamiento de esta variable es estable durante las fechas de toma de muestras. Los datos se presentan en el rango entre 84.4 y 93.7%, siendo un periodo de altos niveles de humedad.

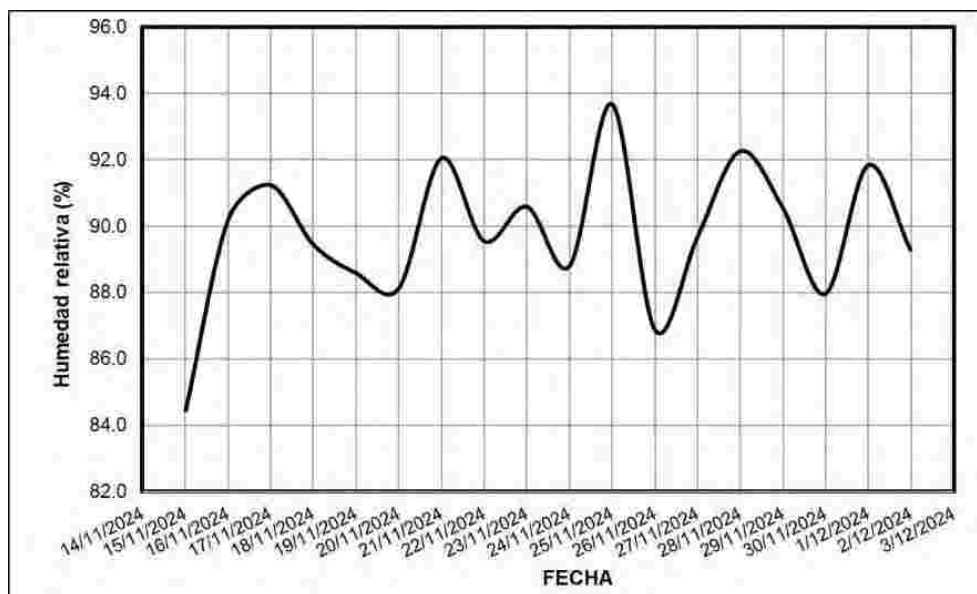


Figura 5.193. Registros de humedad relativa para periodo de medición.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

E. Velocidad del viento

El comportamiento de la velocidad del viento promedio diaria se presenta en la Figura 5.194 para el periodo de medición, en la cual se puede observar que el comportamiento de esta variable es estable durante las fechas de toma de muestras. Los datos se presentan en el rango entre 0.3 y 0.8 m/s.

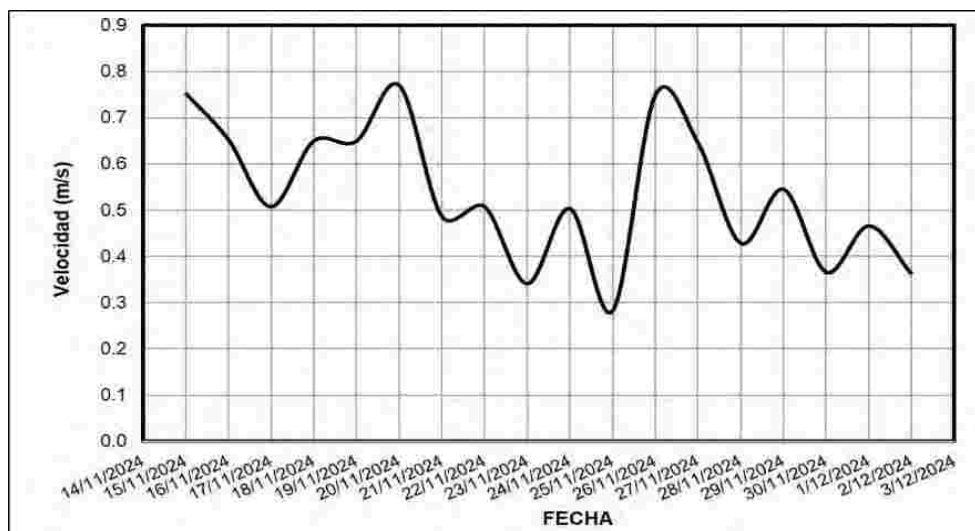


Figura 5.194. Registros de velocidad del viento para periodo de medición

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

F. Dirección del viento

A continuación, se presenta el comportamiento de los vientos para los días de muestreo en la Figura 5.195 para el periodo de medición, evidenciando la predominancia de los vientos en dirección desde el Sureste hacia el Noroeste.

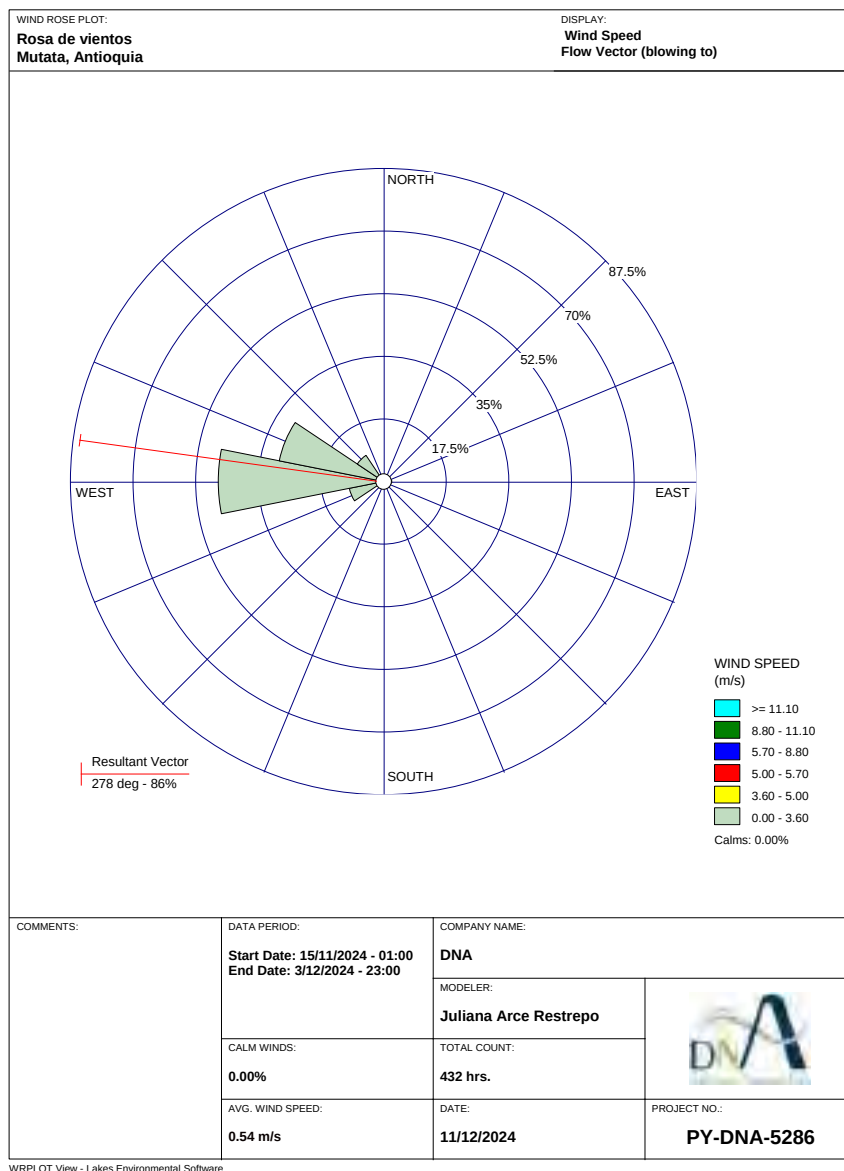


Figura 5.195 Dirección de los vientos del área de estudio

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.5.9 Resultados monitoreo de contaminantes

A. Material particulado PM₁₀

A continuación, se tabulan los resultados para los dos (2) puntos de muestreo o estaciones para el contaminante material particulado expresado como PM₁₀.

I. Concentración de PM₁₀ para el punto 1 "CA1"

En la Tabla 5.166, se tabulan los resultados de las concentraciones estimadas para los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

Tabla 5.166 Resultados de las concentraciones de PM10 del Punto 1 "CA1"

RESULTADOS										ESTIMACIÓN DEL ICA		
Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	t (min)	Q _{ref} (m³/min)	V _{ref} (m³)	W (g)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ICA	COLOR	CATEGORIA
2024-11-15	5001873	1380.0	1.1022	1521.1	0.0288	18.9343 +/-	1.3202	75.00	Cumplimiento	18	Verde	Buena
2024-11-16	5001874	1380.0	1.0917	1506.5	0.0422	28.0111 +/-	1.7327	75.00	Cumplimiento	26	Verde	Buena
2024-11-17	5001876	1380.0	1.0864	1499.3	0.0414	27.6135 +/-	1.7155	75.00	Cumplimiento	26	Verde	Buena
2024-11-18	5001878	1380.0	1.0760	1484.8	0.0231	15.5574 +/-	1.2007	75.00	Cumplimiento	14	Verde	Buena
2024-11-19	5001880	1380.0	1.0908	1505.3	0.0271	18.0031 +/-	1.2878	75.00	Cumplimiento	17	Verde	Buena
2024-11-20	5001882	1380.0	1.0786	1488.4	0.0331	22.2386 +/-	1.4742	75.00	Cumplimiento	21	Verde	Buena
2024-11-21	5001884	1380.0	1.0782	1488.0	0.0196	13.1722 +/-	1.1118	75.00	Cumplimiento	12	Verde	Buena
2024-11-22	5001886	1391.0	1.0956	1524.0	0.0213	13.9768 +/-	1.1244	75.00	Cumplimiento	13	Verde	Buena
2024-11-23	5001888	1387.0	1.0977	1522.5	0.0075	4.9261 +/-	0.8755	75.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-24	5001890	1380.0	1.1093	1530.8	0.0212	13.8492 +/-	1.1168	75.00	Cumplimiento	13	Verde	Buena
2024-11-25	5001892	1440.0	1.0999	1583.9	0.0093	5.8717 +/-	0.8622	75.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-26	5001894	1440.0	1.0853	1562.8	0.0174	11.1335 +/-	1.0113	75.00	Cumplimiento	10	Verde	Buena
2024-11-27	5001896	1400.0	1.0869	1521.7	0.0239	15.7061 +/-	1.1903	75.00	Cumplimiento	15	Verde	Buena
2024-11-28	5001898	1420.0	1.0830	1537.8	0.0208	13.5257 +/-	1.1033	75.00	Cumplimiento	13	Verde	Buena
2024-11-29	5001900	1395.0	1.0825	1510.0	0.0429	28.4098 +/-	1.7522	75.00	Cumplimiento	26	Verde	Buena
2024-11-30	5001902	1380.0	1.1015	1520.1	0.0442	29.0765 +/-	1.7787	75.00	Cumplimiento	27	Verde	Buena
2024-12-01	5001904	1395.0	1.1039	1539.9	0.0361	23.4426 +/-	1.5112	75.00	Cumplimiento	22	Verde	Buena
2024-12-02	5001906	1380.0	1.1125	1535.3	0.0158	10.2912 +/-	0.9965	75.00	Cumplimiento	10	Verde	Buena
PROMEDIO PARA COMPARACIÓN ANUAL						17.4 +/-	3.6	50.00	Cumplimiento	NO APLICA PARA ANUAL		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.196 se muestran las concentraciones estimadas y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

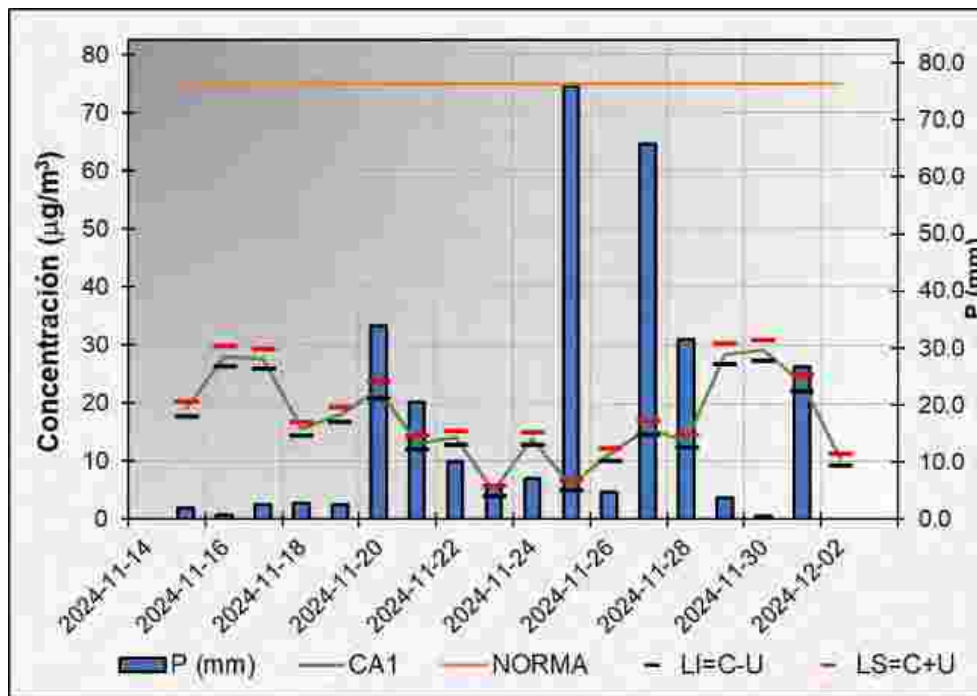


Figura 5.196 Concentración de PM10 para el Punto 1.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

II. Concentración de PM10 para el punto 1 "CA2"

En la Tabla 5.167, se tabulan los resultados de las concentraciones estimadas para los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y el 02 de diciembre del 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

Tabla 5.167 Resultados de las concentraciones de PM10 del Punto 2 "CA2".

Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	t (min)	Q _{ref} (m³/min)	V _{ref} (m³)	W (g)	RESULTADOS				Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ESTIMACIÓN DEL ICA		
						C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)			ICA	COLOR	CATEGORIA
2024-11-15	5001872	1380.0	1.0600	1462.9	0.0162	11.0742 +/-	1.0497	75.00		Cumplimiento	10	Verde	Buena
2024-11-16	5001875	1380.0	1.0486	1447.1	0.0196	13.5442 +/-	1.1379	75.00		Cumplimiento	13	Verde	Buena
2024-11-17	5001877	1380.0	1.0820	1493.1	0.0126	8.4389 +/-	0.9611	75.00		Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-18	5001879	1380.0	1.0717	1479.0	0.0135	9.1278 +/-	0.9863	75.00		Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-19	5001881	1380.0	1.0725	1480.0	0.0112	7.5674 +/-	0.9475	75.00		Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-20	5001883	1380.0	1.0723	1479.8	0.0176	11.8938 +/-	1.065	75.00		Cumplimiento	11	Verde	Buena
2024-11-21	5001885	1380.0	1.0689	1475.0	0.0281	19.0506 +/-	1.3281	75.00		Cumplimiento	18	Verde	Buena
2024-11-22	5001887	1380.0	1.0727	1480.3	0.0371	25.0617 +/-	1.5829	75.00		Cumplimiento	23	Verde	Buena
2024-11-23	5001889	1391.0	1.0828	1506.2	0.0101	6.7056 +/-	0.9151	75.00		Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-24	5001891	1380.0	1.0681	1474.0	0.0111	7.5304 +/-	0.95	75.00		Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-25	5001893	1440.0	1.0735	1545.8	0.0119	7.6984 +/-	0.9176	75.00		Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-26	5001895	1435.0	1.0690	1534.1	0.0261	17.0138 +/-	1.2254	75.00		Cumplimiento	16	Verde	Buena
2024-11-27	5001897	1400.0	1.0530	1474.2	0.0238	16.1445 +/-	1.2171	75.00		Cumplimiento	15	Verde	Buena
2024-11-28	5001899	1425.0	1.0781	1536.3	0.0133	8.6569 +/-	0.9458	75.00		Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-29	5001901	1400.0	1.0818	1514.5	0.0114	7.5272 +/-	0.9289	75.00		Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-30	5001903	1380.0	1.0848	1497.0	0.0252	16.8332 +/-	1.232	75.00		Cumplimiento	16	Verde	Buena
2024-12-01	5001905	1386.0	1.0888	1509.1	0.0105	6.9579 +/-	0.919	75.00		Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-12-02	5001907	1380.0	1.0895	1503.6	0.0163	10.8409 +/-	1.0221	75.00		Cumplimiento	10	Verde	Buena
PROMEDIO PARA COMPARACION ANUAL						11.8 +/-	2.5	50.00		Cumplimiento	NO APLICA PARA ANUAL		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.197 se muestran las concentraciones estimadas y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

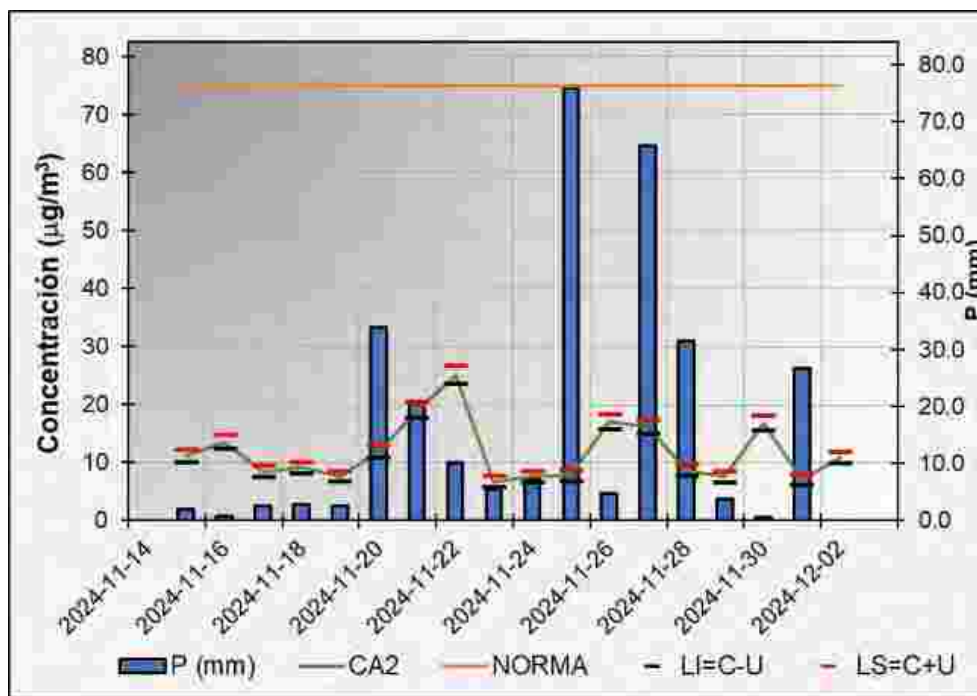


Figura 5.197 Concentración de PM10 para el Punto 2.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

i. *Análisis Estadístico para PM10*

Los resultados del análisis estadístico se muestran en la Tabla 5.168, los cuales ayudan a identificar los percentiles en los cuales se distribuyen los resultados de concentración, mostrando para el percentil 75 un valor de 24.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto 1 y 16.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el punto 2.

Tabla 5.168 Estadística descriptiva por punto para material particulado PM10

PUNTO	N	Desviación Estándar	Promedio	Coefficiente de variación	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
Punto 1	18	7.6	17.4	43.5%	12.7	15.6	24.5
Punto 2	18	5.2	11.8	43.9%	7.6	10.0	16.3

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

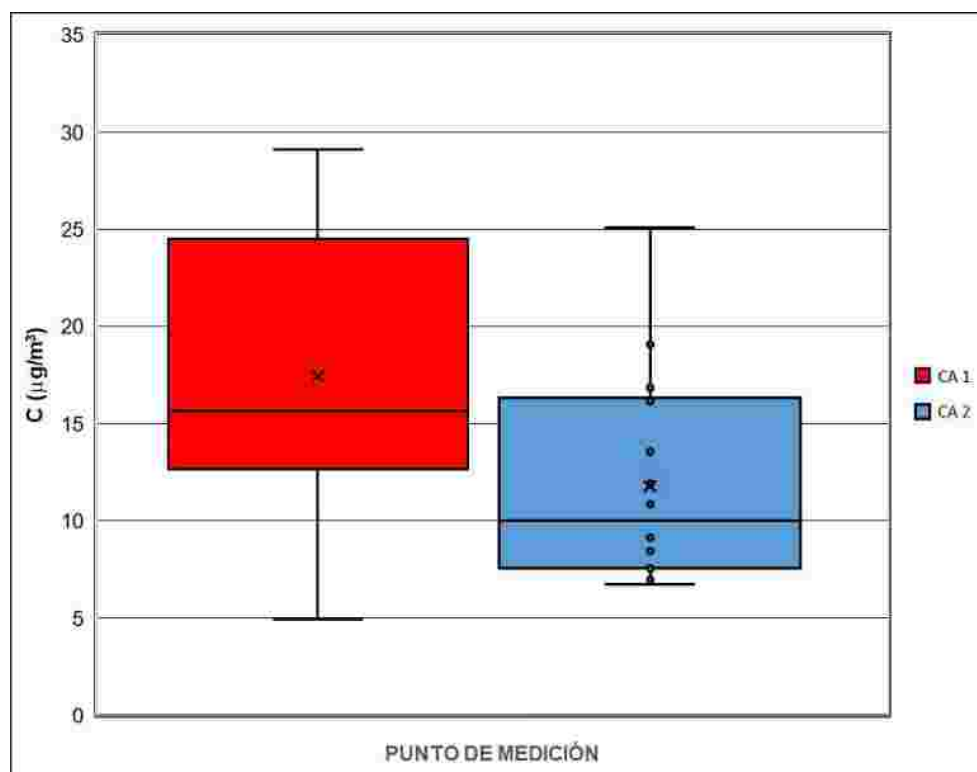


Figura 5.198 Diagrama de caja y bigotes para PM10

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

El gráfico de caja y bigotes mostrada en la Figura 5.198, representa la distribución de las concentraciones obtenidas para los dos puntos de muestreo.

Por otro lado, para los dos puntos, se obtuvo que el valor promedio del estudio por debajo de la norma anual de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y de continuar con la tendencia actual lo más probable es que no se supere.

B. Resultados de Material Particulado PM2.5

A continuación, se tabulan los resultados para los dos (2) puntos de muestreo o estaciones para el contaminante material particulado expresado como PM2.5.

I. Concentraciones de PM2.5 para el Punto 1 "CA1"

En la Tabla 5.169, se tabulan los resultados de las concentraciones estimadas para los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

Tabla 5.169 Resultados de las concentraciones de PM2.5 del Punto 1 "CA1".

RESULTADOS										ESTIMACIÓN DEL ICA		
Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	t (min)	Q _{ref} (l/min)	V _{ref} (m³)	W (µg)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ICA	COLOR	CATEGORIA
2024-11-15	C1722564	1380.0	16.28	22.47	140	6.23	+/- 0.53	37.00	Cumplimiento	26	Verde	Buena
2024-11-16	C1722560	1380.0	16.27	22.45	109	4.86	+/- 0.49	37.00	Cumplimiento	20	Verde	Buena
2024-11-17	C1722568	1380.0	16.26	22.44	88	3.92	+/- 0.47	37.00	Cumplimiento	16	Verde	Buena
2024-11-18	C1722567	1380.0	16.29	22.48	47	2.09	+/- 0.44	37.00	Cumplimiento	9	Verde	Buena
2024-11-19	C1722570	1380.0	16.25	22.43	49	2.18	+/- 0.44	37.00	Cumplimiento	9	Verde	Buena
2024-11-20	C1722562	1380.0	16.22	22.39	25	1.12	+/- 0.43	37.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-21	C1722574	1380.0	16.25	22.42	34	1.52	+/- 0.43	37.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-22	C1722554	1391.0	16.36	22.76	60	2.64	+/- 0.44	37.00	Cumplimiento	11	Verde	Buena
2024-11-23	C1722577	1387.0	16.25	22.54	71	3.15	+/- 0.45	37.00	Cumplimiento	13	Verde	Buena
2024-11-24	C1722578	1380.0	16.25	22.42	72	3.21	+/- 0.45	37.00	Cumplimiento	13	Verde	Buena
2024-11-25	C1722576	1440.0	16.24	23.38	23	0.98	+/- 0.41	37.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena
2024-11-26	C1722551	1440.0	16.31	23.48	88	3.75	+/- 0.45	37.00	Cumplimiento	16	Verde	Buena
2024-11-27	C1722559	1400.0	16.20	22.68	56	2.47	+/- 0.44	37.00	Cumplimiento	10	Verde	Buena
2024-11-28	C1722580	1420.0	16.26	23.08	52	2.25	+/- 0.43	37.00	Cumplimiento	9	Verde	Buena
2024-11-29	C1722569	1395.0	16.31	22.75	47	2.07	+/- 0.43	37.00	Cumplimiento	9	Verde	Buena
2024-11-30	C1722579	1380.0	16.20	22.36	77	3.44	+/- 0.46	37.00	Cumplimiento	14	Verde	Buena
2024-12-01	C1722585	1395.0	16.24	22.66	114	5.03	+/- 0.49	37.00	Cumplimiento	21	Verde	Buena
2024-12-02	C1722583	1380.0	16.32	22.52	45	2	+/- 0.43	37.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
PROMEDIO PARA COMPARACION ANUAL						2.9	+/- 0.7	25.00	Cumplimiento	NO APLICA PARA ANUAL		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.199 se muestran las concentraciones estimadas y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

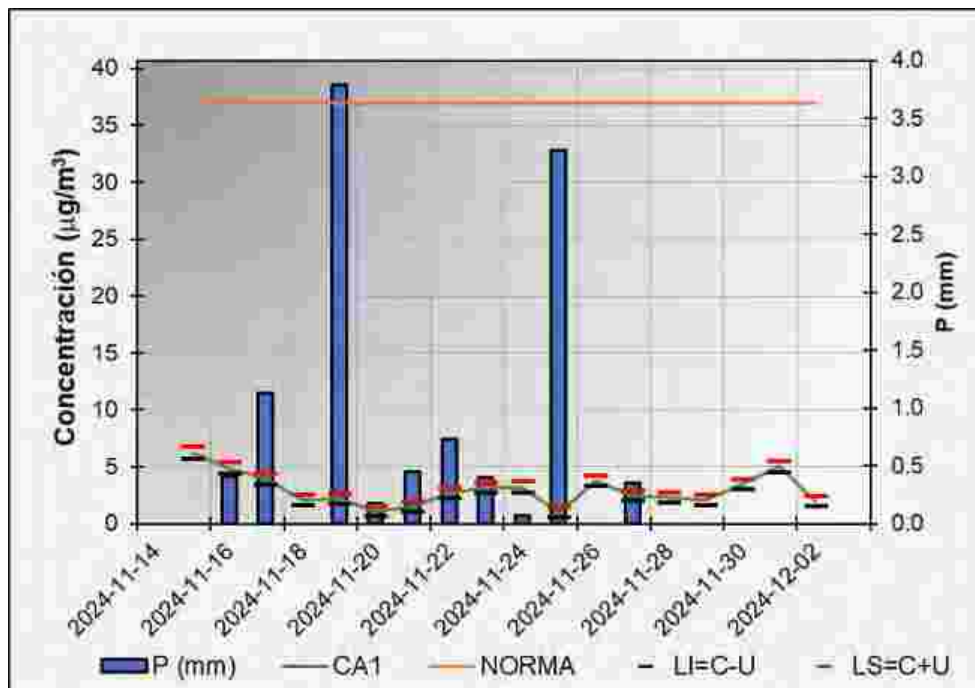


Figura 5.199 Concentración de PM2.5 para el Punto 1.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

II. Concentraciones de PM2.5 para el Punto 1 "CA2"

En la Tabla 5.170, se tabulan los resultados de las concentraciones estimadas para los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y el 02 de diciembre de 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

Tabla 5.170 Resultados de las concentraciones de PM2.5 del Punto 2 "CA2".

RESULTADOS										ESTIMACIÓN DEL ICA		
Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	t (min)	Q _{ref} (l/min)	V _{ref} (m³)	W (µg)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ICA	COLOR	CATEGORIA
2024-11-15	C1722553	1380.0	16.18	22.34	103	4.61 +/-	0.48	37.00	Cumplimiento	19	Verde	Buena
2024-11-16	C1722565	1380.0	16.15	22.29	90	4.04 +/-	0.47	37.00	Cumplimiento	17	Verde	Buena
2024-11-17	C1722558	1380.0	16.08	22.18	66	2.98 +/-	0.45	37.00	Cumplimiento	12	Verde	Buena
2024-11-18	C1722571	1380.0	16.16	22.31	25	1.12 +/-	0.43	37.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-19	C1722566	1380.0	16.13	22.26	26	1.17 +/-	0.43	37.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-20	C1722556	1380.0	16.12	22.24	90	4.05 +/-	0.47	37.00	Cumplimiento	17	Verde	Buena
2024-11-21	C1722573	1380.0	16.11	22.23	50	2.25 +/-	0.44	37.00	Cumplimiento	9	Verde	Buena
2024-11-22	C1722561	1380.0	16.19	22.34	68	3.04 +/-	0.45	37.00	Cumplimiento	13	Verde	Buena
2024-11-23	C1722557	1391.0	16.10	22.40	47	2.1 +/-	0.44	37.00	Cumplimiento	9	Verde	Buena
2024-11-24	C1722582	1380.0	16.08	22.19	57	2.57 +/-	0.45	37.00	Cumplimiento	11	Verde	Buena
2024-11-25	C1722572	1440.0	16.08	23.15	35	1.51 +/-	0.42	37.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-26	C1722563	1435.0	16.13	23.15	20	0.86 +/-	0.41	37.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena
2024-11-27	C1722552	1400.0	16.04	22.45	95	4.23 +/-	0.47	37.00	Cumplimiento	18	Verde	Buena
2024-11-28	C1722555	1425.0	16.06	22.89	173	7.56 +/-	0.56	37.00	Cumplimiento	31	Verde	Buena
2024-11-29	C1722581	1400.0	16.09	22.52	79	3.51 +/-	0.46	37.00	Cumplimiento	15	Verde	Buena
2024-11-30	C1722575	1380.0	16.07	22.17	218	9.83 +/-	0.66	37.00	Cumplimiento	41	Verde	Buena
2024-12-01	C1722584	1386.0	16.04	22.23	58	2.61 +/-	0.45	37.00	Cumplimiento	11	Verde	Buena
2024-12-02	C1722586	1390.0	16.16	22.46	34	1.51 +/-	0.43	37.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
PROMEDIO PARA COMPARACION ANUAL						3.3 +/-	1.1	25.00	Cumplimiento	NO APLICA PARA ANUAL		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.200 se muestran las concentraciones estimadas y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

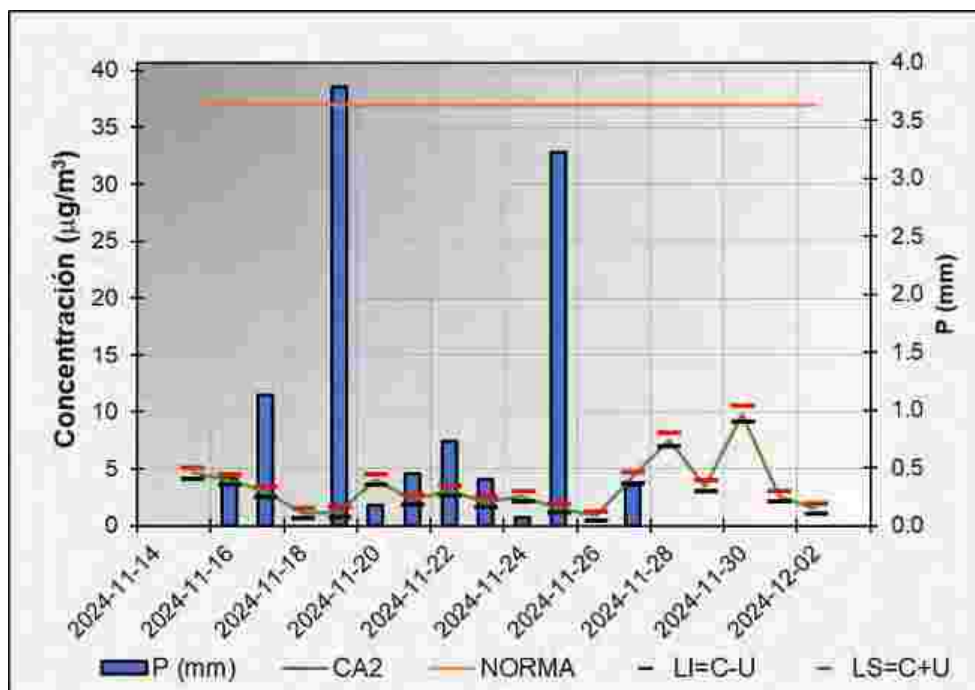


Figura 5.200. Concentración de PM2.5 para el Punto 2

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

III. Análisis Estadístico para PM2.5

Los resultados del análisis estadístico se muestran en la Tabla 5.171, los cuales ayudan a identificar los percentiles en los cuales se distribuyen los resultados de concentración, mostrando para el percentil 75 un valor de 3.8 µg/m3 en el punto1 y 4.1 µg/m3 en el punto 2.

Tabla 5.171. Estadística descriptiva por punto para material particulado PM2.5.

PUNTO	N	Desviación Estándar	Promedio	Coefficiente de variación	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
Punto 1	18	1.4	2.9	47.9%	2.1	2.6	3.8
Punto 2	18	2.3	3.3	69.5%	1.5	2.8	4.1

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

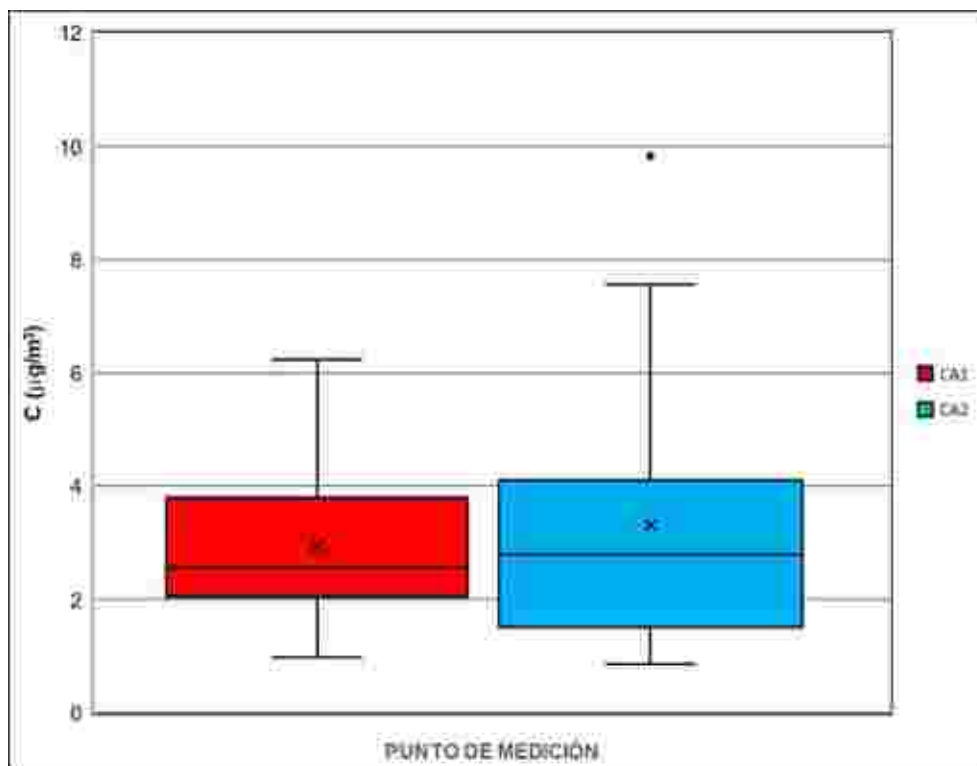


Figura 5.201. Diagrama de caja y bigotes PM2.5.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

El grafico de caja y bigotes mostrada en la Figura 5.201, representa la distribución de las concentraciones obtenidas para los dos puntos de muestreo.

Por otro lado, para los dos puntos, se obtuvo que el valor promedio del estudio está por debajo de la norma anual de 25 µg/m³.

C. Dióxido de azufre SO₂

A continuación, se tabulan los resultados para los dos (2) puntos de muestreo o estaciones para el contaminante dióxido de azufre SO₂.

I. Concentraciones de SO₂ para el Punto 1 "CA1"

En la Tabla 5.172, se tabulan los resultados de las concentraciones diarias estimadas para los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024.

Tabla 5.172 Resultados de las concentraciones de SO₂ del Punto 1 "CA1".

Resultados							
Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	C (ppb)	U (ppb)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)
2024-11-15	C07-561086	1.66	+/- 0.25	4.36	+/- 0.65	50.00	Cumplimiento
2024-11-16	C07-496988	1.7	+/- 0.3	4.44	+/- 0.78	50.00	Cumplimiento
2024-11-17	C07-151066	0.63	+/- 0.17	1.65	+/- 0.45	50.00	Cumplimiento
2024-11-18	C07-833620	1.11	+/- 0.25	2.91	+/- 0.66	50.00	Cumplimiento
2024-11-19	C07-625622	0.93	+/- 0.23	2.42	+/- 0.6	50.00	Cumplimiento
2024-11-20	C07-647383	0.82	+/- 0.18	2.14	+/- 0.48	50.00	Cumplimiento
2024-11-21	C07-053969	0.69	+/- 0.17	1.79	+/- 0.46	50.00	Cumplimiento
2024-11-22	C07-568087	1.91	+/- 0.3	5.01	+/- 0.78	50.00	Cumplimiento
2024-11-23	C07-538459	1.5	+/- 0.21	3.94	+/- 0.55	50.00	Cumplimiento
2024-11-24	C07-601958	1.05	+/- 0.18	2.74	+/- 0.47	50.00	Cumplimiento
2024-11-25	C07-535075	1.28	+/- 0.26	3.36	+/- 0.69	50.00	Cumplimiento
2024-11-26	C07-863912	0.66	+/- 0.17	1.74	+/- 0.45	50.00	Cumplimiento
2024-11-27	C07-053574	0.7	+/- 0.18	1.83	+/- 0.46	50.00	Cumplimiento
2024-11-28	C07-460317	0.8	+/- 0.23	2.1	+/- 0.59	50.00	Cumplimiento
2024-11-29	C07-777688	0.92	+/- 0.22	2.4	+/- 0.57	50.00	Cumplimiento
2024-11-30	C07-017187	1.08	+/- 0.23	2.84	+/- 0.61	50.00	Cumplimiento
2024-12-01	C07-222601	0.77	+/- 0.18	2.01	+/- 0.46	50.00	Cumplimiento
2024-12-02	C07-698507	1.26	+/- 0.24	3.3	+/- 0.64	50.00	Cumplimiento

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.202 se muestran las concentraciones diarias estimadas y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

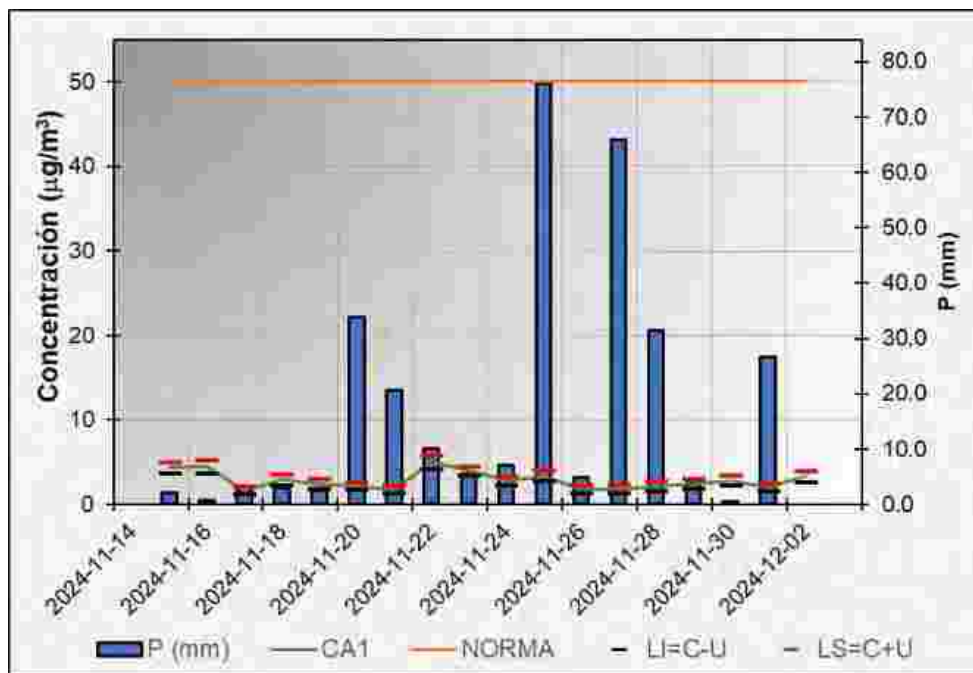


Figura 5.202 Concentración de SO₂ diaria para el Punto 1.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.173, se tabulan los resultados de las concentraciones máximas horarias estimadas para cada uno de los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

Tabla 5.173 Resultados de las concentraciones máximas horarias de SO₂ del Punto 1 "CA1".

Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	Resultados						ESTIMACIÓN DEL ICA		
		C (ppb)	U (ppb)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ICA	COLOR	CATEGORIA
2024-11-15	C07-561086	4.22 +/- 0.51		11.05 +/- 1.32		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-16	C07-496988	7.78 +/- 0.48		20.37 +/- 1.25		100.00	Cumplimiento	11	Verde	Buena
2024-11-17	C07-151066	1.33 +/- 0.53		3.49 +/- 1.40		100.00	Cumplimiento	2	Verde	Buena
2024-11-18	C07-833620	5.18 +/- 0.50		13.56 +/- 1.30		100.00	Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-19	C07-625622	3.72 +/- 0.51		9.75 +/- 1.34		100.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-20	C07-647383	2.61 +/- 0.52		6.82 +/- 1.36		100.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena
2024-11-21	C07-053969	2.05 +/- 0.53		5.37 +/- 1.38		100.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena
2024-11-22	C07-568087	9.03 +/- 0.47		23.64 +/- 1.23		100.00	Cumplimiento	13	Verde	Buena
2024-11-23	C07-538459	3.31 +/- 0.51		8.68 +/- 1.35		100.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-24	C07-601958	2.07 +/- 0.53		5.42 +/- 1.38		100.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena
2024-11-25	C07-535075	5.33 +/- 0.50		13.94 +/- 1.30		100.00	Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-26	C07-863912	1.61 +/- 0.53		4.21 +/- 1.39		100.00	Cumplimiento	2	Verde	Buena
2024-11-27	C07-053574	1.53 +/- 0.53		4.00 +/- 1.39		100.00	Cumplimiento	2	Verde	Buena
2024-11-28	C07-460317	4.11 +/- 0.51		10.76 +/- 1.33		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-29	C07-777688	4.05 +/- 0.51		10.60 +/- 1.33		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-30	C07-017187	4.32 +/- 0.50		11.31 +/- 1.32		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-12-01	C07-222601	2.04 +/- 0.53		5.35 +/- 1.38		100.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena
2024-12-02	C07-698507	3.85 +/- 0.51		10.08 +/- 1.33		100.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.203 se muestran las concentraciones horarias medidas y en la Tabla 5.174, los valores del ICA de todas las horas de muestreo.

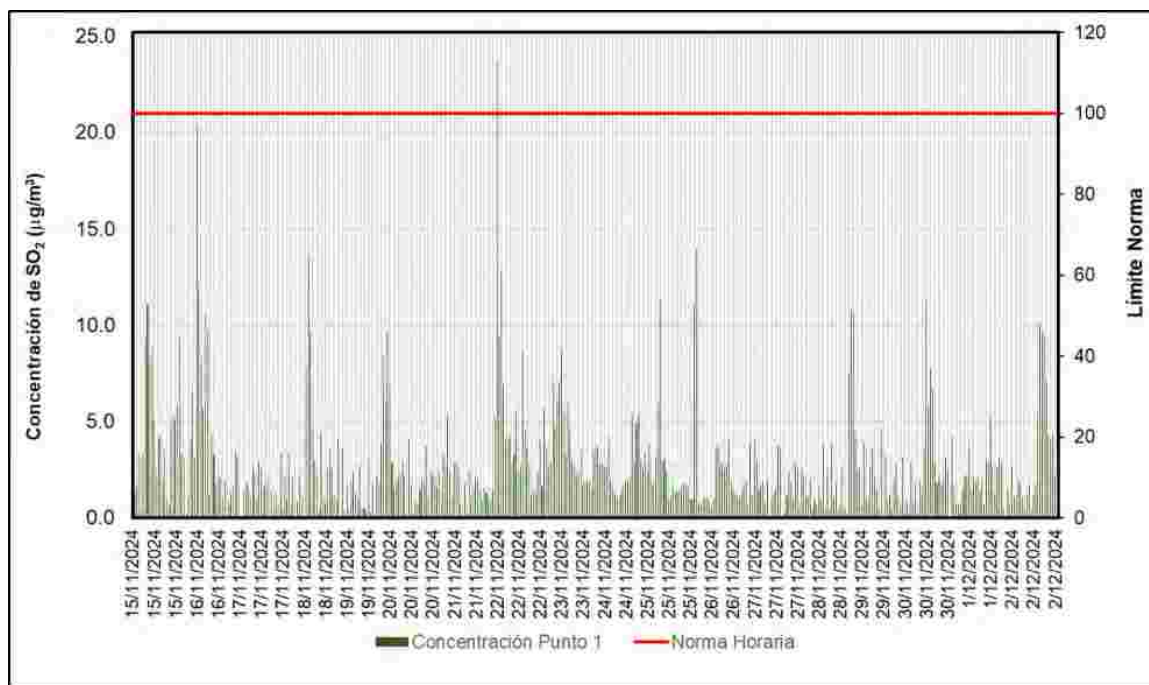


Figura 5.203 Concentración de SO₂ horaria para el Punto 1.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

ICA RESUMEN HORARIO

[illegible]

Resumen					
Calor	Conteo	%	Calor	Conteo	%
Verde	432	100.0	Rojo	0	0.0
Amarillo	0	0.0	Púrpura	0	0.0
Naranja	0	0.0	Marrón	0	0.0

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

II. Concentraciones de SO₂ para el Punto 2 "CA2"

En la Tabla 5.175, se tabulan los resultados de las concentraciones diarias estimadas para los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024.

Tabla 5.175 Resultados de las concentraciones de SO₂ del Punto 2 "CA2".

Resultados							
Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	C (ppb)	U (ppb)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)
2024-11-15	C07-001252	1.96 +/- 0.24		5.12 +/- 0.62		50.00	Cumplimiento
2024-11-16	C07-731759	2.53 +/- 0.26		6.63 +/- 0.69		50.00	Cumplimiento
2024-11-17	C07-599338	2.7 +/- 0.26		7.08 +/- 0.69		50.00	Cumplimiento
2024-11-18	C07-090328	2.34 +/- 0.26		6.12 +/- 0.67		50.00	Cumplimiento
2024-11-19	C07-233608	1.92 +/- 0.27		5.04 +/- 0.7		50.00	Cumplimiento
2024-11-20	C07-627067	2.17 +/- 0.26		5.67 +/- 0.69		50.00	Cumplimiento
2024-11-21	C07-134787	2.49 +/- 0.26		6.53 +/- 0.69		50.00	Cumplimiento
2024-11-22	C07-275920	2.16 +/- 0.27		5.64 +/- 0.72		50.00	Cumplimiento
2024-11-23	C07-111896	2.54 +/- 0.26		6.66 +/- 0.68		50.00	Cumplimiento
2024-11-24	C07-996418	2.39 +/- 0.27		6.25 +/- 0.7		50.00	Cumplimiento
2024-11-25	C07-366694	2.3 +/- 0.27		6.02 +/- 0.71		50.00	Cumplimiento
2024-11-26	C07-969838	2.45 +/- 0.25		6.43 +/- 0.66		50.00	Cumplimiento
2024-11-27	C07-879106	1.97 +/- 0.24		5.15 +/- 0.63		50.00	Cumplimiento
2024-11-28	C07-404722	2.08 +/- 0.24		5.45 +/- 0.62		50.00	Cumplimiento
2024-11-29	C07-959145	2.21 +/- 0.24		5.79 +/- 0.64		50.00	Cumplimiento
2024-11-30	C07-270837	2.13 +/- 0.24		5.57 +/- 0.63		50.00	Cumplimiento
2024-12-01	C07-174943	1.71 +/- 0.25		4.48 +/- 0.66		50.00	Cumplimiento
2024-12-02	C07-506618	1.8 +/- 0.22		4.71 +/- 0.59		50.00	Cumplimiento

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.204 se muestran las concentraciones estimadas y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

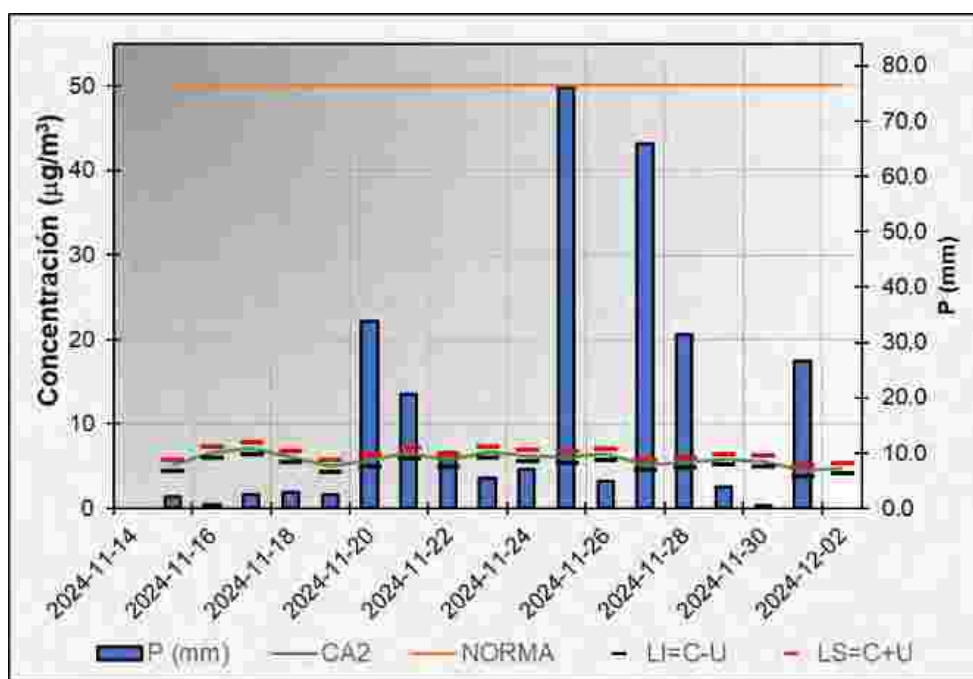


Figura 5.204 Concentración de SO₂ diaria para el Punto 2.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

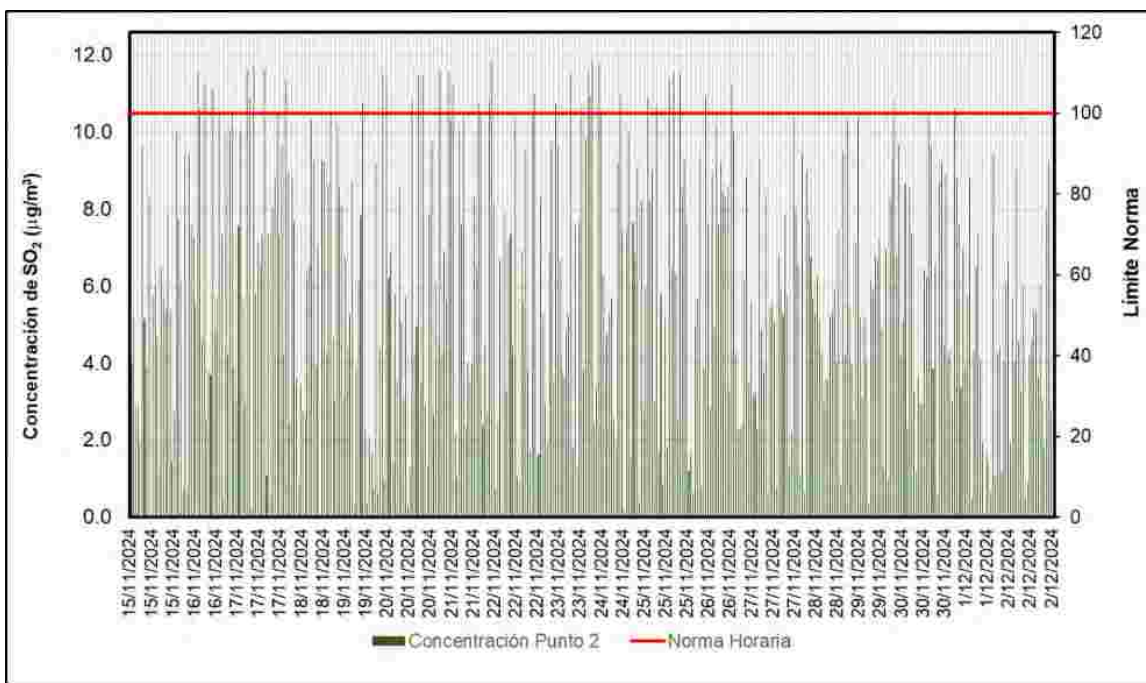
En la Tabla 5.176, se tabulan los resultados de las concentraciones máximas horarias estimadas para cada uno de los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

Tabla 5.176 Resultados de las concentraciones máximas horarias de SO₂ del Punto 2 "CA2".

Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	Resultados						ESTIMACIÓN DEL ICA		
		C (ppb)	U (ppb)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ICA	COLOR	CATEGORIA
2024-11-15	C07-001252	3.81 +/- 0.55		9.99 +/- 1.44		100.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-16	C07-731759	4.41 +/- 0.54		11.55 +/- 1.42		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-17	C07-599338	4.49 +/- 0.54		11.75 +/- 1.42		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-18	C07-090328	4.34 +/- 0.54		11.37 +/- 1.43		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-19	C07-233608	4.39 +/- 0.54		11.50 +/- 1.42		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-20	C07-627067	4.39 +/- 0.54		11.50 +/- 1.42		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-21	C07-134787	4.45 +/- 0.54		11.64 +/- 1.42		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-22	C07-275920	4.50 +/- 0.54		11.79 +/- 1.42		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-23	C07-111896	4.42 +/- 0.54		11.57 +/- 1.42		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-24	C07-996418	4.51 +/- 0.54		11.82 +/- 1.42		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-25	C07-366694	4.41 +/- 0.54		11.56 +/- 1.42		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-26	C07-969838	4.30 +/- 0.54		11.26 +/- 1.43		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-27	C07-879106	3.97 +/- 0.55		10.40 +/- 1.44		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-28	C07-404722	3.94 +/- 0.55		10.32 +/- 1.44		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-29	C07-959145	4.14 +/- 0.55		10.85 +/- 1.43		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-30	C07-270837	3.99 +/- 0.55		10.46 +/- 1.43		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-12-01	C07-174943	4.06 +/- 0.55		10.62 +/- 1.43		100.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-12-02	C07-506618	3.53 +/- 0.55		9.24 +/- 1.45		100.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.205 se muestran las concentraciones horarias medidas y en la Tabla 5.177, los valores del ICA de todas las horas de muestreo.



Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

ICA RESUMEN HORARIO

[illegible]

Resumen					
Calor	Conteo	%	Calor	Conteo	%
Verde	432	100.0	Rojo	0	0.0
Amarillo	0	0.0	Púrpura	0	0.0
Naranja	0	0.0	Marrón	0	0.0

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Los resultados del análisis estadístico se muestran en la Tabla 5.178 para las concentraciones máximas horarias, los cuales ayudan a identificar Las concentraciones para el percentil 75 los cuales son de 11.9 µg/m3 para el punto 1 y de 11.6 µg/m3 para el punto 2.

Tabla 5.178. Estadística descriptiva por punto para el Dióxido de Azufre SO₂

PUNTO	N	Desviación Estándar	Promedio	Coefficiente de variación	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
Punto 1	18	5.5	9.9	55.4%	5.4	9.9	11.9
Punto 2	18	0.7	11.1	6.7%	10.4	11.4	11.6

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

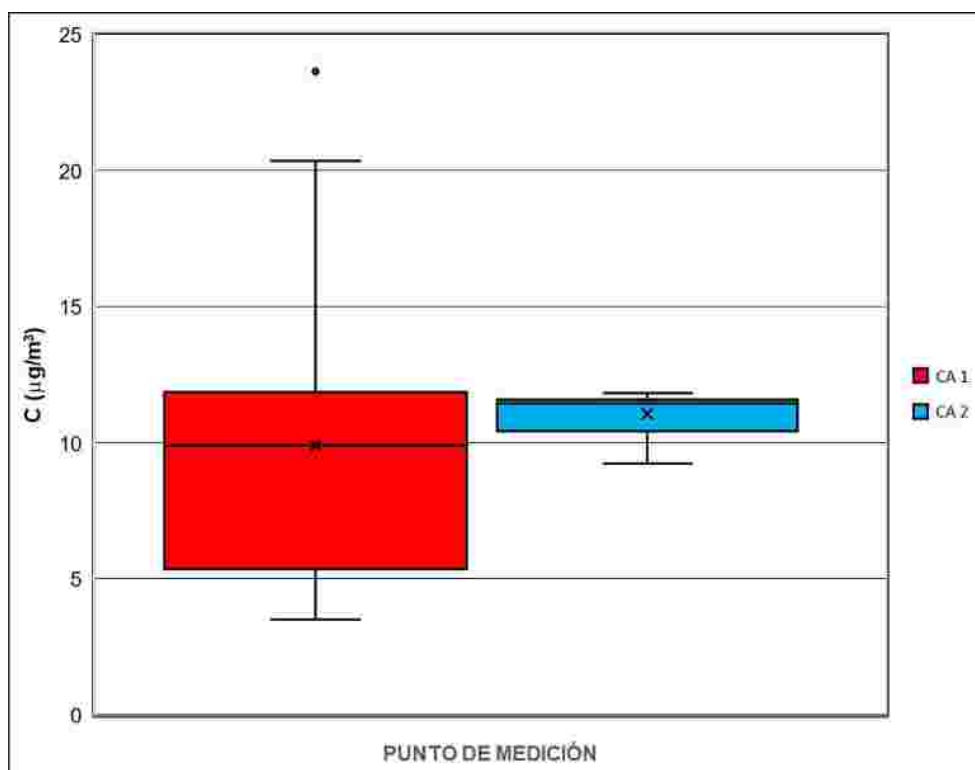


Figura 5.206 Diagrama de caja y bigotes SO₂.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

El grafico de caja y bigotes mostrada en la Figura 5.206, representa la distribución de las concentraciones obtenidas para los dos puntos de muestreo, se identifica un dato atípico de 23.64 µg/m³.

D. Dióxido de nitrógeno NO₂

A continuación, se tabulan los resultados para los dos (2) puntos de muestreo o estaciones para el contaminante dióxido de nitrógeno NO₂.

I. Concentraciones de NO₂ para el Punto 1 "CA1"

En la Tabla 5.179, se tabulan los resultados de las concentraciones diarias estimadas para los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024.

Tabla 5.179 Resultados de las concentraciones de NO₂ del Punto 1 "CA1".

RESULTADOS							
Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	C (ppb)	U (ppb)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)
2024-11-15	C06-281852	2.34	+/- 0.37	4.4	+/- 0.7		
2024-11-16	C06-447324	3.29	+/- 0.37	6.19	+/- 0.7		
2024-11-17	C06-945935	1.19	+/- 0.37	2.24	+/- 0.7		
2024-11-18	C06-200947	1.68	+/- 0.37	3.16	+/- 0.7		
2024-11-19	C06-422278	1.44	+/- 0.37	2.72	+/- 0.7		
2024-11-20	C06-256116	1.52	+/- 0.37	2.86	+/- 0.7		
2024-11-21	C06-728661	1.36	+/- 0.37	2.56	+/- 0.7		
2024-11-22	C06-420221	2.9	+/- 0.37	5.46	+/- 0.7		
2024-11-23	C06-464059	2.24	+/- 0.37	4.21	+/- 0.7		
2024-11-24	C06-923552	1.16	+/- 0.37	2.19	+/- 0.7		
2024-11-25	C06-237514	1.78	+/- 0.37	3.36	+/- 0.7		
2024-11-26	C06-898906	1.46	+/- 0.37	2.75	+/- 0.7		
2024-11-27	C06-071647	1.53	+/- 0.37	2.88	+/- 0.7		
2024-11-28	C06-203737	1.85	+/- 0.37	3.47	+/- 0.7		
2024-11-29	C06-246442	3.4	+/- 0.37	6.39	+/- 0.7		
2024-11-30	C06-123061	1.32	+/- 0.37	2.49	+/- 0.7		
2024-12-01	C06-664528	1.63	+/- 0.37	3.06	+/- 0.7		
2024-12-02	C06-049019	1.59	+/- 0.37	2.99	+/- 0.7		
PROMEDIO				3.5	+/- 0.7	60.00	Cumplimiento

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.207 se muestran las concentraciones máximas diarias y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

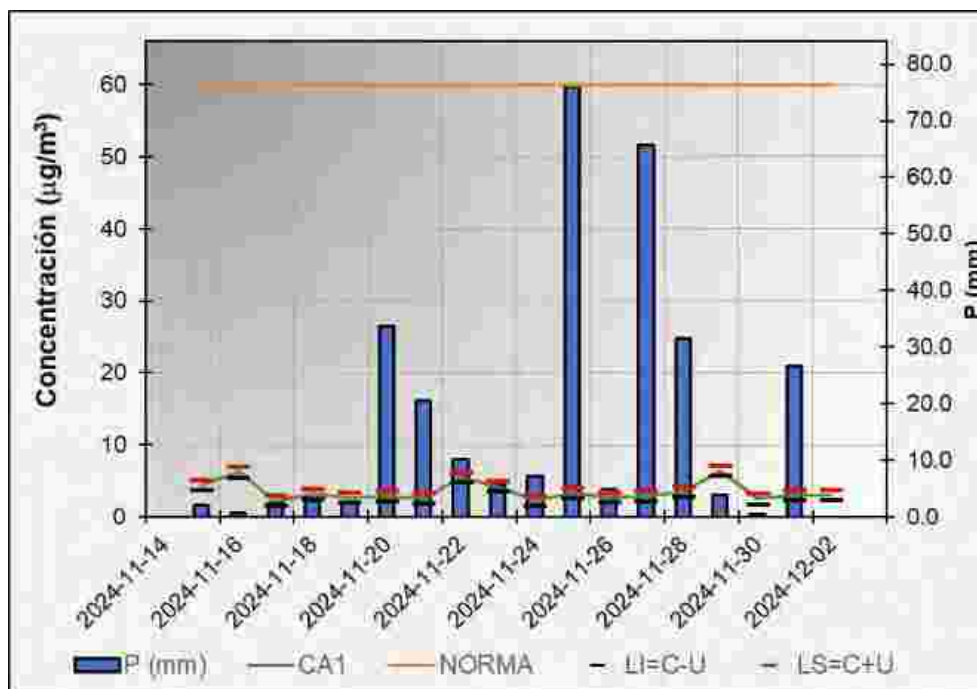


Figura 5.207 Concentración de NO₂ diaria para el Punto 1.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.180, se tabulan los resultados de las concentraciones máximas horarias estimadas para cada uno de los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

Tabla 5.180 Resultados de las concentraciones máximas horarias de NO₂ del Punto 1 "CA1".

Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	Resultados						ESTIMACIÓN DEL ICA		
		C (ppb)	U (ppb)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ICA	COLOR	CATEGORIA
2024-11-15	C06-281852	7.06 +/- 1.82		13.27 +/- 3.43		200.00	Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-16	C06-447324	9.57 +/- 1.81		18.00 +/- 3.41		200.00	Cumplimiento	9	Verde	Buena
2024-11-17	C06-945935	4.35 +/- 1.83		8.18 +/- 3.44		200.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena
2024-11-18	C06-200947	6.12 +/- 1.82		11.51 +/- 3.42		200.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-19	C06-422278	9.03 +/- 1.82		16.98 +/- 3.43		200.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-20	C06-256116	4.90 +/- 1.83		9.21 +/- 3.43		200.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-21	C06-728661	3.31 +/- 1.83		6.23 +/- 3.44		200.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena
2024-11-22	C06-420221	6.77 +/- 1.82		12.72 +/- 3.43		200.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-23	C06-464059	7.59 +/- 1.82		14.27 +/- 3.42		200.00	Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-24	C06-923552	4.54 +/- 1.83		8.54 +/- 3.44		200.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena
2024-11-25	C06-237514	4.93 +/- 1.82		9.27 +/- 3.42		200.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-26	C06-898906	5.80 +/- 1.82		10.91 +/- 3.42		200.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-27	C06-071647	3.64 +/- 1.83		6.84 +/- 3.44		200.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena
2024-11-28	C06-203737	8.18 +/- 1.82		15.38 +/- 3.42		200.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-29	C06-246442	7.85 +/- 1.82		14.75 +/- 3.41		200.00	Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-30	C06-123061	3.96 +/- 1.83		7.45 +/- 3.44		200.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena
2024-12-01	C06-664528	5.92 +/- 1.82		11.13 +/- 3.42		200.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-12-02	C06-049019	4.82 +/- 1.83		9.06 +/- 3.44		200.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.208 se muestran las concentraciones horarias medidas y en la Tabla 5.181, los valores del ICA de todas las horas de muestreo.

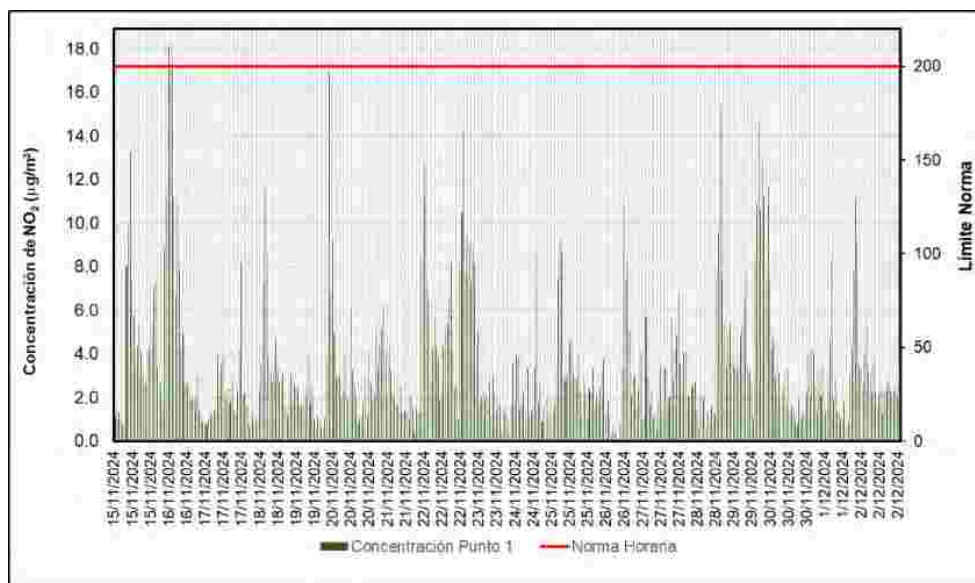


Figura 5.208. Concentración de NO₂ horaria para el Punto 1.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

ICA RESUMEN HORARIO

Resumen					
Calor	Conteo	%	Calor	Conteo	%
Verde	432	100.0	Rojo	0	0.0
Amarillo	0	0.0	Púrpura	0	0.0
Naranja	0	0.0	Marrón	0	0.0

II. Concentraciones de NO₂ para el Punto 2 “CA2”

407

Tabla 5.182 Resultados de las concentraciones de NO₂, Punto 2 "CA2".

RESULTADOS							
Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	C (ppb)	U (ppb)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)
2024-11-15	C06-824877	1.69 +/- 0.71	0.71	3.18 +/- 1.33	1.33		
2024-11-16	C06-699561	1.59 +/- 0.71	0.71	2.98 +/- 1.33	1.33		
2024-11-17	C06-813717	1.76 +/- 0.71	0.71	3.31 +/- 1.33	1.33		
2024-11-18	C06-770947	1.27 +/- 0.71	0.71	2.39 +/- 1.33	1.33		
2024-11-19	C06-989485	1.59 +/- 0.71	0.71	3 +/- 1.33	1.33		
2024-11-20	C06-144257	1.61 +/- 0.71	0.71	3.02 +/- 1.33	1.33		
2024-11-21	C06-707416	1.95 +/- 0.71	0.71	3.66 +/- 1.33	1.33		
2024-11-22	C06-821307	1.44 +/- 0.71	0.71	2.71 +/- 1.33	1.33		
2024-11-23	C06-045919	2.6 +/- 0.7	0.7	4.89 +/- 1.32	1.32		
2024-11-24	C06-501523	3.38 +/- 0.7	0.7	6.36 +/- 1.32	1.32		
2024-11-25	C06-252219	3.2 +/- 0.7	0.7	6.02 +/- 1.32	1.32		
2024-11-26	C06-557914	3.59 +/- 0.7	0.7	6.75 +/- 1.32	1.32		
2024-11-27	C06-951684	3.72 +/- 0.7	0.7	7 +/- 1.32	1.32		
2024-11-28	C06-103800	3.76 +/- 0.7	0.7	7.07 +/- 1.32	1.32		
2024-11-29	C06-789651	3.03 +/- 0.7	0.7	5.69 +/- 1.32	1.32		
2024-11-30	C06-364050	2.64 +/- 0.7	0.7	4.97 +/- 1.32	1.32		
2024-12-01	C06-609363	2.84 +/- 0.7	0.7	5.34 +/- 1.32	1.32		
2024-12-02	C06-208197	2.42 +/- 0.71	0.71	4.55 +/- 1.33	1.33		
PROMEDIO				4.6 +/- 0.9		60.00	Cumplimiento

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.209 se muestran las concentraciones máximas diarias y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

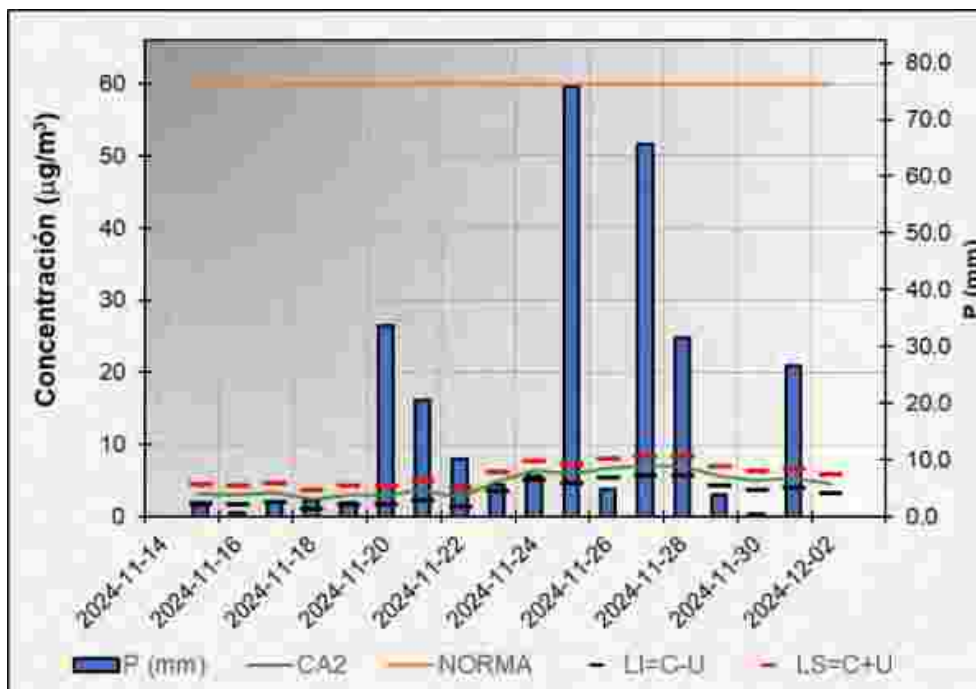


Figura 5.209 Concentración de NO₂ diaria para el Punto 2.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.183, se tabulan los resultados de las concentraciones máximas horarias estimadas para cada uno de los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

Tabla 5.183 Resultados de las concentraciones máximas horarias de NO₂ del Punto 2 "CA2".

Resultados								ESTIMACIÓN DEL ICA			
Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	C (ppb)	U (ppb)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ICA	COLOR	CATEGORIA	
2024-11-15	C06-824877	2.36	+/- 3.46	4.45	+/- 6.50	200.00	Cumplimiento	2	Verde	Buena	
2024-11-16	C06-699561	1.91	+/- 3.46	3.58	+/- 6.51	200.00	Cumplimiento	2	Verde	Buena	
2024-11-17	C06-813717	2.66	+/- 3.46	5.00	+/- 6.50	200.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena	
2024-11-18	C06-770947	2.38	+/- 3.45	4.48	+/- 6.50	200.00	Cumplimiento	2	Verde	Buena	
2024-11-19	C06-989485	2.23	+/- 3.46	4.20	+/- 6.51	200.00	Cumplimiento	2	Verde	Buena	
2024-11-20	C06-144257	2.46	+/- 3.46	4.63	+/- 6.50	200.00	Cumplimiento	2	Verde	Buena	
2024-11-21	C06-707416	2.64	+/- 3.46	4.97	+/- 6.50	200.00	Cumplimiento	2	Verde	Buena	
2024-11-22	C06-821307	4.18	+/- 3.48	7.86	+/- 6.54	200.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena	
2024-11-23	C06-045919	3.24	+/- 3.45	6.09	+/- 6.48	200.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena	
2024-11-24	C06-501523	3.62	+/- 3.44	6.80	+/- 6.48	200.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena	
2024-11-25	C06-252219	3.46	+/- 3.44	6.50	+/- 6.48	200.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena	
2024-11-26	C06-557914	3.80	+/- 3.44	7.15	+/- 6.47	200.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena	
2024-11-27	C06-951684	3.86	+/- 3.44	7.26	+/- 6.47	200.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena	
2024-11-28	C06-103800	3.95	+/- 3.44	7.43	+/- 6.47	200.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena	
2024-11-29	C06-789651	3.77	+/- 3.44	7.08	+/- 6.47	200.00	Cumplimiento	4	Verde	Buena	
2024-11-30	C06-364050	3.58	+/- 3.44	6.73	+/- 6.47	200.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena	
2024-12-01	C06-609363	3.50	+/- 3.45	6.59	+/- 6.48	200.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena	
2024-12-02	C06-208197	3.15	+/- 3.45	5.92	+/- 6.48	200.00	Cumplimiento	3	Verde	Buena	

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.210 se muestran las concentraciones horarias medidas y en la Tabla 5.184, los valores del ICA de todas las horas de muestreo.

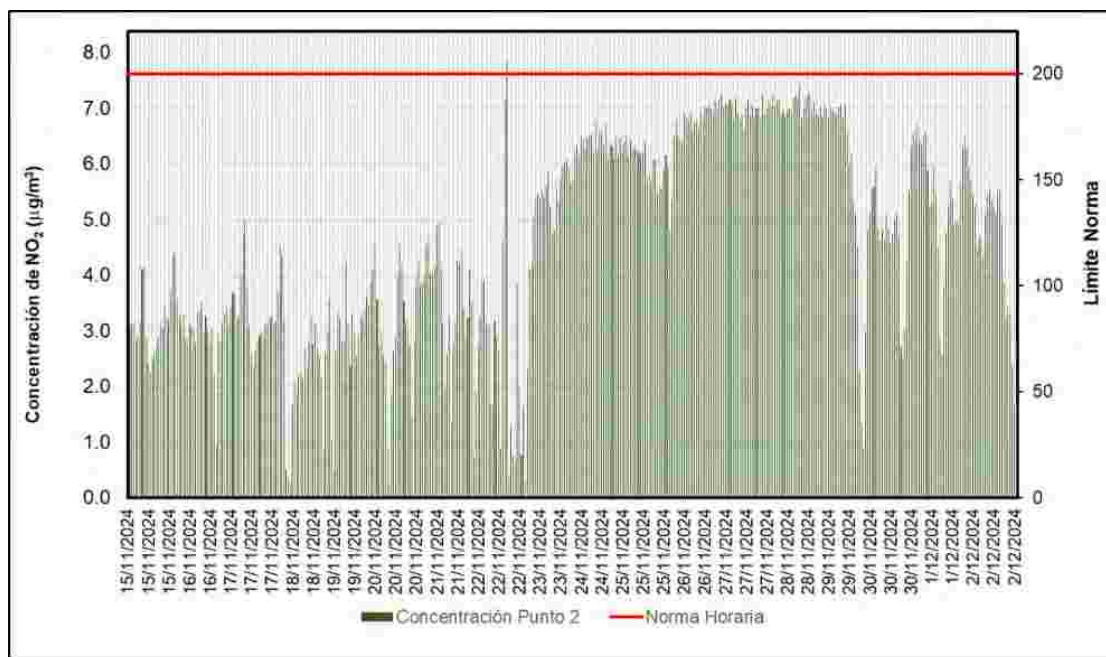


Figura 5.210 Concentración de NO₂ horaria para el Punto 2.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

ICA RESUMEN HORARIO

[illegible]

Resumen					
Calor	Conteo	%	Calor	Conteo	%
Verde	432	100.0	Rojo	0	0.0
Amarillo	0	0.0	Púrpura	0	0.0
Naranja	0	0.0	Marrón	0	0.0

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Los resultados del análisis estadístico se muestran en la Tabla 5.185 para las concentraciones máximas horarias, los cuales ayudan a identificar Las concentraciones para el percentil 75 los cuales son de 14.4µg/m3 para el punto 1 y de 7.1 µg/m3 para el punto 2.

Tabla 5.185 Estadística descriptiva por punto para Dióxido de Nitrógeno NO₂

PUNTO	N	Desviación Estándar	Promedio	Coefficiente de variación	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
Punto 1	18	3.5	11.3	31.2%	8.5	11.0	14.4
Punto 2	18	1.3	5.9	22.0%	4.6	6.3	7.1

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

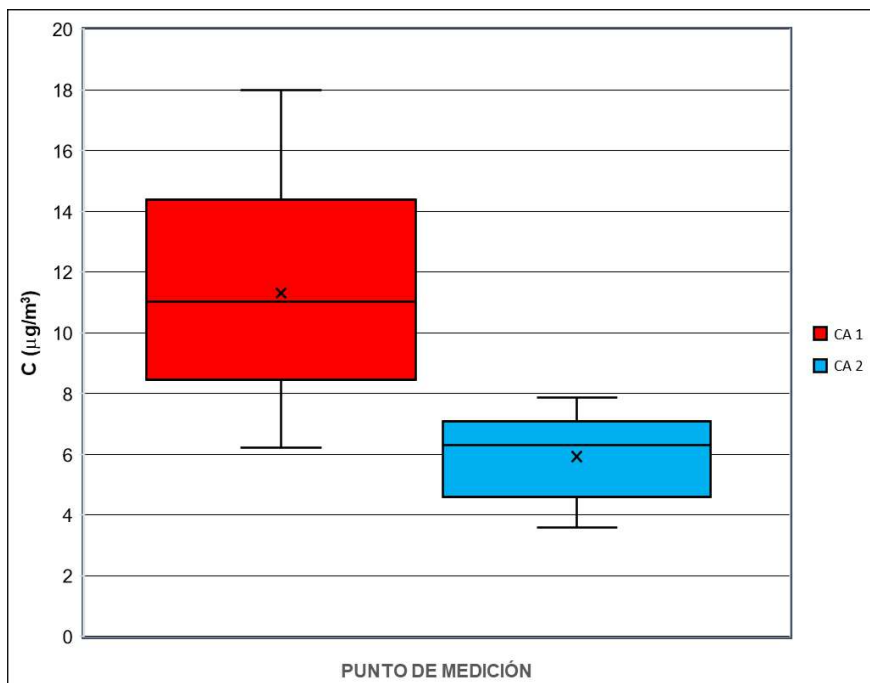


Figura 5.211 Diagrama de caja y bigotes NO₂

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

El grafico de caja y bigotes mostrada en la Figura 5.211, representa la distribución de las concentraciones obtenidas para los dos puntos de muestreo. Sin presencia de datos atípicos.

E. Monóxido de carbono CO

A continuación, se tabulan los resultados para los dos (2) puntos de muestreo o estaciones para el contaminante Monóxido de Carbono (CO).

I. Concentraciones de CO para el Punto 1 "CA1"

En la Tabla 5.186, se tabulan los resultados de las concentraciones máximas octorarias estimadas para los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

**Tabla 5.186 Resultados de las concentraciones máximas octorarias de CO del Punto 1
"CA1".**

Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	Resultados					Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ESTIMACIÓN DEL ICA		
		C (ppm)	U (ppm)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)		ICA	COLOR	CATEGORIA
2024-11-15	C08-986024	0.9369 +/- 0.1618		1072.6 +/- 185.2		5000.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-16	C08-301407	0.3842 +/- 0.1136		439.8 +/- 130.1		5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-17	C08-965039	0.5701 +/- 0.1136		652.7 +/- 130.0		5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-18	C08-439906	0.6010 +/- 0.1128		688.1 +/- 129.1		5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-19	C08-284467	0.4025 +/- 0.1200		460.8 +/- 137.3		5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-20	C08-995468	0.4389 +/- 0.1211		502.5 +/- 138.7		5000.00	Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-21	C08-750560	0.3394 +/- 0.1145		388.6 +/- 131.1		5000.00	Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-22	C08-816351	0.3316 +/- 0.1163		379.6 +/- 133.2		5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-23	C08-419122	0.2952 +/- 0.1146		337.9 +/- 131.2		5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-24	C08-177380	0.2595 +/- 0.1167		297.1 +/- 133.6		5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-25	C08-690810	0.2125 +/- 0.1149		243.3 +/- 131.5		5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-26	C08-075922	0.2216 +/- 0.1148		253.7 +/- 131.4		5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-27	C08-039358	0.2320 +/- 0.1148		265.6 +/- 131.5		5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-28	C08-647256	0.2574 +/- 0.1147		294.7 +/- 131.3		5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-29	C08-150418	0.2643 +/- 0.1238		302.6 +/- 141.7		5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-30	C08-947763	0.3384 +/- 0.1144		387.4 +/- 130.9		5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-12-01	C08-205567	0.2978 +/- 0.1208		341.0 +/- 138.3		5000.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-12-02	C08-894667	0.3229 +/- 0.1176		369.7 +/- 134.6		5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.212 se muestran las concentraciones estimadas y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

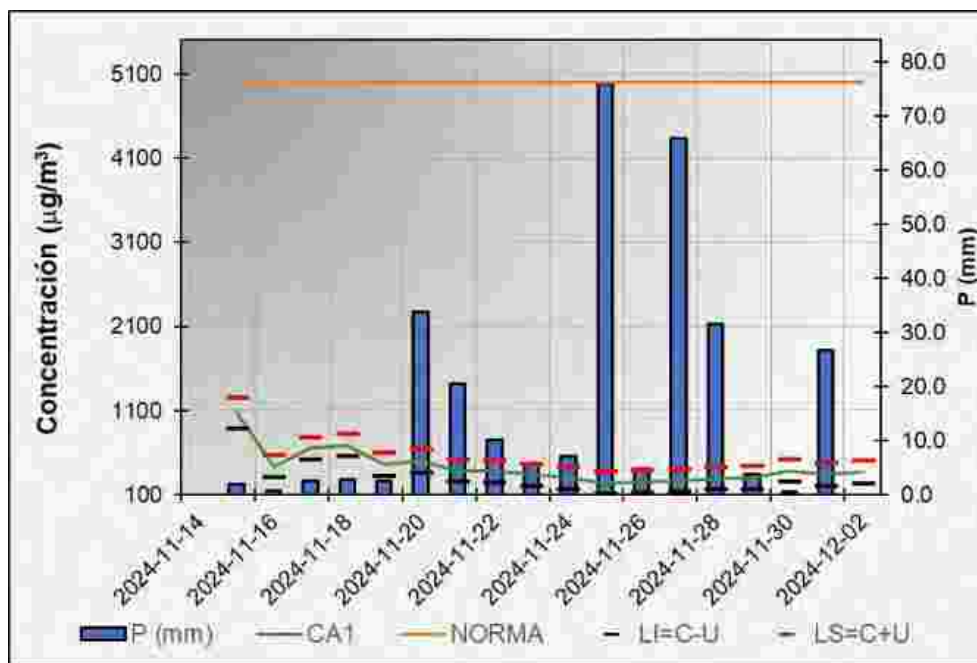


Figura 5.212 Concentración de CO octoraria para el Punto 1.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Figura 5.213 y Figura 5.214 se muestran las concentraciones horarias y octorarias respectivamente, mientras en la Tabla 5.187 se tabulan los valores del ICA de todos los datos octorarios estimados.

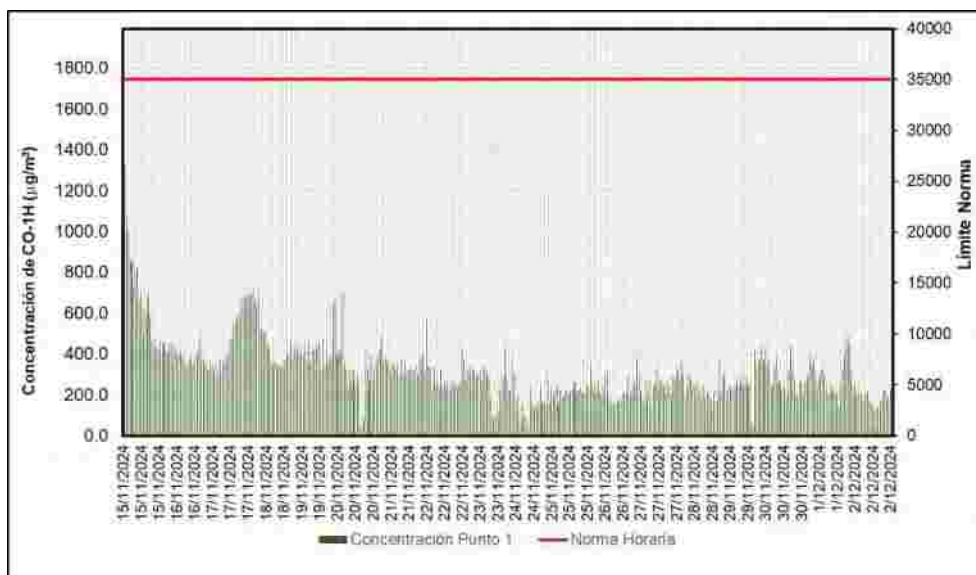


Figura 5.213 Concentración de CO horaria para el Punto 1

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

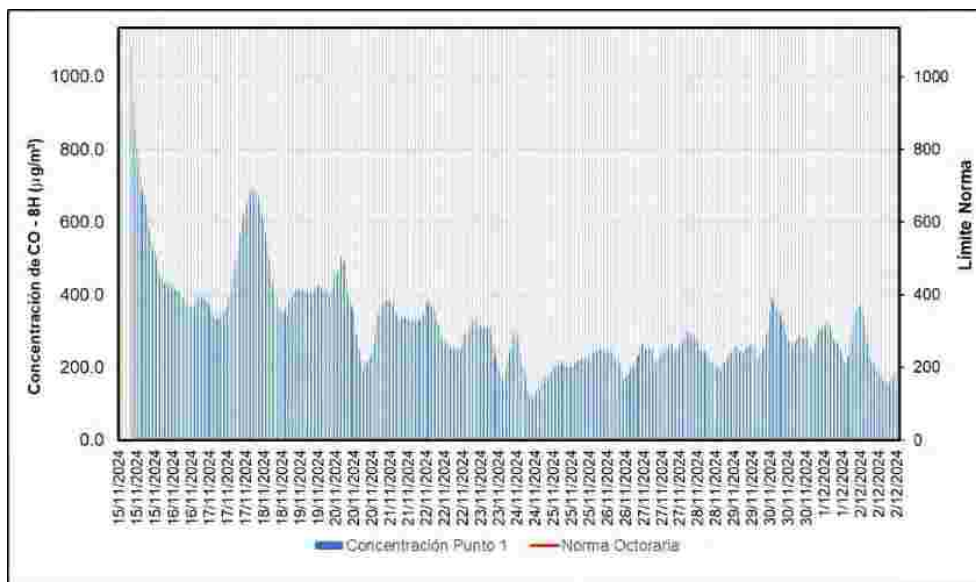


Figura 5.214 Concentración de CO octoraria para el Punto 1

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

ICA RESUMEN OCTORARIO

Resumen					
Calor	Conteo	%	Calor	Conteo	%
Verde	432	100.0	Rojo	0	0.0
Amarillo	0	0.0	Púrpura	0	0.0
Naranja	0	0.0	Marrón	0	0.0

En la Tabla 5.188, se tabulan los resultados de las concentraciones máximas octorarias estimadas para los 18 días de monitoreo realizado entre el 15 de noviembre y 02 de diciembre de 2024, además se tabula el ICA y su clasificación por color y categoría.

Tabla 5.188 Resultados de las concentraciones máximas octorarias de CO del Punto 2 "CA2".

Resultados								ESTIMACIÓN DEL ICA		
Fecha (aaaa-mm-dd)	NºMuestra	C (ppm)	U (ppm)	C (µg/m³)	U (µg/m³)	N (µg/m³)	Resultado regla de decisión (C+U≤N)	ICA	COLOR	CATEGORIA
2024-11-15	C08-520354	0.4238	+/- 0.1198	485.2	+/- 137.1	5000.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-11-16	C08-619859	0.5071	+/- 0.1135	580.5	+/- 130.0	5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-17	C08-058411	0.4965	+/- 0.1136	568.5	+/- 130.0	5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-18	C08-090232	0.5383	+/- 0.1136	616.3	+/- 130.0	5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-19	C08-637918	0.5526	+/- 0.1133	632.6	+/- 129.8	5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-20	C08-770925	0.6316	+/- 0.1133	723.1	+/- 129.7	5000.00	Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-21	C08-328596	0.6488	+/- 0.1142	742.7	+/- 130.8	5000.00	Cumplimiento	7	Verde	Buena
2024-11-22	C08-631506	0.7070	+/- 0.1135	809.5	+/- 129.9	5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-23	C08-935942	0.6916	+/- 0.1133	791.8	+/- 129.7	5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-24	C08-253966	0.7299	+/- 0.1131	835.7	+/- 129.5	5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-25	C08-763452	0.6815	+/- 0.1204	780.2	+/- 137.9	5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-26	C08-087450	0.7400	+/- 0.1132	847.2	+/- 129.5	5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-27	C08-674762	0.7020	+/- 0.1194	803.7	+/- 136.6	5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-28	C08-712647	0.6824	+/- 0.1420	781.3	+/- 162.6	5000.00	Cumplimiento	8	Verde	Buena
2024-11-29	C08-967779	0.5428	+/- 0.1397	621.5	+/- 159.9	5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-11-30	C08-880759	0.5335	+/- 0.1395	610.8	+/- 159.8	5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena
2024-12-01	C08-123682	0.4195	+/- 0.1419	480.3	+/- 162.5	5000.00	Cumplimiento	5	Verde	Buena
2024-12-02	C08-965269	0.5595	+/- 0.1426	640.6	+/- 163.2	5000.00	Cumplimiento	6	Verde	Buena

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.215 se muestran las concentraciones estimadas y en la escala del eje derecho se muestra el nivel de precipitación durante los días de muestreo.

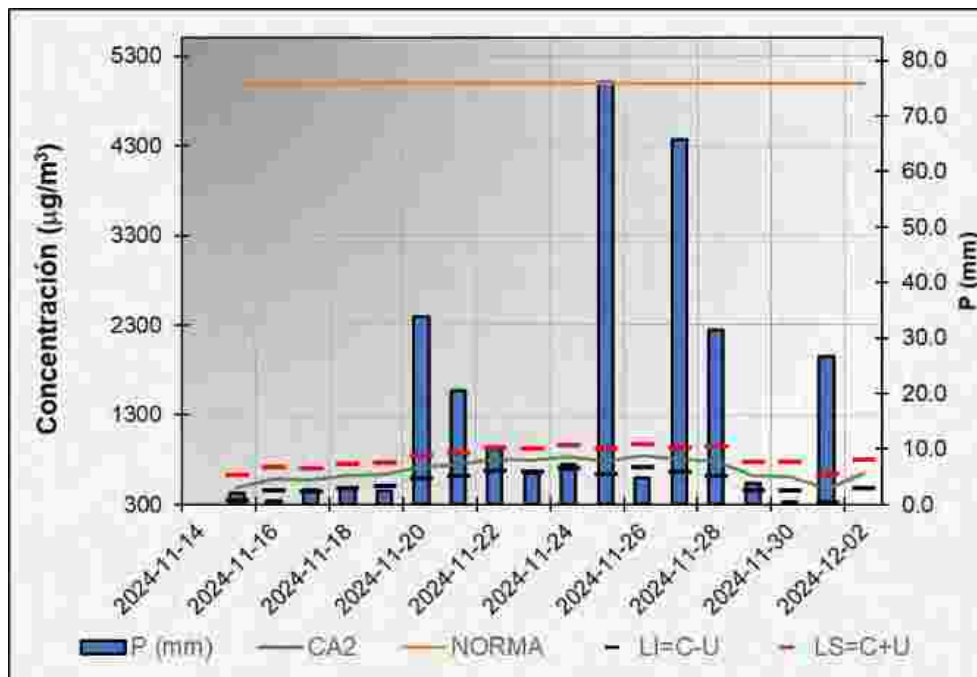


Figura 5.215 Concentración de CO octoraria para el Punto 2.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Figura 5.216 y Figura 5.217 se muestran las concentraciones horarias y octorarias respectivamente, mientras en la Tabla 5.189 se tabulan los valores del ICA de todos los datos octorarios estimados.

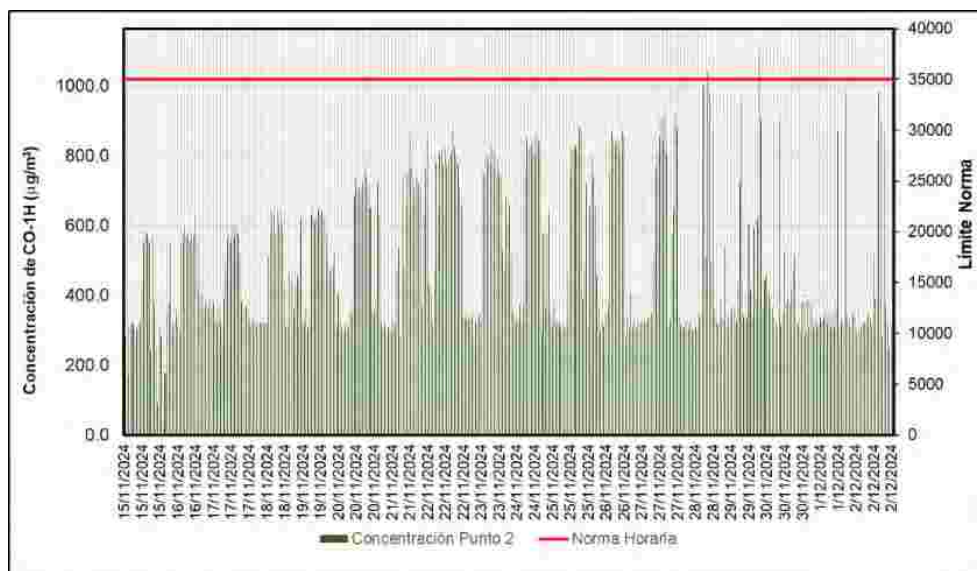


Figura 5.216. Concentración de CO horaria para el Punto 2

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

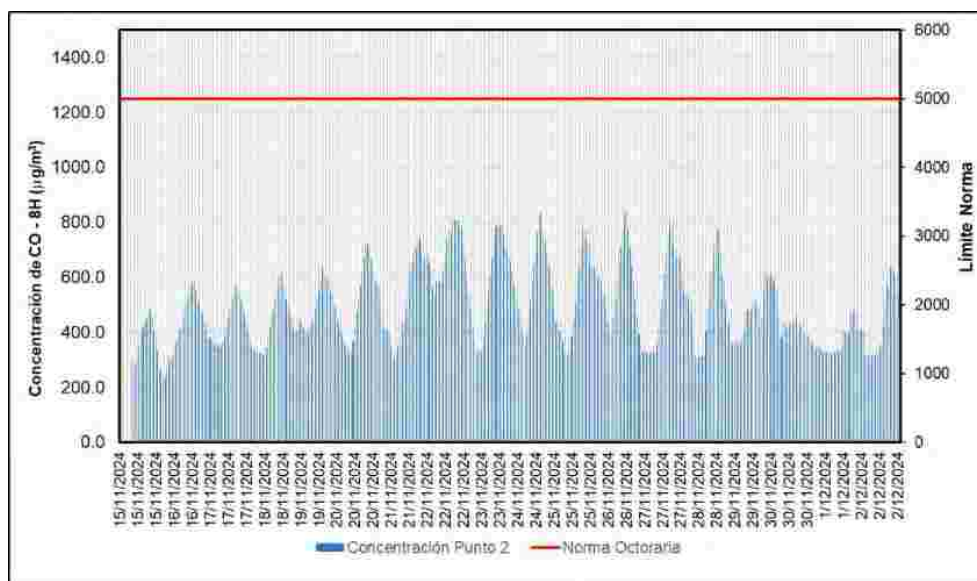


Figura 5.217. Concentración de CO octoraria para el Punto 2.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

ICA RESUMEN OCTORARIO

Resumen					
Calor	Conteo	%	Calor	Conteo	%
Verde	432	100.0	Rojo	0	0.0
Amarillo	0	0.0	Púrpura	0	0.0
Naranja	0	0.0	Marrón	0	0.0

i. Análisis Estadístico para CO

Los resultados del análisis estadístico se muestran en la Tabla 5.190 para las concentraciones máximas octorarias, los cuales ayudan a identificar las concentraciones para el percentil 75 los cuales son de 471.2 µg/m3 para el punto 1 y de 794.7 µg/m3 para el punto 2.

Tabla 5.190. Estadística descriptiva por punto para el Monóxido de Carbono

PUNTO	N	Desviación Estándar	Promedio	Coefficiente de variación	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
Punto 1 "CA1"	18	203.9	426.5	47.8%	296.5	374.6	471.2
Punto 2 "CA2"	18	118.4	686.2	17.3%	603.2	681.8	794.7

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

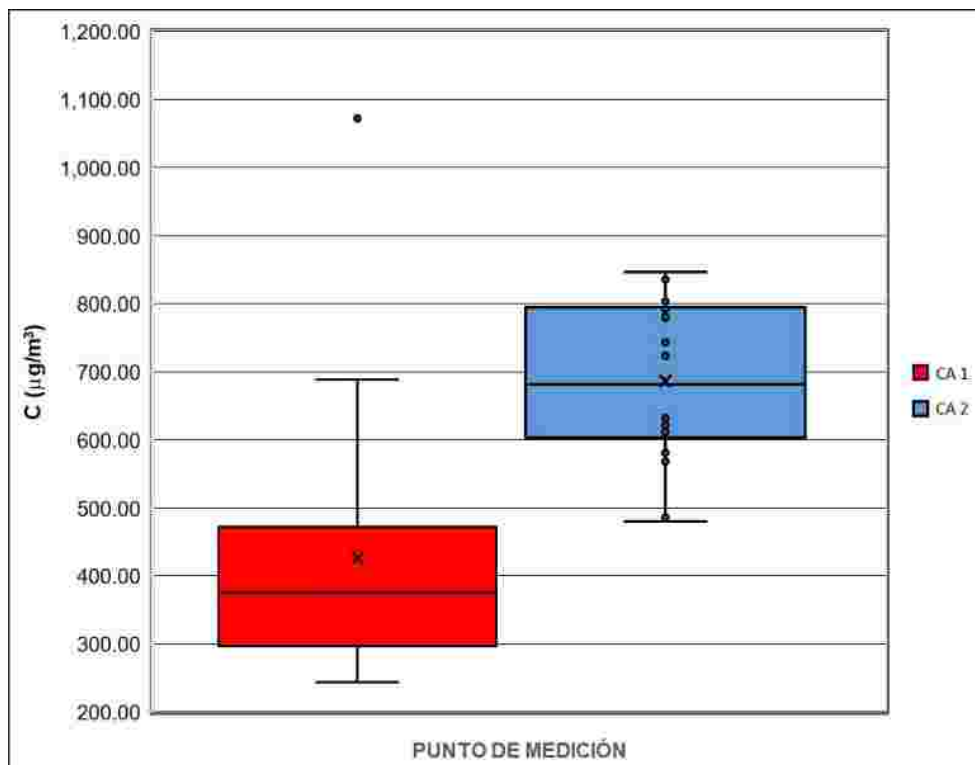


Figura 5.218. Diagrama de caja y bigotes para el CO.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

El grafico de caja y bigotes mostrada en la Figura 5.218, representa la distribución de las concentraciones obtenidas para los dos puntos de muestreo.

III. Análisis de resultados

En la Tabla 5.191, se resume el nivel de cumplimiento con respecto a la Resolución 2254 de 2017.

Tabla 5.191. Nivel de cumplimiento con la Resolución 2254 de 2017. Diagnóstico Ambiental S.A.S., 2024

PM ₁₀ – Material Particulado menor a 10 micras					
Estación	Muestras Válidas Diarias	#Excedencias Límite Anual	#Excedencias Límite Diario	%Cumplimiento Diario	%Cumplimiento Anual

Punto 1. CA1	18/18	0	0	100%	100%	
Punto 2. CA2	18/18	0	0	100%	100%	
PM _{2.5} – Material Particulado menor a 2.5 micras						
Estació n	Muestra s Válidas Diarias	#Excedencias Límite Anual	#Excedencias Límite Diario	%Cumplimiento Diario	%Cumplimiento Anual	
Punto 1. CA1	18/18	0	0	100%	100%	
Punto 2. CA2	18/18	0	0	100%	100%	
SO ₂ – Dióxido de Azufre						
Estació n	Muestra s Válidas Horarias	Muestras Válidas Diarias	#Excedencia s Límite Diario	#Excedencia s Límite Horario	%Cumplimient o Diario	%Cumplimient o Horario
Punto 1. CA1	432/432	18/18	0	0	100%	100%
Punto 2. CA2	432/432	18/18	0	0	100%	100%
NO ₂ – Dióxido de Nitrógeno						
Estació n	Muestra s Válidas Horarias	Muestras Válidas Diarias	#Excedencia s Límite Anual	#Excedencia s Límite Horario	%Cumplimient o Anual	%Cumplimient o Horario
Punto 1. CA1	432/432	18/18	0	0	100%	100%
Punto 2. CA2	432/432	18/18	0	0	100%	100%
CO – Monóxido de Carbono						
Estació n	Muestra s Válidas Horarias	Muestras Válidas Octoraria s	#Excedencia s Límite Octorario	#Excedencia s Límite Horario	%Cumplimient o Octorario	%Cumplimient o Horario
Punto 1. CA1	425/425	425/425	0	0	100%	100%
Punto 2. CA2	425/425	425/425	0	0	100%	100%

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Los resultados entregados para cada uno de los contaminantes evaluados son válidos para el día y condiciones de evaluación, considerando que en las concentraciones reportadas se cuenta con influencia de las condiciones atmosféricas y las actividades que se realicen en la zona objeto de estudio.

Teniendo presente que la normativa de calidad del aire es una norma de inmisión, DIAGNÓSTICO AMBIENTAL S.A.S, analizará en este reporte como un cumplimiento o incumplimiento de la norma solo para el periodo en el que se llevó a cabo monitoreo, para analizar una fuente determinada y su comportamiento a largo plazo sería más aplicable el desarrollo de modelos de dispersión.

Se aclara que los valores de concentración aquí reportados no hacen referencia a una actividad o fuente específica, son valores obtenidos en el punto de medición cuya procedencia hace parte de las condiciones meteorológicas de la zona y las fuentes de influencia en la misma.

De los parámetros evaluados no se reportan valores superiores al estándar diario de comparación para PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂ y NO₂ en ninguna de las estaciones monitoreadas.

Los promedios obtenidos con los días evaluados indican que, no se supera el estándar anual establecido, sin embargo, las evaluaciones se realizan como un SVCAI, en el cual se presenta mayor dificultad al evaluar la representatividad de los datos en una escala de un año.

i. Conclusiones

Los resultados del monitoreo de calidad de aire realizado permiten obtener las siguientes afirmaciones:

Para las concentraciones reportadas de PM₁₀, se encuentra que en los dos puntos no se superó el límite permisible diario establecido en la Resolución 2254 del 2017 (75 µg/m³) con resultados entre 4.9261 µg/m³ y 29.0765 µg/m³. En cuanto a la comparación con la norma anual (50 µg/m³) esta no se sobrepasaría si se continua con la tendencia evidenciada en el periodo de medición, encontrándose que el valor mayor se presenta en la ubicación del punto 1 con un valor promedio de 17.4 µg/m³.

Para las concentraciones reportadas de PM_{2.5}, se encuentra que en ninguno de los dos puntos se superó el límite permisible diario establecido en la Resolución 2254 del 2017 (37 µg/m³) con resultados entre 0.86 µg/m³ y 9.83 µg/m³. En cuanto a la comparación con la norma anual (25.0 µg/m³) esta no se sobrepasaría si se continua con la tendencia evidenciada en el periodo de medición, encontrándose que el valor mayor se presenta en la ubicación del punto 2 con un valor promedio de 3.3 µg/m³.

Las muestras de SO₂ se encuentra que en ninguno de los dos puntos se superó el límite horario establecido en la Resolución 2254 del 2017 (100 µg/m³) con resultados máximos entre 3.49 µg/m³ y 23.64 µg/m³, en cuanto al límite diario (50 µg/m³) este tampoco se sobrepasaría, permitiendo inferir que las fuentes que emiten este tipo contaminante no impactan la calidad el aire en la zona de monitoreo.

Para las concentraciones reportadas de NO₂, se encuentra que en ninguno de los dos puntos se superó el límite permisible horario establecido en la Resolución 2254 del 2017 (200 µg/m³) con resultados entre 3.58 µg/m³ y 18.0 µg/m³, valores que se encuentran alejados del límite permisible, lo que permite inferir que el aporte de las fuentes no impacta de manera significativa la calidad del aire en la zona de monitoreo para este contaminante.

Para las concentraciones reportadas de CO, se encuentra que en ninguno de los dos puntos se superó el límite permisible octorario establecido en la Resolución 2254 del 2017 (5000 µg/m³) con resultados entre 243.33 µg/m³ y 1072.62 µg/m³, valores que se encuentran alejados del límite permisible, lo que permite inferir que el aporte de las fuentes no impacta de manera significativa la calidad del aire en la zona de monitoreo para este contaminante.

5.1.10.5.10 Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos

Para el cálculo de los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 y CO) se utilizó AERMOD, es un modelo de dispersión de Gauss en estado estacionario que permite encontrar las concentraciones de contaminantes atmosféricos máximas horarias, máximas diarias y promedio anual a nivel del suelo, considera las condiciones simples y complejas del terreno y permite evaluar la influencia de la variación de las condiciones meteorológicas. Este modelo propuesto por la US EPA (Environmental Protection Agency), denominado AERMOD fue implementado mediante el programa informático AERMOD View de la empresa Lakes Environmental (Versión 12.0.0), el cual utiliza una metodología que permite determinar el impacto de la fuente bajo un conjunto de condiciones meteorológicas y topográficas, y establecer los posibles escenarios de contaminación (bajo condiciones operativas reales), de tal manera que no se puedan tener concentraciones superiores a las que se obtendrán con el modelo.

A. Ubicación de la zona de modelación

La zona donde se encuentra ubicado el proyecto de Modificación de Licencia Variante Mutatá, se muestra en la [Figura 5.219](#), la cual se localizaría en el costado occidental de la cabecera urbana del municipio de MUTATÁ, [en zona de influencia de las veredas AGUAS CLARAS, MUTATA y MUTATACITO](#), departamento de Antioquia (para una mejor visualización ver el plano incluido en la [carpeta Anexos_C5_1\5_1_10_Atmosfera\Mod_Disp\Ubic_Zona_Estudio](#)). Mientras en la [Figura 5.45](#), se muestra una imagen tomada desde Google Earth, donde se puede ver la zona donde se encuentra el polígono del proyecto, así como el área de modelación definida (recuadro por el rectángulo rojo).

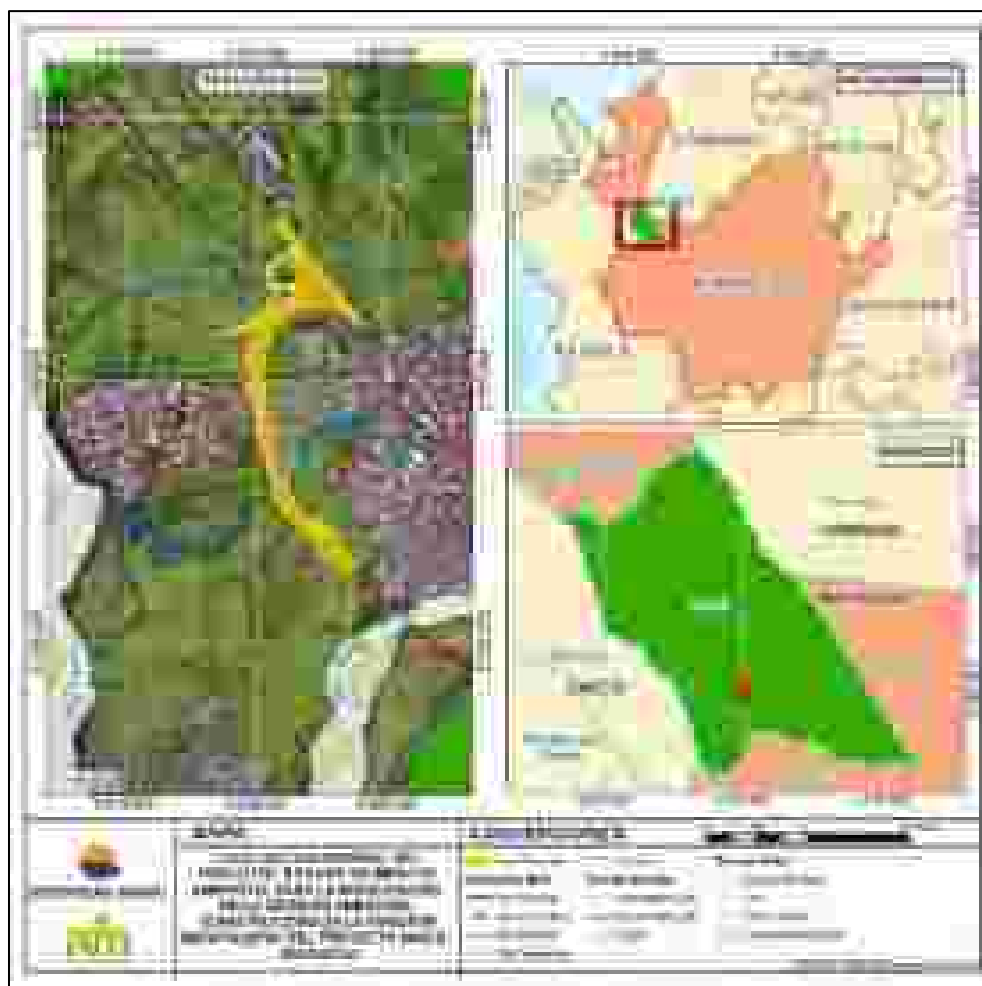


Figura 5.219 Ubicación proyecto de Modificación de Licencia Variante Mutatá
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

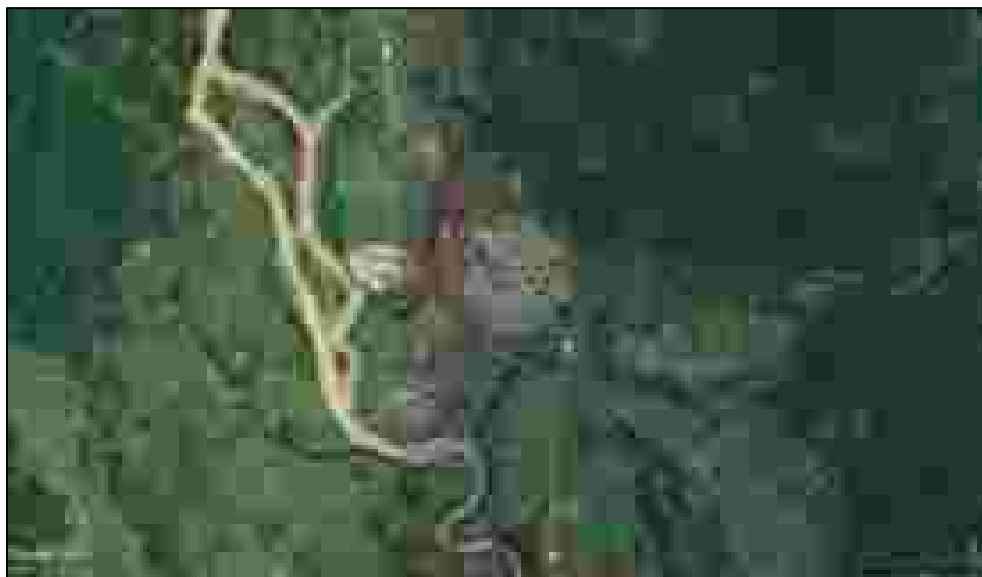


Figura 5.220. Vista de los alrededores del proyecto de Modificación
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

B. Ubicación de las Fuentes de Emisión dentro de la zona de modelación

Las fuentes de emisión de material particulado y gases más relevantes del proyecto de Modificación de Licencia Variante Mutatá se constituyen en las zonas de transferencia de materiales, excavaciones, y transporte (ejes viales), adicionalmente se incluye las emisiones de material particulado asociadas a maquinaria amarilla por resuspensión (pequeños desplazamientos) y por combustión.

En la [Figura 5.46](#), se muestran los **nueve (9)** ejes viales trazados, que se emplean por el proyecto, los cuales se describen a continuación:

VIA_1: Tramo actual construido de la variante.

VIA_2: Tramo sobre la vía al mar que conecta la variante y pasa por el centro del pueblo.

VIA_3: Tramo de la variante a construir.

VIA_4: Tramo sobre la calle 14 entre Variante y Carrera 5.

VIA_5: Tramo sobre calle 10 entre Variante y Carrera 5.

VIA_6: Tramo sobre la vía al mar desde la variante en dirección Turbo.

VIA_7: Tramo sobre la vía al mar desde la variante en dirección Medellín.

[VIA_8: Tramo de la variante a construir \(eje 8\).](#)

[VIA_9: Tramo de la variante a construir \(eje 9\).](#)

Mientras a continuación se describe la fuente de área ingresada que se muestra en la [Figura 5.121](#):

FA_1: Zona donde se desarrollarán las actividades de construcción de la variante, esta incluye retornos, calzada, cunetas, box culvert, drenajes, etc.

[FA_2: Zona donde se desarrollarán las actividades de construcción de los ejes 8 y 9.](#)

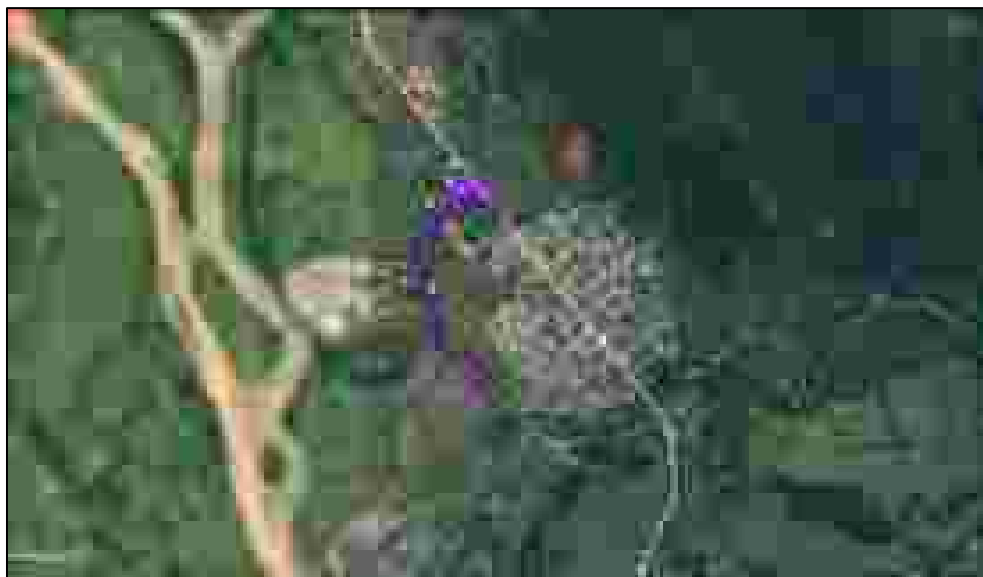


Figura 5.221 Ubicación de fuentes lineales asociadas al proyecto
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.222 Ubicación de las fuentes de área asociadas al proyecto
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

C. **Receptores dentro de la zona de influencia proyecto de Modificación de Licencia Variante Mutatá**

El área de análisis para el modelo de dispersión comprende la zona definida por el polígono de la Figura 5.122, en la cual producto de las operaciones asociadas a la construcción del proyecto Modificación de Licencia Variante Mutatá, se generan emisiones de material particulado medido como PM2.5 y PM10 y de gases producto de la combustión, donde destaca el dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre

(SO₂), los cuales serán transportadas y dispersadas por las corrientes de aire, llegando en última instancia a diferentes áreas aledañas. Dentro de la posible área de influencia de las emisiones generadas, se tomaron **cuatrocientos veintiún (421)** receptores. En la [Figura 5.224](#)[Figura 5.223](#), se muestran los receptores distribuidos en dos arreglos de receptores rectangulares espaciados uniformemente, los cuales se describen a continuación: los primeros ciento veintiuno (121) se identifican como REC1 a REC121 hacen parte de una red mayor (mostrados con círculos verdes espaciados en 400 m en ambas direcciones), seguidos de una segunda red compuesta por ciento veintiuno (121), que se identifican como REC123 a REC242 (receptores mostrados con círculos amarillos en un arreglo espaciado en 75 m horizontales por 150 m en vertical).

Por otro lado, en la [Figura 5.224](#), se ubican ciento **sesenta y siete (167)** receptores distribuidos a lo largo de los ejes viales principales **y zonas aledañas** (representados por círculos de color rojo, REC243 a [REC409](#)), más dos (2) ubicaciones donde se realizaron las mediciones de calidad del aire (CA1 a CA2), y por último (10) ubicaciones identificadas como receptores sensibles, que incluye parques, canchas, iglesias y colegios (RS1 a RS10).

En la Tabla 5.192, se tabulan parcialmente los primeros 20 y los últimos se **presentan** dispersos sobre el área de modelación mostrada en la [Figura 5.224](#).



Figura 5.223. Ubicación rejillas uniformes de receptores en la zona del proyecto.
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

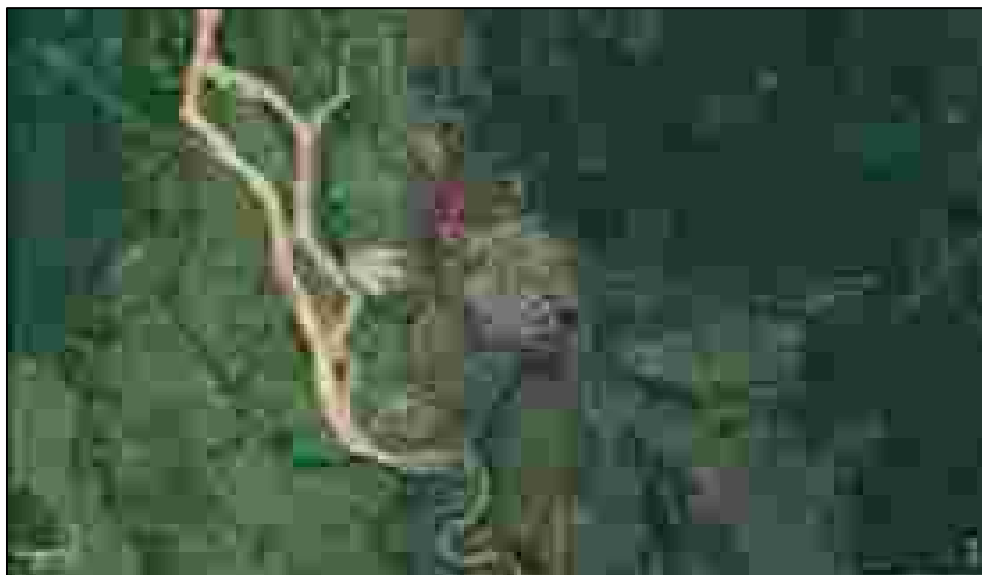


Figura 5.224 Ubicación de receptores discretos en la zona del proyecto
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

**Tabla 5.192 Coordenadas de los receptores para la emisión generada por el proyecto
Modificación de Licencia Variante Mutatá**

Receptor	Coordenadas Geográficas WGS84		Coordenadas MAGNA-SIRGAS CTM12	
	Longitud	Latitud	X	Y
REC1	-76,457546	7,223364	4618215,36	2357629,77
REC2	-76,453929	7,223391	4618615,36	2357629,77
REC3	-76,450311	7,223419	4619015,36	2357629,77
REC4	-76,446693	7,223446	4619415,36	2357629,77
REC5	-76,443075	7,223474	4619815,36	2357629,77
REC6	-76,439457	7,223501	4620215,36	2357629,77
REC7	-76,435839	7,223528	4620615,36	2357629,77
REC8	-76,432221	7,223555	4621015,36	2357629,77
REC9	-76,428603	7,223583	4621415,36	2357629,77
REC10	-76,424985	7,223610	4621815,36	2357629,77
REC11	-76,421366	7,223637	4622215,36	2357629,77
REC12	-76,457574	7,226977	4618215,36	2358029,77
REC13	-76,453956	7,227005	4618615,36	2358029,77
REC14	-76,450338	7,227032	4619015,36	2358029,77
REC15	-76,446720	7,227059	4619415,36	2358029,77
REC16	-76,443102	7,227087	4619815,36	2358029,77
REC17	-76,439484	7,227114	4620215,36	2358029,77
REC18	-76,435866	7,227141	4620615,36	2358029,77
REC19	-76,432248	7,227219	4621015,36	2358029,77
REC20	-76,428630	7,227196	4621415,36	2358029,77
.....				

Receptor	Coordenadas Geográficas WGS84		Coordenadas MAGNA-SIRGAS CTM12	
	Longitud	Latitud	X	Y
REC407	-76,444241	7,243753	4619709,70	2359866,69
REC408	-76,442710	7,244323	4619879,47	2359928,55
REC409	-76,444053	7,244742	4619731,28	2359976,03
CA1	-76,439343	7,241569	4620249,32	2359620,87
CA2	-76,437009	7,246820	4620511,73	2360020,19
RS1	-76,437721	7,243800	4620430,51	2359866,49
RS2	-76,437292	7,245611	4620479,43	2360066,64
RS3	-76,437163	7,242904	4620491,40	2359766,83
RS4	-76,433698	7,239608	4620871,71	2359399,12
RS5	-76,439407	7,245721	4620245,74	2360080,49
RS6	-76,440102	7,245915	4620169,05	2360102,64
RS7	-76,437508	7,244444	4620454,61	2359937,60
RS8	-76,435300	7,245337	4620699,37	2360034,65
RS9	-76,435658	7,240812	4620655,99	2359534,01
RS10	-76,436962	7,245187	4620515,53	2360019,38

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

D. Nivel de actividad del proyecto Modificación de Licencia Variante Mutatá

Para la Modificación de Licencia Variante Mutatá se tienen proyectadas las actividades que se listan en la Tabla 5.193, donde se muestra la cantidad de materiales a ser excavados, y transferidos durante la etapa de construcción. Adicional a los materiales mencionados, se requerirán del transporte hacia el proyecto materiales de relleno, concreto para las obras y pavimentación. La construcción se desarrollará en el horario 7:00 a 19:00 horas de lunes a sábado, 12 horas diarias.

Tabla 5.193 Flujo de excavaciones y transferencia de materiales

Proceso	Volumen (m3)	Tiempo (días)	Tiempo (h)	Flujo (m3/h)	Flujo (ton/h)	Volumen transferido (m3)
Descapote y demolición asfalto	421.53	30	360	1.171	1,991	843.06
Excavaciones (sin descapote y demolición)	3753.94	112	1344	2.793	4.748	7507.88
Llenos-Excavaciones	84186.80	155	1860	45.262	76.945	84186.80
Excavacion para estructuras varias	300.00	20	240	1.250	2.125	600.00
Estructuras	450.00	251	3012	0.149	0.344	450.00
Subrasante	5961.29	271	3252	1.833	3.116	5961.29
Subbase	3406.45	271	3252	1.047	1.781	3406.45
Base	3406.45	65	780	4.367	7.861	3406.45
Capa asfáltica	1703.23	26	312	5.459	12.556	1703.23

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Nota 1: Para el material excavado, llenos, subrasante y subbase se asume una densidad de 1.7 ton/m3, para la base de 1.8 ton/m3, para el material de las estructuras y la capa asfáltica de 2.3 ton/m3, valores tomados de la literatura.

Nota 2: Para estimar el volumen de subrasante, subbase, base y carpa asfáltica, se tomaron espesores de 0.35 m, 0.2 m, 0.2 m y 0.1 m respectivamente para un área a recubrir de 17032.26 m².

E. Maquinaria empleada durante la etapa de construcción.

A continuación, en la Tabla 5.194 se resumen los equipos que se emplearán durante la etapa de construcción.

Tabla 5.194 Maquinaria empleados durante la construcción

Tipo	Combustible	Potencia¹ (hp)	Etapas en la que se emplea
Cortadora de concreto y pavimento	Diesel	13	Preliminares
Fresadora de pavimento PM622	Diesel	130	Preliminares
Retroexcavadora oruga	Diesel	141.0	Excavaciones y movimientos tierra
Bulldozer CAT D6H o similar	Diesel	215.9	Excavaciones y movimientos tierra
Retroexcavadora llanta	Diesel	62.0	Excavaciones y movimientos tierra
Retroexcavadora sobre oruga	Diesel	211.9	Excavaciones y movimientos tierra
Motoniveladora	Diesel	215.0	Nivelación
Vibrocompactador	Diesel	153.0	Nivelación
Compactador neumático	Diesel	70.0	Nivelación
Compactador de rodillo	Diesel	99.0	Nivelación
Compactador Vibratorio Ingersoll Rand DD-110HF o	Diesel	125	Nivelación
Vibrador de concreto	Gasolina	5.5	Nivelación
Motobomba 2"	Diesel	7.0	Soporte
Compresor neumático	Diesel	50.0	Soporte
Planta eléctrica Motogenerador	Diesel	100.0	Soporte
Carro grúa 8 ton	Diesel	202.5	Soporte y redes
Grúa telescópica 20 ton	Diesel	257.5	Soporte y redes
Asfaltadora Finisher	Diesel	73.8	Pavimentación

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

¹Valores tomados de los fabricantes y suministrados por la empresa, la potencia puede diferir de una marca a otra y de modelos, por lo cual los valores dados son indicativos.

Nota 1: La mayor actividad se dará durante las etapas de excavaciones y nivelación, y serán durante estas donde se generarán las mayores emisiones.

Nota 2: Se incluyen todos los equipos en función del tiempo de uso aproximado y se distribuyen en 3744 horas al año, con el fin de estimar el aporte anual de estos al ambiente, asociado a la combustión.

F. Estimación del número de desplazamientos asociados al proyecto

En la Tabla 5.195, se resume la información asociada a los aforos estimados para el desplazamiento de volquetas, se asumen volquetas de capacidad de 10 m³, que es un valor intermedio entre las volquetas sencillas de capacidad de 7 m³ y las volquetas doble troque de 14 m³.

Tabla 5.195 Aforos vehiculares utilizados para el desarrollo del modelo de dispersión

Vías	Cantidad de volquetas
VIA 1	100
VIA 2	15
VIA 3	76
VIA 4	15
VIA 5	15
VIA 6	43
VIA 7	100
VIA 8	6
VIA 9	3

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Con la información de la Tabla 5.195 y adicionando cantidades adicionales para el transporte de personal, equipos y materiales se dan los aforos que se tabulan en la Tabla 5.196.

Tabla 5.196 Aforos vehiculares utilizados para el desarrollo del modelo de dispersión

ESCENARIO 1 - CONDICIONES CONSTRUCCION						
VIA	DIURNO – N° VEHICULOS			NOCTURNO – N° VEHICULOS		
	LIVIANOS	PESADOS	MOTOS	LIVIANOS	PESADOS	MOTOS
VIA 1	24*	108**	40*	0	0	0
VIA 2	12	19	20	0	0	0
VIA 3	18	82	30	0	0	0
VIA 4	6	17	10	0	0	0
VIA 5	6	17	10	0	0	0
VIA 6	6	45	10	0	0	0
VIA 7	24	108	40	0	0	0
VIA 8	9	9	15	0	0	0
VIA 9	6	5	10	0	0	0

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

* Valores aproximados de la cantidad de vehículos empleados para el transporte de personal, en los pesados también se incluyen recorridos adicionales, para cubrir cualquier movimiento adicional para transporte de personal en buses o de carga que no transporten volquetas.

** Incluye tanto los desplazamientos con carga como sin carga.

G. Resultados de las emisiones por resuspensión asociadas a las vías del proyecto

En la Tabla 5.197, se tabulan las dimensiones de la vía, información requerida para estimar las emisiones por unidad de área.

Tabla 5.197 Especificaciones de los tramos viales

VÍA	Largo (m)	Ancho (m)	Área (m²)	Área (ha)
VIA 1	899.8	7.5	6748.6	0.67
VIA 2	1732.7	7.5	12995.3	1.30
VIA 3	1077.0	7.5	8077.5	0.81
VIA 4	394.8	6.0	2368.8	0.24
VIA 5	539.4	6.0	3236.4	0.32
VIA 6	1482.3	7.5	11117.0	1.11
VIA 7	1265.6	7.5	9492.4	0.95
VIA 8	412.3	7.5	3092.2	0.31

VIA_9	61.6	7.5	462.3	0.05

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para la actividad de levantamiento de material particulado por el tránsito de los vehículos en las vías, los estimados de las emisiones generadas, se muestran tabulados en la Tabla 5.198.

Tabla 5.198 Estimación de emisiones de material particulado por resuspensión.

VÍA	DIURNO	DIURNO	DIURNO	DIURNO
	PM ₁₀ g/s	PM _{2.5} g/s	PM ₁₀ (ton/año)	PM _{2.5} (ton/año)
VIA 1	5.5646E-03	1.3463E-03	0.0500	0.0121
VIA 2	5.3398E-03	1.2919E-03	0.0480	0.0116
VIA 3	1.6075E-01	1.7689E-02	1.4444	0.1590
VIA 4	3.3786E-03	3.3785E-04	0.0304	0.0030
VIA 5	1.4462E-03	3.4990E-04	0.0130	0.0031
VIA 6	3.7843E-03	9.1556E-04	0.0340	0.0082
VIA 7	7.8270E-03	1.8936E-03	0.0703	0.0170
VIA 8	9.3021E-03	9.9058E-04	0.0836	0.0089
VIA 9	8.2676E-04	8.7531E-05	0.0074	0.0008

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

H. Emisiones vehiculares asociadas a la combustión

Para la determinación de las emisiones de fuentes asociadas al desarrollo del proyecto, se toma como base el cálculo las tasas de emisión en función de la distribución de vehículos que transitan por las vías de este. A partir de la distribución de vehículos, se toma en cuenta el inventario de factores de emisión propuestos en la guía EMEP/EEA 2019 de la Unión Europea. En dicho inventario se proponen factores de emisión de acuerdo con el tipo de vehículo y el tipo de combustible usado (1.A.3.b. Passenger cars, light commercial trucks, heavy duty vehicles, included buses and motorcycles. Table 3.5 a Table 3.6 y Table 3.15). Para el presente estudio, se utiliza el algoritmo Tier 1 (conforme a Figure 3-1: Decision tree for exhaust emissions from road transport), el cual se aplica cuando no se conoce la tecnología de los vehículos y solo se conoce la emisión en función de la clasificación por tipo de vehículo como se muestra en la Tabla 5.199 y el consumo de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 5.200 (1.A.3.b. Passenger cars, light commercial trucks, heavy duty vehicles, included buses and motorcycles. Table 3.15).

Tabla 5.199 Factores de emisión por combustión (en g contaminante/kg combustible).

Tipo de vehículo	Combustible	PST=PM ₁₀ =PM _{2.5}	NO ₂	CO	VOC
Vehículo Liviano	Gasolina	0.03	8.73	84.7	10.05
Vehículo Liviano	Diesel	1.10	12.96	3.33	0.70
Vehículo Liviano	LPG	0.00	15.20	84.7	13.64
Camión Liviano	Gasolina	0.02	13.22	152.3	14.59
Camión Liviano	Diesel	1.52	14.91	7.40	1.54
Camión Pesado	Diesel	0.94	33.37	7.58	1.92
Camión Pesado (Buses)	CNG	0.02	13.00	5.70	0.26
Motocicletas 2 y 4 tiempos	Gasolina	2.20	6.64	497.7	131.4

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.200 Consumo nominal de combustibles en vehículos

Tipo de vehículo	Combustible	Consumo (g/km)
Vehículo Liviano	Gasolina	70
Vehículo Liviano	Diesel	60
Vehículo Liviano	LPG	57.5
Camión Liviano	Gasolina	100
Camión Liviano	Diesel	80
Camión Pesado	Diesel	240
Camión Pesado (Buses)	CNG	500
Motocicletas 2 y 4 tiempos	Gasolina	35

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para el caso de la emisión de dióxido de azufre, se tiene en cuenta el nivel máximo permitido de azufre contenido en los combustibles de uso nacional, siendo según normatividad (50 ppm en peso, equivalente a 0.05 g/kg de combustible). Para la determinación de las condiciones de tráfico vehicular típicas del proyecto, se toma como base la información suministrada por la empresa y la estimada en función de la actividad del proyecto. Para el ingreso de las emisiones en el modelo las fuentes deben de ser registradas en función de su tasa de emisión y las condiciones físicas de la fuente (longitud, ancho, altura de emisión), por lo cual se utiliza información técnica tipo, la cual se determina en el sitio de estudio mediante inspección visual y se clasifica la flota vehicular conforme a lo dictado por INVIAS acorde con la Figura 5.225. Los resultados de las emisiones asociadas a la quema de combustibles para los diferentes ejes viales que componen el proyecto se tabulan en la Tabla 5.201.

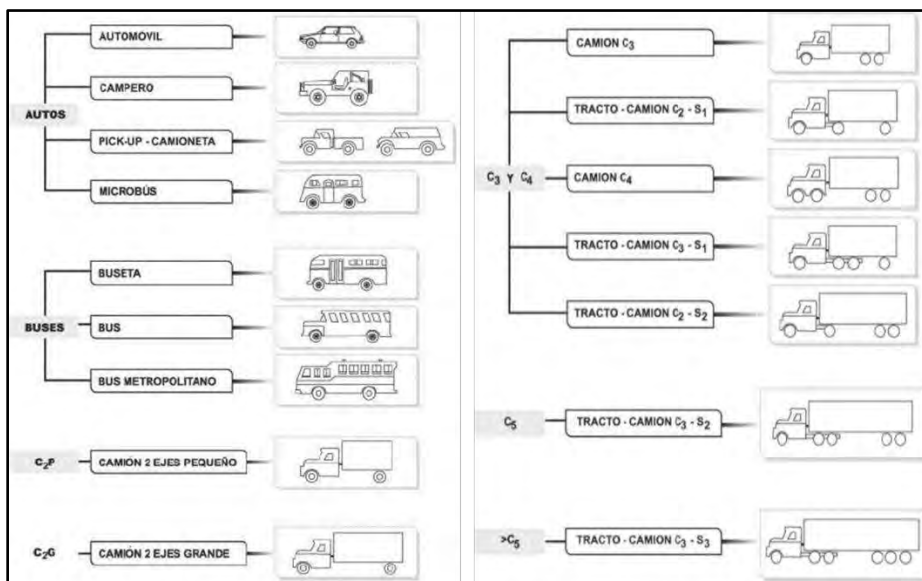


Figura 5.225 Categorías de vehículos según clasificación nacional.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.201 Estimación de emisiones contaminantes provenientes de la combustión

VÍA	CO (kg/h)	NO2 (kg/h)	PM10=PM2 .5 (kg/h)	SO2 (kg/h)	CO (ton/año)	NO2 (ton/año)	PM10=PM2 .5 (ton/año)	SO2 (ton/año)	CO g/(s*m ²)	NO2 g/(s*m ²)	PM10=PM2 .5 (g/(s*m ²))	SO2 g/(s*m ²)
VIA_ 1	7.7650 E-02	6.6655 E-02	2.0617E-03	1.0873 E-04	1.9381E -01	2.6662E -03	7.6283E-05	1.3047E -06	3.1961 E-06	2.7436 E-06	8.4862E-08	4.4753 E-09
VIA_ 2	6.5569 E-02	2.3702 E-02	8.4493E-04	4.4040 E-05	1.6366E -01	9.4807E -04	3.1262E-05	5.2848E -07	1.4016 E-06	5.0663 E-07	1.8060E-08	9.4136 E-10
VIA_ 3	6.9869 E-02	6.0554 E-02	1.8710E-03	9.8681 E-05	1.7439E -01	2.4222E -03	6.9228E-05	1.1842E -06	2.4027 E-06	2.0824 E-06	6.4343E-08	3.3935 E-09
VIA_ 4	7.9190 E-03	4.6765 E-03	1.5193E-04	7.9784 E-06	1.9766E -02	1.4029E -04	5.6213E-06	9.5741E -08	9.2861 E-07	5.4838 E-07	1.7816E-08	9.3557 E-10
VIA_ 5	1.0819 E-02	6.3893 E-03	2.0757E-04	1.0901 E-05	2.7005E -02	1.9168E -04	7.6802E-06	1.3081E -07	9.2861 E-07	5.4838 E-07	1.7816E-08	9.3557 E-10
VIA_ 6	3.6023 E-02	4.5257 E-02	1.3507E-03	7.1458 E-05	8.9914E -02	1.8103E -03	4.9975E-05	8.5749E -07	9.0010 E-07	1.1308 E-06	3.3749E-08	1.7855 E-09
VIA_ 7	1.0922 E-01	9.3754 E-02	2.8999E-03	1.5293 E-04	2.7261E -01	3.7502E -03	1.0730E-04	1.8352E -06	3.1961 E-06	2.7436 E-06	8.4862E-08	4.4753 E-09
VIA_ 8	1.1373 E-02	2.7852 E-03	1.1009E-04	5.6948 E-06	2.8388E -02	1.1141E -04	4.0734E-06	6.8338E -08	1.0217 E-06	2.5020 E-07	9.8898E-09	5.1157 E-10
VIA_ 9	1.1241 E-03	2.3644 E-04	9.8131E-06	5.0591 E-07	2.8058E -03	9.4576E -06	3.6309E-07	6.0709E -09	6.7551 E-07	1.4208 E-07	5.8969E-09	3.0401 E-10

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025

J. Emisiones de área

En la Tabla 5.203, se resumen los resultados para las operaciones de excavaciones, escarpe, acopios y transferencia de materiales, asociados a las fuentes de área identificadas.

Tabla 5.203 Estimación de emisiones de material particulado para las actividades de trituración y transferencia de materiales

Fuente emisora	PM ₁₀ kg/h	PM ₁₀ g/s	PM _{2.5} kg/h	PM _{2.5} g/s
Transferencia de materiales	5.1786E-03	1.4385E-03	7.8419E-04	2.1783E-04
Excavaciones	1.6947E-06	4.7076E-07	8.8813E-07	2.4670E-07
Escarpe	4.7773E-07	1.3270E-07	2.2749E-07	6.3191E-08

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Nota: Si desea consultar las emisiones para cada fuente individual puede consultar el archivo Estimador emisiones Construcción.xlsx, ubicado en Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera.

5.1.10.5.11 Control de material particulado generado por resuspensión en vías no pavimentadas

La aplicación regular de riego en las vías reduce el nivel de emisiones, en función de la razón de humedad que posea el material que recubre la vía, para este trabajo se asume un factor de humedad $M=1.8$, lo que equivale a una reducción de las emisiones de las vías no pavimentadas del 60%, como se muestra en la Figura 5.226.¹⁷⁴

¹⁷⁴ (MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Decreto 948, 1995)

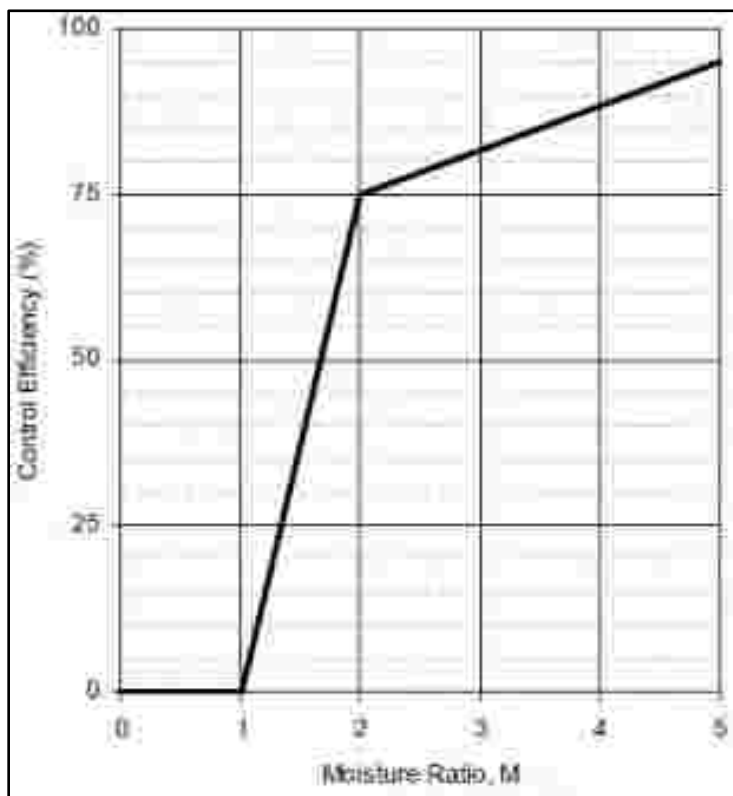


Figura 5.226 Efectividad de control de riego para superficies de viaje sin pavimentar. Fuente: AP-42 (EPA).

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.5.12 Análisis meteorología para el año 2024

A continuación, se muestra el análisis de meteorología del año 2024, para el cual se corre el modelo.

A. Precipitación

De acuerdo con la [Figura 5.227](#) los meses con mayor media de precipitación son los meses de mayo a noviembre, en la [Figura 5.228](#) se encuentra que las horas con niveles levemente superiores de precipitación son las comprendidas entre las 14:00 y 17:00, con un máximo acumulado de 40.2 mm/h, pero en general es muy homogéneo el comportamiento durante las 24 h.

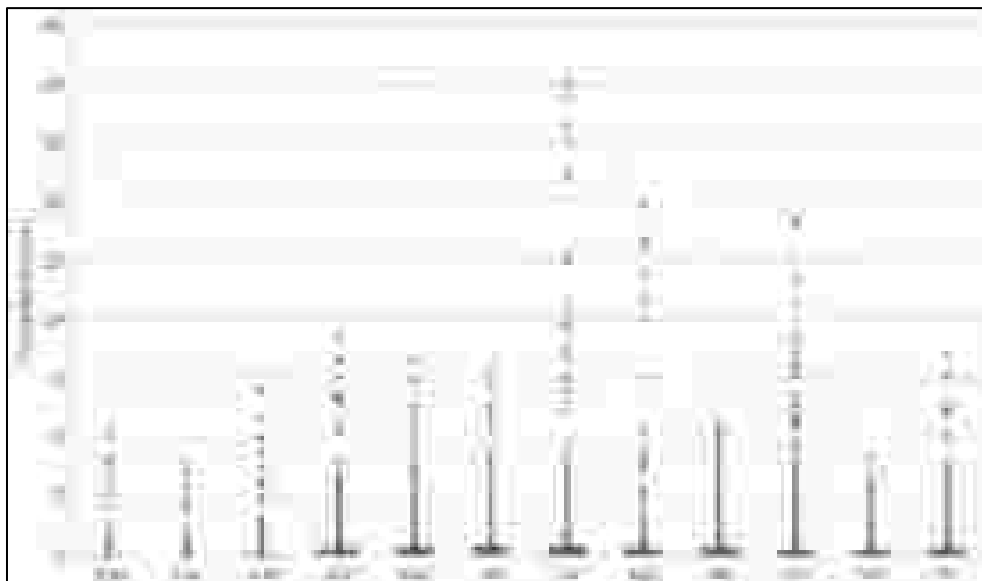


Figura 5.227 Precipitación - Comportamiento típico mensual.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

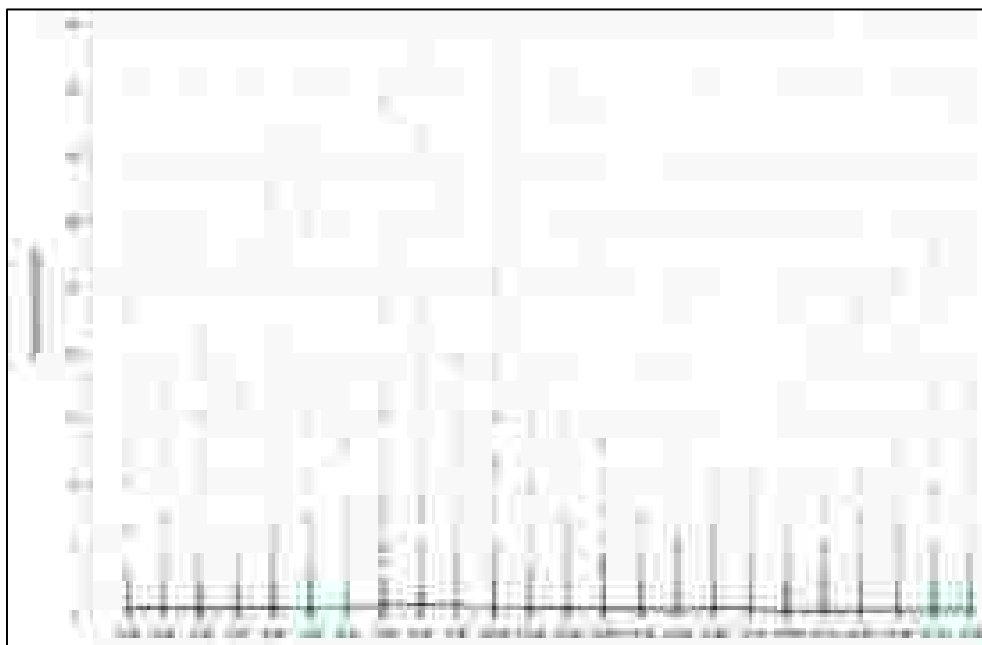


Figura 5.228 Precipitación - Comportamiento típico horario.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

B. Temperatura ambiental

Según el análisis de la temperatura mensual mostrado en la [Figura 5.229](#), los registros tienden a un valor medio de 27.02°C y un rango típico entre 25.72 y 28.60°C . De acuerdo con la [Figura 5.230](#), el comportamiento mensual de la temperatura presenta poca variabilidad, con una disminución en el mes de enero hasta un valor de 25.72°C .

Al analizar el comportamiento horario mostrado en la [Figura 5.230](#), se encuentra un mínimo de 24.74°C en horas de la mañana (antes de las 4:00 a.m.) y un máximo medio de 30.60°C alrededor de las 3:00 p.m. Esto se vincula con la radiación solar neta del sitio y las condiciones topográficas que condicionan la entrada de energía.



Figura 5.229 Temperatura superficial – Comportamiento mensual.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

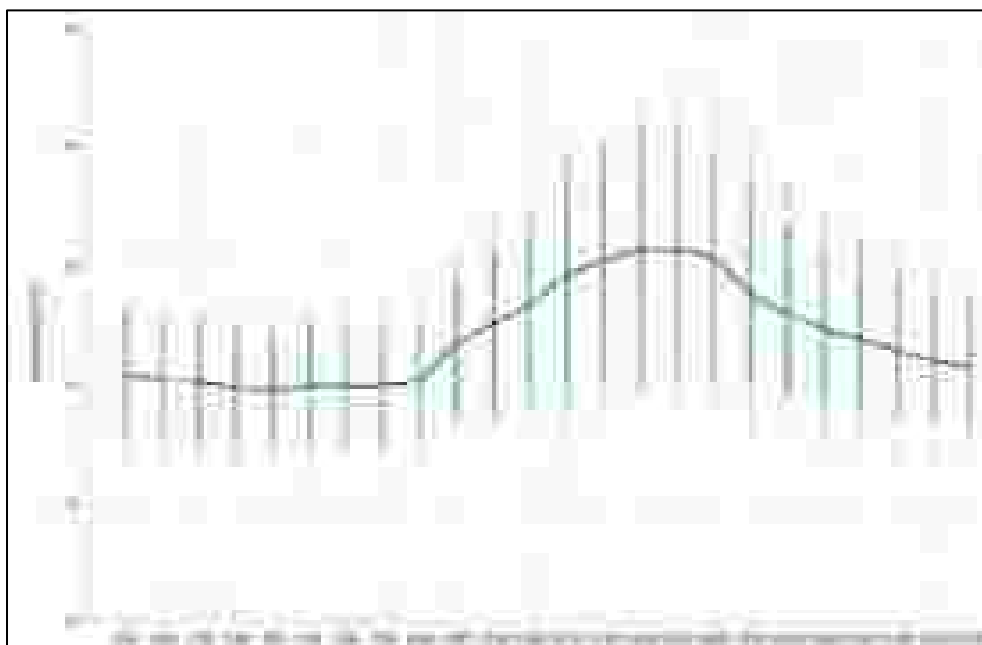


Figura 5.230 Temperatura – Comportamiento horario

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

C. Humedad relativa

En la [Figura 5.231](#), se muestra el comportamiento mensual de la humedad relativa donde los registros se encuentran en el intervalo entre 37.6% y 100.0% con un valor medio de 84.3%, siendo el periodo con menor humedad el mes de febrero con 75.94%.

Los registros horarios se muestran en la [Figura 5.131](#) que los niveles de humedad se incrementan en las primeras horas de la mañana (antes de las 7:00 am) hasta un valor promedio cercano a 92.06%, para luego disminuir hasta 70.27% de humedad en horas de la tarde (2:00 pm).

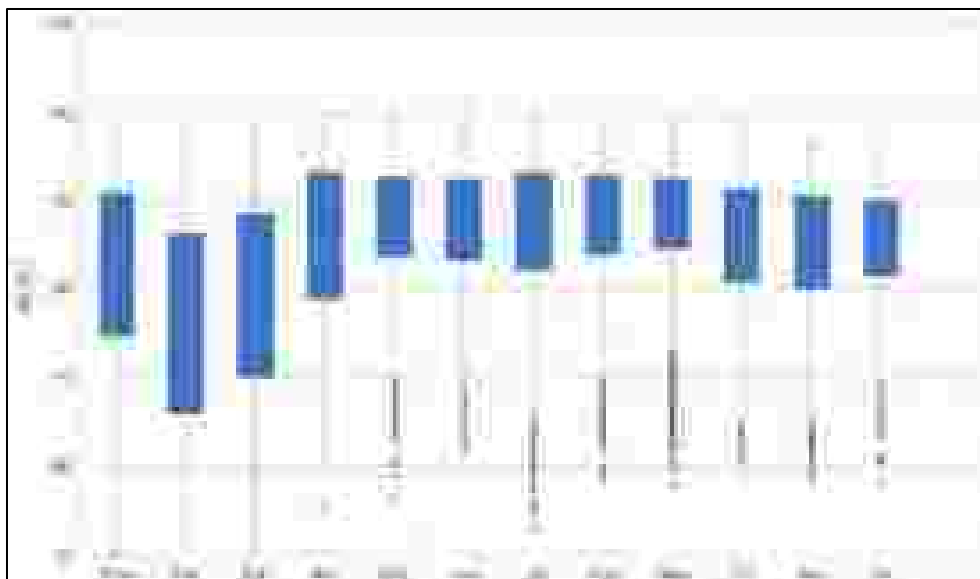


Figura 5.231 Humedad relativa – Comportamiento mensual

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

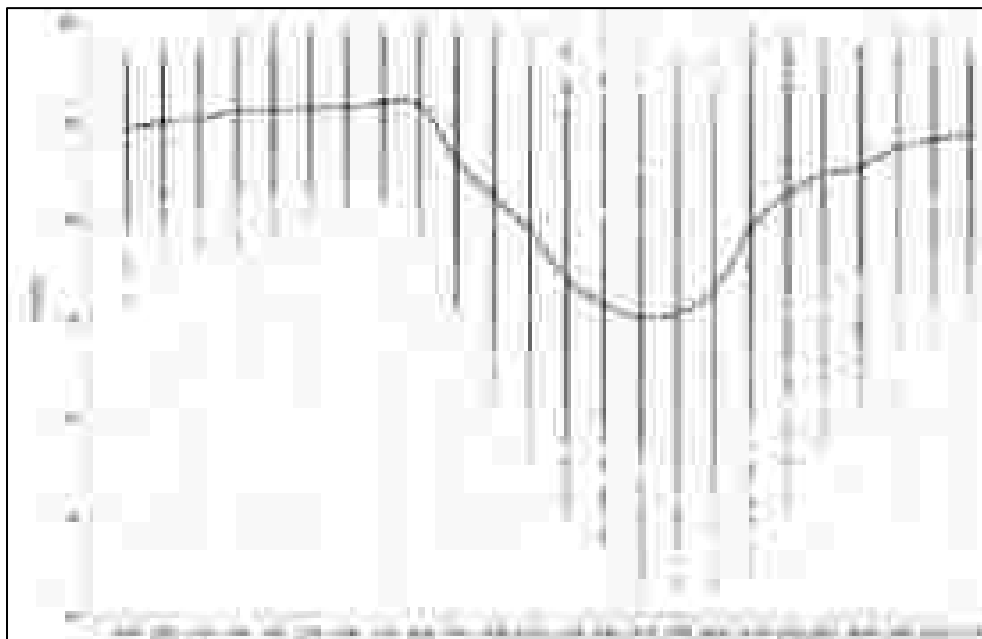


Figura 5.232 Humedad relativa – Comportamiento horario.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

D. Presión atmosférica

La presión atmosférica presenta un valor medio de 1000.1 ± 2.1 mbar (Figura 5.233). El comportamiento diario muestra una relación con la temperatura, con un aumento de 2.0 mbar antes de las 9:00 a.m. y una reducción de 2.3 mbar en horas de la tarde (5:00 pm).

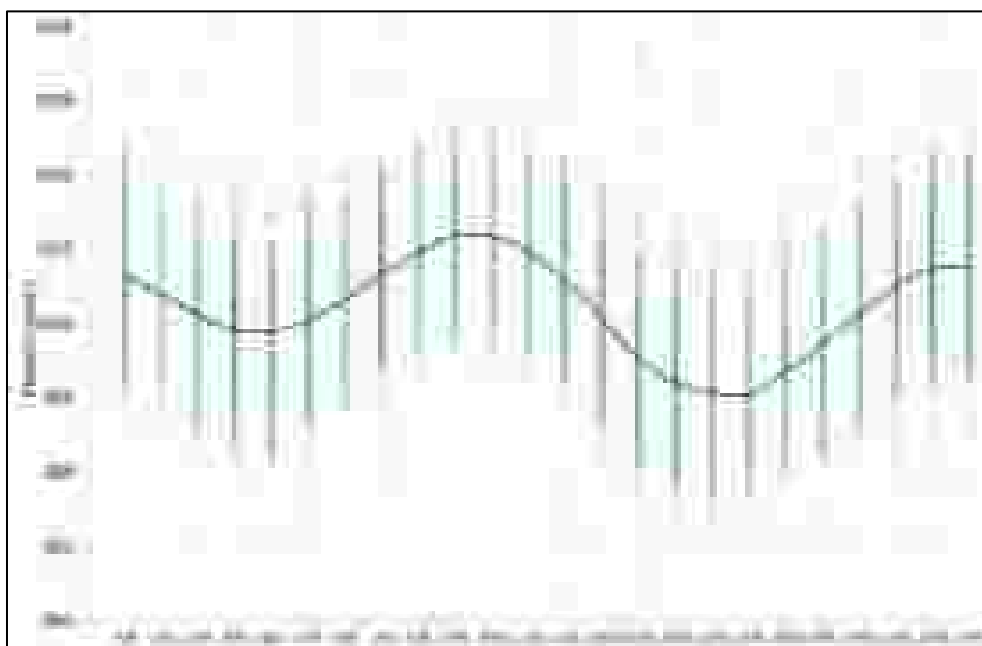


Figura 5.233 Presión atmosférica – Comportamiento horario

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

E. Rosa de vientos

En la Figura 5.234, se muestra la rosa de vientos (incluida en los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Disp/Rosa_Vientos) para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2024 y el 31 de diciembre de 2024. Adicionalmente en la Figura 5.235, se muestra la misma rosa de vientos, pero desplegada sobre la zona de influencia del proyecto.



Se puede observar que hay dirección predominante clara viniendo ("Blowing from") de la dirección S (aunque se presentan aportes también de las direcciones restantes, destacando la SSE, SSW y SE). Para la rosa de vientos graficada, se encuentra que la velocidad promedio es de 1.41 m/s, presentándose velocidades hasta de 5.7 m/s (la velocidad del viento y dirección se modelan a una altura de 10 m), y de las horas de información utilizadas para su construcción en el 5,61% del tiempo el viento estuvo en calma (para un análisis más completo del comportamiento del viento ver los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Disp/Análisis_Meteorol).



Figura 5.235 Rosa de los vientos, elaborada con la información descargada del proveedor METEOBLUE.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

F. Velocidad de vientos

El régimen de vientos se puede clasificar entre vientos de calma inferiores a 0.56 m hasta vientos clasificados Flojo (Brisa Ligera con vientos entre 3.3 m/s a 5.3 m/s, según la escala de Beaufort), como se puede observar en la [Figura 5.236](#) donde también se puede apreciar que el mes con mayor velocidad de los vientos corresponde a febrero con una velocidad promedio de 2.02 m/s.

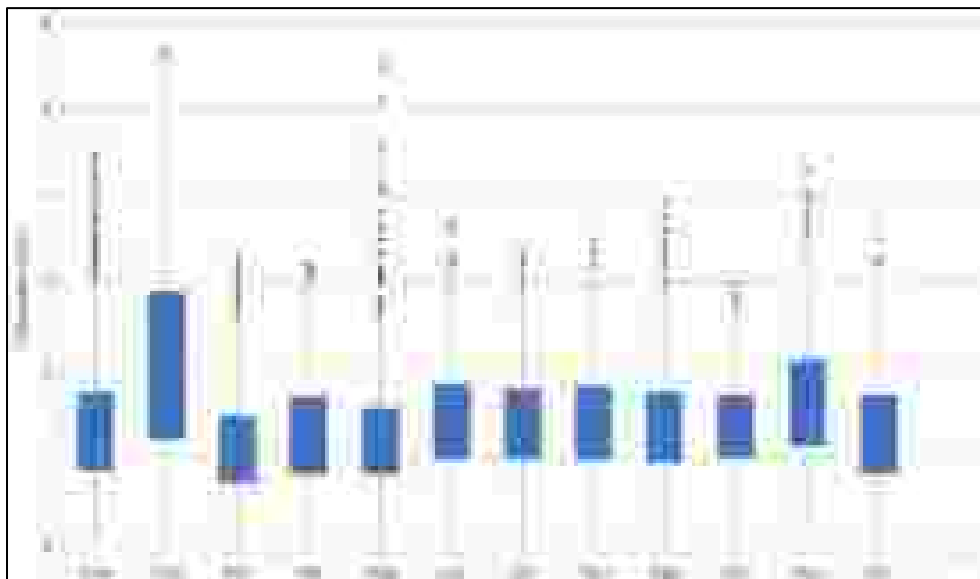


Figura 5.236 Velocidad del viento – Comportamiento mensual.
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

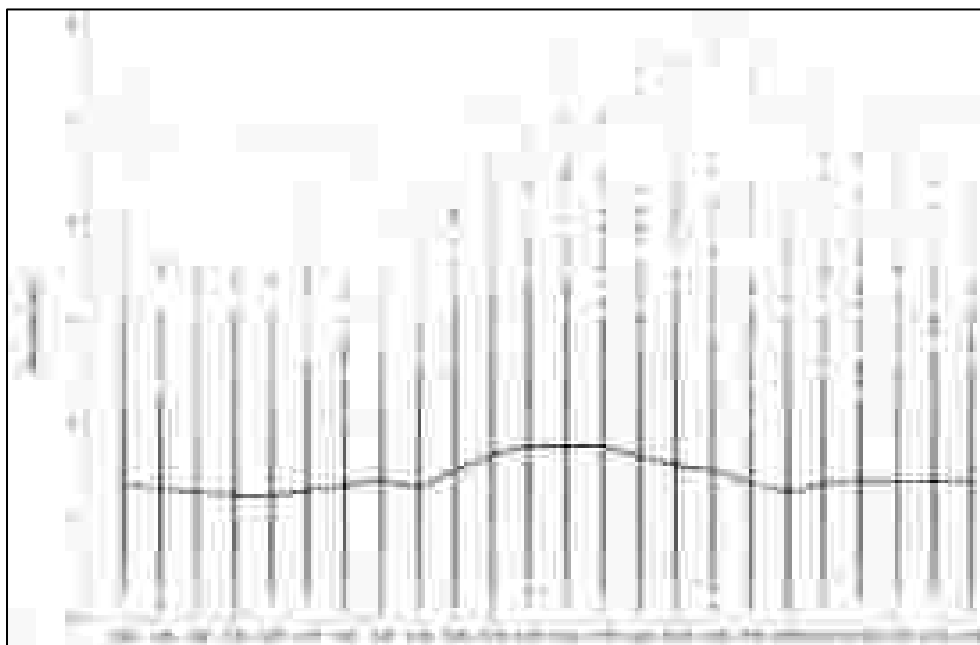


Figura 5.237 Velocidad del viento – Comportamiento horario.
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

De acuerdo con la [Figura 5.237](#) puede encontrarse que las velocidades presentan un comportamiento homogéneo a lo largo del día.

En la [Figura 5.238](#), se muestra la distribución de frecuencias de velocidad, donde se puede ver que el mayor tiempo la velocidad de los vientos se encuentra entre 0.56 m/s y 3.6 m/s con una participación de 93.0%, y que los vientos arriba de 5.7 m/s son nulos.

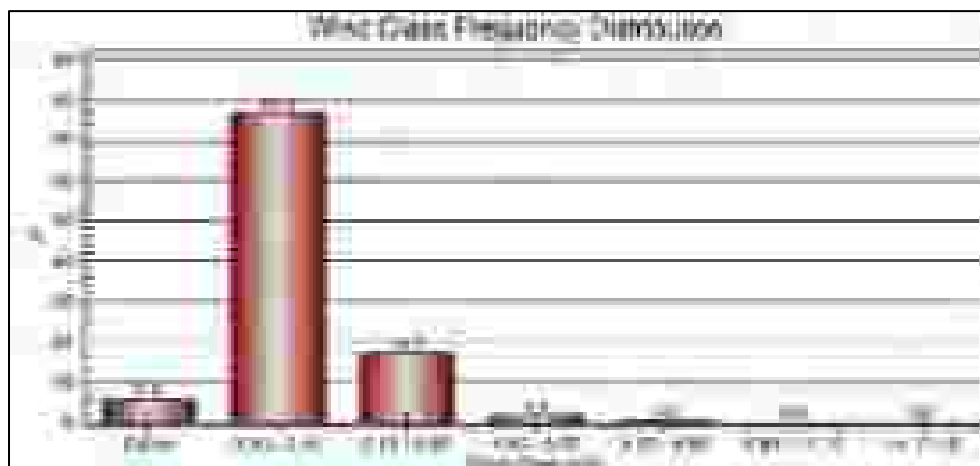


Figura 5.238 Diagrama de frecuencia de distribución de las lases de velocidad

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

G. Nubosidad

La nubosidad permite establecer cuanta radiación solar llega al suelo y cuanta se refracta, calentando el aire de la troposfera: a mayor radiación solar, mayor será la altura de capa de mezcla atmosférica por condiciones convectivas, reduciendo el riesgo de aumentos inesperados de la concentración de contaminantes. Según registros, la nubosidad tiende a un valor predominante de 3 décimas, con clasificación medianamente nuboso (Figura 5.239).

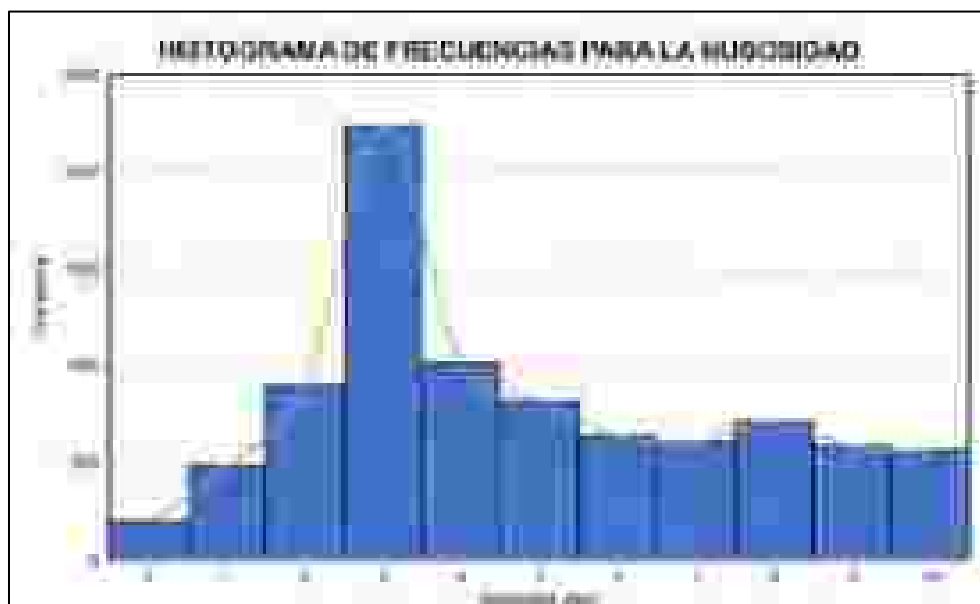


Figura 5.239 Perfil de frecuencia nubosidad

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.5.13 Altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica

El espesor de la troposfera indica la capacidad de dilución de un contaminante: a mayor altura, mayor será la dilución pues habrá una mayor proporción de aire respecto al contaminante. Una menor altura confinará la mezcla aire-contaminante más cerca al suelo, aumentando su concentración. En la [Figura 5.240](#), se muestra la altura de mezclado horaria, donde se puede apreciar que las horas del día cuando se presenta mayor nivel de radiación se incrementa la altura de mezclado. Por otro lado, en la [Figura 5.241](#), se muestra la estabilidad atmosférica horaria.

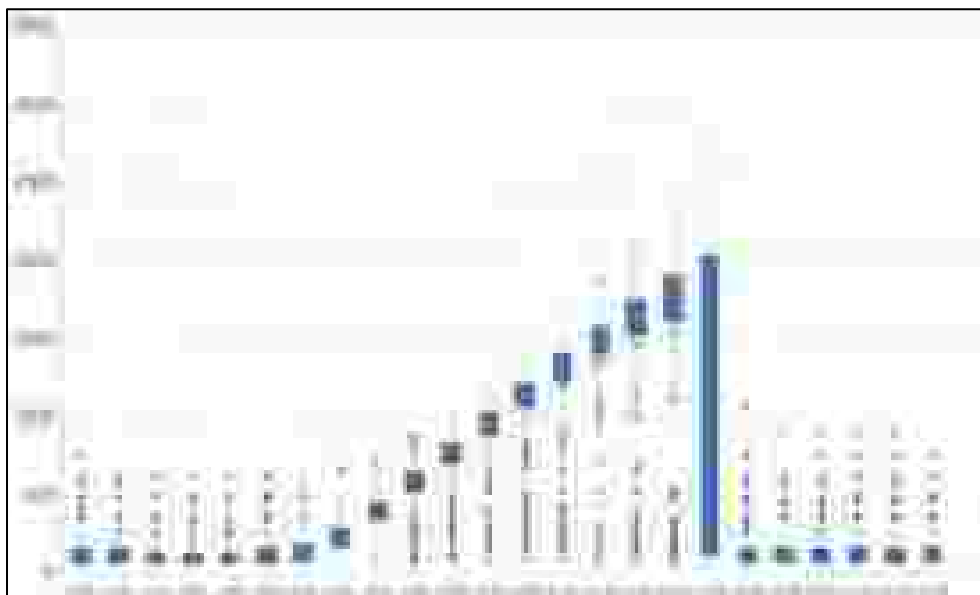


Figura 5.240 Altura de capa de mezcla global típica horaria.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

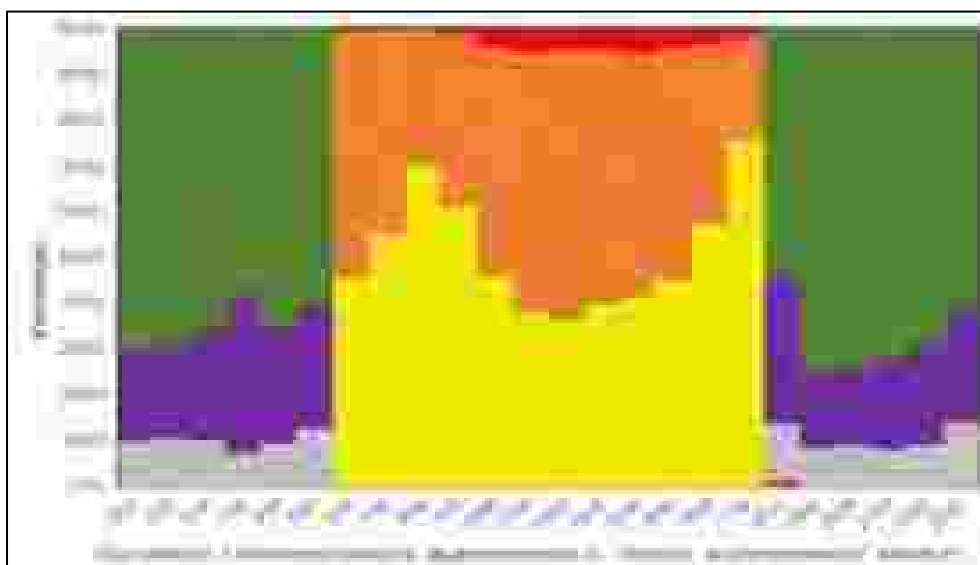


Figura 5.241 Distribución horaria de la estabilidad atmosférica anual promedio

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

El análisis de la distribución de la altura de capa de mezcla atmosférica típica de la zona presenta un pico máximo medio de **1531.67 m** sobre el nivel del suelo a las 4:00 pm, y un pico mínimo medio de **110.84 m** sobre el nivel del suelo a las 4:00 am, presentando una alta dependencia de las condiciones convectivas presentes en la atmosfera para el periodo diurno, ya que las menores alturas de mezclado promedio se presentan en el periodo nocturno.

Según la información estimada, el comportamiento de estabilidad de la zona de acuerdo con la categoría Pasquill-Guilford en horario diurno es de A - C (Moderadamente inestable), mientras que en horario nocturno es D - F (moderado estable). Según la **Figura 5.241**, el comportamiento se puede leer como: (A) muy inestable, (B) moderadamente inestable, (C) Ligeramente inestable, (D) neutral, (E) ligeramente estable y (F) estable.

5.1.10.5.14 Concentraciones de fondo

Con el fin de determinar los niveles de fondo promedio dentro de la zona de modelación, se emplean los datos registrados por el estudio de calidad del aire realizado por Diagnóstico Ambiental S.A.S., en una campaña realizada entre el 15 de noviembre al 2 de diciembre del 2024, donde se realizó la medición dos puntos, para el cual se muestra en la Tabla 5.204 su identificación y georreferenciación se muestran en la **Figura 5.242**. Adicionalmente en la Tabla 5.205, se muestran los promedios para cada uno de los contaminantes en cada uno de los puntos monitoreados.

Tabla 5.204 Sitios de Muestreo Calidad de Aire.

Punto	COORD. WGS 84		COORD. CTM12	
	Norte	Oeste	X	Y
1. CA1	7°14'29.65"	76°26'21.63"	4620249,32	2359620,87
2. CA2	7°14'48.55"	76°26'13.23"	4620511,73	2360200,19

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

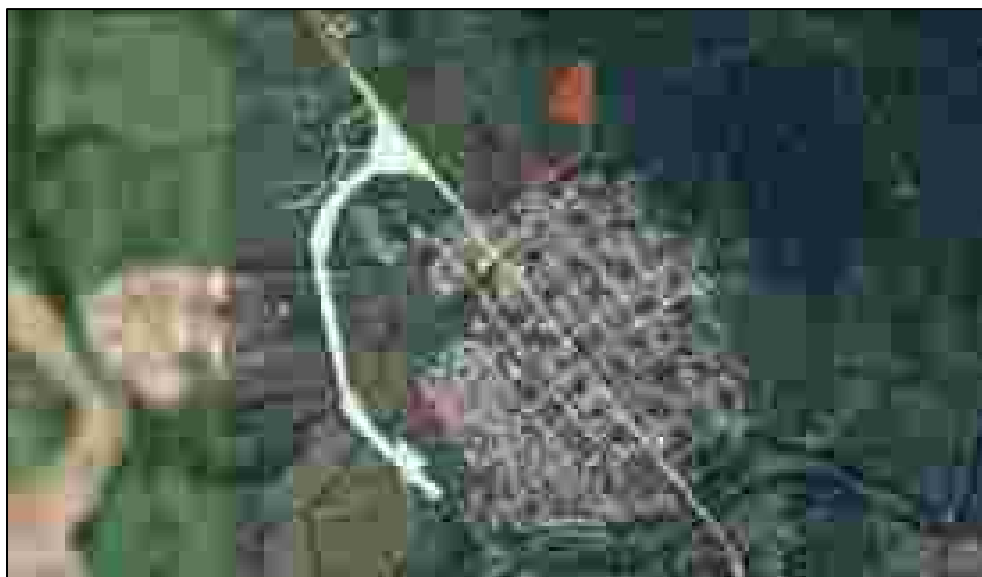


Figura 5.242 Puntos de Monitoreo Calidad de Aire

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.205 Concentraciones reportadas por estudio de calidad del aire

PUNTO	ID	CAMPAÑA 1				
		PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	CO (µg/m ³)
1	CA1	17.4	2.9	2.8	3.5	426.5
1	CA2	11.8	3.3	5.8	4.6	686.2
PROMEDIO		14.6	3.1	4.3	4.1	556.4

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Los datos promedios para PM₁₀, no superan el límite permisible (representan el 29.2% del límite anual establecido en 50 µg/m³), los datos de PM_{2.5}, no superan el límite permisible (representan el 12.4% del límite anual establecido en 25 µg/m³), para NO₂ representan solo 6.8% de límite anual establecido en 60 µg/m³, para CO representan solo 11.1% de límite anual establecido en 5000 µg/m³ y por último para SO₂ representa el 8.6% de límite anual establecido en 50 µg/m³. Para el modelo se tendrán en cuenta los valores promedios redondeados al entero más cercano con lo cual los niveles de fondo serán: PM₁₀ 15 µg/m³, PM_{2.5} 3 µg/m³, SO₂ 4 µg/m³, CO 556 µg/m³ y NO₂ 4 µg/m³.

Los valores empleados para calcular los promedios, se puede consultar el archivo Resumen resultados mediciones calidad del aire.xlsx incluido en los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Dispo/Arch_Resultado.

5.1.10.5.15 Resultados de la corrida del modelo AERMOD

Para el desarrollo del modelo, se establece un área de modelación equivalente a (4.0 km de base por 6.0 km de alto) 16 km², porque se encuentra que es apropiada ya que permite evaluar el efecto de la distancia entre fuente y receptor apropiadamente. Encontrándose, además que más allá de estos límites establecidos, la influencia por parte de los niveles de emisión generados por el proyecto, resultan ser inferiores al 1% de los valores establecidos en la Normatividad.

En el presente estudio se establece el desarrollo de tres escenarios de modelación que se describen a continuación:

- Actual sin proyecto,
- Construcción proyecto sin medidas de control
- Construcción proyecto con medidas de control

A. Escenario actual (escenario 0)

Actualmente en los alrededores del área de intervención del proyecto se encuentra como fuentes de emisión el tráfico vehicular por vías descubiertas y pavimentadas. Por tanto, serán las fuentes objeto de cuantificación de emisiones para el escenario actual. Este escenario aplica en caso de contar con inventario de emisiones formal de la zona. Si no se posee inventario de emisiones, la línea base corresponderá a las concentraciones de los niveles de inmisión del monitoreo de calidad acorde a su cobertura espacial. La caracterización de este escenario se basa en los monitoreos de calidad de aire ejecutados durante el año 2024 en la campaña que se describe en el 5.1.10.5, siendo el reflejo de las condiciones actuales de la calidad de aire mediante la integración de todas las fuentes de emisión del entorno del proyecto.

B. Escenario 1 construcción proyecto sin control

Para este escenario se incluyen las emisiones generadas por las actividades requeridas durante la etapa de construcción, donde se incluyen todas las fuentes tanto de carácter lineal como dispersas. La modelización solo se ejecuta para las condiciones de construcción, y las salidas del modelo se pueden emplear como complemento a las mediciones de calidad del aire, las salidas del modelo incluyen el nivel de fondo.

C. Escenario 2 construcción proyecto con control

Similar al escenario 1, pero adicionalmente con el fin de reducir las emisiones provenientes del tráfico vehicular, para este se asume un control del 60%, esto podría constituir un buen indicativo de las reducciones que se lograrían si se lograra una adecuada humectación de la cobertura de las vías no pavimentadas asociadas al proyecto, que en este caso solo aplicaría para el tramo a construir VIA_3, a través del cual se movilizarían los vehículos para el transporte de materiales requeridos. Este escenario solo aplica para los contaminantes PM₁₀ y PM_{2.5}.

D. Aclaraciones

Debido a que el modelo AERMOD tiende a sobreestimar las emisiones para periodos cortos, la US EPA recomienda que para comparación con el estándar de NO₂ de 1 hora, el valor de diseño modelado se basa en el percentil 98 (P98) de los valores máximos diarios de 1 hora, que está representado por el octavo más alto de los valores máximos diarios de 1 hora a lo largo del año. El valor de diseño modelado para comparación con el estándar de SO₂ de 1 hora se basa en el percentil 99 (P99), o el cuarto más alto, de los valores máximos diarios de 1 hora durante todo el año. Para los contaminantes PM₁₀ y PM_{2.5}, para el periodo de 24 h con el fin de comparar con el estándar la US EPA habla del percentil 98 (representado por el octavo más alto) para PM_{2.5} y del sexto más alto para el PM₁₀ (equivalente a aproximadamente el percentil 98.5¹⁷⁵). Para el contaminante CO, no se especifica el uso de percentiles por lo cual la comparación se realiza con el valor máximo para cada uno de los periodos evaluados.

Para los contaminantes PM₁₀ y PM_{2.5} no se asume deposición seca, lo que equivale a que cuando se modelan las partículas, no se calcula una velocidad de sedimentación y una velocidad de deposición para cada categoría de tamaño. La velocidad de asentamiento hace que la pluma se "incline" hacia la superficie (si la pluma está elevada) a medida que viaja a favor del viento, mientras que la velocidad de deposición se usa para calcular el flujo de la materia depositada en la superficie. Cuando se incluye la opción de agotamiento del penacho, la masa de partículas se elimina del penacho a medida que se deposita en la superficie, conservando así la masa. La opción de no agotamiento puede ser aceptable si la deposición es débil y dará como resultado una sobreestimación tanto de las concentraciones como de la deposición.

Las salidas graficas del modelo de dispersión de contaminantes se presentan para tiempos de inmisión de 24 horas y anual para PM₁₀ y PM_{2.5}, 1 hora y anual para dióxido de nitrógeno (NO₂), 1 hora y 24 h para el dióxido de azufre (SO₂) y 1 hora y 8 h para el monóxido de carbono (CO).

¹⁷⁵ (Resolución 1541 de 2013," Bogotá DC, 2013.)

5.1.10.5.16 Aclaraciones para la no inclusión de escenario con control.

Para el desarrollo del escenario con control se requiere que se den las siguientes condiciones: la primera que la fuente sobre la que se va a realizar el control sea aportante, segunda que sea factible el control y por último que las salidas del modelo sin control reflejen la necesidad de incluir dichos controles. Para este caso, la fuente sobre la que es más factible la aplicación de controles son las vías no pavimentadas.

En la Tabla 5.206, se tabulan las emisiones de las fuentes globales ingresadas al modelo, de las cuales se propone el control de emisiones representan el 80.02% de las emisiones de material particulado expresado como la fracción de PM₁₀, mientras que expresada como PM_{2.5} corresponde al 46.10%.

Tabla 5.206 Emisiones globales y efecto del control por humectación de las vías

FUENTE	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀ %	PM _{2.5} %
Vías pavimentadas (g/s)	0.0260	0.0078	12.64	19.45
Vías no pavimentadas (g/s)	0.1647	0.0186	80.02	46.10
Fuentes de área total (g/s)	0.0151	0.0139	7.34	34.45
Total, emisiones	0.2058	0.0403	100.00	100.00
Emisiones total vías (g/s)	0.1907	0.0264		
Emisiones vías con control (g/s)	0.0989	0.0158		
Porcentaje de las vías con control (%)	0.8636	0.7033		
Emisiones con control vías (g/s)	0.0989	0.0158		
Porcentaje de control vías (%)	48.1395	40.2648		
Reducción emisiones vías (g/s)	0.0918	0.0106		
Reducción emisiones global (g/s)	0.0918	0.0106		
Porcentaje control global (%)	44.6044	26.3930		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Al aplicar el control propuesto del 60% mediante la humectación de las vías (para una relación de humedad M=1.8), se obtendría una reducción de las emisiones globales asociadas a la operación del proyecto de 0.0918 g/s de material particulado expresado como PM₁₀ y de 0.0106 g/s expresado como PM_{2.5}, lo que equivale a una reducción global de las emisiones para ambos contaminantes de 44.60% y 26.39% respectivamente.

5.1.10.5.17 Resultados del modelo AERMOD para el contaminante PM₁₀

A continuación, se muestran los resultados de la modelización para los tres escenarios planteados, para el contaminante PM₁₀. Las salidas incluyen un nivel de fondo de 15 µg/m³.

A. Concentraciones de material particulado PM₁₀, escenario 1

En la Figura 5.243 muestra las concentraciones máximas diarias predichas por el modelo estimadas a partir del percentil 98.5 (la sexta más alta), estimadas para las coordenadas (X, Y) ingresadas al modelo de dispersión AERMOD, los puntos identificados con estas coordenadas corresponden a los 421 receptores ingresados. Mientras en la Figura 5.244, se muestran las concentraciones para el periodo anual (los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Disip/Arch_Resultado).

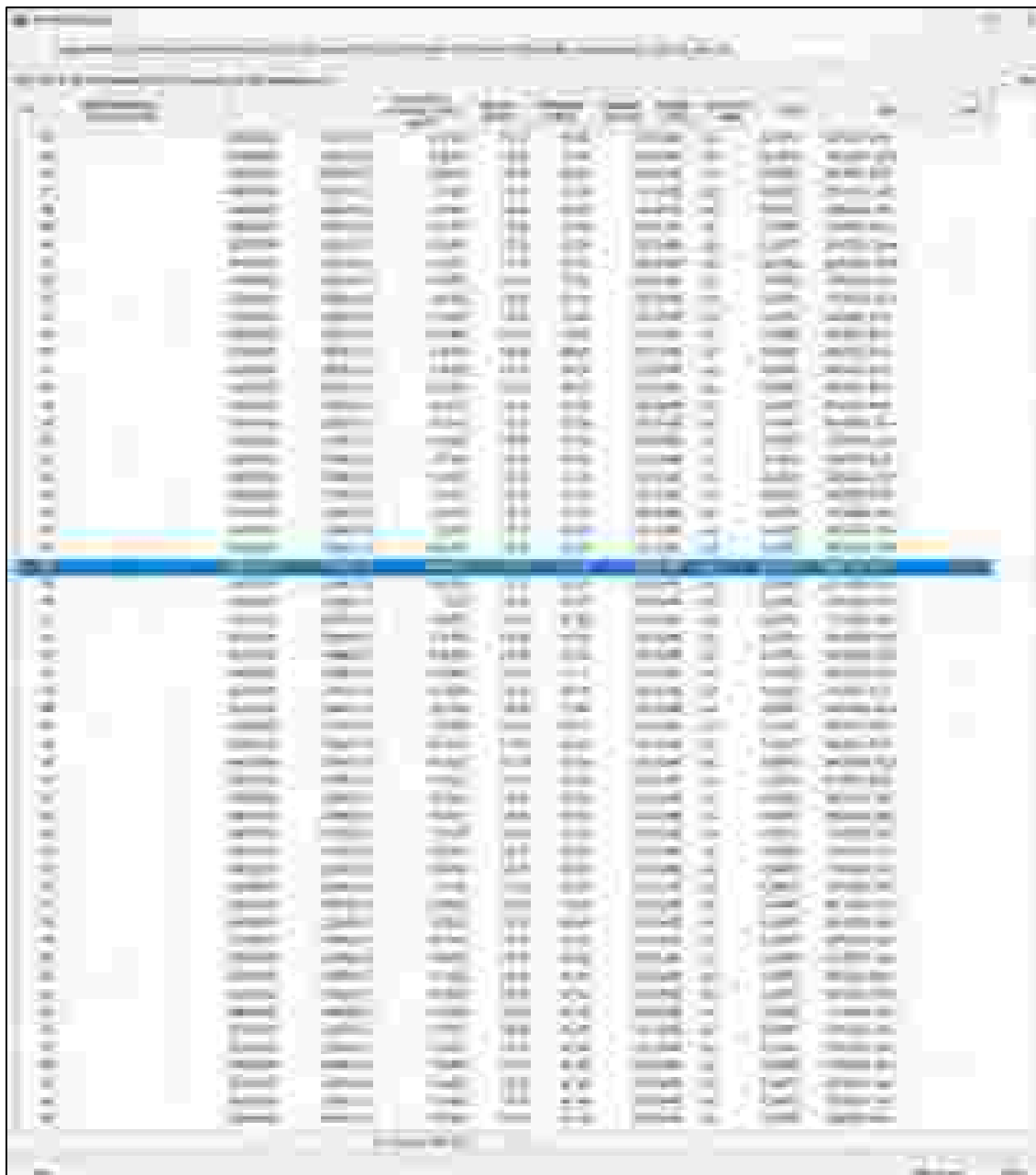


Figura 5.243 Concentraciones máximas de PM_{10} para el periodo de 24h (P98.5) en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1.

Fuente: AERMOD View.

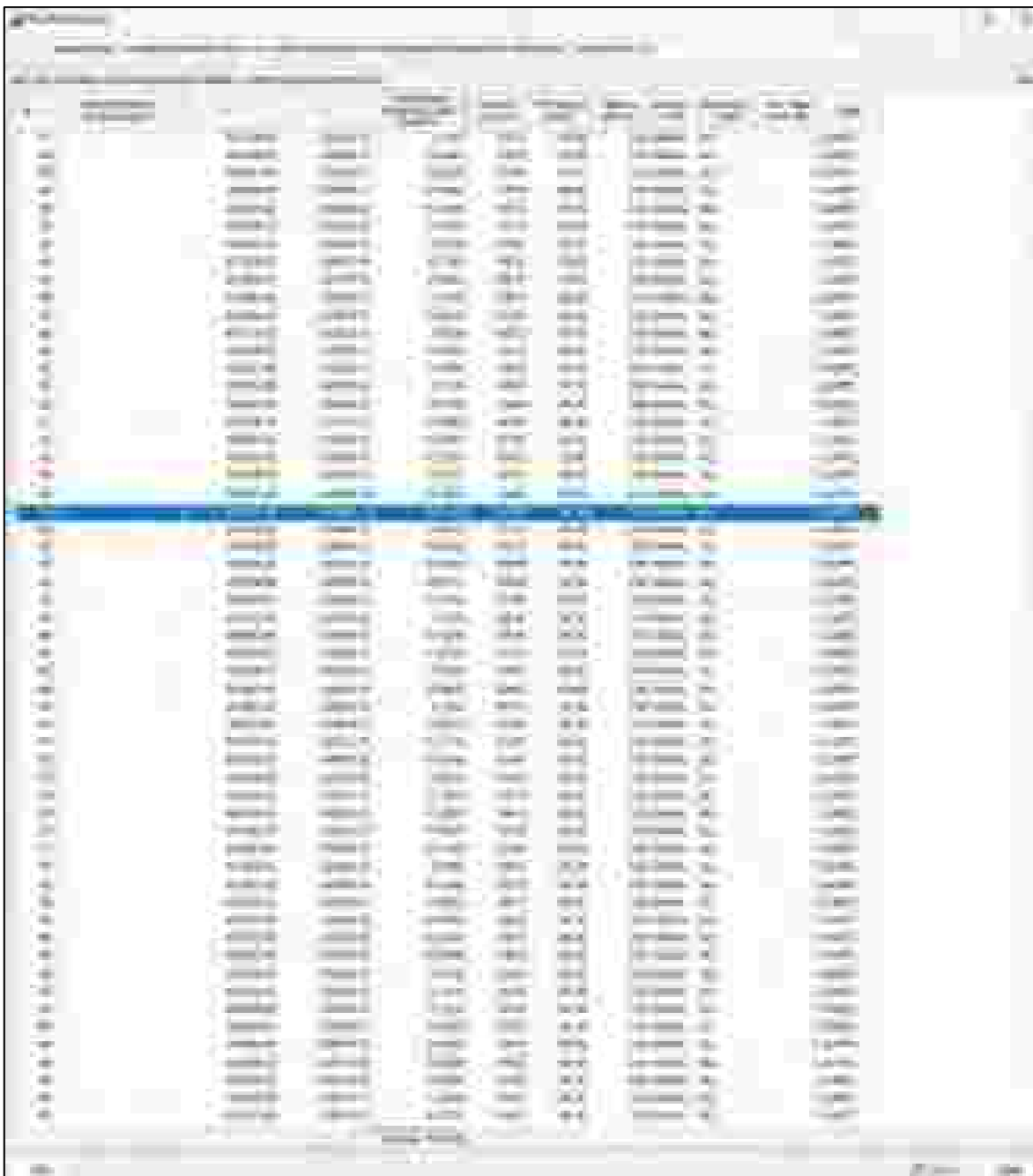


Figura 5.244 Concentraciones máximas de PM_{10} para el periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1.

Fuente: AERMOD View.

De la [Figura 5.243](#) y [Figura 5.244](#) se encuentra que las concentraciones máximas predichas por el modelo son $44.90 \mu g/m^3$ (en la ubicación REC158) para el periodo de 24 h dado como el percentil 98.5, mientras para el periodo anual es de $28.34 \mu g/m^3$ (en la ubicación

REC158), los valores incluyen un nivel de fondo de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que implica incrementos máximos de $29,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $13,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 24 h y anual respectivamente.

La información tabulada, se muestra de forma gráfica en la [Figura 5.245](#) y [Figura 5.246](#), lo cual permite una mejor interpretación de la afectación y dispersión de las emisiones de PM_{10} desde la fuente y los niveles de concentración presentados en los diferentes receptores seleccionados.

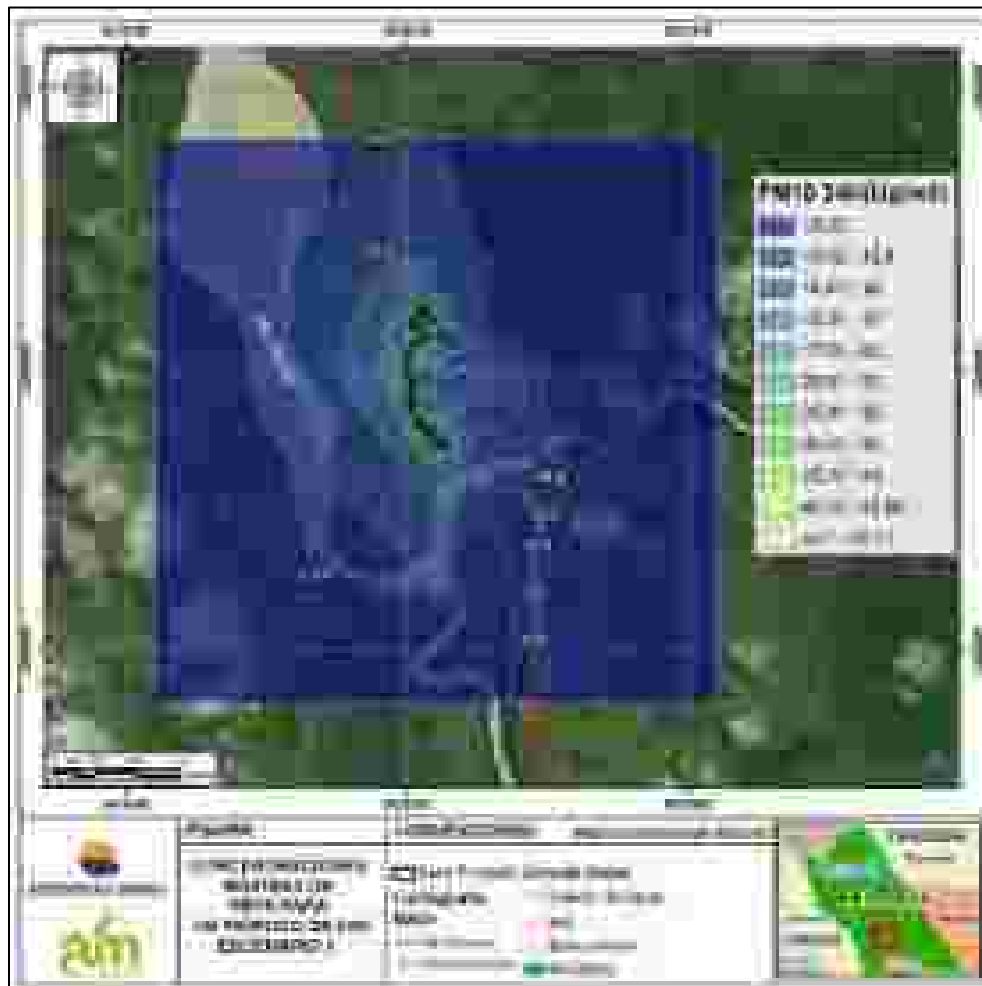


Figura 5.245 Concentraciones máximas de PM_{10} para un periodo de 24h (P98.5), escenario 1.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025 y AERMOD View.



Figura 5.246 Concentraciones máximas de PM10 para un periodo anual, escenario 1.

Fuentes: Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025 y AERMOD View.

Al analizar la [Figura 5.245](#) y [Figura 5.246](#), se observa que la zona donde el modelo predice los mayores niveles de concentración, tanto para el periodo de 24 h (P98.5) como anual, corresponde al área cercana a los ejes viales y en los alrededores del trazado de la variante, y a medida que la distancia incrementa con respecto a estas las concentraciones disminuyen de forma exponencial.

Con el fin de tener una mejor visión del área de influencia atmosférica se muestra la [Figura 5.247](#), donde se puede observar la zona donde se presentarán los principales impactos, en dicha figura se muestran las zonas donde se presentarán niveles de inmisión de $17.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (las cuales se encuentran cerca de la zona de construcción), para los periodos de 24 h (P98.5) y anual, lo que equivale a incrementos de $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que constituyen los aportes del proyecto en relación con el nivel de fondo ingresado de $15.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe aclarar que en ninguna de las 421 ubicaciones modeladas se alcanzan a superar los límites permisibles.

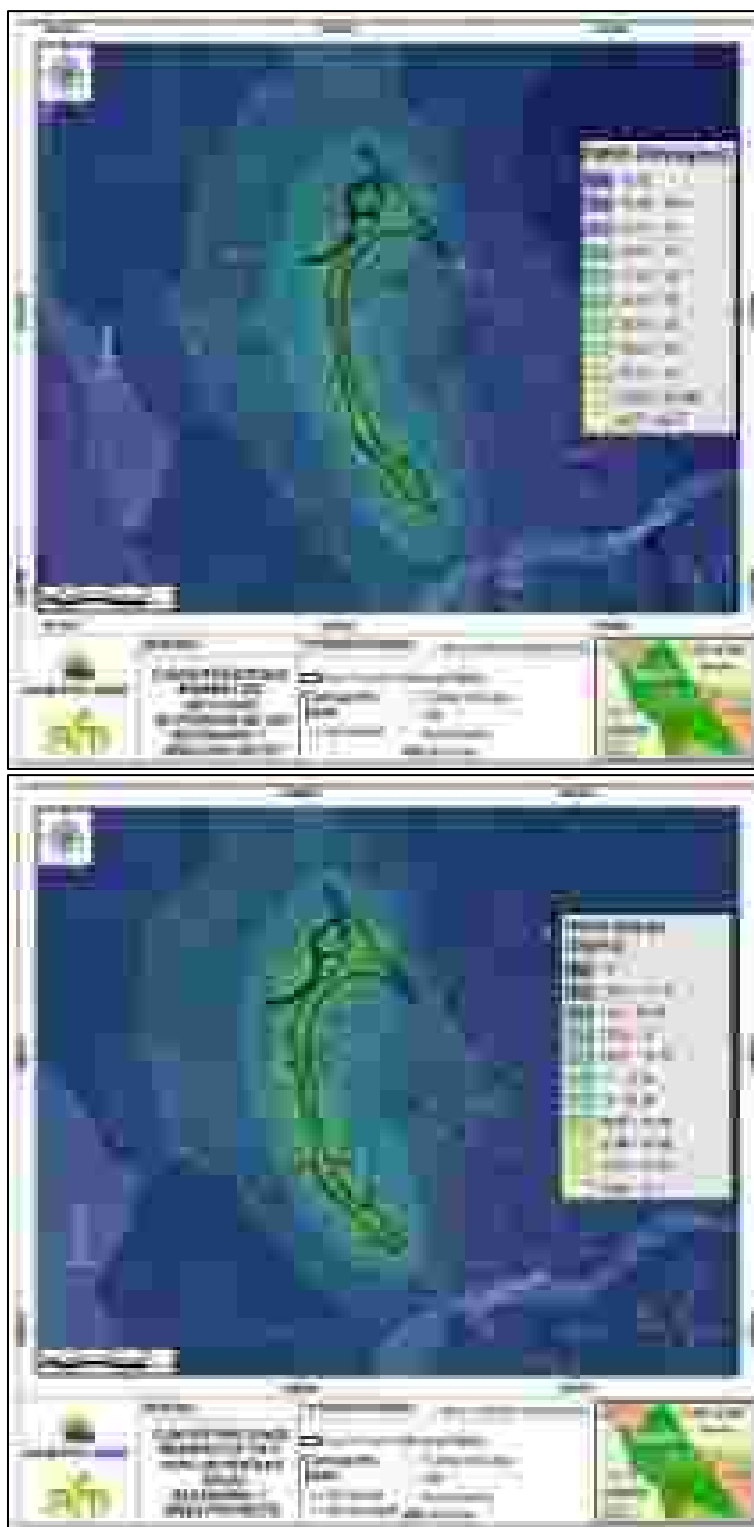


Figura 5.247 Vista cercana de las concentraciones máximas de PM_{10} para los periodos de 24 h (P98.5) y anual, escenario 1.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Por otro lado, en la [Figura 5.248](#), se muestra una vista 3D de los niveles de concentración máxima para el periodo de 24 h, se puede observar cómo los niveles máximos se presentan en las zonas cercanas a las fuentes ingresadas al modelo, donde destacan los ejes viales, la zona de construcción de la variante.

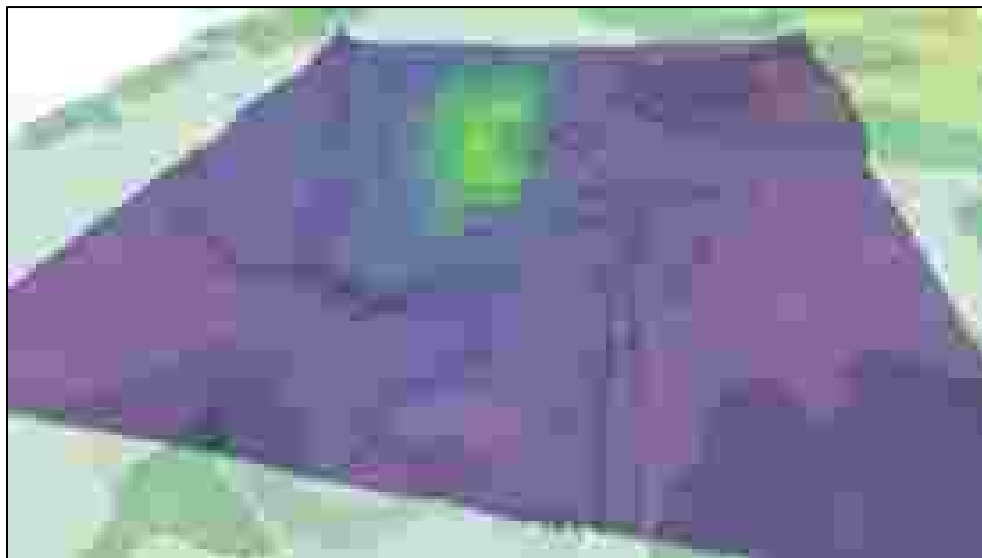


Figura 5.248 Vista 3D de las concentraciones máximas de PM₁₀ para el periodo de 24 h estimado como el percentil 98.5, escenario 1.

Fuente: AERMOD View.

B. Concentraciones de material particulado PM₁₀, escenario 2 (con control en las vías) escenario 2

Para este escenario se modelan las emisiones estimadas con las condiciones con un control en la vía identificada como VIA_3 y VIA_8 a VIA_9 equivalente al 60%, resultante de la aplicación de agua mediante el método de aspersion con carro tanque. La [Figura 5.249](#) muestra las concentraciones máximas diarias predichas por el modelo a partir del percentil 98.5 (la sexta más alta), estimadas para las coordenadas (X, Y) ingresadas al modelo de dispersión AERMOD. Los puntos identificados con estas coordenadas corresponden a los 421 receptores ingresados. Mientras en la [Figura 5.250](#), se muestran las concentraciones para el periodo anual (para ver los datos completos consultar los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Disp/Arch_Resultado).

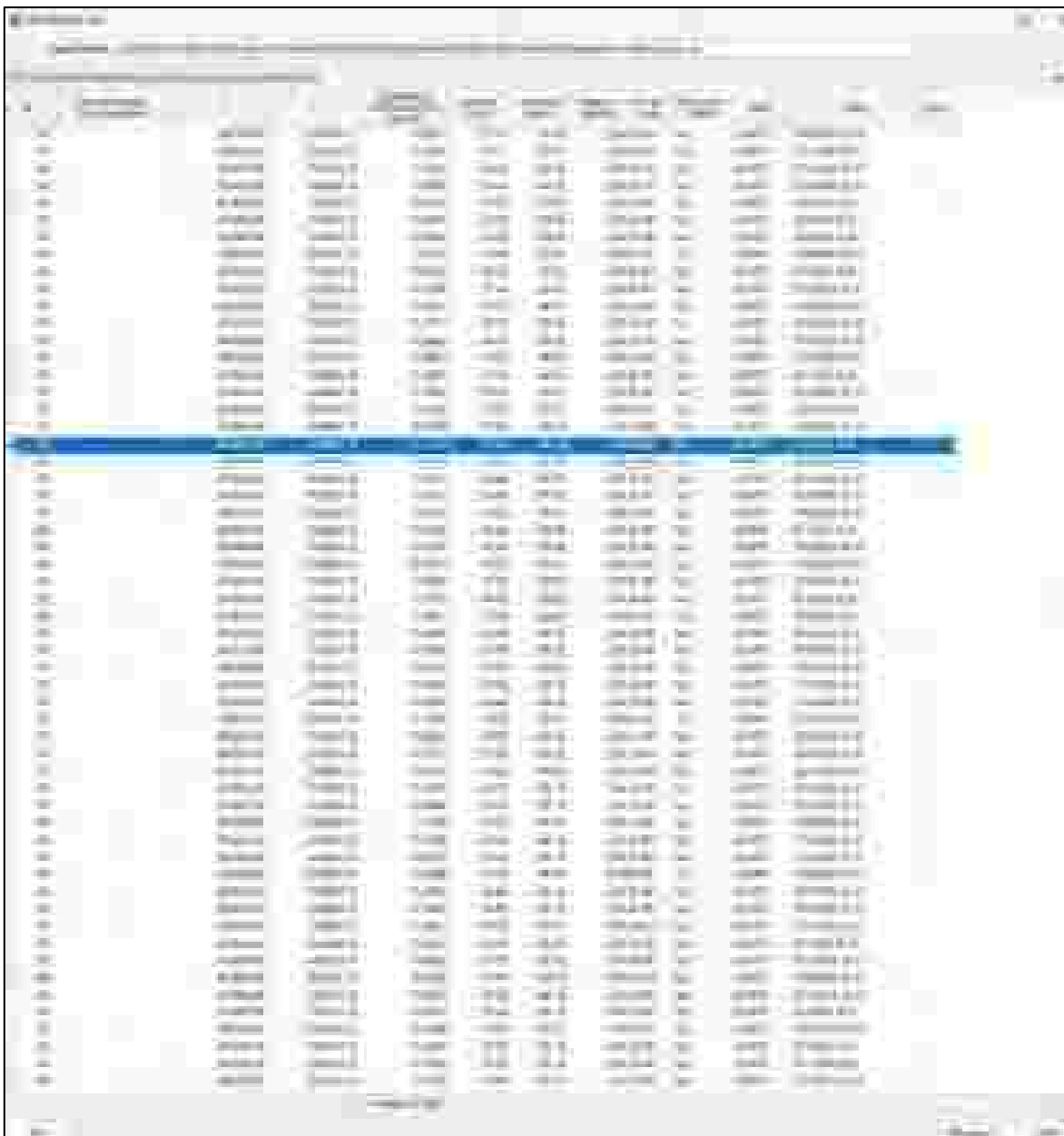


Figura 5.249 Concentraciones máximas de PM_{10} para el periodo de 24h en las ubicaciones de los 421 receptores, con control de las emisiones.

Fuente: AERMOD View.

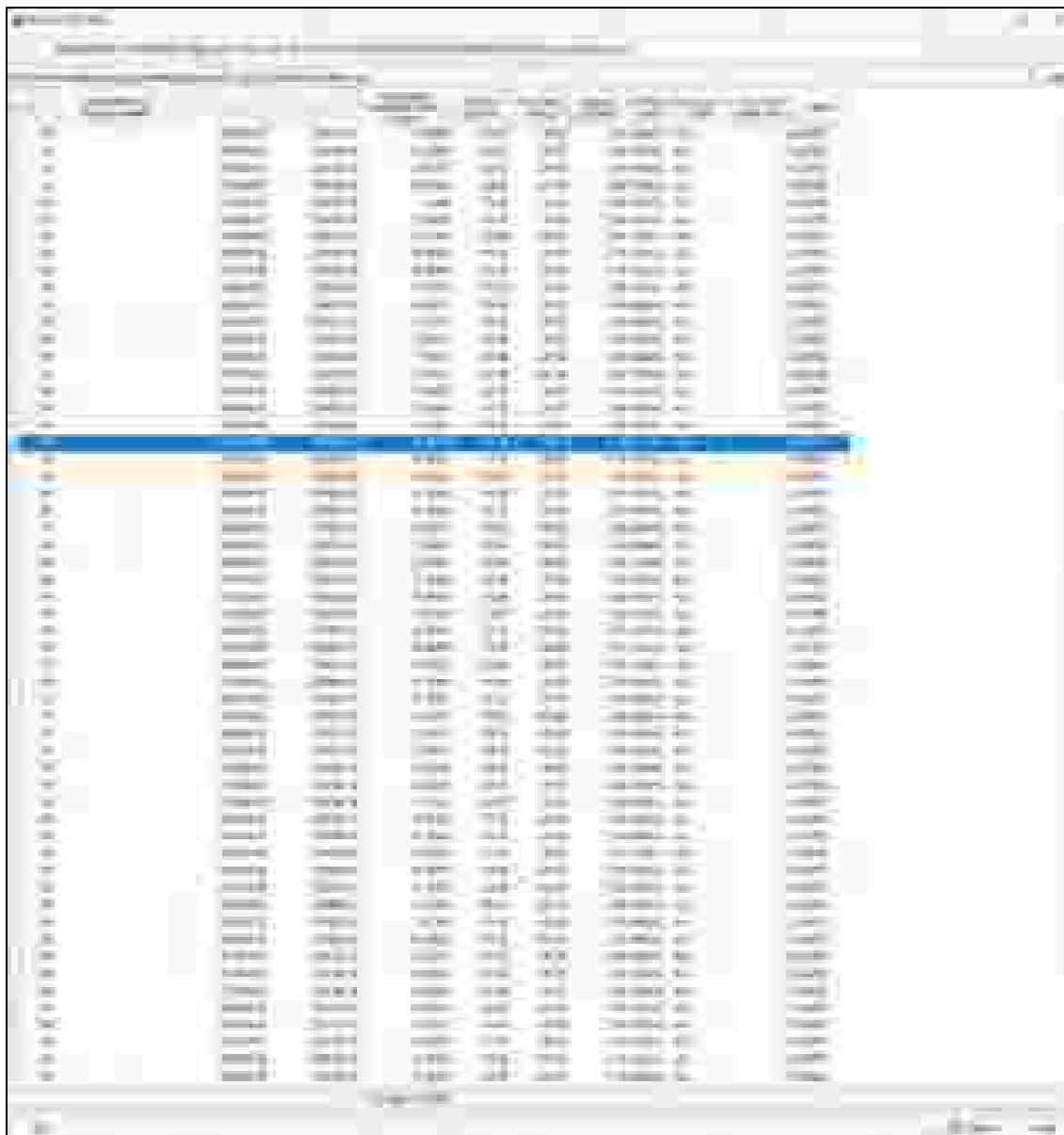


Figura 5.250 Concentraciones máximas de PM₁₀ para el periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, con control de las emisiones.

Fuente: AERMOD View.

De la [Figura 5.249](#) y [Figura 5.250](#) se encuentra que las concentraciones máximas predichas por el modelo son $27,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en la ubicación REC158) para el periodo de 24 h, mientras para el periodo anual es de $20,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en la ubicación REC158), los valores incluyen un nivel de fondo de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que implica incrementos máximos de $12,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 24 h y anual respectivamente.

Si se comparan los datos sin control y con control en las vías se encuentra que este permite una reducción en los niveles máximos predichos por el modelo para el valor de 24h, del

orden de 0.5923 (59.23%) para el periodo de 24 h, mientras para el periodo anual es del orden de 0.5765 (57.65%).

La información tabulada, se muestra de forma gráfica en la [Figura 5.251](#) y [Figura 5.252](#), lo cual permite una mejor interpretación de la afectación y dispersión de las emisiones de PM₁₀ desde la fuente y los niveles de concentración presentados en los diferentes receptores seleccionados.



Figura 5.251. Concentraciones máximas de PM10 para el periodo de 24h, con control de las emisiones, escenario 2.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.



Figura 5.252 Concentraciones máximas de PM₁₀ para el periodo anual, con control de las emisiones, escenario 2.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Al analizar la [Figura 5.251](#) y [Figura 5.252](#), se encuentra que la zona donde el modelo predice los mayores niveles de concentración, tanto para el periodo de 24 h como anual, corresponde al área cercana al trazado de construcción de la variante. Si se observa la región de máxima concentración esta se orienta en las direcciones predominantes de la rosa de vientos mostrada en la [Figura 5.235](#) de norte a sur.

Con el fin de tener una mejor visión del área de influencia directa en la [Figura 5.253](#), donde se puede observar la zona donde se presentarán los principales impactos, en dicha figura se muestran las zonas donde se presentarán niveles de inmisión de $16.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para los periodos de 24 h (P98.5) y anual, lo que equivale a incrementos de $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que constituyen los aportes del proyecto en relación con el nivel de fondo ingresado de $15.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

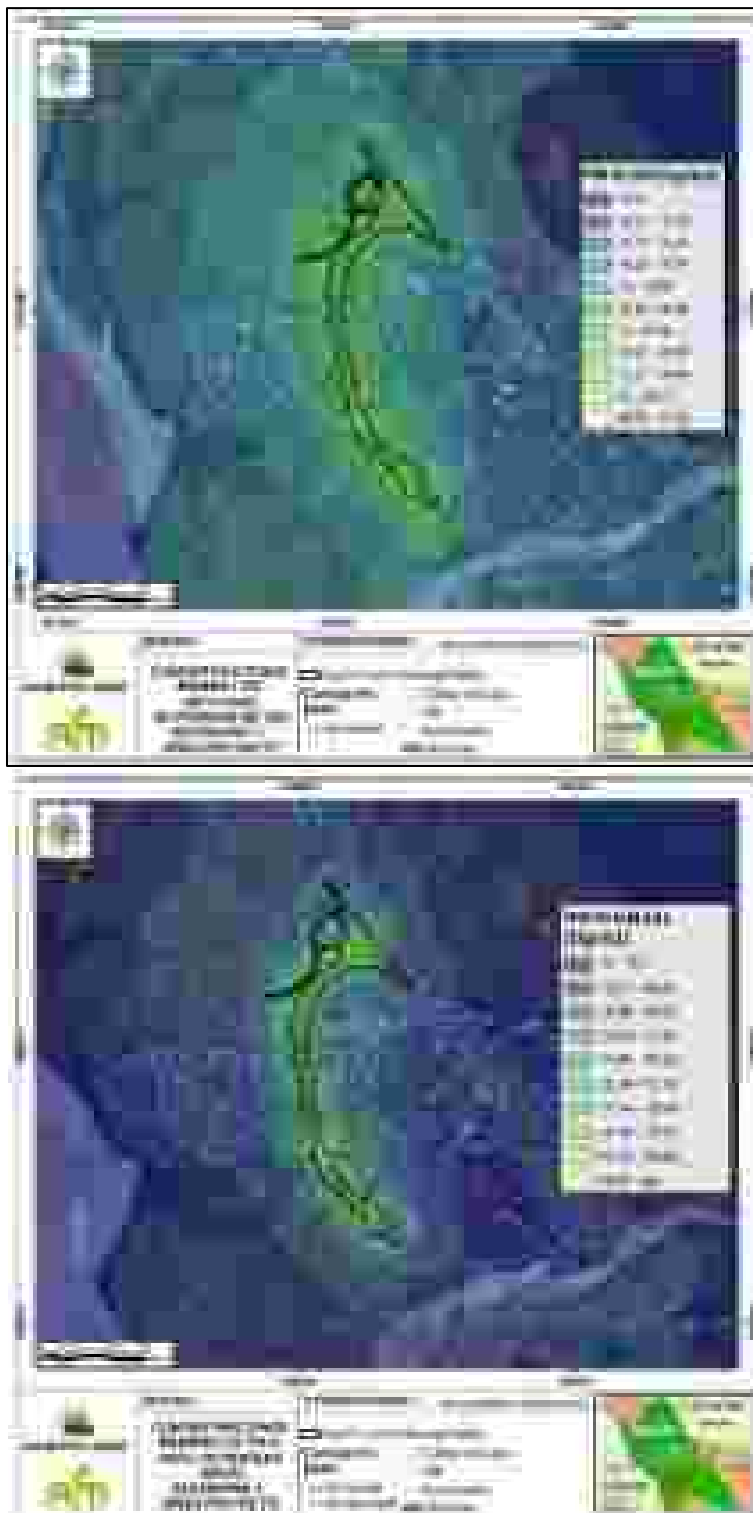


Figura 5.253 Vista cercana de las concentraciones máximas de PM_{10} para el periodo de 24h y anual, escenario 2.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Por otro lado, en la [Figura 5.253](#), se muestra una vista 3D de los niveles de concentración máxima para el periodo de 24 h, cuando se aplica control sobre las vías, donde se puede observar cómo los niveles máximos se alinean con las zonas aledañas a las fuentes ingresadas, coincidiendo con algunos tiempos de aportes del viento en esa dirección representados en la rosa de vientos de la [Figura 5.254](#). Cabe destacar que la zona que más resalta es la de los alrededores del área de construcción de la variante.

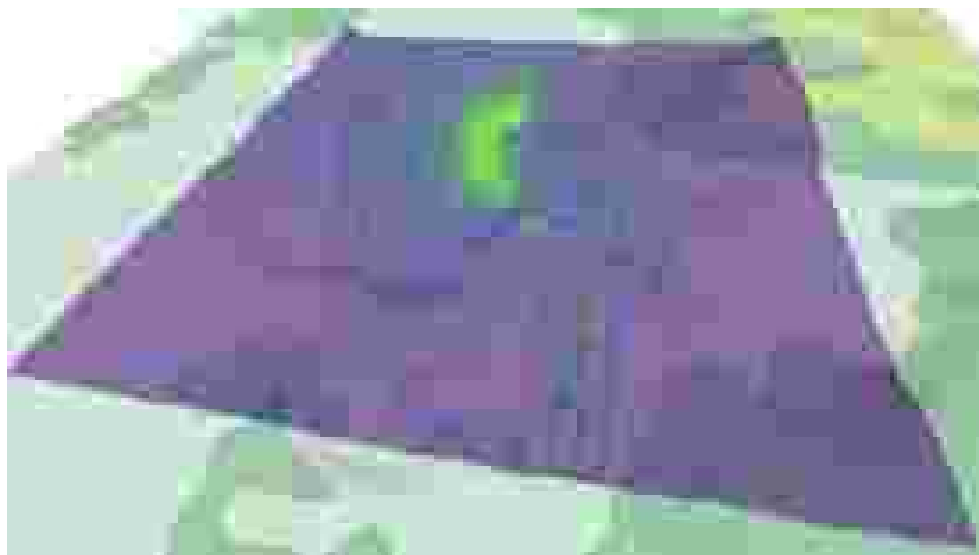


Figura 5.254 Vista 3D de las concentraciones máximas de PM₁₀ para el periodo de 24h, con control de las emisiones, escenario 2.

Fuente: AERMOD View.

5.1.10.5.18 Resultados del modelo AERMOD para el contaminante PM_{2.5}

A continuación, se muestran los resultados de la modelización para los tres escenarios (Escenario actual E0, Escenario sin control E1, Escenario con control E2) planteados, para el contaminante PM_{2.5}. Las salidas incluyen un nivel de fondo de 3 µg/m³.

A. Concentraciones de material particulado PM_{2.5}, escenario 1

En la [Figura 5.254](#) muestra las concentraciones máximas diarias predichas por el modelo estimadas a partir del percentil 98 (la octava más alta), estimadas para las coordenadas (X, Y) ingresadas al modelo de dispersión AERMOD, los puntos identificados con estas coordenadas corresponden a los 421 receptores ingresados. Mientras en la [Figura 5.255](#), se muestran las concentraciones para el periodo anual (para ver los datos completos consultar los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Disp/Arch_Resultado).



Figura 5.255 Concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ para un periodo de 24 h (P98) en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1.

Fuente: AERMOD View.

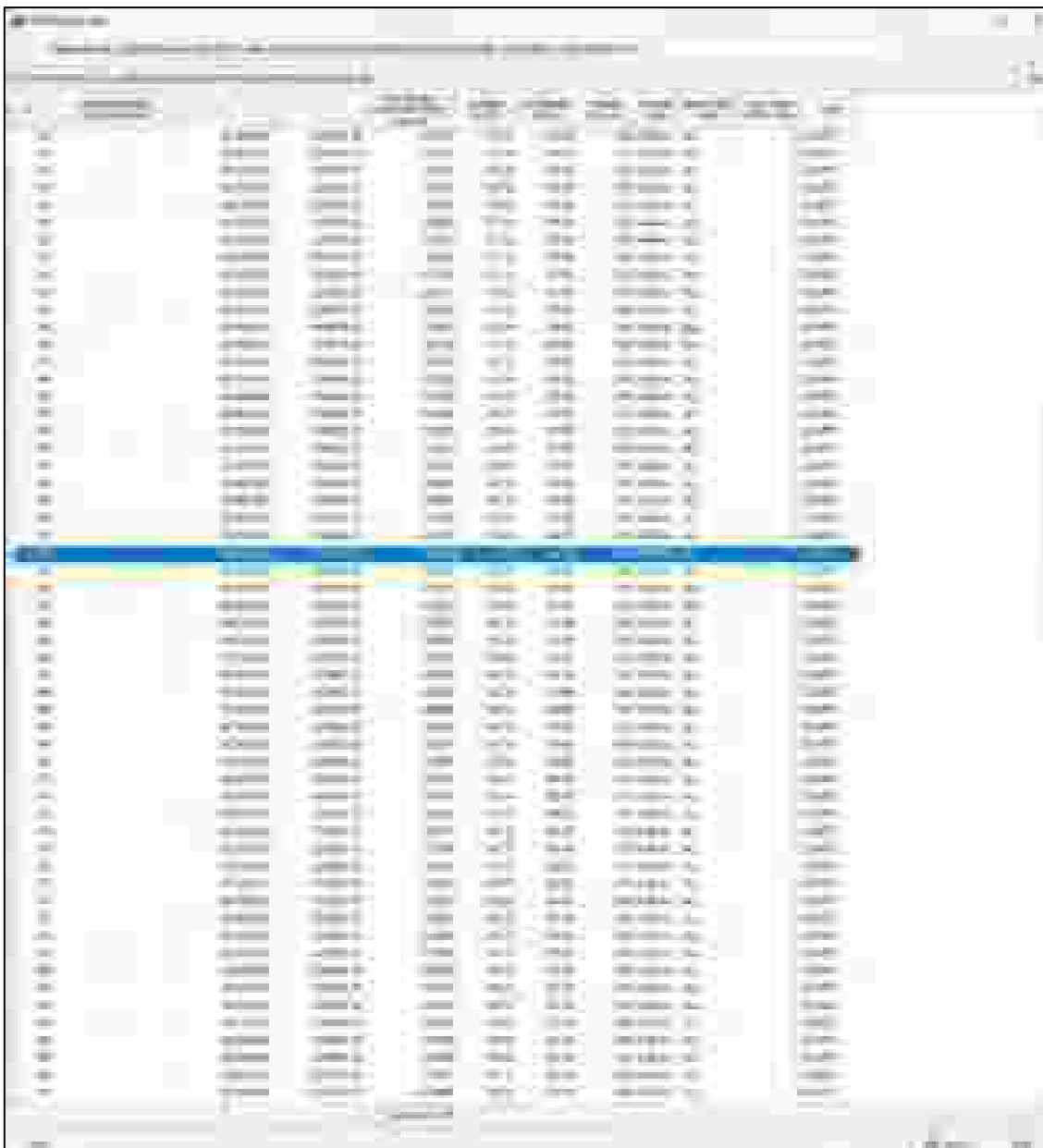


Figura 5.256 Concentraciones máximas de PM_{2.5} para un periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1.

Fuente: AERMOD View.

De la [Figura 5.255](#) y [Figura 5.256](#) se encuentra que las concentraciones máximas predichas por el modelo son $6.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en la ubicación REC158) para el periodo de 24 h (P98), mientras para el periodo anual es de $4.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en la ubicación REC158). Valores que si se comparan con el nivel de fondo de $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es marginal y solo representa para el caso anual un incremento del orden del 7.52% .

La información tabulada, se muestra de forma gráfica en la [Figura 5.257](#) y [Figura 5.258](#), lo cual permite una mejor interpretación de la afectación y dispersión de las emisiones de $PM_{2.5}$ desde la fuente y los niveles de concentración presentados en los diferentes receptores seleccionados.

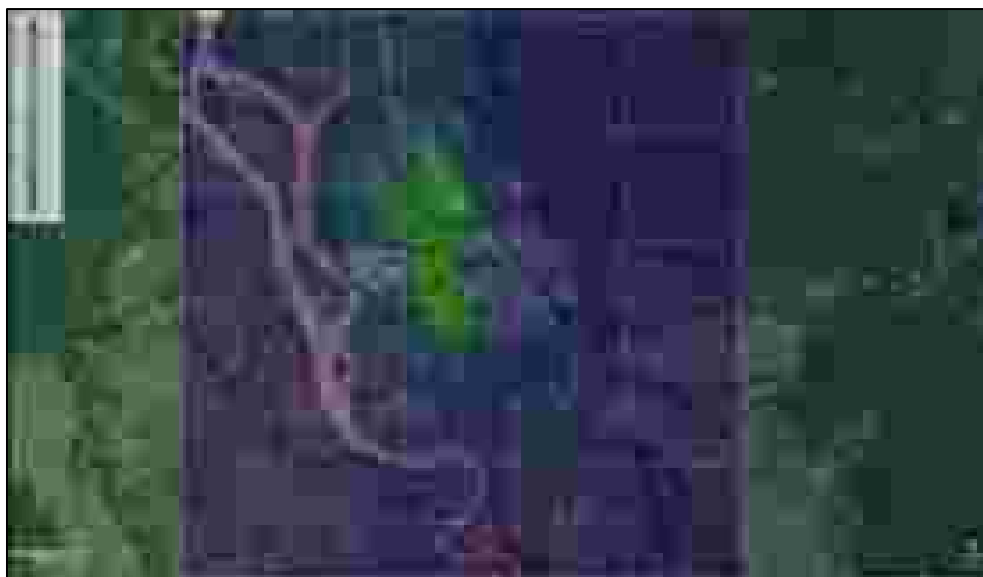


Figura 5.257 Concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ para un periodo de 24 h (P98), escenario 1.
Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

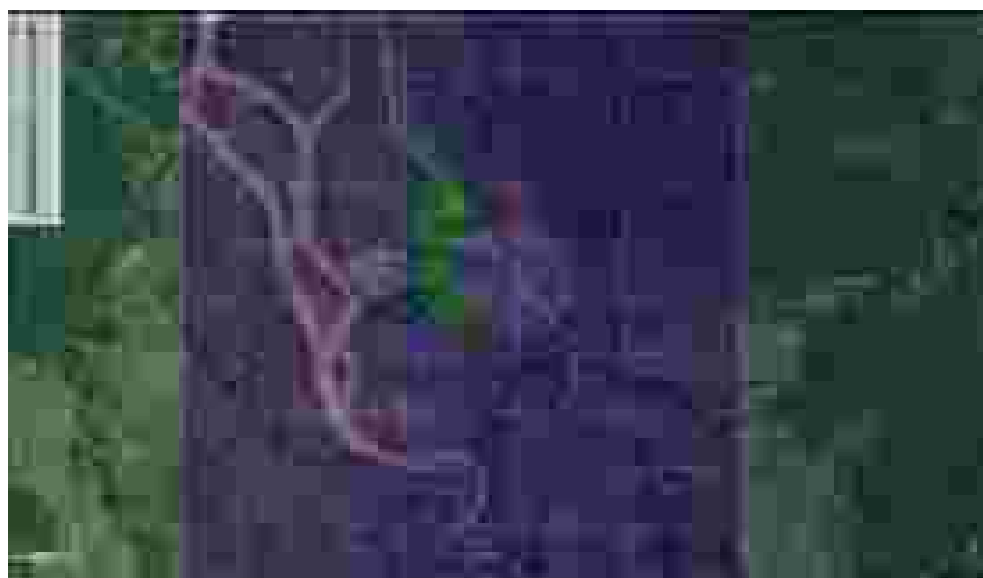


Figura 5.258 Concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ para un periodo anual, escenario 1.
Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Al analizar la [Figura 5.257](#) y [Figura 5.258](#), se encuentra que la zona donde el modelo predice los mayores niveles de concentración, tanto para el periodo de 24 h (P98) como anual, corresponde al área cercana a los ejes viales y a la zona donde se construirá la

variante, y a medida que la distancia incrementa con respecto a esta las concentraciones disminuyen de forma exponencial.

Con el fin de tener una mejor visión del área de influencia directa se muestra la [Figura 5.259](#), donde se puede evidenciar las zonas donde se presentarán los principales impactos, para los periodos de 24 h (P98.5) y anual. Se puede observar las zonas hasta donde se alcanzan los niveles de $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 24 h y anual. En dicha figura se muestra que las zonas donde se presentarán los mayores incrementos están cerca del trazado de la variante, y además se puede afirmar que dichos valores representan aportes de carácter marginal ($0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en relación con el nivel de fondo).



Figura 5.259 Vista cercana de las concentraciones máximas de $\text{PM}_{2.5}$ para los periodos de 24 h (P98) y anual, escenario 1.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Por otro lado, en la [Figura 5.260](#), se muestra una vista 3D de los niveles de concentración máxima para el periodo de 24 h, se puede observar cómo los niveles máximos se presentan en cercanías a las fuentes ingresadas al modelo, donde destacan los alrededores de la zona de construcción de la variante.

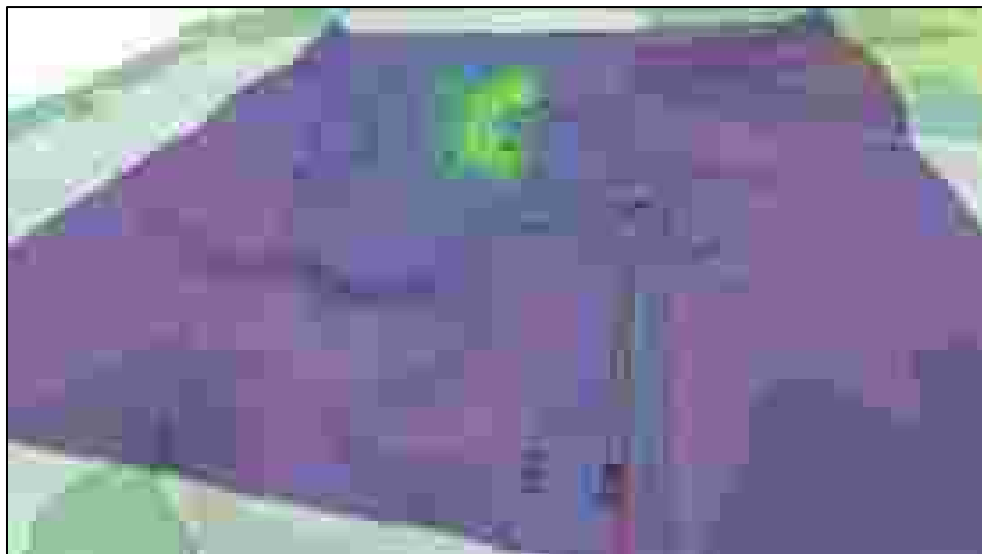


Figura 5.260 Vista 3D de las concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ para el periodo de 24 h (P98), escenario 1.

Fuente: AERMOD View.

B. Concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ con control en las vías, escenario 2

Para este escenario se modelan las emisiones estimadas con las condiciones con un control en la vía identificada como VIA_3 y VIA_8 a VIA_9, equivalente al 60%, resultante de la aplicación de agua mediante el método de aspersión con carrotanque. La [Figura 5.261](#) muestra las concentraciones máximas diarias predichas por el modelo a partir del percentil 98 (la octava más alta), estimadas para las coordenadas (X, Y) ingresadas al modelo de dispersión AERMOD. Los puntos identificados con estas coordenadas corresponden a los [421](#) receptores ingresados. Mientras en la [Figura 5.262](#), se muestran las concentraciones para el periodo anual (para ver los datos completos consultar los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Disp/Arch_Resultado).

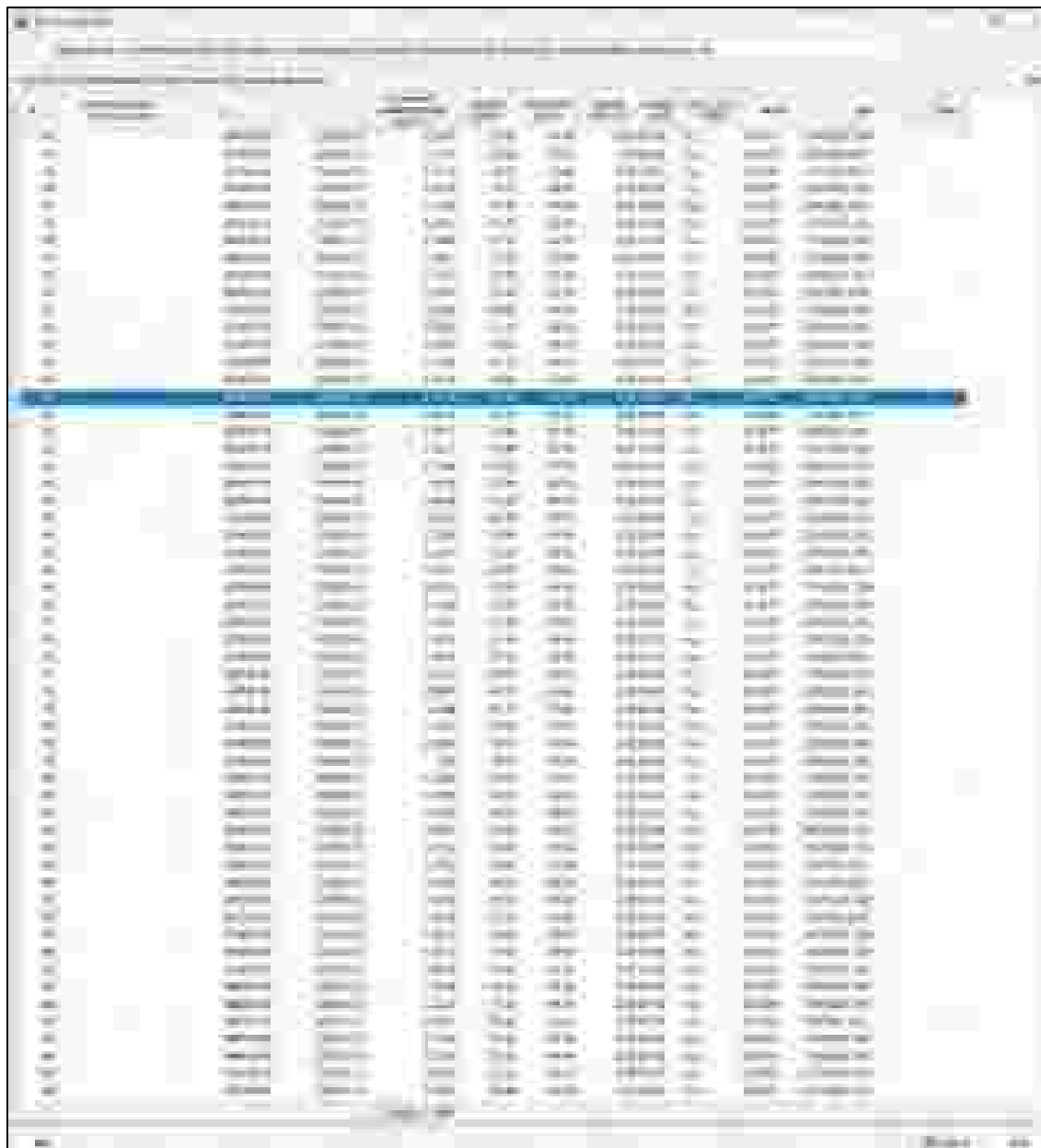


Figura 5.261 Concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ para un periodo de 24h en las ubicaciones de los 421 receptores, con control de las emisiones, escenario 2.

Fuente: AERMOD View.

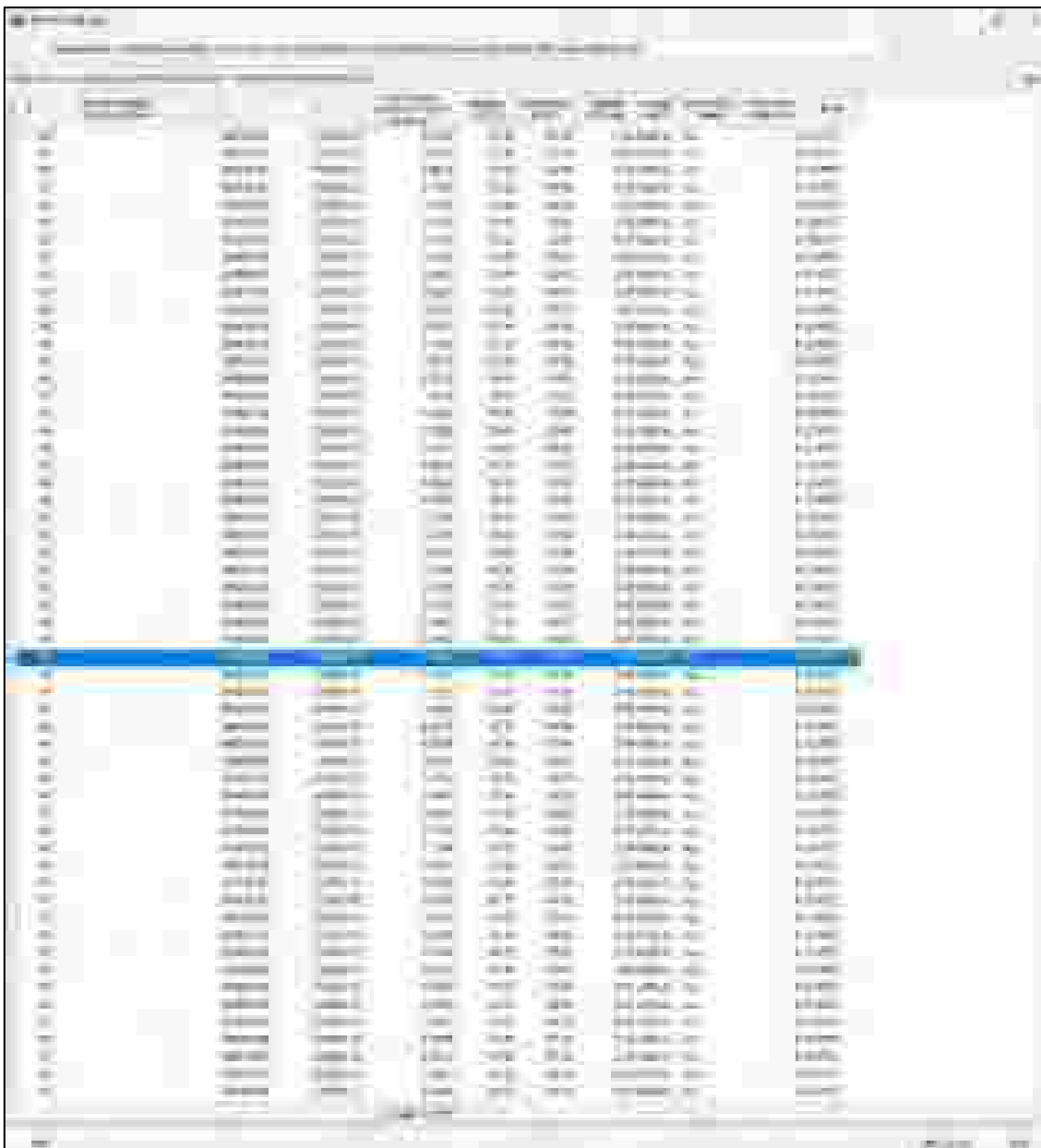


Figura 5.262 Concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ para un periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, con control de las emisiones, escenario 2.

Fuente: AERMOD View.

De la [Figura 5.261](#) y [Figura 5.262](#) se encuentra que las concentraciones máximas predichas por el modelo son $4.88 \mu g/m^3$ (en la ubicación REC158) para el periodo de 24 h, mientras para el periodo anual es de $3.99 \mu g/m^3$ (en la misma ubicación REC158), los valores incluyen un nivel de fondo de $3.0 \mu g/m^3$, lo que implica incrementos máximos de $1.88 \mu g/m^3$ y $0.99 \mu g/m^3$ para los periodos de 24 h y anual respectivamente.

Si se comparan los datos sin control y con control en las vías se encuentra que este permite una reducción en los niveles máximos predichos por el modelo para el valor anual, del orden de 0.4734 (47.34%) veces, mientras para el periodo de 24 h se observa una reducción del orden de 0.5117 (51.17%) veces.

La información tabulada, se muestra de forma gráfica en la [Figura 5.263](#) y [Figura 5.264](#), lo cual permite una mejor interpretación de la afectación y dispersión de las emisiones de $PM_{2.5}$ desde la fuente y los niveles de concentración presentados en los diferentes receptores seleccionados.

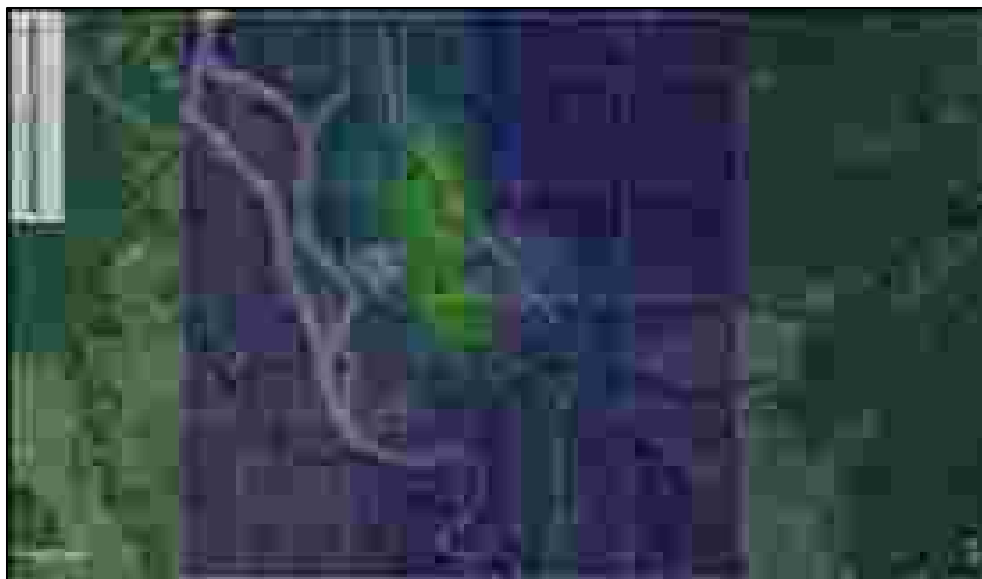


Figura 5.263 Concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ para un periodo de 24h con control de las emisiones, escenario 2.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

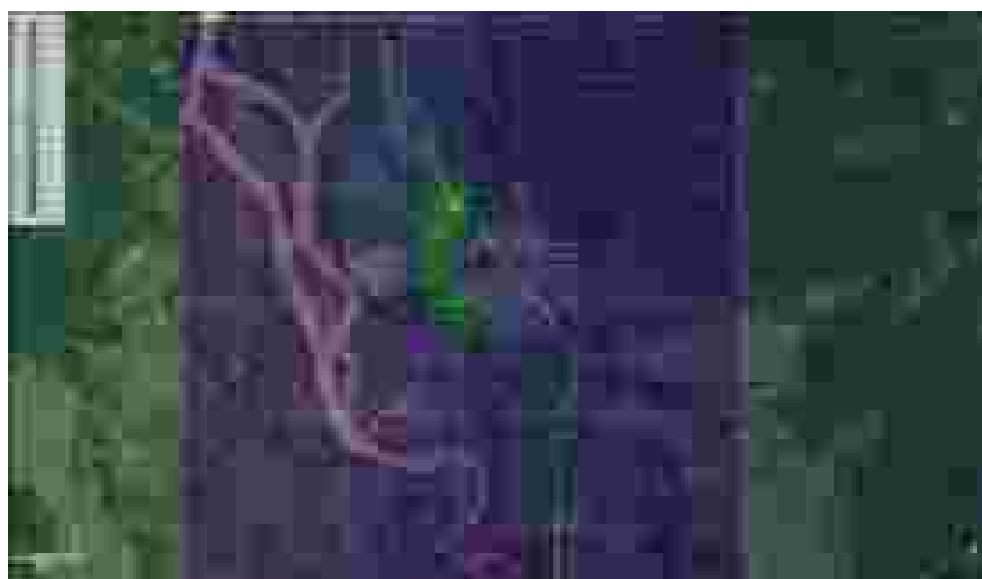
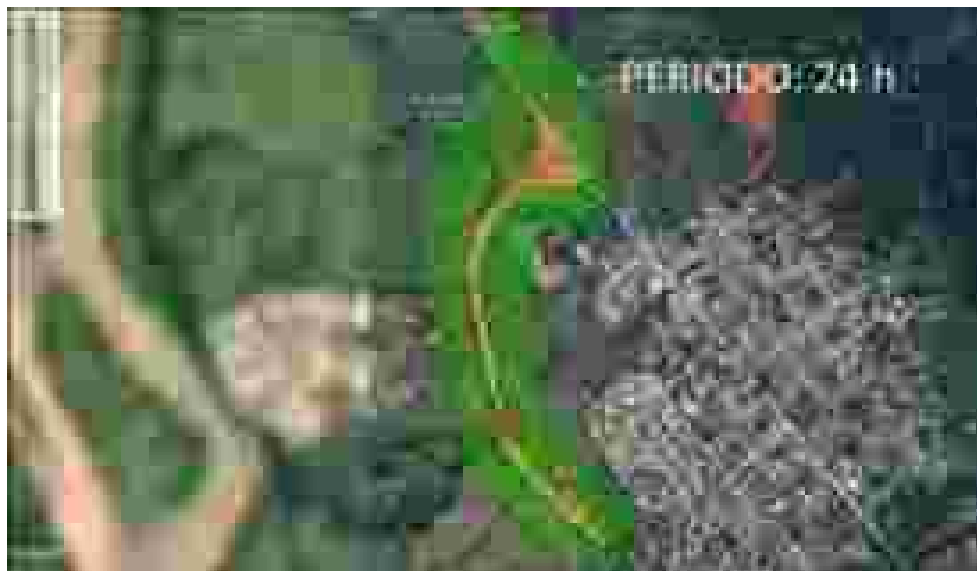


Figura 5.264 Concentraciones máximas de PM2.5 para un periodo anual, con control de las emisiones, escenario 2.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Al analizar la [Figura 5.263](#) y [Figura 5.264](#), nos encontramos con que la zona donde el modelo predice los mayores niveles de concentración, tanto para el periodo de 24 h como anual, se encuentran que la zona donde se concentran los mayores niveles predichos por el modelo se ubica en los alrededores del área de construcción de la variante, y en menor proporción en cercanía de los ejes viales. Si se observa la región de máxima concentración esta se orienta con la predominancia de los vientos.

Con el fin de tener una mejor visión del área de influencia directa se muestra la [Figura 5.265](#), donde se puede observar la zona donde se presentarán los principales impactos, con niveles de inmisión hasta de $3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para los periodos de 24 h (P98) y anual, lo que equivale a incrementos de $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que constituyen los aportes del proyecto en relación con el nivel de fondo ingresado de $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



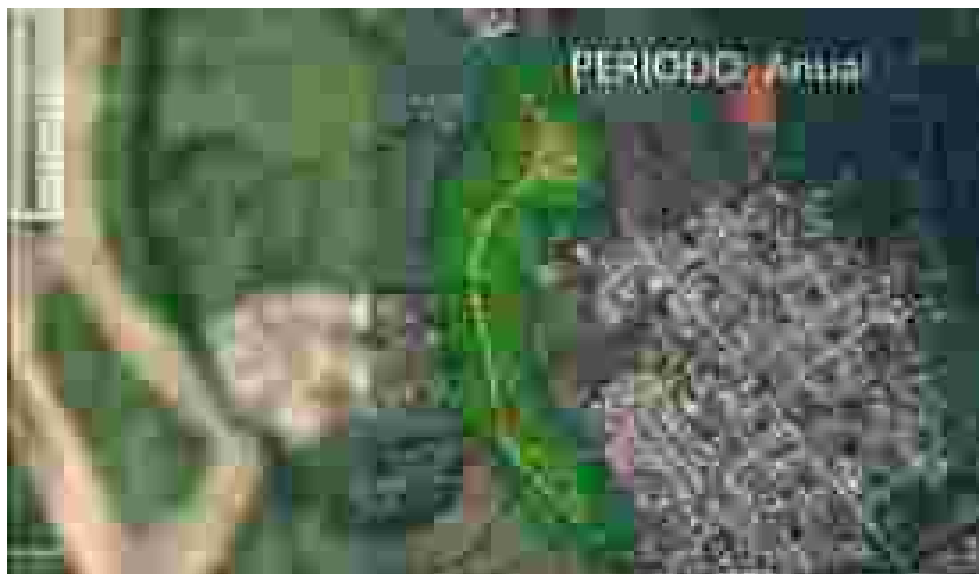


Figura 5.265 Vista cercana de las concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ para el periodo de 24h y anual, y con control de las emisiones, escenario 2.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Por otro lado, en la [Figura 5.266](#), se muestra una imagen 3D para los niveles de concentración máxima predichos para el periodo de 24 h por el modelo AERMOD, cuando se aplica control sobre la vía (VIA_3, VIA_8 a VIA_9) durante la construcción, donde se puede observar cómo los niveles máximos se presentan prioritariamente en la zona cercana a la construcción y en menor proporción sobre los ejes viales restantes.



Figura 5.266 Vista 3D de las concentraciones máximas de $PM_{2.5}$ para el periodo de 24h, con control de las emisiones, escenario 2.

Fuente: AERMOD View, 2025

5.1.10.5.19 Concentraciones de dióxido de nitrógeno NO_2 .

A continuación, se muestran los resultados de la modelización para el escenario 1, para el contaminante NO₂. Las salidas incluyen un nivel de fondo de 4 µg/m³.

A. Concentraciones de dióxido de nitrógeno NO₂ escenario 1

La [Figura 5.267](#) muestra las concentraciones máximas horarias para el percentil 98 (la octava más alta) predichas por el modelo, estimadas para las coordenadas (X, Y) ingresadas al modelo de dispersión AERMOD. Los puntos identificados con estas coordenadas corresponden a los [421](#) receptores ingresados. Mientras en la [Figura 5.268](#), se muestran las concentraciones para el periodo anual (para ver los datos completos consultar los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Disp/Arch_Resultado.).



Figura 5.267 Concentraciones máximas de NO₂ para un periodo de 1h expresada como el percentil 98 en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.

Fuente: AERMOD View.

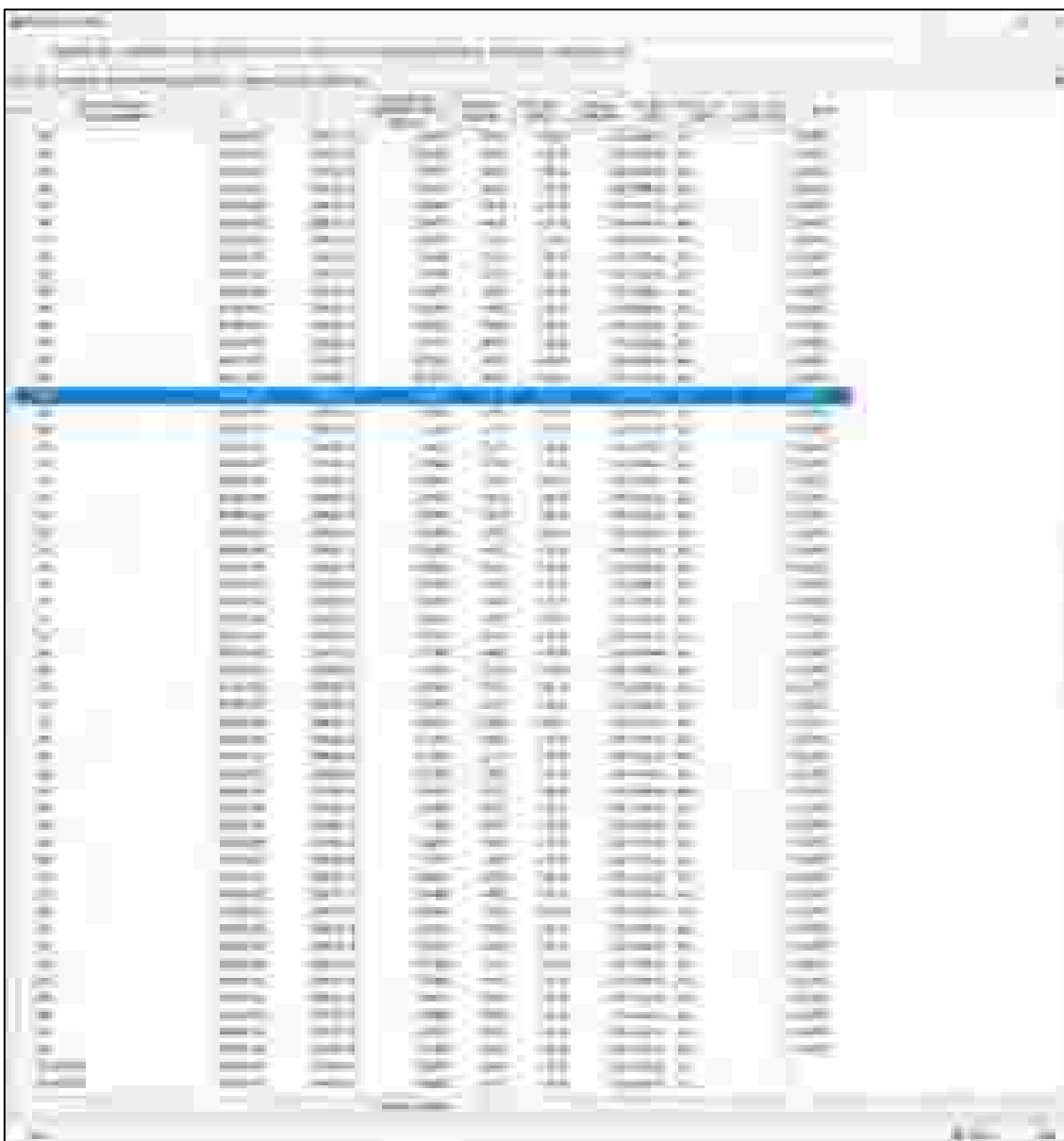


Figura 5.268 Concentraciones máximas de NO₂ para un periodo anual en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.

Fuente: AERMOD View.

De la [Figura 5.267](#) y [Figura 5.268](#), se encuentra que las concentraciones máximas predichas por el modelo son **118.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** (en la ubicación REC203) para el periodo de 1 h (P98), mientras para el periodo anual es de **26.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** (en la ubicación REC204), valores que equivalen aportes del **57.47%** y **36.67%** de los niveles permisibles definidos en 200

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ y $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 1 h (P98) y anual respectivamente, los valores incluyen un nivel de fondo de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que implica incrementos máximos de $114.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $22.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 24 h y anual respectivamente.

La información tabulada, se muestra de forma gráfica en la [Figura 5.169](#) y [Figura 5.170](#), lo cual permite una mejor interpretación de la afectación y dispersión de las emisiones de NO_2 desde la fuente y los niveles de concentración presentados en los diferentes receptores seleccionados.

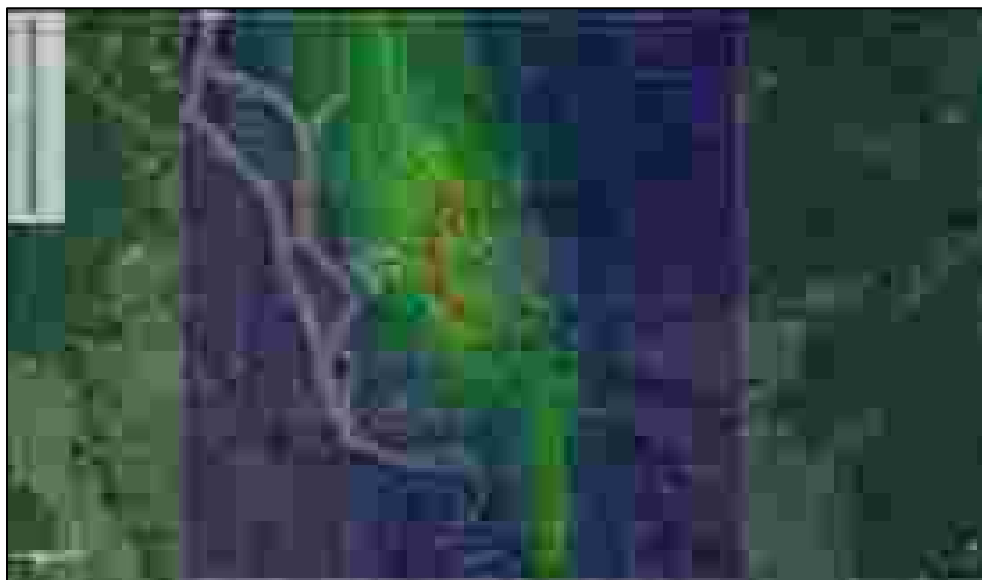


Figura 5.269 Concentraciones máximas de NO_2 para un periodo de 1h (P98), escenario 1.
Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

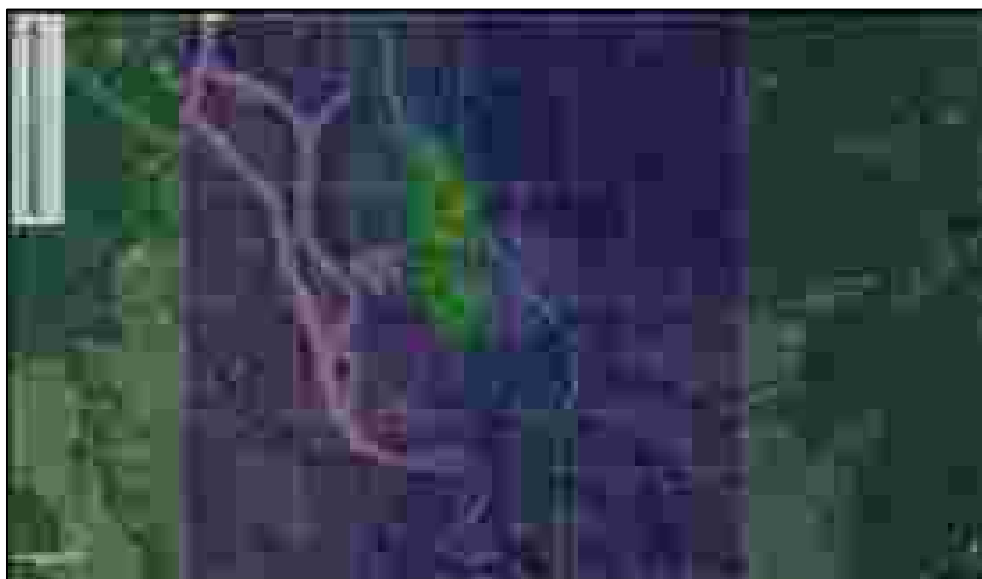


Figura 5.270 Concentraciones máximas de NO_2 para un periodo anual, escenario 1.
Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Al analizar la [Figura 5.169](#) y [Figura 5.170](#), se encuentra que la zona donde el modelo predice los mayores niveles de concentración, tanto para el periodo de 1 h (P98) como anual, se encuentran en las zonas cercanas al área de construcción, y a medida que la distancia incrementa con respecto a estos las concentraciones disminuyen de forma exponencial.

Lo anterior se puede evidenciar de una forma más clara en la [Figura 5.271](#), donde se puede evidenciar la zona donde se presentarán los principales impactos. Las zonas hasta donde se alcanzan niveles de $25.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 1 h (P98) y anual se ubican en el área cercana a la construcción de la variante. Lo que equivale a incrementos de $21.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, si se tiene en cuenta el nivel de fondo ingresado de $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figura 5.271 Vista cercana de las concentraciones máximas de NO_2 para los periodos de 1 h (P98) y anual, para escenario 1.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Por otro lado, en la [Figura 5.272](#), se muestran una imagen 3D para los niveles de concentración máxima predichos para el periodo de 1 h (P98) por el modelo AERMOD, donde se puede observar cómo los niveles máximos se presentan en las zonas cercanas al trazado de la variante y en menor proporción sobre los restantes ejes viales ingresados.

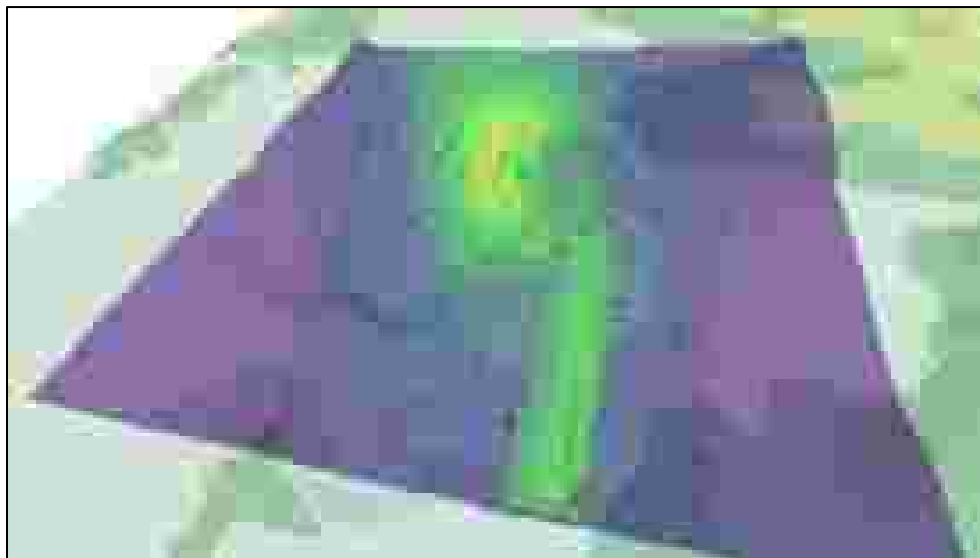


Figura 5.272 Vista 3D de las concentraciones máximas de NO₂ para el periodo de 1 h (P98), escenario 1.

Fuente: AERMOD View

5.1.10.5.20 Concentraciones de dióxido de azufre SO₂.

A continuación, se muestran los resultados de la modelización para el escenario 1, para el contaminante SO₂. Las salidas incluyen un nivel de fondo de 4 µg/m³.

A. Concentraciones de dióxido de azufre SO₂ escenario 1

La [Figura 5.273](#) muestra las concentraciones máximas horarias para el percentil 99 (la octava más alta) predichas por el modelo, estimadas para las coordenadas (X, Y) ingresadas al modelo de dispersión AERMOD. Los puntos identificados con estas coordenadas corresponden a los [421](#) receptores ingresados. Mientras en la [Figura 5.274](#), se muestran las concentraciones para el periodo de 24h (para ver los datos completos consultar los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Disp/Arch_Resultado).

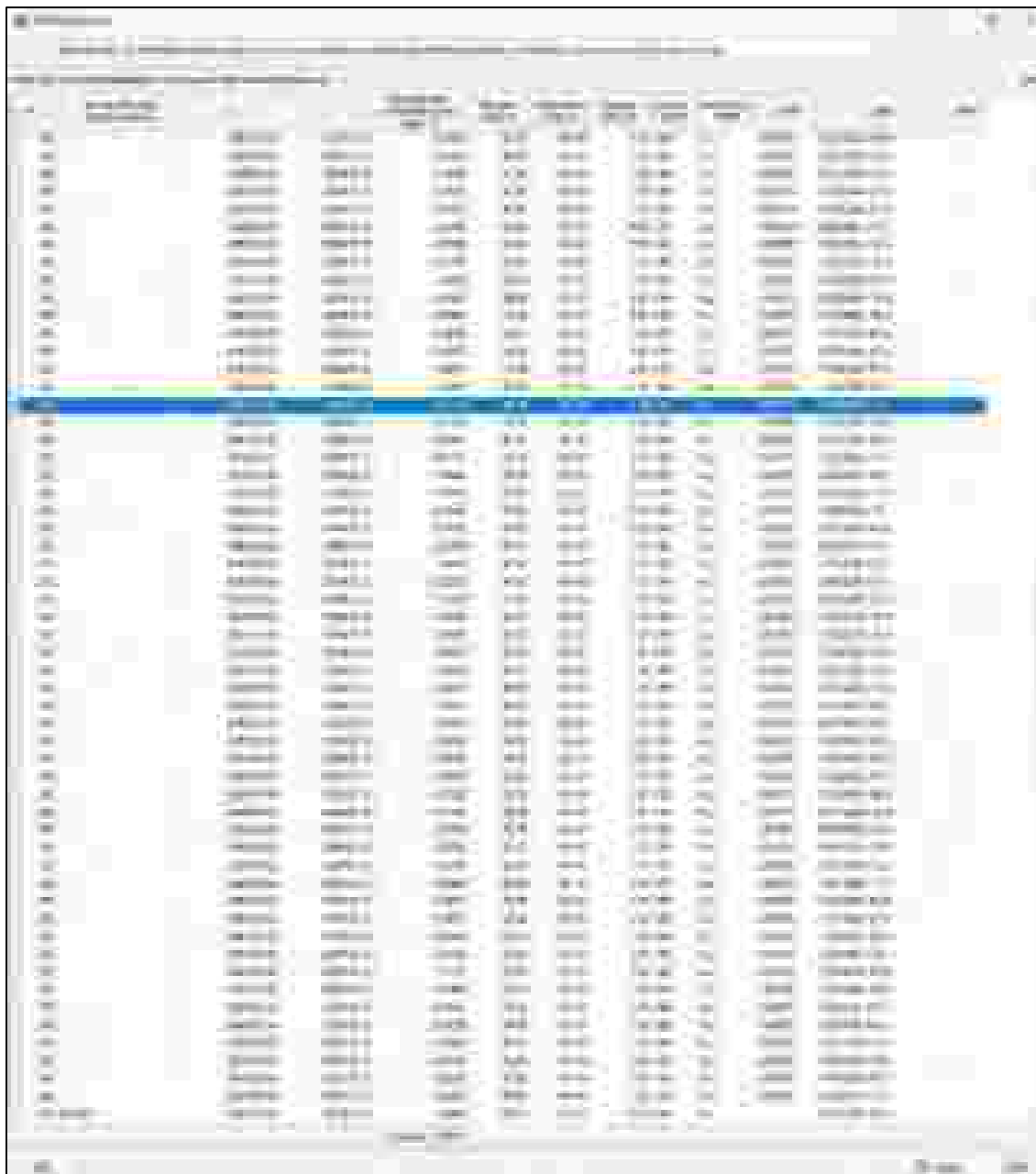


Figura 5.273 Concentraciones máximas de SO₂ para un periodo de 1 h (P99) en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.
Fuente: AERMOD View.

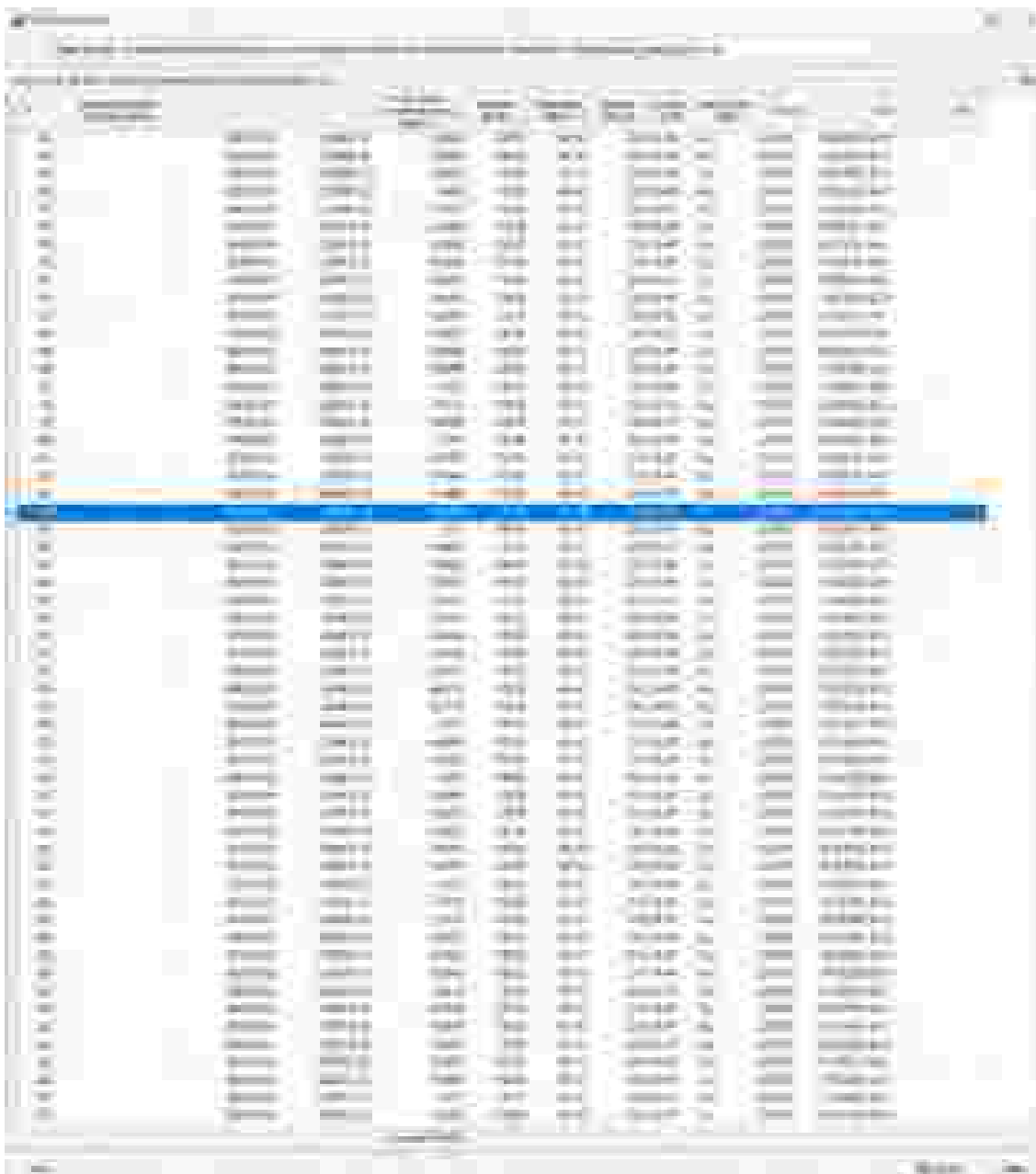


Figura 5.274 Concentraciones máximas de SO₂ para un periodo 24h en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.

Fuente: AERMOD View.

De la [Figura 5.273](#) y [Figura 5.274](#) se encuentra que las concentraciones máximas predichas por el modelo son $4.2612 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en la ubicación REC203) para el periodo de 1 h (P99), mientras para el periodo de 24h es de $4.0582 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en la ubicación REC204), los valores incluyen un nivel de fondo de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que implica incrementos máximos de $0.2612 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.0582 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 24 h y anual respectivamente. Se encuentra que el aporte del proyecto durante la etapa de construcción es bajo y difícil de diferenciar mediante

medición de las condiciones actuales (incrementos con aportes inferiores a 0.3% si se comparan con los respectivos límites permisibles de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 1 h y 24 h, siendo estos de 0.26% y 0.12% respectivamente).

La información tabulada, se muestra de forma gráfica en la [Figura 5.275](#) y [Figura 5.276](#), lo cual permite una mejor interpretación de la afectación y dispersión de las emisiones de SO_2 desde la fuente y los niveles de concentración presentados en los diferentes receptores seleccionados.

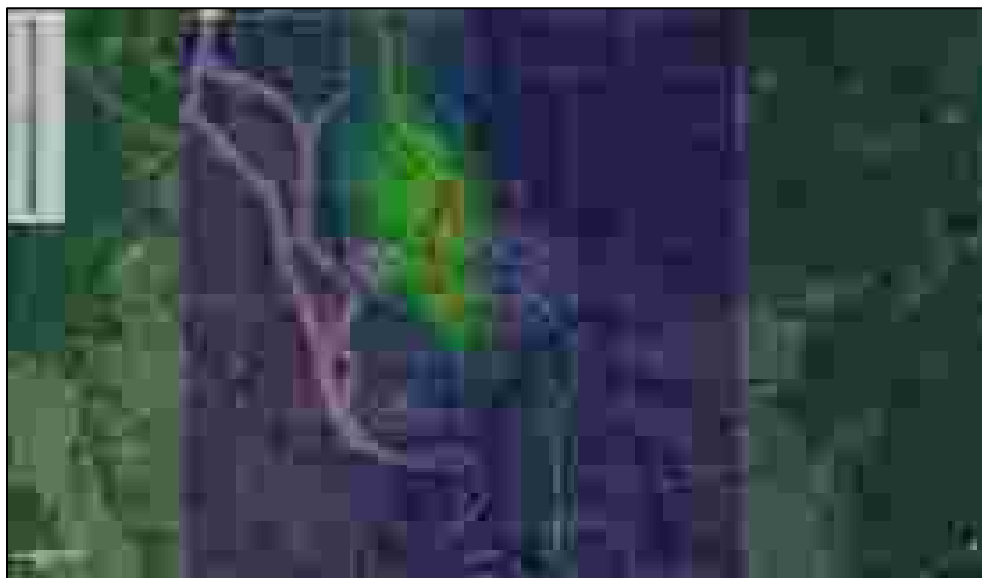


Figura 5.275 Concentraciones máximas de SO_2 para un periodo de 1 h (P99), escenario 1 construcción.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.



Figura 5.276 Concentraciones máximas de SO₂ para un periodo 24h, escenario 1 construcción.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Al analizar la [Figura 5.275](#) y [Figura 5.276](#), se encuentra que la zona donde el modelo predice los mayores niveles de concentración, tanto para el periodo de 1 h (P99) como de 24h, se encuentran en las zonas cercanas al proyecto, y a medida que la distancia incrementa con respecto a esta las concentraciones disminuyen de forma exponencial. Si se observa la región de máxima concentración esta se orienta en cercanía de los ejes viales y las zonas de construcción.

Por otro lado, en la [Figura 5.268](#) se puede observar la zona donde se presentarán los principales impactos, en dicha figura se muestran las zonas hasta donde se presentarán niveles de inmisión de $4.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $4.016 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para los periodos de 1 h (P99) y 24 h (las cuales se encuentran en cercanías del trazado de la variante, y adicionalmente en ningún caso se alcanza a superar los límites permisibles), lo que equivale aportes del inferiores al 0.05% para ambos periodos en relación con los límites permisibles. Aportes que se pueden considerar marginales y muy por debajo del nivel de fondo registrado de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figura 5.277 Vista cercana de las concentraciones máximas de SO_2 para los periodos de 1 h (P99) y 24h, escenario 1 construcción.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Por otro lado, en la [Figura 5.278](#), se muestra una imagen 3D para los niveles de concentración máximos predichos para el periodo de 1 h (P99) por el modelo AERMOD, donde se puede observar cómo los niveles máximos se presentan en las zonas cercanas a

las fuentes presentes siguiendo la predominancia de los vientos, y no se ven influenciadas por la orografía, debido a que este es predominantemente plano.



Figura 5.278 Vista 3D de las concentraciones máximas de SO₂ para el periodo de 1 h (P99), escenario 1 construcción.

Fuente: AERMOD View.

5.1.10.5.21 Concentraciones de monóxido de carbono CO.

Para este contaminante se incluye un nivel de fondo de 556 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A. Concentraciones de monóxido de carbono CO escenario 1 construcción

La [Figura 5.279](#) muestra las concentraciones máximas diarias horarias predichas por el modelo, estimadas para las coordenadas (X, Y) ingresadas al modelo de dispersión AERMOD. Los puntos identificados con estas coordenadas corresponden a los [421](#) receptores ingresados. Mientras en la [Figura 5.280](#), se muestran las concentraciones para el periodo de 8h (para ver los datos completos consultar los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Disp/Arch_Resultado).



Figura 5.279 Concentraciones máximas de CO para un periodo de 1h en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.

Fuente: AERMOD View.

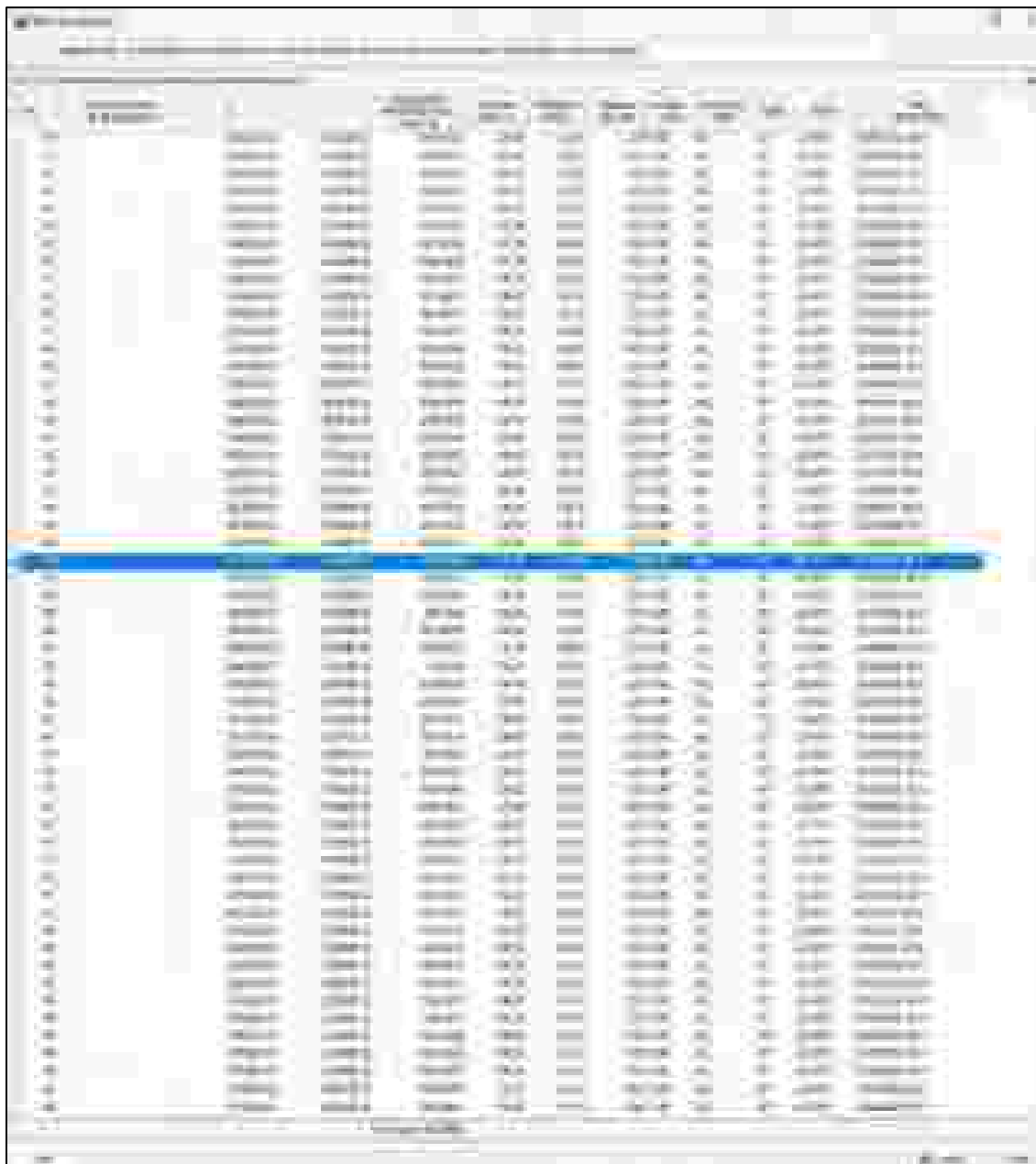


Figura 5.280 Concentraciones máximas de CO para un periodo de 8h (octorario) en las ubicaciones de los 421 receptores, escenario 1 construcción.

Fuente: AERMOD View.

De la [Figura 5.279](#) y [Figura 5.280](#) se encuentra que las concentraciones máximas predichas por el modelo son $723.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en la ubicación REC397) para el periodo de 1 h, mientras para el periodo de 8 h (octorario) es de $582.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en la ubicación REC158), si se comparan estos valores con los permisibles de la norma para los periodos de 1h y 8h, estos solo representan alrededor del 2.07% y 11.65% respectivamente. Por otra parte, si solo se tiene en cuenta el aporte del proyecto los niveles serían de $167.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.53%) y 26.45

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.53%) para los periodos de 1h y 8h respectivamente, con lo cual se puede inferir que el aporte del proyecto es de carácter marginal.

La información tabulada, se muestra de forma gráfica en la [Figura 5.181](#) y [Figura 5.282](#), lo cual permite una mejor interpretación de la afectación y dispersión de las emisiones de CO desde la fuente y los niveles de concentración presentados en los diferentes receptores seleccionados.



Figura 5.281 Concentraciones máximas de CO para un periodo de 1h, escenario 1 construcción.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

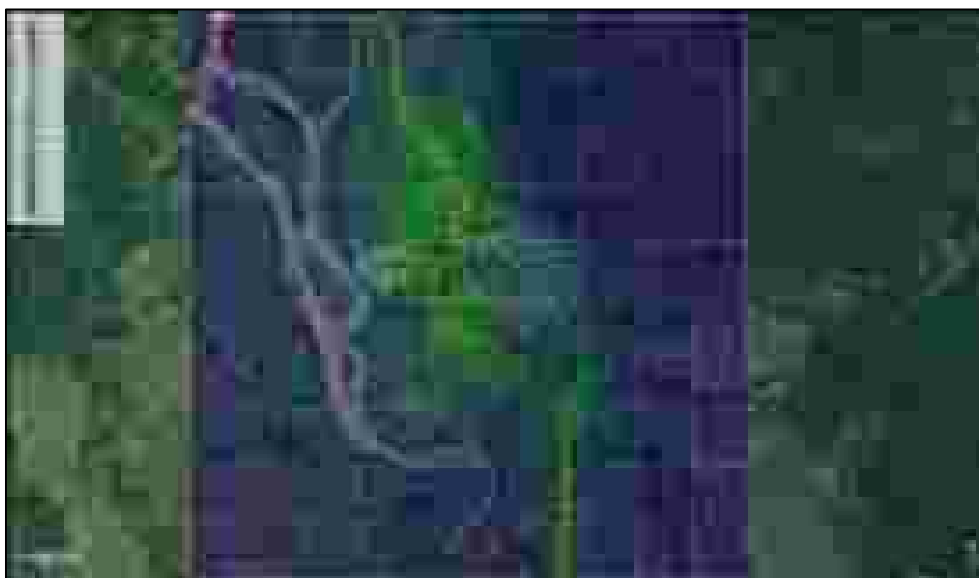


Figura 5.282 Concentraciones máximas de CO para un periodo de 8h (octorario), escenario 1 construcción.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Al analizar la [Figura 5.181](#) y [Figura 5.282](#), se observa que la zona donde el modelo predice los mayores niveles de concentración, tanto para el periodo de 1 h como 8 h, se encuentran en las zonas cercanas a la zona de construcción, y a medida que la distancia incrementa con respecto a este las concentraciones disminuyen de forma exponencial. Adicionalmente se ve como la orientación de los vientos juega un papel predominante en la forma y dirección de la zona de dispersión predominante.

Por otro lado, en la [Figura 5.283](#), se puede visualizar la zona donde se presentarán los principales impactos, para los periodos de 1 h y 8 h, en la cual se alcanzan niveles de [620.0](#) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y [566.0](#) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 1 h y 8h respectivamente (incluido el nivel de fondo ingresado de 556 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En dicha figura se muestra que las zonas donde se presentarán los mayores incrementos están alrededor de la línea de construcción de la variante (en ninguna de las ubicaciones se superan los límites permisibles), siendo el aporte del proyecto de carácter marginal con solo [64.0](#) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y [10.0](#) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 1 h y 8 h respectivamente, y que representan menos del 0.20% de los límites permisibles.



Figura 5.283 Vista cercana de las concentraciones máximas de CO para los periodos de 1 h y 8h, para escenario 1.

Fuentes: Google Earth y AERMOD View.

Por otro lado, en la [Figura 5.284](#), se muestra una imagen 3D para los niveles de concentración máxima predichos para el periodo de 1 h por el modelo AERMOD, donde se puede observar cómo los niveles máximos se presentan en las zonas cercanas a las fuentes ingresadas donde destaca la zona de construcción de la variante.



Figura 5.284 Vista 3D de las concentraciones máximas de CO para el periodo de 1h, escenario 1 construcción.

Fuente: AERMOD View.

5.1.10.5.22 Análisis de sensibilidad y comparación con la normatividad

Para identificar la influencia de las variables de entrada en el modelo, se pueden modificar desde los parámetros seleccionados de albedo (r), Bowen Ratio (B), fracción de radiación neta al piso (CG), longitud de rugosidad (z_0) y constante de von Kármán (k), así como la variabilidad de las mediciones realizadas por las estación que incluye Temperatura (T), Radiación Solar (R), % de Humedad Relativa (%HR), Presión Atmosférica (P), nubosidad (n), dirección del viento (WD), velocidad del viento (Vs) y precipitación. Por otro lado, se tiene la variabilidad ingresada al modelo producto de las estimaciones realizadas para las emisiones, siendo esta última la de mayor relevancia debido a que los demás parámetros se promedian con el tiempo y su efecto se ve minimizado.

Para analizar la sensibilidad del modelo a los factores de entrada (emisiones), se evaluará el modelo con valores que del 50%, 100% y 150% lo que equivale a un 50% de incertidumbre en los factores de emisión estimados. En la Figura 5.281, se muestra el efecto que tiene sobre las emisiones de las vías para el escenario 1 las variaciones en la humedad (M), en el porcentaje de finos (s), peso de los vehículos (W), velocidad (V) y otras, donde se puede ver una variación cercana al 50% para el contaminante PM_{10} , pero para efecto del análisis se toma el 50%, con el fin de evaluar las variaciones que tendrían sobre los resultados predichos por el modelo.

Tabla 5.207 Análisis de sensibilidad para las fuentes ingresadas

Fuente	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
REC1	15.1471	15.2943	15.0125	50.00	15.1471	15.2943	15.0125	50.00
REC2	15.0631	15.1261	15.0223	50.00	15.0631	15.1261	15.0223	50.00
REC3	15.1027	15.2054	15.0316	50.00	15.1027	15.2054	15.0316	50.00
REC4	15.1350	15.2699	15.0459	50.00	15.1350	15.2699	15.0459	50.00
REC5	15.4863	15.9726	15.1497	50.00	15.4863	15.9726	15.1497	50.00
REC6	15.2855	15.5710	15.0633	50.00	15.2855	15.5710	15.0633	50.00
REC7	15.3033	15.6067	15.0685	50.00	15.3033	15.6067	15.0685	50.00
REC9	15.0442	15.0885	15.0245	50.01	15.0442	15.0885	15.0245	50.01
REC10	15.0185	15.0369	15.0130	50.01	15.0185	15.0369	15.0130	50.01
REC11	15.0198	15.0396	15.0066	50.00	15.0198	15.0396	15.0066	50.00
REC12	15.0390	15.0780	15.0207	49.99	15.0390	15.0780	15.0207	49.99
REC13	15.1209	15.2418	15.0139	50.00	15.1209	15.2418	15.0139	50.00
REC14	15.1600	15.3200	15.0342	50.00	15.1600	15.3200	15.0342	50.00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Después de correr el modelo para las variaciones ingresadas, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 5.208 y Tabla 5.209, para los periodos de 24 h y anual respectivamente para el contaminante PM₁₀. Se evidencia como una variación introducida del 50% con respecto al promedio de los estimativos de las emisiones, genera en promedio una variación en las concentraciones del mismo orden en las predicciones del modelo para PM₁₀.

Tabla 5.208 Análisis de sensibilidad entre la variación en la emisión y las predicciones del modelo AERMOD, para el periodo de 24 h para PM₁₀

RECEPTOR	COORDENADAS CTM 12		CONCENTRACIONES DE PM ₁₀ 24h			%VARIACIÓN MAXIMO
	X	Y	50% Emisión	100% Emisión	150% Emisión	
REC1	4618215.36	2357629.77	15.1471	15.2943	15.0125	50.00
REC2	4618615.36	2357629.77	15.0631	15.1261	15.0223	50.00
REC3	4619015.36	2357629.77	15.1027	15.2054	15.0316	50.00
REC4	4619415.36	2357629.77	15.1350	15.2699	15.0459	50.00
REC5	4619815.36	2357629.77	15.4863	15.9726	15.1497	50.00
REC6	4620215.36	2357629.77	15.2855	15.5710	15.0633	50.00
REC7	4620615.36	2357629.77	15.3033	15.6067	15.0685	50.00
REC9	4621415.36	2357629.77	15.0442	15.0885	15.0245	50.01
REC10	4621815.36	2357629.77	15.0185	15.0369	15.0130	50.01
REC11	4622215.36	2357629.77	15.0198	15.0396	15.0066	50.00
REC12	4618215.36	2358029.77	15.0390	15.0780	15.0207	49.99
REC13	4618615.36	2358029.77	15.1209	15.2418	15.0139	50.00
REC14	4619015.36	2358029.77	15.1600	15.3200	15.0342	50.00

RECEPTO R	COORDENADAS CTM 12		CONCENTRACIONES DE PM ₁₀ 24h			%VARIACIÓN MAXIMO
	X	Y	50% Emisión	100% Emisión	150% Emisión	
REC15	4619415.36	2358029.77	15.1871	15.3743	15.0528	50.00
REC16	4619815.36	2358029.77	15.5434	16.0868	15.2285	50.00
REC17	4620215.36	2358029.77	15.3331	15.6663	15.0916	50.00
REC18	4620615.36	2358029.77	15.2417	15.4835	15.0959	50.00
REC19	4621015.36	2358029.77	15.1010	15.2020	15.0805	50.00
REC20	4621415.36	2358029.77	15.0378	15.0755	15.0209	50.00
REC21	4621815.36	2358029.77	15.0227	15.0455	15.0121	50.00
REC22	4622215.36	2358029.77	15.0148	15.0295	15.0064	50.02
REC23	4618215.36	2358429.77	15.1006	15.2012	15.0521	50.00
REC24	4618615.36	2358429.77	15.1297	15.2594	15.0421	50.00
REC25	4619015.36	2358429.77	15.1051	15.2101	15.0252	50.00
REC26	4619415.36	2358429.77	15.2157	15.4313	15.0810	50.00
REC27	4619815.36	2358429.77	15.5678	16.1355	15.3695	50.00
REC28	4620215.36	2358429.77	15.4136	15.8271	15.1630	50.00
REC29	4620615.36	2358429.77	15.2006	15.4013	15.1147	50.00
REC30	4621015.36	2358429.77	15.1655	15.3310	15.0979	50.00
REC31	4621415.36	2358429.77	15.0688	15.1377	15.0210	50.00
REC408	4619879.47	2359928.55	17.2289	19.4579	17.6110	50.00
REC409	4619731.28	2359976.03	16.8401	18.6804	16.2452	50.00
RS1	4620249.32	2359620.87	17.0841	19.1683	17.6191	50.00
RS2	4620511.73	2360200.19	15.8215	16.6429	15.5446	50.00
RS3	4620430.51	2359866.49	15.5610	16.1220	15.5522	50.00
RS4	4620479.43	2360066.64	15.6100	16.2200	15.5197	50.00
RS5	4620491.40	2359766.83	15.6477	16.2955	15.6028	50.00
RS6	4620871.71	2359399.12	15.5454	16.0909	15.2091	50.00
RS7	4620245.74	2360080.49	16.1225	17.2451	16.3347	50.00
RS8	4620169.05	2360102.64	16.3553	17.7107	16.6803	50.00
RS9	4620454.61	2359937.60	15.5742	16.1485	15.5651	50.00
RS10	4620699.37	2360034.65	15.4335	15.8671	15.3357	50.00
CA1	4620655.99	2359534.01	15.5518	16.1036	15.5226	50.00
CA2	4620515.53	2360019.38	15.5751	16.1503	15.5237	50.00
PROMEDIO						50.13

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.209 Análisis de sensibilidad entre la variación en la emisión y las predicciones del modelo AERMOD, para el periodo anual para PM₁₀

RECEPTO R	COORDENADAS CTM 12		CONCENTRACIONES DE PM ₁₀ ANUAL			%VARIACIÓN MAXIMO
	X	Y	50% Emisión	100% Emisión	150% Emisión	
REC1	4618215.36	2357629.77	15.0014	15.0029	15.0042	50.17
REC2	4618615.36	2357629.77	15.0013	15.0025	15.0037	50.00
REC3	4619015.36	2357629.77	15.0028	15.0055	15.0082	50.00
REC4	4619415.36	2357629.77	15.0039	15.0079	15.0117	49.94
REC5	4619815.36	2357629.77	15.0077	15.0153	15.0228	50.00
REC6	4620215.36	2357629.77	15.0078	15.0156	15.0231	50.03
REC7	4620615.36	2357629.77	15.0074	15.0147	15.0216	50.00
REC9	4621415.36	2357629.77	15.0012	15.0023	15.0033	50.00
REC10	4621815.36	2357629.77	15.0007	15.0013	15.0019	50.00
REC11	4622215.36	2357629.77	15.0004	15.0007	15.0011	50.68
REC12	4618215.36	2358029.77	15.0012	15.0024	15.0036	50.21
REC13	4618615.36	2358029.77	15.0016	15.0031	15.0046	49.84
REC14	4619015.36	2358029.77	15.0030	15.0060	15.0089	50.08
REC15	4619415.36	2358029.77	15.0049	15.0099	15.0147	50.00
REC16	4619815.36	2358029.77	15.0105	15.0210	15.0312	50.00
REC17	4620215.36	2358029.77	15.0110	15.0220	15.0327	50.00
REC18	4620615.36	2358029.77	15.0102	15.0205	15.0301	50.00
REC19	4621015.36	2358029.77	15.0126	15.0252	15.0373	50.00
REC20	4621415.36	2358029.77	15.0015	15.0029	15.0042	50.00
REC21	4621815.36	2358029.77	15.0010	15.0019	15.0028	50.00
REC22	4622215.36	2358029.77	15.0005	15.0010	15.0014	50.00
REC23	4618215.36	2358429.77	15.0021	15.0043	15.0063	50.12
REC24	4618615.36	2358429.77	15.0026	15.0052	15.0077	50.00
REC25	4619015.36	2358429.77	15.0024	15.0048	15.0070	50.00
REC26	4619415.36	2358429.77	15.0058	15.0115	15.0171	50.04
REC27	4619815.36	2358429.77	15.0138	15.0276	15.0410	50.02
REC28	4620215.36	2358429.77	15.0164	15.0328	15.0487	50.00
REC29	4620615.36	2358429.77	15.0127	15.0254	15.0374	50.02
REC30	4621015.36	2358429.77	15.0148	15.0295	15.0433	50.00
REC31	4621415.36	2358429.77	15.0030	15.0060	15.0088	49.92
REC408	4619879.47	2359928.55	15.2524	15.5049	15.7553	50.00
REC409	4619731.28	2359976.03	15.1078	15.2156	15.3219	50.00
RS1	4620249.32	2359620.87	15.4708	15.9416	16.4092	50.00
RS2	4620511.73	2360200.19	15.0523	15.1045	15.1422	50.00
RS3	4620430.51	2359866.49	15.0840	15.1681	15.2387	50.00

RECEPTOR	COORDENADAS CTM 12		CONCENTRACIONES DE PM ₁₀ ANUAL			%VARIACIÓN MAXIMO
	X	Y	50% Emisión	100% Emisión	150% Emisión	
RS4	4620479.43	2360066.64	15.0699	15.1398	15.1677	50.00
RS5	4620491.40	2359766.83	15.0628	15.1257	15.1768	50.00
RS6	4620871.71	2359399.12	15.0328	15.0655	15.0667	49.99
RS7	4620245.74	2360080.49	15.2875	15.5749	15.8519	50.00
RS8	4620169.05	2360102.64	15.3203	15.6407	15.9546	50.00
RS9	4620454.61	2359937.60	15.0806	15.1612	15.2093	50.00
RS10	4620699.37	2360034.65	15.0284	15.0569	15.0746	50.01
CA1	4620655.99	2359534.01	15.0323	15.0646	15.0862	49.99
CA2	4620515.53	2360019.38	15.0676	15.1351	15.1585	50.00
PROMEDIO						50.00

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la [Tabla 5.210](#) y [Tabla 5.211](#) se muestran la comparación y el grado de cumplimiento con respecto al valor permisible dado en la Resolución 2254 de 2017, para los periodos de 24h y anual para el contaminante PM₁₀ para los tres escenarios modelados. Mientras en la [Tabla 5.212](#) y [Tabla 5.213](#), se muestran la comparación y el grado de cumplimiento con respecto al valor permisible dado en la Resolución 2254 de 2017, para los periodos de 24h y anual para el contaminante PM_{2.5} para los tres escenarios modelados, por último, en la [Tabla 5.214](#), para NO₂, en la [Tabla 5.215](#) para SO₂ y en la [Tabla 5.216](#) para CO, se muestran la comparación y el grado de cumplimiento con respecto al valor permisible dado en la Resolución 2254 de 2017.

NOTA: Las Tablas no muestran la información completa de los 421 receptores, si desea visualizar la totalidad de los valores puede consultar el archivo "Análisis sensibilidad y comparación con normatividad", incluido en los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Dis/Arch_Resultado.

Tabla 5.211 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para PM₁₀ escenario 2.

RECEPTOR	COORDENADAS (UTM 12)		COMPARACIÓN NORMA IMV			COMPARACIÓN NORMA ANUAL			PERIODO	ESCENARIO 2
	X	Y	C (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	C (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	24 h	CON CONTROL
REC1	4618215.36	2357629.77	18.0105	75.00	SI	15.0017	50.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC2	4618615.36	2357629.77	18.0152	75.00	SI	15.0018	50.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC3	4619015.36	2357629.77	18.0186	75.00	SI	15.0031	50.00	SI	MAXIMO	27,1874
REC4	4619415.36	2357629.77	18.0252	75.00	SI	15.0043	50.00	SI	PERIODO	ESCENARIO 2
REC5	4619815.36	2357629.77	18.0683	75.00	SI	15.0079	50.00	SI	ANUAL	CON CONTROL
REC6	4620215.36	2357629.77	18.0308	75.00	SI	15.0084	50.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC7	4620615.36	2357629.77	18.0482	75.00	SI	15.0093	50.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC8	4621015.36	2357629.77	18.0411	75.00	SI	15.0080	50.00	SI	MAXIMO	20,6473
REC9	4621415.36	2357629.77	18.0138	75.00	SI	15.0076	50.00	SI		
REC10	4621815.36	2357629.77	18.0076	75.00	SI	15.0068	50.00	SI		
REC11	4622215.36	2357629.77	18.0047	75.00	SI	15.0054	50.00	SI		
REC12	4622615.36	2358029.77	18.0136	75.00	SI	15.0016	50.00	SI		
REC13	4623015.36	2358029.77	18.0121	75.00	SI	15.0026	50.00	SI		
REC14	4623415.36	2358029.77	18.0712	75.00	SI	15.0044	50.00	SI		
REC15	4623815.36	2358029.77	18.0322	75.00	SI	15.0054	50.00	SI		
REC16	4624215.36	2358029.77	18.1002	75.00	SI	15.0208	50.00	SI		
REC17	4624615.36	2358029.77	18.0432	75.00	SI	15.0120	50.00	SI		
REC18	4625015.36	2358029.77	18.0417	75.00	SI	15.0547	50.00	SI		
REC19	4625415.36	2358029.77	18.0788	75.00	SI	15.0234	50.00	SI		
REC20	4625815.36	2358029.77	18.0138	75.00	SI	15.0025	50.00	SI		
REC21	4626215.36	2358029.77	18.0073	75.00	SI	15.0013	50.00	SI		
REC22	4626615.36	2358029.77	18.0045	75.00	SI	15.0006	50.00	SI		
REC23	4627015.36	2358429.77	18.0296	75.00	SI	15.0026	50.00	SI		
REC24	4627415.36	2358429.77	18.0734	75.00	SI	15.0032	50.00	SI		
REC25	4627815.36	2358429.77	18.0190	75.00	SI	15.0011	50.00	SI		
REC26	4628215.36	2358429.77	18.0404	75.00	SI	15.0065	50.00	SI		
REC27	4628615.36	2358429.77	18.1747	75.00	SI	15.0141	50.00	SI		
REC28	4629015.36	2358429.77	18.0665	75.00	SI	15.0173	50.00	SI		
REC29	4629415.36	2358429.77	18.0087	75.00	SI	15.0188	50.00	SI		
REC30	4629815.36	2358429.77	18.1647	75.00	SI	15.0272	50.00	SI		
REC31	4630215.36	2358429.77	18.0100	75.00	SI	15.0045	50.00	SI		
REC408	4619839.47	2359928.55	18.1418	75.00	SI	15.2292	50.00	SI		
REC409	4619771.28	2359576.08	18.5803	75.00	SI	15.1008	50.00	SI		
RS1	4620249.31	2359620.82	18.0951	75.00	SI	15.4845	50.00	SI		
RS2	4620511.73	2360201.18	18.3111	75.00	SI	15.0832	50.00	SI		
RS3	4620430.11	2359866.49	18.2768	75.00	SI	15.1083	50.00	SI		
RS4	4620473.43	2360066.64	18.2812	75.00	SI	15.0998	50.00	SI		
RS5	4620491.40	2359766.83	18.2387	75.00	SI	15.0785	50.00	SI		
RS6	4620871.71	2359398.12	18.1773	75.00	SI	15.0987	50.00	SI		
RS7	4620845.34	2360080.48	18.2878	75.00	SI	15.0940	50.00	SI		
RS8	4620168.05	2360102.64	18.8114	75.00	SI	15.3473	50.00	SI		
RS9	4620454.63	2359937.60	18.3941	75.00	SI	15.1070	50.00	SI		
RS10	4620680.37	2360034.65	18.1734	75.00	SI	15.0384	50.00	SI		
CA1	4620655.99	2359534.01	18.2407	75.00	SI	15.0463	50.00	SI		
CA2	4620615.53	2360018.38	18.2908	75.00	SI	15.0937	50.00	SI		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.212 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para PM_{2.5} escenario 1

RECEPTOR	COORDENADAS UTM 12		COMPARACIÓN NORMA 24h			COMPARACIÓN NORMA ANUAL			PERIODO	ESCENARIO 1
	X	Y	C (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	C (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	24 h	SIN CONTROL
REC1	4618215.35	2357629.77	3.0031	37.00	SI	3.0006	25.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC2	4618615.35	2357629.77	3.0035	37.00	SI	3.0006	25.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC3	4619015.35	2357629.77	3.0005	37.00	SI	3.0011	25.00	SI	MAXIMO	8.8183
REC4	4619415.35	2357629.77	3.0000	37.00	SI	3.0016	25.00	SI	PERIODO	ESCENARIO 1
REC5	4619815.35	2357629.77	3.0195	37.00	SI	3.0028	25.00	SI	ANUAL	SIN CONTROL
REC6	4620215.35	2357629.77	3.0107	37.00	SI	3.0030	25.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC7	4620615.35	2357629.77	3.0134	37.00	SI	3.0032	25.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC8	4621015.35	2357629.77	3.0148	37.00	SI	3.0028	25.00	SI	MAXIMO	4.3813
REC9	4621415.35	2357629.77	3.0038	37.00	SI	3.0025	25.00	SI		
REC10	4621815.35	2357629.77	3.0024	37.00	SI	3.0013	25.00	SI		
REC11	4622215.35	2357629.77	3.0072	37.00	SI	3.0002	25.00	SI		
REC12	4618215.35	2358029.77	3.0041	37.00	SI	3.0006	25.00	SI		
REC13	4618615.35	2358029.77	3.0037	37.00	SI	3.0007	25.00	SI		
REC14	4619015.35	2358029.77	3.0037	37.00	SI	3.0012	25.00	SI		
REC15	4619415.35	2358029.77	3.0101	37.00	SI	3.0028	25.00	SI		
REC16	4619815.35	2358029.77	3.0100	37.00	SI	3.0038	25.00	SI		
REC17	4620215.35	2358029.77	3.0129	37.00	SI	3.0043	25.00	SI		
REC18	4620615.35	2358029.77	3.0173	37.00	SI	3.0040	25.00	SI		
REC19	4621015.35	2358029.77	3.0217	37.00	SI	3.0074	25.00	SI		
REC20	4621415.35	2358029.77	3.0046	37.00	SI	3.0007	25.00	SI		
REC21	4621815.35	2358029.77	3.0033	37.00	SI	3.0006	25.00	SI		
REC22	4622215.35	2358029.77	3.0011	37.00	SI	3.0002	25.00	SI		
REC23	4618215.35	2358429.77	3.0035	37.00	SI	3.0006	25.00	SI		
REC24	4618615.35	2358429.77	3.0071	37.00	SI	3.0011	25.00	SI		
REC25	4619015.35	2358429.77	3.0058	37.00	SI	3.0011	25.00	SI		
REC26	4619415.35	2358429.77	3.0103	37.00	SI	3.0024	25.00	SI		
REC27	4619815.35	2358429.77	3.0090	37.00	SI	3.0003	25.00	SI		
REC28	4620215.35	2358429.77	3.0186	37.00	SI	3.0062	25.00	SI		
REC29	4620615.35	2358429.77	3.0177	37.00	SI	3.0063	25.00	SI		
REC30	4621015.35	2358429.77	3.0247	37.00	SI	3.0086	25.00	SI		
REC31	4621415.35	2358429.77	3.0000	37.00	SI	3.0015	25.00	SI		
REC408	4619879.47	2359938.55	3.1539	37.00	SI	3.0824	25.00	SI		
REC409	4619731.28	2359976.03	3.1807	37.00	SI	3.0362	25.00	SI		
R51	4620349.37	2359620.87	3.4403	37.00	SI	3.1790	25.00	SI		
R52	4620311.73	2360200.19	3.0793	37.00	SI	3.0216	25.00	SI		
R53	4620430.51	2359696.48	3.0903	37.00	SI	3.0318	25.00	SI		
R54	4620479.43	2360366.64	3.0846	37.00	SI	3.1007	25.00	SI		
R55	4620491.40	2359766.83	3.0881	37.00	SI	3.0283	25.00	SI		
R56	4620671.71	2359799.12	3.0471	37.00	SI	3.0111	25.00	SI		
R57	4620745.74	2360380.48	3.0001	37.00	SI	3.0007	25.00	SI		
R58	4620769.05	2360102.64	3.2130	37.00	SI	3.1108	25.00	SI		
R59	4620454.61	2359937.60	3.0876	37.00	SI	3.0350	25.00	SI		
R510	4620889.37	2360034.65	3.0568	37.00	SI	3.0120	25.00	SI		
CA1	4620555.99	2359534.01	3.0588	37.00	SI	3.0146	25.00	SI		
CA2	4620515.53	2360019.38	3.0803	37.00	SI	3.0302	25.00	SI		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.213 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para PM_{2.5} escenario 2.

RECEPTOR	COORDENADAS UTM 12		COMPARACIÓN NORMA 24h			COMPARACIÓN NORMA ANUAL			PERIODO	ESCENARIO 2
	X	Y	C (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	C (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	24 h	CON CONTROL
REC1	4618215.36	2357629.77	3.0029	33.00	SI	3.0005	25.00	SI	NO CUMPLEN	0
REC2	4618015.36	2357629.77	3.0038	33.00	SI	3.0055	25.00	SI	NO CUMPLEN	0
REC3	4619015.36	2357629.77	3.0041	33.00	SI	3.0008	25.00	SI	MÁXIMO	4.8811
REC4	4619415.36	2357629.77	3.0044	33.00	SI	3.0012	25.00	SI	PERIODO	ESCENARIO 2
REC5	4619815.36	2357629.77	3.0048	33.00	SI	3.0020	25.00	SI	ANUAL	CON CONTROL
REC6	4620215.36	2357629.77	3.0063	33.00	SI	3.0022	25.00	SI	NO CUMPLEN	0
REC7	4620615.36	2357629.77	3.0110	33.00	SI	3.0039	25.00	SI	NO CUMPLEN	0
REC8	4621015.36	2357629.77	3.0134	33.00	SI	3.0077	25.00	SI	MÁXIMO	3.9538
REC9	4621415.36	2357629.77	3.0030	33.00	SI	3.0054	25.00	SI		
REC10	4621815.36	2357629.77	3.0017	33.00	SI	3.0002	25.00	SI		
REC11	4622215.36	2357629.77	3.0009	33.00	SI	3.0005	25.00	SI		
REC12	4618215.36	2358029.77	3.0032	33.00	SI	3.0006	25.00	SI		
REC13	4618615.36	2358029.77	3.0034	33.00	SI	3.0008	25.00	SI		
REC14	4619015.36	2358029.77	3.0047	33.00	SI	3.0009	25.00	SI		
REC15	4619415.36	2358029.77	3.0050	33.00	SI	3.0014	25.00	SI		
REC16	4619815.36	2358029.77	3.0061	33.00	SI	3.0027	25.00	SI		
REC17	4620215.36	2358029.77	3.0061	33.00	SI	3.0031	25.00	SI		
REC18	4620615.36	2358029.77	3.0140	33.00	SI	3.0043	25.00	SI		
REC19	4621015.36	2358029.77	3.0216	33.00	SI	3.0072	25.00	SI		
REC20	4621415.36	2358029.77	3.0033	33.00	SI	3.0006	25.00	SI		
REC21	4621815.36	2358029.77	3.0020	33.00	SI	3.0004	25.00	SI		
REC22	4622215.36	2358029.77	3.0008	33.00	SI	3.0002	25.00	SI		
REC23	4618215.36	2358429.77	3.0043	33.00	SI	3.0007	25.00	SI		
REC24	4618615.36	2358429.77	3.0050	33.00	SI	3.0009	25.00	SI		
REC25	4619015.36	2358429.77	3.0052	33.00	SI	3.0009	25.00	SI		
REC26	4619415.36	2358429.77	3.0062	33.00	SI	3.0018	25.00	SI		
REC27	4619815.36	2358429.77	3.0218	33.00	SI	3.0036	25.00	SI		
REC28	4620215.36	2358429.77	3.0357	33.00	SI	3.0044	25.00	SI		
REC29	4620615.36	2358429.77	3.0157	33.00	SI	3.0058	25.00	SI		
REC30	4621015.36	2358429.77	3.0229	33.00	SI	3.0064	25.00	SI		
REC31	4621415.36	2358429.77	3.0000	33.00	SI	3.0013	25.00	SI		
REC408	4619873.47	2359928.55	3.0063	33.00	SI	3.0006	25.00	SI		
REC409	4619731.28	2359976.03	3.1230	33.00	SI	3.0030	25.00	SI		
RS1	4620243.32	2359620.87	3.2328	33.00	SI	3.0240	25.00	SI		
RS2	4620511.73	2360000.19	3.0009	33.00	SI	3.0308	25.00	SI		
RS3	4620438.51	2359866.49	3.0048	33.00	SI	3.0288	25.00	SI		
RS4	4620479.43	2360066.94	3.0703	33.00	SI	3.0256	25.00	SI		
RS5	4620491.40	2359768.83	3.0705	33.00	SI	3.0209	25.00	SI		
RS6	4620871.71	2359399.12	3.0008	33.00	SI	3.0760	25.00	SI		
RS7	4620345.74	2360080.89	3.1458	33.00	SI	3.0761	25.00	SI		
RS8	4620163.05	2360102.64	3.2168	33.00	SI	3.0816	25.00	SI		
RS9	4620454.01	2359937.80	3.0506	33.00	SI	3.0288	25.00	SI		
RS10	4620699.37	2360034.65	3.0404	33.00	SI	3.0096	25.00	SI		
CA1	4620665.99	2359534.01	3.0379	33.00	SI	3.0327	25.00	SI		
CA2	4620615.53	2360019.38	3.0819	33.00	SI	3.0257	25.00	SI		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.214 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para NO₂ escenario 1.

RECEPTOR	COORDENADAS CITA 12		COMPARACIÓN NORMA, 1h			COMPARACIÓN NORMA, Anual			PERIODO	ESCENARIO 1
	X	Y	C (µg/m ³)	NORMA	CUMPLE	C (µg/m ³)	NORMA	CUMPLE		
REC1	4618415.36	2357629.77	4.0062	300.00	SI	4.0062	60.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC2	4618845.36	2357629.77	4.0029	300.00	SI	4.0029	60.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC3	4619015.36	2357629.77	4.0150	300.00	SI	4.0150	60.00	SI	MAXIMO	178.0052
REC4	4619435.36	2357629.77	4.0412	300.00	SI	4.0412	60.00	SI	PERIODO	ESCENARIO 1
REC5	4619815.36	2357629.77	4.1837	300.00	SI	4.1837	60.00	SI	Anual	CONSTRUCCION
REC6	4620215.36	2357629.77	4.2783	300.00	SI	4.2783	60.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC7	4620615.36	2357629.77	4.2989	300.00	SI	4.2989	60.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC8	4621015.36	2357629.77	4.3308	300.00	SI	4.3308	60.00	SI	MAXIMO	25.0013
REC9	4621415.36	2357629.77	4.0818	300.00	SI	4.0818	60.00	SI		
REC10	4621815.36	2357629.77	4.0380	300.00	SI	4.0380	60.00	SI		
REC11	4622215.36	2357629.77	4.0088	300.00	SI	4.0088	60.00	SI		
REC12	4622615.36	2357629.77	4.0070	300.00	SI	4.0070	60.00	SI		
REC13	4623015.36	2357629.77	4.0616	300.00	SI	4.0616	60.00	SI		
REC14	4623415.36	2357629.77	4.0383	300.00	SI	4.0383	60.00	SI		
REC15	4623815.36	2357629.77	4.0715	300.00	SI	4.0715	60.00	SI		
REC16	4624215.36	2357629.77	4.2421	300.00	SI	4.2421	60.00	SI		
REC17	4624615.36	2357629.77	4.4353	300.00	SI	4.4353	60.00	SI		
REC18	4625015.36	2357629.77	4.4170	300.00	SI	4.4170	60.00	SI		
REC19	4625415.36	2357629.77	4.4530	300.00	SI	4.4530	60.00	SI		
REC20	4625815.36	2357629.77	4.0834	300.00	SI	4.0834	60.00	SI		
REC21	4626215.36	2357629.77	4.0386	300.00	SI	4.0386	60.00	SI		
REC22	4626615.36	2357629.77	4.0113	300.00	SI	4.0113	60.00	SI		
REC23	4627015.36	2357629.77	4.0526	300.00	SI	4.0526	60.00	SI		
REC24	4627415.36	2357629.77	4.0700	300.00	SI	4.0700	60.00	SI		
REC25	4627815.36	2357629.77	4.0183	300.00	SI	4.0183	60.00	SI		
REC26	4628215.36	2357629.77	4.1158	300.00	SI	4.1158	60.00	SI		
REC27	4628615.36	2357629.77	4.3437	300.00	SI	4.3437	60.00	SI		
REC28	4629015.36	2357629.77	4.0717	300.00	SI	4.0717	60.00	SI		
REC29	4629415.36	2357629.77	4.0889	300.00	SI	4.0889	60.00	SI		
REC30	4629815.36	2357629.77	4.4078	300.00	SI	4.4078	60.00	SI		
REC31	4630215.36	2357629.77	4.0684	300.00	SI	4.0684	60.00	SI		
REC400	4639879.47	2359928.55	13.8737	300.00	SI	0.0180	60.00	SI		
REC409	4639731.28	2359976.03	1.3443	300.00	SI	4.4838	60.00	SI		
R51	4620240.32	2359620.87	18.3331	300.00	SI	6.8900	60.00	SI		
R52	4620531.73	2360008.19	0.8853	300.00	SI	4.2783	60.00	SI		
R53	4620430.51	2359866.40	0.8876	300.00	SI	4.3844	60.00	SI		
R54	4620479.43	2360068.64	0.7403	300.00	SI	4.3148	60.00	SI		
R55	4620481.40	2359768.33	0.4180	300.00	SI	4.2843	60.00	SI		
R56	4620571.71	2359998.11	4.3087	300.00	SI	4.1358	60.00	SI		
R57	4620245.74	2360080.43	11.9187	300.00	SI	5.2488	60.00	SI		
R58	4620169.05	2360102.64	15.8817	300.00	SI	6.3881	60.00	SI		
R59	4620454.67	2359937.60	0.7595	300.00	SI	4.3733	60.00	SI		
FO10	4620088.37	2360094.85	4.7081	300.00	SI	4.1307	60.00	SI		
CA1	4620085.99	2359934.04	4.0881	300.00	SI	4.1808	60.00	SI		
CA2	4620015.38	2360018.88	0.3344	300.00	SI	4.2917	60.00	SI		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.215 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para SO₂ escenario 1.

RECEPTOR	COORDINADAS UTM 12		COMPARACIÓN NORMA 1h			COMPARACIÓN NORMA 24h			PERIODO	ESCENARIO 1
	X	Y	C (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	C (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	1h	CONSTRUCCIÓN
REC1	4618215.36	2357629.77	4.00008	100.00	SI	4.00010	50.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC2	4618615.36	2357629.77	4.00012	100.00	SI	4.00013	50.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC3	4619015.36	2357629.77	4.00016	100.00	SI	4.00018	50.00	SI	MAXIMO	4.2012
REC4	4619415.36	2357629.77	4.00021	100.00	SI	4.00023	50.00	SI	PERIODO	ESCENARIO 1
REC5	4619815.36	2357629.77	4.00026	100.00	SI	4.00028	50.00	SI	24h	CONSTRUCCIÓN
REC6	4620215.36	2357629.77	4.00031	100.00	SI	4.00033	50.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC7	4620615.36	2357629.77	4.00036	100.00	SI	4.00038	50.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC8	4621015.36	2357629.77	4.00041	100.00	SI	4.00043	50.00	SI	MAXIMO	4.0582
REC9	4621415.36	2357629.77	4.00046	100.00	SI	4.00048	50.00	SI		
REC10	4621815.36	2357629.77	4.00051	100.00	SI	4.00053	50.00	SI		
REC11	4622215.36	2357629.77	4.00056	100.00	SI	4.00058	50.00	SI		
REC12	4622615.36	2358029.77	4.00061	100.00	SI	4.00063	50.00	SI		
REC13	4623015.36	2358029.77	4.00066	100.00	SI	4.00068	50.00	SI		
REC14	4623415.36	2358029.77	4.00071	100.00	SI	4.00073	50.00	SI		
REC15	4623815.36	2358029.77	4.00076	100.00	SI	4.00078	50.00	SI		
REC16	4624215.36	2358029.77	4.00081	100.00	SI	4.00083	50.00	SI		
REC17	4624615.36	2358029.77	4.00086	100.00	SI	4.00088	50.00	SI		
REC18	4625015.36	2358029.77	4.00091	100.00	SI	4.00093	50.00	SI		
REC19	4625415.36	2358029.77	4.00096	100.00	SI	4.00098	50.00	SI		
REC20	4625815.36	2358029.77	4.00101	100.00	SI	4.00103	50.00	SI		
REC21	4626215.36	2358029.77	4.00106	100.00	SI	4.00108	50.00	SI		
REC22	4626615.36	2358029.77	4.00111	100.00	SI	4.00113	50.00	SI		
REC23	4627015.36	2358029.77	4.00116	100.00	SI	4.00118	50.00	SI		
REC24	4627415.36	2358029.77	4.00121	100.00	SI	4.00123	50.00	SI		
REC25	4627815.36	2358029.77	4.00126	100.00	SI	4.00128	50.00	SI		
REC26	4628215.36	2358029.77	4.00131	100.00	SI	4.00133	50.00	SI		
REC27	4628615.36	2358029.77	4.00136	100.00	SI	4.00138	50.00	SI		
REC28	4629015.36	2358029.77	4.00141	100.00	SI	4.00143	50.00	SI		
REC29	4629415.36	2358029.77	4.00146	100.00	SI	4.00148	50.00	SI		
REC30	4629815.36	2358029.77	4.00151	100.00	SI	4.00153	50.00	SI		
REC31	4630215.36	2358029.77	4.00156	100.00	SI	4.00158	50.00	SI		
REC32	4630615.36	2359238.55	4.00161	100.00	SI	4.00163	50.00	SI		
REC33	4631015.36	2359238.55	4.00166	100.00	SI	4.00168	50.00	SI		
REC34	4631415.36	2359238.55	4.00171	100.00	SI	4.00173	50.00	SI		
REC35	4631815.36	2359238.55	4.00176	100.00	SI	4.00178	50.00	SI		
REC36	4632215.36	2359238.55	4.00181	100.00	SI	4.00183	50.00	SI		
REC37	4632615.36	2359238.55	4.00186	100.00	SI	4.00188	50.00	SI		
REC38	4633015.36	2359238.55	4.00191	100.00	SI	4.00193	50.00	SI		
REC39	4633415.36	2359238.55	4.00196	100.00	SI	4.00198	50.00	SI		
REC40	4633815.36	2359238.55	4.00201	100.00	SI	4.00203	50.00	SI		
REC41	4634215.36	2359238.55	4.00206	100.00	SI	4.00208	50.00	SI		
REC42	4634615.36	2359238.55	4.00211	100.00	SI	4.00213	50.00	SI		
REC43	4635015.36	2359238.55	4.00216	100.00	SI	4.00218	50.00	SI		
REC44	4635415.36	2359238.55	4.00221	100.00	SI	4.00223	50.00	SI		
REC45	4635815.36	2359238.55	4.00226	100.00	SI	4.00228	50.00	SI		
REC46	4636215.36	2359238.55	4.00231	100.00	SI	4.00233	50.00	SI		
REC47	4636615.36	2359238.55	4.00236	100.00	SI	4.00238	50.00	SI		
REC48	4637015.36	2359238.55	4.00241	100.00	SI	4.00243	50.00	SI		
REC49	4637415.36	2359238.55	4.00246	100.00	SI	4.00248	50.00	SI		
REC50	4637815.36	2359238.55	4.00251	100.00	SI	4.00253	50.00	SI		
REC51	4638215.36	2359238.55	4.00256	100.00	SI	4.00258	50.00	SI		
REC52	4638615.36	2359238.55	4.00261	100.00	SI	4.00263	50.00	SI		
REC53	4639015.36	2359238.55	4.00266	100.00	SI	4.00268	50.00	SI		
REC54	4639415.36	2359238.55	4.00271	100.00	SI	4.00273	50.00	SI		
REC55	4639815.36	2359238.55	4.00276	100.00	SI	4.00278	50.00	SI		
REC56	4640215.36	2359238.55	4.00281	100.00	SI	4.00283	50.00	SI		
REC57	4640615.36	2359238.55	4.00286	100.00	SI	4.00288	50.00	SI		
REC58	4641015.36	2359238.55	4.00291	100.00	SI	4.00293	50.00	SI		
REC59	4641415.36	2359238.55	4.00296	100.00	SI	4.00298	50.00	SI		
REC60	4641815.36	2359238.55	4.00301	100.00	SI	4.00303	50.00	SI		
REC61	4642215.36	2359238.55	4.00306	100.00	SI	4.00308	50.00	SI		
REC62	4642615.36	2359238.55	4.00311	100.00	SI	4.00313	50.00	SI		
REC63	4643015.36	2359238.55	4.00316	100.00	SI	4.00318	50.00	SI		
REC64	4643415.36	2359238.55	4.00321	100.00	SI	4.00323	50.00	SI		
REC65	4643815.36	2359238.55	4.00326	100.00	SI	4.00328	50.00	SI		
REC66	4644215.36	2359238.55	4.00331	100.00	SI	4.00333	50.00	SI		
REC67	4644615.36	2359238.55	4.00336	100.00	SI	4.00338	50.00	SI		
REC68	4645015.36	2359238.55	4.00341	100.00	SI	4.00343	50.00	SI		
REC69	4645415.36	2359238.55	4.00346	100.00	SI	4.00348	50.00	SI		
REC70	4645815.36	2359238.55	4.00351	100.00	SI	4.00353	50.00	SI		
REC71	4646215.36	2359238.55	4.00356	100.00	SI	4.00358	50.00	SI		
REC72	4646615.36	2359238.55	4.00361	100.00	SI	4.00363	50.00	SI		
REC73	4647015.36	2359238.55	4.00366	100.00	SI	4.00368	50.00	SI		
REC74	4647415.36	2359238.55	4.00371	100.00	SI	4.00373	50.00	SI		
REC75	4647815.36	2359238.55	4.00376	100.00	SI	4.00378	50.00	SI		
REC76	4648215.36	2359238.55	4.00381	100.00	SI	4.00383	50.00	SI		
REC77	4648615.36	2359238.55	4.00386	100.00	SI	4.00388	50.00	SI		
REC78	4649015.36	2359238.55	4.00391	100.00	SI	4.00393	50.00	SI		
REC79	4649415.36	2359238.55	4.00396	100.00	SI	4.00398	50.00	SI		
REC80	4649815.36	2359238.55	4.00401	100.00	SI	4.00403	50.00	SI		
REC81	4650215.36	2359238.55	4.00406	100.00	SI	4.00408	50.00	SI		
REC82	4650615.36	2359238.55	4.00411	100.00	SI	4.00413	50.00	SI		
REC83	4651015.36	2359238.55	4.00416	100.00	SI	4.00418	50.00	SI		
REC84	4651415.36	2359238.55	4.00421	100.00	SI	4.00423	50.00	SI		
REC85	4651815.36	2359238.55	4.00426	100.00	SI	4.00428	50.00	SI		
REC86	4652215.36	2359238.55	4.00431	100.00	SI	4.00433	50.00	SI		
REC87	4652615.36	2359238.55	4.00436	100.00	SI	4.00438	50.00	SI		
REC88	4653015.36	2359238.55	4.00441	100.00	SI	4.00443	50.00	SI		
REC89	4653415.36	2359238.55	4.00446	100.00	SI	4.00448	50.00	SI		
REC90	4653815.36	2359238.55	4.00451	100.00	SI	4.00453	50.00	SI		
REC91	4654215.36	2359238.55	4.00456	100.00	SI	4.00458	50.00	SI		
REC92	4654615.36	2359238.55	4.00461	100.00	SI	4.00463	50.00	SI		
REC93	4655015.36	2359238.55	4.00466	100.00	SI	4.00468	50.00	SI		
REC94	4655415.36	2359238.55	4.00471	100.00	SI	4.00473	50.00	SI		
REC95	4655815.36	2359238.55	4.00476	100.00	SI	4.00478	50.00	SI		
REC96	4656215.36	2359238.55	4.00481	100.00	SI	4.00483	50.00	SI		
REC97	4656615.36	2359238.55	4.00486	100.00	SI	4.00488	50.00	SI		
REC98	4657015.36	2359238.55	4.00491	100.00	SI	4.00493	50.00	SI		
REC99	4657415.36	2359238.55	4.00496	100.00	SI	4.00498	50.00	SI		
REC100	4657815.36	2359238.55	4.00501	100.00	SI	4.00503	50.00	SI		
REC101	4658215.36	2359238.55	4.00506	100.00	SI	4.00508	50.00	SI		
REC1										

Tabla 5.216 Comparación de las predicciones del modelo para la ubicación de los 421 receptores contra el valor permisible de la Norma, para CO escenario 1.

RECEPTOR	COORDINADAS UTM 12		COMPARACIÓN NORMA 1h			COMPARACIÓN NORMA 8h			PERIODO	ESCUENRIO 1
	X	Y	CO (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	CO (µg/m³)	NORMA	CUMPLE	1h	CONSTRUCCIÓN
REC1	4618215.36	2357629.77	560.10182	35000.00	SI	536.63380	5000.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC2	4618615.36	2357629.77	558.71158	35000.00	SI	536.38663	5000.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC3	4619015.36	2357629.77	563.01818	35000.00	SI	537.00003	5000.00	SI	MÁXIMO	721.8273
REC4	4619415.36	2357629.77	560.09187	35000.00	SI	536.51188	5000.00	SI	PERIODO	ESCUENRIO 1
REC5	4619815.36	2357629.77	568.83807	35000.00	SI	537.72184	5000.00	SI	8h	CONSTRUCCIÓN
REC6	4620215.36	2357629.77	562.31340	35000.00	SI	536.84019	5000.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC7	4620615.36	2357629.77	564.02477	35000.00	SI	537.18640	5000.00	SI	# NO CUMPLEN	0
REC8	4621015.36	2357629.77	563.18121	35000.00	SI	537.30812	5000.00	SI	MÁXIMO	582.3480
REC9	4621415.36	2357629.77	557.89311	35000.00	SI	536.21734	5000.00	SI		
REC10	4621815.36	2357629.77	560.82115	35000.00	SI	536.74000	5000.00	SI		
REC11	4622215.36	2357629.77	556.43831	35000.00	SI	536.11581	5000.00	SI		
REC12	4618215.36	2358029.77	558.17008	35000.00	SI	536.31130	5000.00	SI		
REC13	4618615.36	2358029.77	558.87420	35000.00	SI	536.38470	5000.00	SI		
REC14	4619015.36	2358029.77	565.82588	35000.00	SI	537.38175	5000.00	SI		
REC15	4619415.36	2358029.77	562.19478	35000.00	SI	536.77480	5000.00	SI		
REC16	4619815.36	2358029.77	569.10902	35000.00	SI	537.83579	5000.00	SI		
REC17	4620215.36	2358029.77	561.35325	35000.00	SI	537.01611	5000.00	SI		
REC18	4620615.36	2358029.77	564.05987	35000.00	SI	537.15081	5000.00	SI		
REC19	4621015.36	2358029.77	566.78882	35000.00	SI	537.53722	5000.00	SI		
REC20	4621415.36	2358029.77	557.58880	35000.00	SI	536.29077	5000.00	SI		
REC21	4621815.36	2358029.77	557.67223	35000.00	SI	536.32181	5000.00	SI		
REC22	4622215.36	2358029.77	557.38340	35000.00	SI	536.24641	5000.00	SI		
REC23	4618215.36	2358429.77	559.88810	35000.00	SI	536.53770	5000.00	SI		
REC24	4618615.36	2358429.77	559.37875	35000.00	SI	536.51139	5000.00	SI		
REC25	4619015.36	2358429.77	558.18420	35000.00	SI	536.48798	5000.00	SI		
REC26	4619415.36	2358429.77	562.71882	35000.00	SI	536.88189	5000.00	SI		
REC27	4619815.36	2358429.77	568.81388	35000.00	SI	537.83630	5000.00	SI		
REC28	4620215.36	2358429.77	568.72718	35000.00	SI	537.83174	5000.00	SI		
REC29	4620615.36	2358429.77	568.88128	35000.00	SI	537.88880	5000.00	SI		
REC30	4621015.36	2358429.77	568.08187	35000.00	SI	537.72548	5000.00	SI		
REC31	4621415.36	2358429.77	563.48258	35000.00	SI	537.12813	5000.00	SI		
REC32	4619815.36	2359029.77	568.54588	35000.00	SI	562.67798	5000.00	SI		
REC33	4619771.28	2359076.03	576.88052	35000.00	SI	561.12702	5000.00	SI		
R51	4620249.22	2359281.87	584.38758	35000.00	SI	582.48751	5000.00	SI		
R52	4620511.73	2360200.19	600.31813	35000.00	SI	601.63883	5000.00	SI		
R53	4620430.51	2359886.40	572.88728	35000.00	SI	568.22286	5000.00	SI		
R54	4620479.43	2360066.84	570.24183	35000.00	SI	558.88888	5000.00	SI		
R55	4620491.40	2359786.83	572.84887	35000.00	SI	568.15678	5000.00	SI		
R56	4620571.71	2359375.12	570.16733	35000.00	SI	552.87889	5000.00	SI		
R57	4620745.74	2360080.49	586.43488	35000.00	SI	581.77641	5000.00	SI		
R58	4620190.25	2360102.64	605.00181	35000.00	SI	602.49173	5000.00	SI		
R59	4620454.03	2359917.60	588.87841	35000.00	SI	598.72578	5000.00	SI		
R510	4620889.27	2360054.65	589.88279	35000.00	SI	597.84110	5000.00	SI		
CA1	4620555.99	2359534.01	575.73388	35000.00	SI	558.81908	5000.00	SI		
CA2	4620515.53	2360019.98	581.78486	35000.00	SI	558.87233	5000.00	SI		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Al analizar la información tabulada en la [Tabla 5.210](#) y [Tabla 5.211](#), se puede inferir lo siguiente:

Una variación del 50% en las estimaciones de las emisiones, genera una variación promedio similar en las predicciones del modelo tanto para el periodo de 24 h como para el

anual, con valores de 50.13% y 50.00% como muestra en la parte inferior de la [Tabla 5.210](#) y [Tabla 5.211](#), siendo más cercano para el periodo anual.

Al analizar la información tabulada en la [Tabla 5.210](#) a [Tabla 5.213](#) donde se tabulan los valores predichos por el modelo para las condiciones siguientes: PM₁₀ construcción sin controles Escenario 1 ([Tabla 5.210](#)), PM₁₀ construcción con controles Escenario 2 ([Tabla 5.211](#)), PM_{2.5} construcción sin controles Escenario 1 ([Tabla 5.212](#)), PM_{2.5} construcción con controles Escenario 2 ([Tabla 5.213](#)), se encuentra:

- Las zonas donde se presentan los mayores niveles de material particulado corresponden a las ubicaciones más cercanas a las ubicadas en cercanías a la zona de construcción de la variante y en menor medida en los alrededores de los restantes ejes, y a medida que las ubicaciones donde se estiman las emisiones se alejan de estas, las concentraciones predichas por el modelo decaen exponencialmente.
- Para las concentraciones predichas por el modelo para PM₁₀ Escenario 1 de construcción sin control ([Tabla 5.210](#)) el modelo predice que, para el periodo de 24 h en ninguno de los 421 receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 75 µg/m³ establecido en la Resolución 2254 de 2017, mientras si se compara con el límite anual de 50 µg/m³, este tampoco se supera en ninguna de las 421 ubicaciones. Con máximos de 44.90 µg/m³ y 28.34 µg/m³ para los periodos de 24 h y anual. Cabe resaltar que la mayoría de las ubicaciones donde se presentan los mayores niveles se encuentran alrededor de la zona de construcción.
- Para las concentraciones predichas por el modelo para PM₁₀ Escenario 2 de construcción con control ([Tabla 5.211](#)) el modelo predice que, para el periodo de 24 h en ninguno de los 421 receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 75 µg/m³ establecido en la Resolución 2254 de 2017, mientras si se compara con el límite anual de 50 µg/m³, este tampoco se supera en ninguna de las 421 ubicaciones. Con máximos de 27.19 µg/m³ y 20.65 µg/m³ para los periodos de 24 h y anual, valores que representan el 36.3% y 41.3% de los límites permisibles incluido el valor de fondo de 15 µg/m³ que por sí solo representa el 30% del límite anual.
- Para las concentraciones predichas por el modelo para PM₁₀ Escenario 2 de construcción con control ([Tabla 5.211](#)) el modelo predice que, para el periodo de 24 h en ninguno de los 421 receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 75 µg/m³ establecido en la Resolución 2254 de 2017, mientras si se compara con el límite anual de 25 µg/m³, este tampoco se supera. Con máximos de 6.85 µg/m³ y 4.88 µg/m³ para los periodos de 24 h y anual, valores que representan el 18.5% y 19.5% de los límites permisibles de 37 µg/m³ y 25 µg/m³ respectivamente, incluido el valor de fondo de 3.0 µg/m³.
- Para las concentraciones predichas por el modelo para PM_{2.5} escenario 2 de construcción con control ([Tabla 5.213](#)) el modelo predice que, para el periodo de 24 h, en ninguno de los 421 receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 37 µg/m³ establecido en la Resolución 2254 de 2017, mientras si se compara con el límite anual de 25 µg/m³, este tampoco se supera. Con máximos de 4.88 µg/m³ y 3.99 µg/m³ para los periodos de 24 h y anual, valores que representan el 13.2% y 16.0% de los límites permisibles de 37 µg/m³ y 25 µg/m³

respectivamente, incluido el valor de fondo de 3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que por sí solo representa el 12% del límite anual.

En cuanto a los resultados mostrados en la [Tabla 5.214](#) para NO_2 escenario 1, [Tabla 5.215](#) para SO_2 escenario 1, en la [Tabla 5.216](#) para CO, para el escenario modelado, se puede afirmar lo siguiente:

- Que en todos los casos los mayores niveles registrados se presentaron en receptores ubicados en cercanías a la zona de construcción de la variante y en cercanía a los ejes viales.
- Que para ninguno de los siguientes contaminantes CO, NO_2 y SO_2 , para los escenarios modelados se alcanza a superar los límites permisibles, y en la mayoría de los casos los aportes del proyecto a la calidad del aire son inferiores al 10% de los valores de fondo ingresados y que asemejan a las condiciones actuales, con excepción del NO_2 que presenta valores máximos de 118.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 26.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 1 h y anual, valores que representan el 59.5% y 43.3% de los límites permisibles de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, incluido el valor de fondo de 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

5.1.10.5.23 Conclusión

- El desarrollo del presente estudio permitió la identificación de los aportes a los niveles de inmisión de los contaminantes PM10, PM2.5, CO, NO_2 , SO_2 , dentro del área de influencia del proyecto de Modificación de Licencia Variante Mutatá de la empresa AUTOPISTAS URABÁ S.A.S., durante los periodos de construcción y operación, encontrándose que estos son más representativos en el escenario de construcción para PM10 y para NO_2 en el periodo horario, mientras para los contaminantes CO, SO_2 y PM2.5 son de carácter marginal.
- El presente estudio permitió la caracterización de las zonas de mayor afectación para la inmisión de los contaminantes CO, NO_2 , SO_2 , PM10 y PM2.5, que se generarán durante el desarrollo de la construcción del proyecto Modificación de Licencia Variante Mutatá de la empresa AUTOPISTAS URABÁ S.A.S., donde se encuentra que estas son las aledañas a la zona de construcción de la variante.
- Para las predicciones del modelo AERMOD cuando se modela el Escenario 1 para las emisiones de material particulado expresado como PM10 del proyecto de construcción Modificación de Licencia Variante Mutatá, se encuentra que para el periodo de 24 h que en ninguno de las 421 ubicaciones de receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, mientras si se compara con el límite anual de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este tampoco se alcanza a superar. Alcanzando máximos de 44.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 28.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que representan solo el 59.9% y 56.7% en relación con los límites permisibles para los periodos de 24 h y anual respectivamente, incluido el nivel de fondo de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (representa el 30% del valor anual).
- Para las predicciones del modelo AERMOD cuando se modela el Escenario 2 para las emisiones de material particulado expresado como PM10 del proyecto de Modificación de Licencia Variante Mutatá, se encuentra que para el periodo de 24 h que en ninguno de las 421 ubicaciones de receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017

del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, mientras si se compara con el límite anual de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este tampoco se alcanza a superar. Alcanzando máximos de 27.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 20.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que representan solo el 36.3% y 41.3% en relación con los límites permisibles para los periodos de 24 h y anual respectivamente, incluido el nivel de fondo de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (representa el 30% del valor anual).

- Para las predicciones del modelo AERMOD cuando se modela el Escenario 1 para las emisiones de material particulado expresado como $\text{PM}_{2.5}$ del proyecto de Modificación de Licencia Variante Mutatá sin controles, se encuentra que para el periodo de 24 h que en ninguno de las 421 ubicaciones de receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, mientras si se compara con el límite anual de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este tampoco se alcanza a superar en ninguno. Alcanzando máximos de 6.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 4.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que representan solo el 18.5% y 19.5% en relación con los límites permisibles para los periodos de 24 h y anual respectivamente, incluido el nivel de fondo de 3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (representa el 12% del valor anual).
- Para las predicciones del modelo AERMOD cuando se modela el Escenario 2 para las emisiones de material particulado expresado como $\text{PM}_{2.5}$ del proyecto de Modificación de Licencia Variante Mutatá con controles, se encuentra que para el periodo de 24 h que en ninguno de las 421 ubicaciones de receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, mientras si se compara con el límite anual de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este tampoco se alcanza a superar en ninguno. Alcanzando máximos de 4.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 3.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que representan solo el 13.2% y 16.0% en relación con los límites permisibles para los periodos de 24 h y anual respectivamente, incluido el nivel de fondo de 3.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (representa el 12% del valor anual).
- Para las predicciones del modelo AERMOD cuando se modela el Escenario 1 para las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO_2) del proyecto Modificación de Licencia Variante Mutatá, se encuentra que para el periodo de 1 h que en ninguno de las 421 ubicaciones de receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, mientras si se compara con el límite anual de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este tampoco se alcanza a superar. Alcanzando máximos de 118.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 26.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que representan el 59.5% y 43.3% en relación con los límites permisibles para los periodos de 1 h y anual respectivamente, incluido el nivel de fondo de 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (representa solo el 6.7% del valor anual).
- Para las predicciones del modelo AERMOD cuando se modela el escenario 1 de construcción para las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) para el proyecto Modificación de Licencia Variante Mutatá, se encuentra que en ninguno de estos y para los periodos modelados de 1 h y anual se alcanza a superar los límites permisibles de 100 mg/m^3 y 50 mg/m^3 establecidos en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible para los periodo de 1 h y 24h. Alcanzando máximos de 4.2612 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 4.00582 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que representan solo el 4.26% y 8.12% en relación con los límites permisibles para los

periodos de 1 h y 24h respectivamente, incluido el nivel de fondo de 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (representa el 8% del valor anual).

- Para las predicciones del modelo AERMOD cuando se modela el Escenario 1 para las emisiones de dióxido de nitrógeno (CO) del proyecto Modificación de Licencia Variante Mutatá, se encuentra que para el periodo de 1 h que en ninguno de las 396 ubicaciones de receptores seleccionados se alcanza a superar el límite permisible de 35000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, mientras si se compara con el límite anual de 5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este tampoco se alcanza a superar. Alcanzando máximos de 723.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 582.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que representan el 2.07% y 11.65% en relación con los límites permisibles para los periodos de 1 h y anual respectivamente, incluido el nivel de fondo de 556 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (representa solo el 11.12% del valor anual).

5.1.10.6 Ruido

5.1.10.6.1 Fuentes de ruido identificadas en la zona

En la [Figura 5.285](#) se identifican las fuentes principales generadoras de ruido dentro de la zona de estudio, como son las fuentes lineales asociadas a los ejes viales como la vía variante Mutatá primer tramo construido y la vía sin pavimentar interna Mutatá, el río Mutatá y las dispersas asociadas al ruido generados por aves, etc.



Figura 5.285 Fuentes de ruido identificadas en la zona de estudio punto RA1
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la [Figura 5.286](#) se identifican las fuentes principales generadoras de ruido dentro de la zona de estudio, como son las fuentes lineales asociadas a los ejes viales como la vía pavimentada Mutatá - Caucheras.



Figura 5.286 Fuentes de ruido identificadas en la zona de estudio RA2

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.287, se identifican las fuentes principales generadoras de ruido dentro de la zona de estudio, como son las fuentes lineales asociadas a los ejes viales (vía destapada), y las dispersas asociadas a la zona poblada y los sonidos producidos por la fauna local, compuesta por insectos y animales domésticos como bovinos y perros.



Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la **Figura 5.288** se muestran los treinta (30) receptores seleccionados, estos se encuentran clasificados de la siguiente manera: del REC1 al REC5 corresponden a las cinco (5) ubicaciones para la calibración del modelo de ruido CM1 a CM5, y los restantes veinticinco (25), REC6 a REC30, corresponden a ubicaciones seleccionadas con el fin de ver los niveles de ruido en estas ubicaciones y como la construcción del proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá influye en relación con su entorno.



Figura 5.288 Receptores potenciales
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.6.2 Monitoreo de niveles presión sonora (ruido ambiental)

Las mediciones se realizaron en **tres (3)** puntos en los horarios diurno y nocturno, en día hábil y no hábil, **los primeros dos (RA1 y RA2) se realizaron** entre los días los días 17 y 19 de noviembre de 2024, **en tanto el tercero (RA3) se realizó entre los días 06 y 07 de septiembre de 2025. Durante estos** períodos se tomaron lecturas para verificar los Niveles de Presión Sonora (NPS) y realizar su comparación con la normatividad ambiental estipulada en la Resolución No. 0627 del 7 de abril de 2006.

El monitoreo de ruido fue desarrollado por la empresa DNA Diagnóstico Ambiental S.A.S., acreditada mediante la Resolución No. 1189 de 13 de octubre de 2021 emitida por el IDEAM, para realizar muestreos y análisis. La resolución de acreditación, plan de muestreo, datos de campo, certificados de calibración, y registro fotográfico, se encuentran disponibles en ANEXOS_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Ruido_Amb.

La metodología empleada corresponde al Procedimiento de Medición para Ruido Ambiental. Capítulo II, Anexo 3 de la Resolución No. 0627 del 7 de abril de 2006, del

entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Los valores de referencia para ruido ambiental están dados por la Resolución 0627 de 2006 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, están dados en la Tabla 2 de dicha Resolución. Debido a que la zona bajo estudio se encuentra inmersa dentro del sector B, según se describe en la Resolución 0627.

A. Selección y ubicación de sitios de medición

La ubicación de los puntos de medición se estableció para los sitios definidos en conjunto por la empresa AUTOPISTAS URABA S.A.S y el Laboratorio Diagnóstico Ambiental S.A.S. En la Tabla 5.217, se tabula la ubicación y georreferenciación de los puntos de medición seleccionados.

Tabla 5.217 Identificación y georreferenciación de los puntos de monitoreo de ruido ambiental

ID	Coordenada CTM12	
	X	Y
M_E1	4620205,49	2359572,67
M_E2	4620392,74	2359359,99
M_E3	4620278,48	2360086,58
BP_E1	4621870,37	2356172,28
RA1	4620395,79	2359357,50
RA2	4620068,43	2360506,88
RA3	4619938,39	2359991,76

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

NOTA IMPORTANTE: Para la construcción del modelo de ruido ambiental, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en el monitoreo realizado entre el 31 de julio y el 4 de agosto de 2022, en cuatro estaciones de medición: M_E1 (Establo Finca La Almidonera), M_E2 (La Almidonera), M_E3 (La Ladilla) y BP_E1 (Casa ZODME). Ver los Anexos_C5_1/ 5_1_10_Atmosfera/ Ruido_Amb/ RA-AGO2022. Estos datos fueron utilizados para complementar los resultados obtenidos en los monitoreos realizados el 17 y 19 de noviembre de 2024 (para los puntos RA1 y RA2) 06 y 07 de septiembre de 2025 (para el punto RA3), con el fin de mejorar la precisión del modelo.

En la [Figura 5.289](#); se muestra la ubicación de las localizaciones seleccionadas para las mediciones de ruido ambiental dentro de la zona de influencia del proyecto construcción de la variante al casco urbano del municipio del Mutatá.



Figura 5.289. Ubicación de puntos de medición de ruido ambiental, vista Satelital.
 Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

B. Tiempo de medición

El número de horas de medición para cada periodo fue de 1 hora para la jornada diurna y de 1 hora para la jornada nocturna, determinada según el alcance de la medición, cumpliendo con lo establecido en el anexo 3, capítulo III “Procedimiento para determinación del número de puntos y de los tiempos de medición para ruido ambiental” de la resolución 0627 de 2006.

Cada medición se distribuye en periodos de diez (10) minutos, hasta completar una hora de medición continua, para lo cual cada medición consta de dos (2) mediciones parciales distribuidas en tiempos iguales, cada una de las cuales se realizó en posiciones del micrófono, así: Norte, Sur, Este, Oeste y Vertical (hacia arriba).

C. Descripción de método de medición

A continuación, en la Tabla 5.218 se realiza una descripción del proceso de medición utilizado para la medición de los puntos de ruido.

Tabla 5.218. Descripción del método de medición empleada.

Método	Descripción
Ruido Ambiental. Capítulo II, Anexo 3 de la Resolución 0627 de 2006	El procedimiento de medición fue realizado en base a lo reglamentado por la Resolución 0627 de 2006, que establece la norma Nacional de Ruido, donde se destacan las siguientes etapas: ➤ Se realizó verificación acústica a una frecuencia de 1 kHz y a un nivel de presión sonora de 114.0 dB antes y después de las mediciones. ➤ Se ubico el equipo de medición sobre un trípode a cuatro (4) metros de altura con respecto al piso. ➤ Se empleó un dispositivo protector contra el viento para minimizar el efecto del viento en las mediciones. ➤ Se registraron los niveles de presión sonora equivalente (L_{eq}) en cada uno de los puntos. ➤ Se realizaron medidas con análisis de frecuencia en tercios de octava. ➤ Las mediciones se realizaron para el horario diurno entre las 7:01 y las 21:00 horas y para el periodo nocturno entre las 21:01 y las 7:00 horas, según lo dispuesto en el Artículo 2 del capítulo 1 de la norma nacional de ruido ambiental. ➤ Los niveles de presión sonora se determinaron con el sonómetro programado con el filtro de ponderación espectral A y respuesta temporal lenta (slow) e impulsiva (impulsive). ➤ Las mediciones se hicieron en dirección de las cuatro (4) coordenadas geográficas (Norte, Este, Sur y Oeste) y en posición vertical, distribuida uniformemente en una hora. ➤ Cada punto constó de una jornada de cuatro (4) mediciones distribuidas entre los periodos diurno-semana, nocturno-semana, diurno-fin de semana y nocturno-fin de semana.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

D. Descripción y estado de los equipos de medición

A continuación, en las [Tabla 5.219](#) y [Tabla 5.220](#) se realiza una descripción de los equipos empleados para los [empleados para el monitoreo de los puntos RA1 y RA2](#).

Tabla 5.219 Relación de los equipos de medición empleados

Instrumento	Tipo	Marca	N° Serie
Sonómetro	SV977	SVANTEK	45401
Calibrador - Pistófono	CAL200	Larson Davis	17652
Estación Meteorológica	6250	Davis	MT211214021

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.220 Descripción de los equipos de medición empleados para el monitoreo de los puntos RA1 y RA2

Equipo	Imagen	Descripción
Sonómetro SV977		El SV 977D es un medidor de nivel de ruido y vibraciones de Clase 1 diseñado para mediciones de acústica de edificios, ruido ocupacional y ruido ambiental. El medidor es un sucesor del SVAN 977A que incorpora el nuevo micrófono MK255 de 1/2" que ofrece un amplio rango de frecuencias a partir de 3 Hz y una excelente estabilidad de la sensibilidad a largo plazo. El SV 977D incorpora una interfaz Bluetooth® para la conexión inalámbrica con aplicaciones de teléfonos inteligentes como Building Acoustics Assistant, que amplía las capacidades de medición dedicadas a la acústica de edificios.
Estación meteorológica		La estación meteorológica Davis Vantage Vue, ofrece observación meteorológica exacta y confiable en un sistema integral fácil de instalar. Ésta contiene un compacto conjunto de sensores para lecturas al aire libre que se configura en minutos y comienza a enviar datos en forma inalámbrica a la consola situada en cualquier lugar. El módulo de sensores está totalmente integrado, es resistente a la corrosión y está fabricado para resistir toda la inclemencia del clima. A través de esta estación, se podrán obtener datos actuales como la temperatura y humedad al aire libre y bajo techo, la presión barométrica, precipitación y la velocidad y dirección del viento. También se presentan íconos de pronóstico meteorológico, alarmas y mucho más
Calibrador CAL200		El Calibrador de sonido clase 1, se utiliza para calibrar micrófonos de medición de clase 1, sonómetros y otros equipos de medición de nivel sonoro. Como calibrador de micrófono preciso, genera una señal de referencia seleccionable de 94 o 114 dB a una frecuencia de 1 kHz. Señal de referencia de 94 o 114 dB a una frecuencia de 1 kHz

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, para el monitoreo del punto RA3 se emplearon los equipos enunciados en la Tabla 5.221.

Tabla 5.221 Descripción de los equipos de medición empleados para el monitoreo del punto
RA3

Equipo	Imagen	Descripción
Sonómetro XL2		Sonómetro Clase 2 diseñado para mediciones de ruido ambiental y emisión de ruido. Este equipo cuenta con la capacidad de calcular en tiempo real los niveles de presión sonora promedio LAeq, LAeq, y LN90, tanto para los niveles ponderados como para el espectro frecuencial en bandas de tercios de octava, lo que lo convierte en el equipo ideal para mediciones de emisión de ruido cuando las fuentes no pueden ser apagadas, como es el caso de las plantas de producción de línea continua. Características principales Sonómetro Clase 2 conforme con • IEC 61672:2013, IEC 61672:2003, IEC 61260:2014, IEC 61260:2003, IEC 60651, IEC 60804. Ruido en el ámbito laboral, emisión de ruido y formación. Fácil manejo con configuraciones de usuario. Medición de SPL actual, Lmin, Lmax, Lpeak, Leq, Lp. Registro de historia temporal. Registro de ponderación de frecuencias en A, C y Z simultáneos. Ponderación temporal en Fast, Slow e Impulse simultáneos. Análisis frecuencial en octavas (1/1) y en tercio de octavas (1/3) Rango de medición de 27-146 dB.
Estación meteorológica BTMETER		Anemómetro de alta precisión para medir la velocidad del viento (0.3 ~ 137.8 ft/s) con múltiples modos y unidades conmutables. Incluye indicadores meteorológicos como presión barométrica (calibrable), temperatura, humedad, punto de rocío, sensación térmica y altitud. Compatible con Bluetooth para monitoreo y exportación de datos a Excel. Cuenta con sensor de copa de 360°, brújula integrada, pantalla LCD retroiluminada y montaje estándar de 1/4". Ideal para actividades al aire libre y uso técnico.

Equipo	Imagen	Descripción
Calibrador CAL200		El Calibrador de sonido clase 1, se utiliza para calibrar micrófonos de medición de clase 1, sonómetros y otros equipos de medición de nivel sonoro. Como calibrador de micrófono preciso, genera una señal de referencia seleccionable de 94 o 114 dB a una frecuencia de 1 kHz. Señal de referencia de 94 o 114 dB a una frecuencia de 1 kHz

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

E. Identificación de los puntos y equipos de medición

En la Tabla 5.222, se presenta el registro fotográfico, ubicación e identificación de los equipos utilizados para el monitoreo de los contaminantes establecidos en el estudio, para la ubicación de monitoreo identificada como Punto 1. "CA1".

Tabla 5.222 Descripción del sitio de muestreo del Punto 1 "CA1".

INFORMACIÓN GENERAL									
Punto	Punto 1	Nombre	CA1	Departamento	Antioquia	Municipio	Mutatá	Vereda	N/A
Altitud (m.s.n.m.)		120	COORD WGS 84	N W	7°14'21.12" 76°26'16.80"		Descripción del punto	Punto de monitoreo de ruido ambiental localizado en zona plana con presencia de especies arbóreas menores en sentido norte y sur a una distancia de 20 metros, viviendas familiares en sentido este y oeste a 15 metros y el río Mutatá en sentido sureste a 77 metros	
Altura del suelo (m)		4	MAGNA SIRGAS CTM12	X Y	4620395.79 2359357.50				
Sector de Restricción Resolución N°0627 de 2006		Sector C. Ruido Intermedio Restringido		Subsector	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, vías troncales, autopistas, vías arterias, vías principales.				
CONFIGURACIÓN DE LA ESTACIÓN									
Parámetro	Equipo de muestreo	Marca	Modelo	serial	Equipo verificación	Marca	Modelo	Serial	
Ruido ambiental	Sonómetro	Svantek	SV977	45401	Calibrador	Larson Davis	CAL200	17652	
REGISTRO FOTOGRAFICO									



Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.223, se presenta el registro fotográfico, ubicación e identificación de los equipos utilizados para el monitoreo de los contaminantes establecidos en el estudio, para la ubicación de monitoreo identificada como Punto 2. "CA2".

Tabla 5.223 Descripción del sitio de muestreo del Punto 2 "CA2".

INFORMACIÓN GENERAL									
Punto	Punto 2	Nombre	CA2	Departamento	Antioquia	Municipio	Mutatá	Vereda	N/A
Altitud (m.s.n.m.)	129	COORD. WGS 84	N	7°14'58.42"		Descripción del punto		Punto de monitoreo de ruido ambiental localizado a un costado de la vía Mutatá - Caucheras con alto flujo vehicular tanto liviano como pesado, con presencia de pastos bajos y arbustos de baja talla en sentido noroeste y sureste, en sentido este se localiza cementerio del municipio de Mutatá a 5 metros.	
			W	76°26'27.74"					
Altura del suelo (m)	4	MAGNA SIRGAS CTM12	X	4620068.43					
			Y	2360506.88					
Sector de Restricción Resolución N°0627 de 2006	Sector C. Ruido Intermedio Restringido			Subsector	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, vías troncales, autopistas, vías arterias, vías principales.				
CONFIGURACIÓN DE LA ESTACIÓN									
Parámetro	Equipo de muestreo	Marca	Modelo	serial	Equipo verificación	Marca	Modelo	Serial	
Ruido ambiental	Sonómetro	Svantek	SV977	45401	Calibrador	Larson Davis	CAL200	17652	

REGISTRO FOTOGRAFICO



Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la Tabla 5.224, se presenta el registro fotográfico, ubicación e identificación de los equipos utilizados para el monitoreo de los contaminantes establecidos en el estudio, para la ubicación de monitoreo identificada como Punto 3. "RA3".

Tabla 5.224 Descripción del sitio de muestreo del Punto 3 "RA3".

INFORMACIÓN GENERAL DEL PUNTO DE MONITOREO							
Nombre estación	RA3	Descripción entorno local	El punto de monitoreo se encuentra ubicado a una distancia aproximada de 15 metros de una vía destapada, al inicio de una pequeña zona poblada. El sitio se localiza sobre un suelo de concreto estable y firme, con presencia de estructuras construidas en dirección este y oeste, mientras que hacia el norte y sur llanos.				
Departamento	Antioquia						
Municipio	Mutatá	Sector de Restricción	Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado.				
Vereda	Mutatá						
Altitud (m.s.n.m.)	123	Subsector	Residencial suburbana.				
Altura del suelo (m)	4						
CONFIGURACIÓN DE LA ESTACIÓN							
Parámetro	Equipo de medición	Marca	Modelo	Equipo verificación	Marca	Modelo	Serie
Ruido ambiental	Sonómetro	NTI	XL2	Calibrador	LARSON DAVIS	CAL200	16589
	Estación Meteorológica	BTMETER	BT8806W M-APP				
REGISTRO FOTOGRAFICO							



Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

F. Condiciones meteorológicas

A continuación, se realiza un análisis de las principales variables que pueden influir dentro de los resultados de las mediciones y que pueden ser utilizadas para buscar correlaciones entre los resultados y estas. Para el tiempo de medición en la Tabla 5.225 las condiciones meteorológicas de los puntos de medición (ID).

Tabla 5.225 Datos de las condiciones meteorológicas de los puntos durante las mediciones

ID	FECHA	Jornada evaluación	Uso de pantalla a antiviento	Presencia de lluvia	Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Condiciones ambientales		
							Presión (mmHg)	Temperatura °C	Humedad %
1	19/11/2024	Diurno semana	SI	NO	SSE	0.0	750.5	26.5	88
	19/11/2024	Nocturno semana	SI	NO	SSE	0.0	748.2	24.1	92
	17/11/2024	Diurno dominical	SI	NO	S	0.3	745.5	24.9	83
	17/11/2024	Nocturno dominical	SI	NO	NE	0.0	745.1	22.3	89
2	19/11/2024	Diurno semana	SI	NO	SW	0.0	749.1	24.6	92
	19/11/2024	Nocturno semana	SI	NO	S	0.0	748.4	23.7	94
	17/11/2024	Diurno dominical	SI	NO	NE	0.2	745.2	27.4	77
	17/11/2024	Nocturno dominical	SI	NO	WNW	0.0	745.4	21.6	92
3	6/09/2025	Diurno semana	SI	NO	SW	0,9	674,8	19,6	85

I D	FECHA	Jornada evaluación	Uso de pantalla a antiviento	Presencia de lluvia	Dirección del viento	Velocidad del viento (m/s)	Condiciones ambientales		
							Presión	Temperatura	Humedad
							(mmHg)	°C	%
	6/09/2025	Nocturno semana	SI	NO	NNE	1	674,6	20,4	83
	7/09/2025	Diurno dominical	SI	NO	S	0,8	674,8	22,1	90
	7/09/2025	Nocturno dominical	SI	NO	ESE	0.6	674.8	19,4	90

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.6.3 Resultados de medición

A continuación, se tabulan los resultados de las mediciones realizadas para las dos (2) puntos de muestreo, definidos con el fin de identificar los niveles de presión sonora en el área de influencia definida para el estudio.

A. Resultados de la medición de ruido ambiental para el Punto 1 "RA 1"

En la Tabla 5.226, se tabulan los resultados de las mediciones de ruido ambiental realizadas para los periodos diurno semana, nocturno semana, diurno fin de semana o feriado y nocturno fin de semana o feriado, con sus respectivas correcciones, tiempos de medición, y niveles de presión acústica medidos (LAeq,Ti) y corregidos (LRAeq,Ti).

Tabla 5.226 Resultados de los niveles de ruido ambiental, Punto 1 "RA 1".

JORNADA	FECHA	Medición	T _i	L _{Aeq,Ti}	K _{Ti}	K _{ji}	K _{Si}	K _{Max,i}	L _{RAeq,Ti}
			min	dBA	dBA	dBA	dBA	dBA	dBA
Diurno semana	2024-11-19	Norte	10	57.2	6	0	0	6	63.2
		Este	10	58.3	6	0	0	6	64.3
		Sur	10	60.0	6	0	0	6	66.0
		Oeste	10	59.1	6	0	0	6	65.1
		Arriba	10	56.0	6	0	0	6	62.0
		T---->	50	L _{Aeq,T} ---->		58.3	L _{RAeq,T} ---->		64.3
Nocturno semana	2024-11-19	Norte	10	52.0	3	0	0	3	55.0
		Este	10	54.9	3	0	0	3	57.9
		Sur	10	53.7	3	0	0	3	56.7
		Oeste	10	52.9	6	0	0	6	58.9
		Arriba	10	56.1	6	0	0	6	62.1
		T---->	50	L _{Aeq,T} ---->		54.2	L _{RAeq,T} ---->		58.8
Diurno fin de semana	2024-11-17	Norte	10	53.8	6	0	0	6	59.8
		Este	10	53.1	6	0	3	6	59.1
		Sur	10	56.5	6	0	0	6	62.5
		Oeste	10	52.6	6	0	3	6	58.6
		Arriba	10	54.3	6	0	0	6	60.3
		T---->	50	L _{Aeq,T} ---->		54.3	L _{RAeq,T} ---->		60.3
Nocturno fin de semana	2024-11-17	Norte	10	52.4	6	0	0	6	58.4
		Este	10	54.2	6	0	0	6	60.2
		Sur	10	52.7	6	0	0	6	58.7
		Oeste	10	53.4	6	0	0	6	59.4
		Arriba	10	57.9	6	0	0	6	63.9
		T---->	50	L _{Aeq,T} ---->		54.6	L _{RAeq,T} ---->		60.6

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para los puntos de ruido ambiental analizados, se registraron niveles de presión sonora corregidos que oscilan entre 60.3 dBA a 64.3 dBA en periodo diurno y entre 58.8 dBA a 60.6 dBA en periodo nocturno. Los niveles de ruido en la zona de medición se puede asociar su comportamiento a la presencia de fuentes esporádicas de ruido identificadas durante el monitoreo, como los sonidos producidos por el tránsito frecuente de vehículos, motocicletas y camiones, entre otros, así mismo, el paso de transeúntes hablando, el paso del río Mutatá, música y los sonidos emitidos por la fauna local, compuesta por aves e insectos y fauna domestica como perros y gallos. Es importante mencionar que, durante el monitoreo, no se percibieron fuentes de ruido permanentes, infiriendo que los resultados registrados, son acordes a las condiciones normales y a las actividades cotidianas desarrolladas en la zona. De la Tabla 5.226, se identifica la presencia de componentes de bajas frecuencias, impulsos y tonales.

Por otro lado, en la Figura 5.290 se muestran las frecuencias promedio (compuesta por el promedio de las cinco mediciones realizadas en las direcciones Norte, Este, Sur, Oeste y Arriba) para los periodos de medición, donde se pueden identificar la presencia de los tonos puros marcados con las flechas de color rojo, los cuales pueden dar lugar a posibles correcciones tonales.

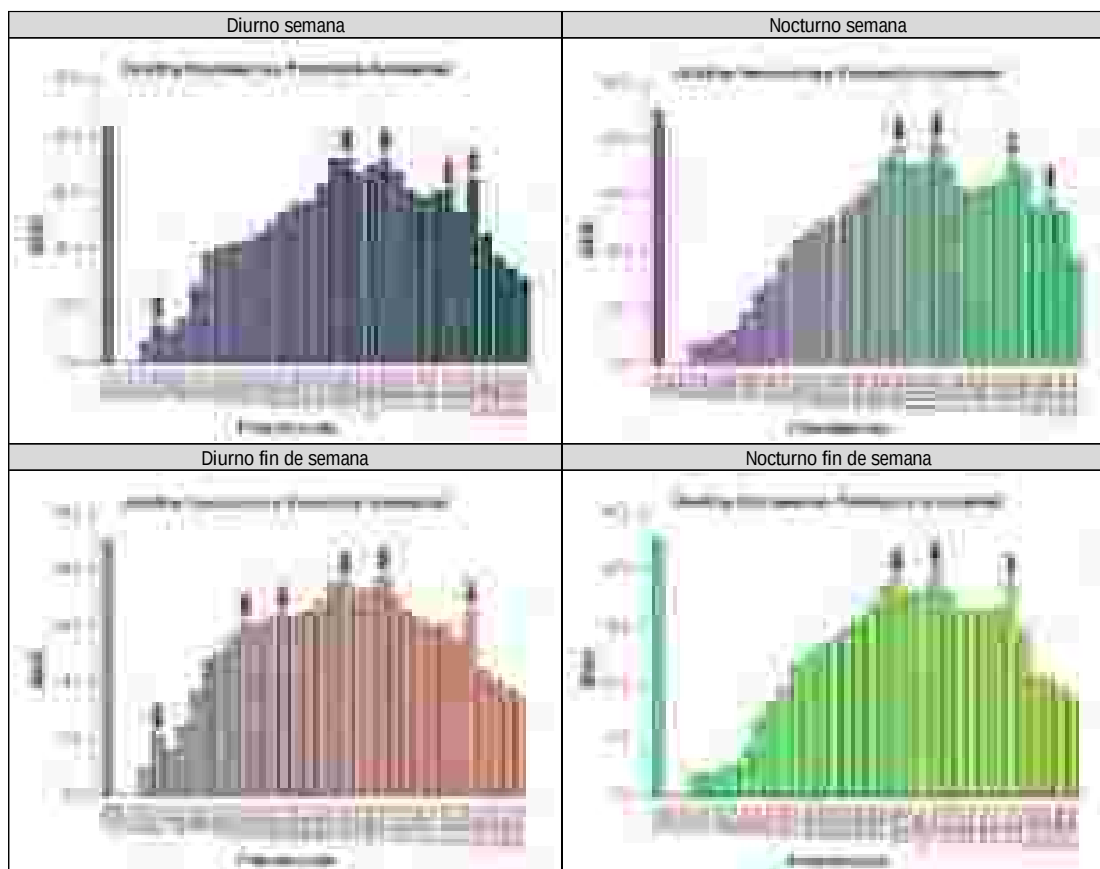


Figura 5.290 Diagrama de frecuencias promedio para los periodos medidos del Punto 1.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

B. Resultados de la medición de ruido ambiental para el Punto 2 "RA 2"

En la Tabla 5.227, se tabulan los resultados de las mediciones de ruido ambiental realizadas para los periodos diurno semana, nocturno semana, diurno fin de semana o feriado y nocturno fin de semana o feriado, con sus respectivas correcciones, tiempos de medición, y niveles de presión acústica medidos ($LA_{eq,Ti}$) y corregidos ($LRA_{eq,Ti}$).

Tabla 5.227 Resultados de los niveles de ruido ambiental, Punto 2 “RA 2”.

JORNADA	FECHA	Medición	T _i	L _{Aeq,Ti}	K _{Ti}	K _{li}	K _{Si}	K _{Max,i}	L _{RAeq,Ti}
			min	dBA	dBA	dBA	dBA	dBA	dBA
Diurno semana	2024-11-19	Norte	10	66.5	3	0	0	3	69.5
		Este	10	66.7	3	0	0	3	69.7
		Sur	10	64.8	6	0	0	6	70.8
		Oeste	10	67.6	0	0	0	0	67.6
		Arriba	10	66.2	3	0	0	3	69.2
		T---->	50	L _{Aeq,T} ---->		66.5	L _{RAeq,T} ---->		69.5
Nocturno semana	2024-11-19	Norte	10	68.5	3	0	0	3	71.5
		Este	10	73.3	6	0	0	6	79.3
		Sur	10	68.3	3	0	0	3	71.3
		Oeste	10	64.6	3	0	0	3	67.6
		Arriba	10	67.6	3	0	0	3	70.6
		T---->	50	L _{Aeq,T} ---->		69.4	L _{RAeq,T} ---->		74.1
Diurno fin de semana	2024-11-17	Norte	10	66.9	0	0	0	0	66.9
		Este	10	67.8	3	0	0	3	70.8
		Sur	10	66.5	0	0	0	0	66.5
		Oeste	10	66.7	3	0	0	3	69.7
		Arriba	10	65.3	3	0	3	3	68.3
		T---->	50	L _{Aeq,T} ---->		66.7	L _{RAeq,T} ---->		68.7
Nocturno fin de semana	2024-11-17	Norte	10	65.1	6	0	0	6	71.1
		Este	10	64.5	3	0	0	3	67.5
		Sur	10	66.7	3	0	0	3	69.7
		Oeste	10	63.1	6	0	0	6	69.1
		Arriba	10	67.8	6	0	0	6	73.8
		T---->	50	L _{Aeq,T} ---->		65.8	L _{RAeq,T} ---->		70.8

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para los puntos de ruido ambiental analizados, se registraron niveles de presión sonora corregidos que oscilan entre 68.7 dBA a 69.5 dBA en periodo diurno y entre 70.8 dBA a 74.1 dBA en periodo nocturno. Los niveles de ruido en la zona de medición se puede asociar su comportamiento a la presencia de fuentes esporádicas de ruido identificadas durante el monitoreo, como los sonidos producidos por el tránsito frecuente de vehículos livianos y pesado, así mismo, el sonido de campanas de iglesia a lo lejos y los sonidos emitidos por la fauna local, compuesta por aves e insectos. Es importante mencionar que, durante el monitoreo, no se percibieron fuentes de ruido permanentes, infiriendo que los resultados registrados, son acordes a las condiciones normales y a las actividades cotidianas desarrolladas en la zona. De la Tabla 5.227, se identifica la presencia de componentes de bajas frecuencias, impulsos y tonales.

Por otro lado, en la Figura 5.291 se muestran las frecuencias promedio (compuesta por el promedio de las cinco mediciones realizadas en las direcciones Norte, Este, Sur, Oeste y Arriba) para los periodos de medición, donde se pueden identificar la presencia de los tonos puros marcados con las flechas de color rojo, los cuales pueden dar lugar a posibles correcciones tonales.

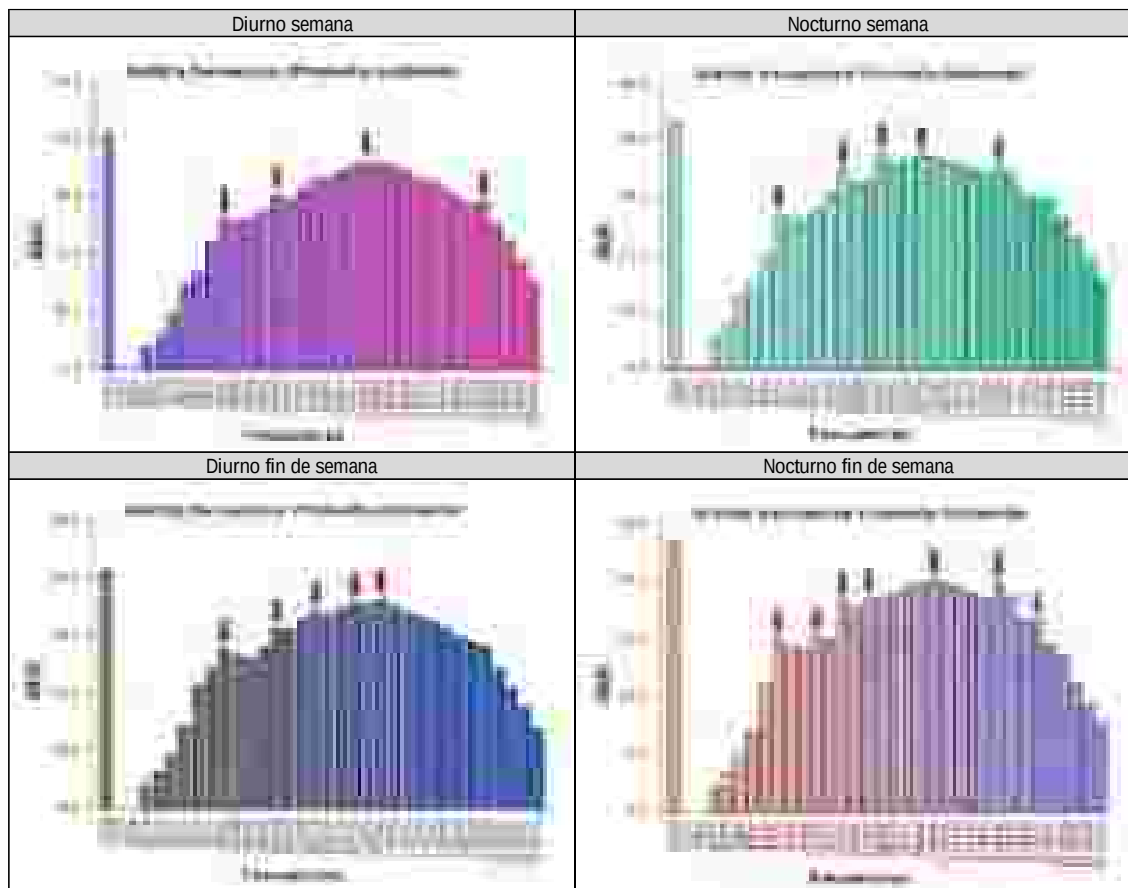


Figura 5.291 Diagrama de frecuencias promedio para los periodos medidos del Punto 2.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

C. Resultados de la medición de ruido ambiental para el Punto 3 "RA 3"

Para el Punto RA3 se registraron niveles de presión sonora corregidos que oscilan entre 63.5 dBA a 73.0 dBA en periodo diurno y entre 71.6 dBA a 75.0 dBA en periodo nocturno. En la Tabla 5.228 se relacionan los resultados y la presencia de componentes de bajas frecuencias, impulsos y tonales.

Tabla 5.228. Resultados de los niveles de ruido ambiental, Punto 3 “RA 3”.
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Por otro lado, en la Figura 5.292 se muestran las frecuencias promedio (compuesta por el promedio de las cinco mediciones realizadas en las direcciones Norte, Este, Sur, Oeste y Arriba) para los periodos de medición, donde se pueden identificar la presencia de los tonos puros marcados con las flechas de color rojo, los cuales pueden dar lugar a posibles correcciones tonales.

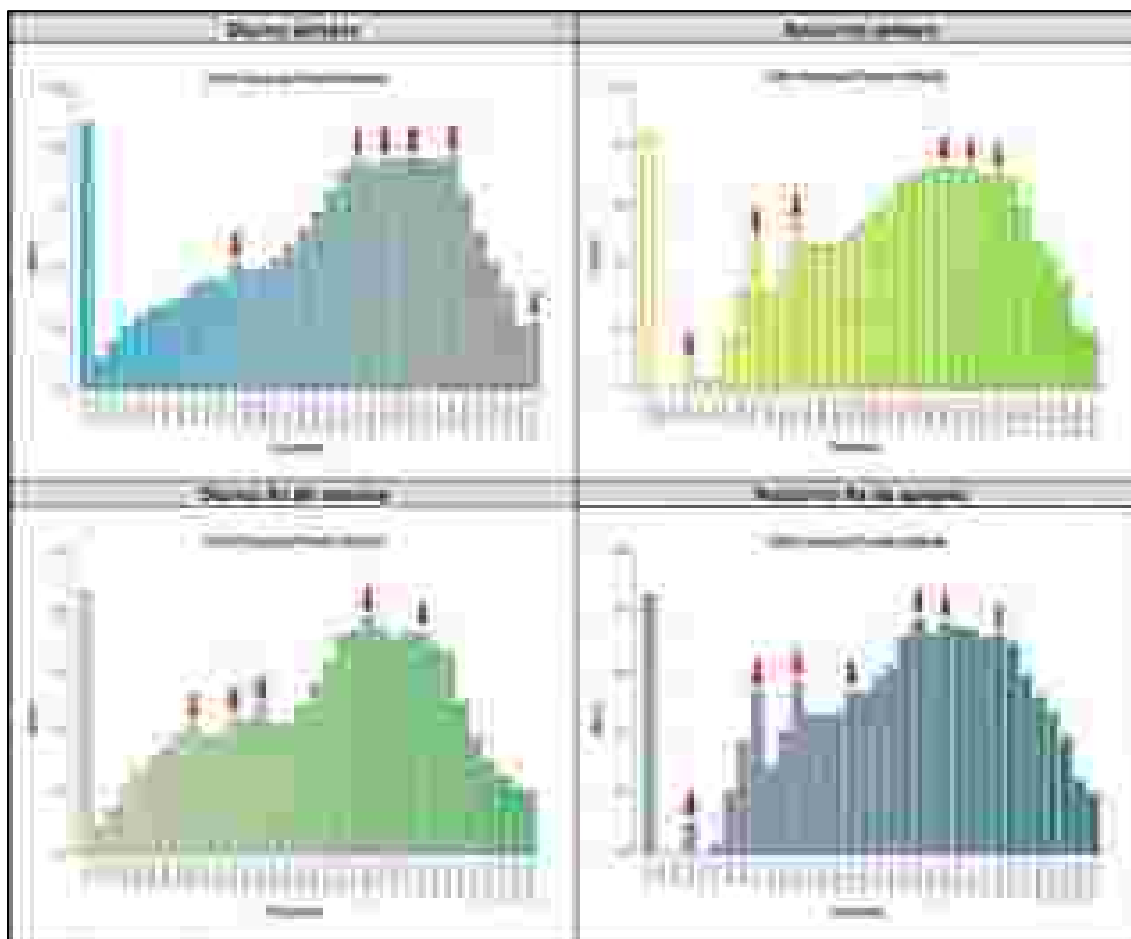


Figura 5.292. Diagrama de frecuencias promedio para los periodos medidos punto RA3
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

D. Comparación resultados con normatividad

En la Tabla 5.229, se resume el nivel de cumplimiento con respecto a la Resolución 0627 de 2006.

Tabla 5.229 Nivel de cumplimiento con la Resolución 0627 de 2006.

I D	Fecha	Jornada de evaluación	L _{Aeq} (dBA)	L _{RAeq} (VM) (dBA)	U (dBA)	Sector	Límite Norma (N) (dBA)	VM+U (dBA)	VM+U±N	Sobrepaso de VM+U sobre N
1	2024-11-19	Diurno semana	58.3	64.3	±1.8	C	80.0	66.1	Cumplimiento	---
	2024-11-19	Nocturno semana	54.2	58.8	±1.9	C	70.0	60.7	Cumplimiento	---
	2024-11-17	Diurno dominical	54.3	60.3	±1.7	C	80.0	62.0	Cumplimiento	---
	2024-11-17	Nocturno dominical	54.7	60.7	±2.2	C	70.0	62.8	Cumplimiento	---
2	2024-11-19	Diurno semana	66.5	69.5	±1.3	C	80.0	70.8	Cumplimiento	---

ID	Fecha	Jornada de evaluación	L _{Aeq} (dBA)	L _{RAeq} (VM) (dBA)	U (dBA)	Sector	Límite Norma (N) (dBA)	VM+U (dBA)	VM+U ≤ N	Sobrepaso de VM+U sobre N
	2024-11-19	Nocturno semana	69.4	74.2	±3.2	C	70.0	77.3	Incumplimiento	7.3
	2024-11-17	Diurno dominical	66.7	68.8	±1.3	C	80.0	70.1	Cumplimiento	---
	2024-11-17	Nocturno dominical	65.8	70.8	±1.9	C	70.0	72.7	Incumplimiento	2.7
3	2025-09-06	Diurno semana	70.6	73.0	±2.3	D	55.0	75.4	Incumplimiento	20.4
	2025-09-06	Nocturno semana	67.1	71.6	±1.6	D	45.0	73.2	Incumplimiento	28.2
	2025-09-07	Diurno dominical	60.9	63.5	±2.7	D	55.0	66.2	Incumplimiento	11.2
	2025-09-07	Nocturno dominical	69.0	75.0	±3.2	D	45.0	78.1	Incumplimiento	33.1

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

NOTA: Para estimar el grado de incumplimiento se aplica la regla de decisión conservadora, expuesta en el numeral 4.1 del Informe de Ruido Ambiental, la cual toma en cuenta la siguiente desigualdad $VM+U \leq N$, en caso de cumplirse se dice que hay Cumplimiento de la medición con relación a la Normatividad en caso contrario se indica que hay Incumplimiento.

E. Análisis e interpretaciones de los resultados

Los resultados entregados para los puntos evaluados son válidos para el día y condiciones de evaluación, considerando que para los niveles reportados son función de las actividades que se realicen en la zona objeto de estudio y en menor grado de la influencia de las condiciones atmosféricas.

Se aclara que los valores de niveles de ruido aquí reportados no hacen referencia a una actividad o fuente específica, son valores obtenidos en el punto de medición cuya procedencia hace parte de las condiciones meteorológicas de la zona y las fuentes de influencia en la misma.

Al analizar los resultados de la Tabla 5.229, se encuentra lo siguiente:

- De las 8 mediciones realizadas para los puntos de medición RA1 y RA2, se encuentra que 2 de estas superan los niveles permisibles dados en la Resolución 0627 de 2006, lo que equivale a un 25% de las mediciones.
- De las 4 mediciones realizadas para el punto de medición RA3, se encuentra que en las 4 de estas se superan los niveles permisibles dados en la Resolución 627 de 2006, lo que equivale a un 100% de las mediciones.
- Para los puntos RA1 y RA2, las excedencias en relación con la regla de decisión $M+U \leq N$, se encuentra que para el periodo diurno no se presenta excedencia, mientras en el periodo nocturno la máxima excedencia es de 7.3 y se presenta en semana.
- Para el punto RA3, en el sector que más se supera el límite permisible es en el sector D, con 4 mediciones por encima de los niveles permisibles dados en la Resolución 627 de 2006.

F. Conclusiones de los resultados de monitoreo

A partir de los resultados obtenidos del monitoreo de ruido ambiental, desarrollado en el área del Proyecto MODIFICACION DE LICENCIA VARIANTE MUTATÁ, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se realizaron mediciones en **tres (3)** puntos de ruido ambiental y teniendo en cuenta las actividades que se evidenciaron en el área del proyecto, se clasificaron en el sector acorde con **los estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental, establecidos en la Resolución 627 de 2006.**

Para los puntos de monitoreo RA1 y RA2, se concluye lo siguiente:

- Los puntos de monitoreo registraron niveles de presión sonora en horario diurno, que oscilaron de 64.3 dBA (RA1) a 69.5 dBA (RA2) en día de semana o hábil y de 60.3 dBA (RA1) a 68.7 dBA (RA2) en día dominical o fin de semana, sin presentar sobrepasos máximos para ningún periodo diurno con respecto a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución N° 627 del 7 de abril de 2006.
- Los puntos de monitoreo registraron niveles de presión sonora en horario nocturno, que oscilaron de 58.8 dBA (RA1) a 74.1 dBA (RA2) en día de semana o hábil y de 60.6 dBA (RA1) a 70.8 dBA (RA2) en día dominical o fin de semana, presentando sobrepasos máximos de 7.3 dBA (RA2) en día hábil o semana y 2.7 dBA (RA2), en día no hábil, con respecto a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución N° 627 del 7 de abril de 2006.

Para el punto de monitoreo RA3, se concluye lo siguiente:

- El punto de monitoreo registró niveles de presión sonora en horario diurno, que oscilaron de 73.0 dBA (RA3) en día de semana o hábil y de 63.5 dBA (RA3) en día dominical o fin de semana, presentando sobrepasos máximos de 20.4 dBA (RA3) en día hábil o semana y 11.2 dBA (RA3), en día no hábil, con respecto a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución N° 627 del 7 de abril de 2006.
- El punto de monitoreo RA3 registro niveles de presión sonora en horario nocturno, que oscilaron de 71.6 dBA (RA1) en día de semana o hábil y de 75.0 dBA (RA1) en día dominical o fin de semana, presentando sobrepasos máximos de 28.2 dBA (RA1) en día hábil o semana y 33.1 dBA (RA1), en día no hábil, con respecto a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución N° 627 del 7 de abril de 2006.

5.1.10.6.4 Modelo de ruido ambiental

El desarrollo del modelo de ruido ambiental se realizó mediante el uso del software SoundPLAN Essential, combina el núcleo de cálculo SoundPLAN con un editor de entrada de datos simplificado para ofrecer una herramienta de modelado de ruido que se puede aprender en minutos, pero lo suficientemente potente como para permitir a los ingenieros hacer la mayoría del modelado de trabajos de ruido. Adecuado para pequeños proyectos, que cuenten con una instalación industrial o algunas carreteras / líneas ferroviarias. Las instalaciones de entrada de datos son menos complejas, pero con interfaces de importación de datos y visualización de modelos sólidos 2D / 3D y el núcleo de cálculo Dynamic Search SoundPLAN estándar, el programa ofrece suficiente flexibilidad y potencia para construir

un modelo de ruido rápidamente y obtener los resultados de impresión listos de forma rápida¹⁷⁶.

A. Ubicación de la fuente de datos meteorológicas

Para las variables meteorológicas requeridas por la aplicación SoundPLAN, se emplean los datos obtenidos Meteoblue, para el año 2023, para las coordenadas mostradas en la Tabla 5.230.

Tabla 5.230 Ubicación de la estación meteorológica utilizada en el desarrollo del modelo de ruido.

Fuente datos	Coordenadas Geográficas WGS84		Coordenadas MAGNAS SIRGAS CTM12		h.s.n.m (m)
	Longitud	Latitud	X	Y	
P1-MET	-76.439594	7.241567	4620215,36	2359629,77	10
Presión atmosférica (mbar)		1000	Temperatura ambiente (°C)		27
%Humedad relativa			84		

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la [Figura 5.293](#), se muestran los datos meteorológicos ingresados al programa SoundPLAN Essential.

¹⁷⁶ (SoundPLAN Essential, 2017)



The screenshot displays the 'Weather Data' (Datos Meteorológicos) section of the SoundPLAN Essential software. It includes various input fields for meteorological parameters such as wind speed, direction, frequency, and temperature, along with checkboxes for different modeling options. The interface is in Spanish and shows a detailed configuration screen for the acoustic simulation.

Figura 5.293 Información meteorológica ingresada al software SoundPLAN Essential.

Fuente: SoundPLAN Essential.

B. Ubicación de la zona de modelación

La zona donde se encuentra ubicado el proyecto, se muestra en la [Figura 5.294](#), el cual se localiza en el Departamento de Antioquia, Municipio de Mutatá, en área suburbana (para una mejor visualización ver el plano incluido en los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Ruido/Mapa_Zona_Estudio. Mientras en la [Figura 5.295](#), se muestra una imagen en Google Earth, donde se puede ver la zona donde se encuentra el proyecto de construcción de modificación de la licencia variante Mutatá, así como el área de modelación definida (polígono rojo).



Figura 5.294 Ubicación de la zona de modelación del proyecto
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

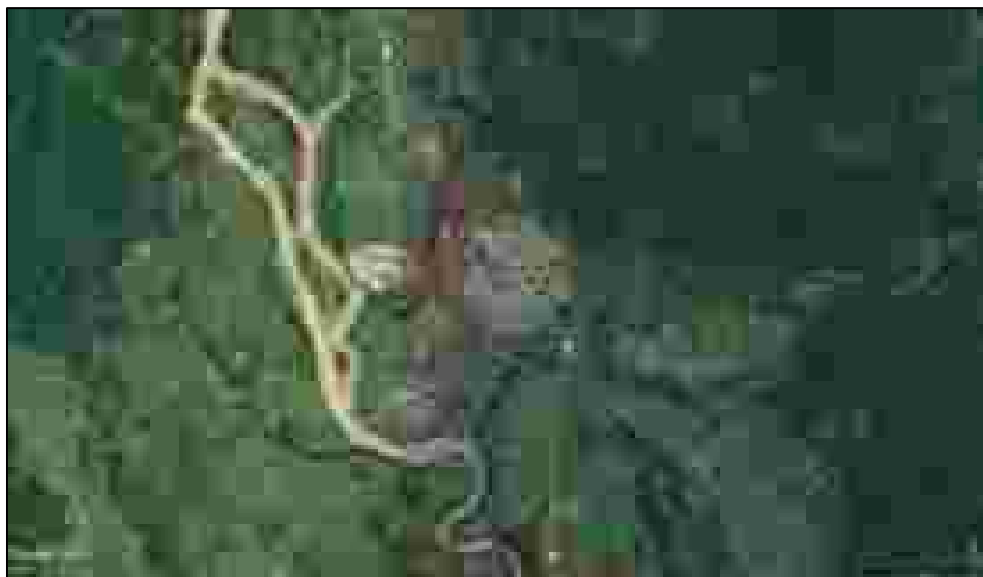


Figura 5.295 Vista cercana de los alrededores del área de la Planta Mutatá de AUTOPISTAS URABÁ SAS

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

C. Ubicación de las fuentes generadoras de ruido

Las fuentes de ruido en la zona cercana de influencia del proyecto son las asociadas a los tramos de vías identificados como VIA_1 a VIA_37, las cuales se muestran en la [Figura 5.296](#). En cuanto a las fuentes lineales se ingresan las asociadas a los ríos FL_1 a FL_2 mostradas también en la en la [Figura 5.297](#).

Por último, se encuentran las fuentes de área (FA_1 a FA_2), que corresponden al área de intervención del proyecto modificación de licencia de la variante, la cual se muestran en la [Figura 5.297](#).

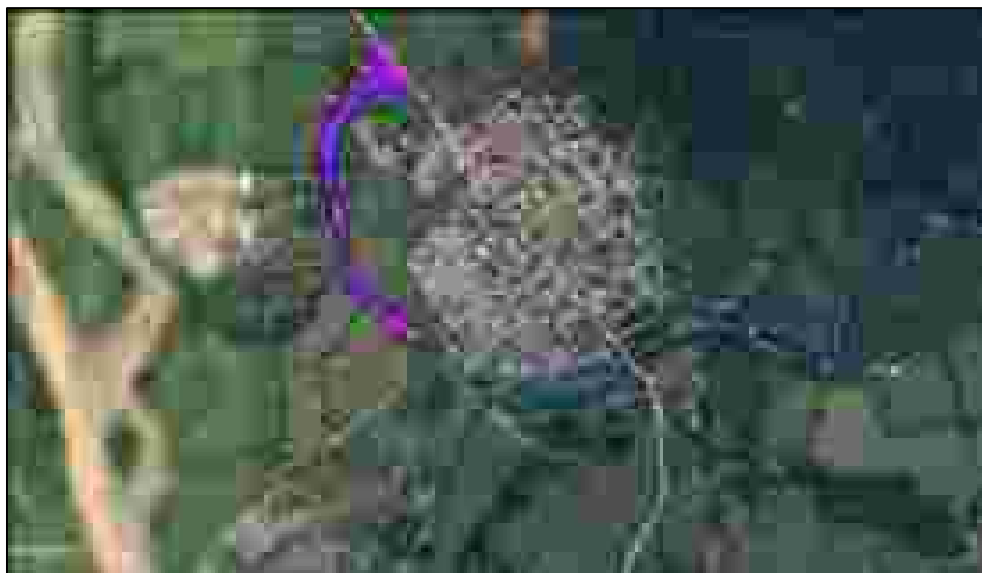


Figura 5.296. Ubicación de las fuentes lineales de influencia del proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.



Figura 5.297 Ubicación de las fuentes de área asociadas al proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Una vez identificadas las fuentes, se debe proceder a la cuantificación, para lo cual se deben establecer los aforos para las vías. Por ello en la Tabla 5.231, se muestran los flujos vehiculares ponderados para los treinta y siete (37) tramos de vías mostradas.

Adicionalmente con el fin de ajustar las predicciones del modelo en relación con los valores medidos en las cinco ubicaciones de medición de ruido (CM1 a CM5) de calibración del modelo, se ajustaron los aforos de los ejes viales y las fuentes existentes). La validez de

los aforos se logra ya que la WG-AEN predice que cuando se trabaja con ejes viales con aforos desconocidos la exactitud de las predicciones tiene un error de 4 dBA, y en la validación del modelo el valor fue inferior en todos los casos a 3 dBA.

Otra aclaración que se debe dar sobre los datos de aforos es que estos representan el valor promedio para todos los días de la semana, y el modelo se calibra solo para el periodo diurno.

Tabla 5.231 Aforos de las vías para los escenarios modelados

ESCENARIO ACTUAL						
VIA	DIA – N° VEHICULOS			NOCHE – N° VEHICULOS		
	LIVIANO S	PESADO S	MOTO S	LIVIANO S	PESADO S	MOTOS
VIA_1	23	34	4	5	7	1
VIA_2	583	840	1277	117	168	256
VIA_3	0	0	0	0	0	0
VIA_4	23	34	4	5	7	1
VIA_5	23	34	4	5	7	1
VIA_6	79	2	1221	16	1	245
VIA_7	180	90	500	36	18	100
VIA_8	269	90	2151	54	18	431
VIA_9	45	23	1882	9	5	377
VIA_10	135	90	1837	27	18	368
VIA_11	135	90	1837	27	18	368
VIA_12	135	90	1837	27	18	368
VIA_13	135	90	1837	27	18	368
VIA_14	45	23	1882	9	5	377
VIA_15	45	23	1882	9	5	377
VIA_16	45	23	1882	9	5	377
VIA_17	45	23	1882	9	5	377
VIA_18	45	23	1882	9	5	377
VIA_19	135	90	1837	27	18	368
VIA_20	135	90	1837	27	18	368
VIA_21	269	90	2151	54	18	431
VIA_22	45	23	1882	9	5	377
VIA_23	135	90	1837	27	18	368
VIA_24	135	90	1837	27	18	368
VIA_25	135	90	1837	27	18	368
VIA_26	135	90	1837	27	18	368
VIA_27	27	13	1129	6	3	226
VIA_28	27	13	1129	6	3	226
VIA_29	27	13	1129	6	3	226
VIA_30	27	13	1129	6	3	226
VIA_31	583	840	1277	117	168	256
VIA_32	606	874	1281	122	175	257
VIA_33	930	516	4660	186	104	932
VIA_34	930	516	1624	186	104	325
VIA_35	0	0	0	0	0	0
VIA_36	0	0	0	0	0	0
VIA_37	0	0	0	0	0	0

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

ESCENARIO CONSTRUCCION						
VIA	DIA – N° VEHICULOS			NOCHE – N° VEHICULOS		
	LIVIANO S	PESADO S	MOTO S	LIVIANO S	PESADO S	MOTOS
VIA_1	47	138	44	5	7	1
VIA_2	595	868	1297	117	168	256
VIA_3	18	78	30	0	0	0
VIA_4	41	112	34	5	7	1
VIA_5	23	34	4	5	7	1
VIA_6	85	28	1231	16	1	245
VIA_7	186	116	510	36	18	100
VIA_8	269	90	2151	54	18	431
VIA_9	45	23	1882	9	5	377
VIA_10	135	90	1837	27	18	368
VIA_11	135	90	1837	27	18	368
VIA_12	135	90	1837	27	18	368
VIA_13	135	90	1837	27	18	368
VIA_14	45	23	1882	9	5	377
VIA_15	45	23	1882	9	5	377
VIA_16	45	23	1882	9	5	377
VIA_17	45	23	1882	9	5	377
VIA_18	45	23	1882	9	5	377
VIA_19	135	90	1837	27	18	368
VIA_20	135	90	1837	27	18	368
VIA_21	269	90	2151	54	18	431
VIA_22	45	23	1882	9	5	377
VIA_23	135	90	1837	27	18	368
VIA_24	135	90	1837	27	18	368
VIA_25	135	90	1837	27	18	368
VIA_26	135	90	1837	27	18	368
VIA_27	27	13	1129	6	3	226
VIA_28	27	13	1129	6	3	226
VIA_29	27	13	1129	6	3	226
VIA_30	27	13	1129	6	3	226
VIA_31	589	890	1287	117	168	256
VIA_32	630	978	1321	122	175	257
VIA_33	942	544	4680	186	104	932
VIA_34	942	544	1644	186	104	325
VIA_35	9	9	15	0	0	0
VIA_36	6	5	10	0	0	0
VIA_37	6	5	01	0	0	0

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

D. Mediciones de ruido ambiental

Dentro del área de influencia, se tomaron cinco (5) puntos de para la calibración del modelo (tres de CM1 a CM5), y la información de este se tabula en la Tabla 5.232 y se muestra en la [Figura 5.298](#).

Tabla 5.232 Ubicación puntos de medición de ruido para calibración del modelo

ID	Coordenada CTM12	
	X	Y
CM1	4620421.80	2359288.67
CM2	4620559.89	2359879.62
CM3	4620022.10	2359971.30
CM4	4619981.35	2360613.71
CM5	4620201.12	2359547.77

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

NOTA IMPORTANTE: Para la construcción del modelo de ruido ambiental, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en el monitoreo realizado entre el 31 de julio y el 4 de agosto de 2022, en cuatro estaciones de medición: M_E1 (Establo Finca La Almidonera), M_E2 (La Almidonera), M_E3 (La Ladilla) y BP_E1 (Casa ZODME). Ver los Anexos_C5_1/ 5_1_10_Atmósfera/ Ruido_Amb/ RA-AGO2022. Estos datos fueron utilizados para complementar los resultados obtenidos en los monitoreos realizados el 17 y 19 de noviembre de 2024 (para los puntos de monitoreo RA1 y RA2) y el 06 y 07 de septiembre de 2025 (para el punto de monitoreo RA3g), con el fin de mejorar la precisión del modelo.

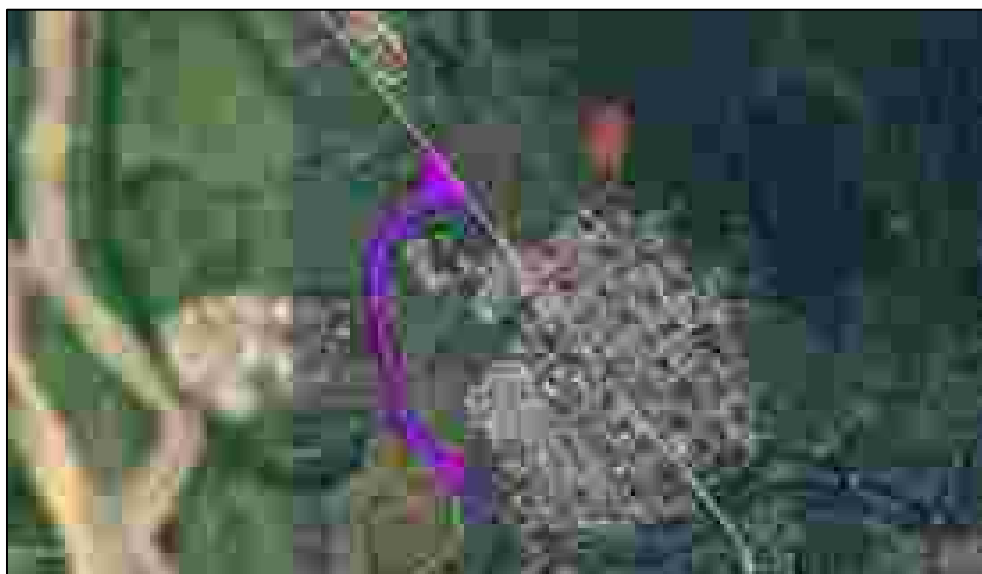


Figura 5.298 Ubicación puntos de medición de ruido para calibración del modelo

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

E. Estimación de los niveles de presión sonora

Para la estimación de los niveles de ruido provenientes de vías vehiculares, se utiliza la información de los aforos tabulados en la Tabla 5.231, los cuales se convierten en valores de presión sonora mediante la utilización de la herramienta implementada en el SoundPLAN y que se muestra en la Figura 5.299.



Figura 5.299 Aplicación utilizada para predecir niveles de ruido de las vías, mediante los datos de aforos

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Las configuraciones tenidas en cuenta para la estimación de los niveles de ruido, provenientes de los ejes viales fueron las siguientes:

Para estimar los flujos promedios para el periodo diurno, se dividieron los datos mostrados en la Tabla 5.231 por un factor de 14 y de la misma forma los datos registrados para el periodo nocturno se dividieron por un factor de 10, con lo cual se obtuvieron las frecuencias horarias requeridas por la aplicación.

Para poder incluir las motos como fuentes de ruido, se empleó un factor extraído de la información mostrada en la Tabla 5.233, en la cual se puede ver que el nivel generado por una motocicleta es equivalente a 0.1585 veces (8 dB de diferencia), con respecto al nivel generado por un vehículo pesado, o lo que es similar a decir que 6.3 motos generan un nivel de ruido equivalente al de un vehículo pesado.

En todas las vías no pavimentadas de Mutatá se asume una velocidad promedio de 30 km/h para los vehículos livianos y pesados, para ambos periodos de medición (diurno y nocturno). Con una superficie en gravel (como este tipo de superficie no se encuentra disponible dentro de las opciones de la aplicación se selecciona la opción de Entrada propia y se coloca un ajuste de 0.0 dB), sin corrección por deflexiones y con un nivel de gradiente o peralte de la vía de 0.0%.

En todas las vías pavimentadas al interior del municipio se asume una velocidad promedio de 40 km/h para los vehículos livianos y de 30 km/h para los pesados, para ambos periodos

de medición (diurno y nocturno). Con una superficie en asfalto, sin corrección por deflexiones y con un nivel de gradiente o peralte de la vía de 0.0%.

Para los tramos viales sobre la ruta al mar identificadas como VIA_31 y VIA_32, se asume una velocidad promedio de 80 km/h para los vehículos livianos y de 60 km/h para los pesados, para ambos periodos de medición (diurno y nocturno). Con una superficie en asfalto, sin corrección por deflexiones y con un nivel de gradiente o peralte de la vía de 0.0%.

En los Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Ruido/Cálculos, se incluye el archivo Cálculos emisión ruido vehículos.xlsx, donde se realizan las estimaciones requeridas para las frecuencias horarias promedio, para las vías ingresadas en el modelo de ruido. Si se comparan las motocicletas con vehículos pesados con peso superior a 10000 lb de la Tabla 5.233, se encuentra una diferencia de 8 dB, valor que es independiente de la velocidad y del tipo de cobertura de la vía (suave o dura).

Tabla 5.233 Niveles de ruido permisible para vehículos manufacturados después de 1979.

Fuente: EPA

Vehicle	Highway Operation, soft site,* 35 mph or less	Highway Operation, soft site, above 35 mph	Highway Operation, hard site,* 35 mph or less	Highway Operation, hard site, above 35 mph	Stationary Operation, soft site	Stationary Operation, hard site
Motorcycles	78 dB	82 dB	80 dB	84 dB	78 dB	80 dB
Passenger Cars, less than 10,000 pounds	72 dB	79 dB	74 dB	81 dB	72 dB	74 dB
Buses	83 dB	88 dB	86 dB	90 dB	83 dB	85 dB
Vehicles more than 10,000 pounds	86 dB	90 dB	88 dB	92 dB	86 dB	88 dB

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.6.5 Desarrollo del modelo de ruido y resultados

Para el desarrollo del modelo de ruido, se requiere la implementación de las siguientes etapas:

- Levantamiento topográfico del terreno, mediante el uso de un archivo digital del terreno .DWG.
- Identificación de las fuentes de ruido y cuantificación de los niveles de emisión.
- Ingreso de las fuentes de ruido a la aplicación mediante el uso de imágenes georreferenciadas donde se identifican las fuentes.
- Identificación de las zonas más expuestas, y ubicación de receptores en éstas.

- Ejecución del modelo y obtención de los resultados.

En la Figura 5.300, se muestra un pantallazo de la aplicación SoundPLAN Essential, donde se evidencian las líneas topográficas del terreno, las fuentes y los treinta (30) receptores ingresados (REC1 a REC30).

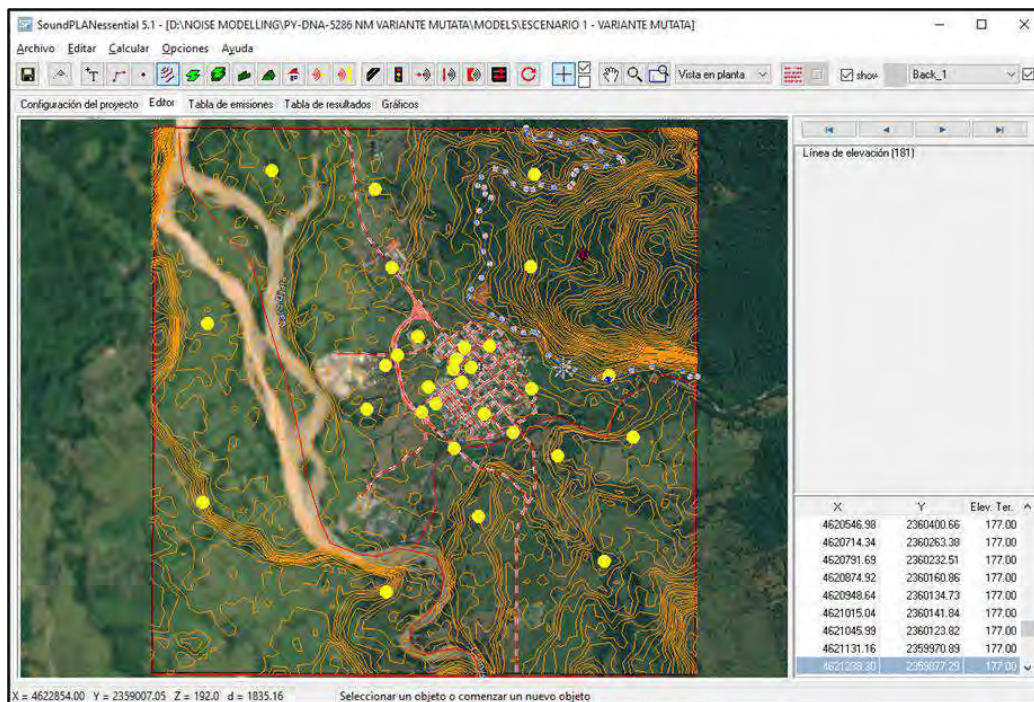


Figura 5.300 Interfaz de la aplicación empleada para el desarrollo del modelo.

Fuente: SoundPLAN Essential.

A. Generación de la elevación digital del terreno

Con los datos de elevación digital disponibles, se crea un archivo adecuado para su uso dentro de la aplicación SoundPLAN Essential. Este archivo contendrá factores de elevación y de escalado. En la Figura 5.301, se muestra una imagen del área de influencia de la zona del proyecto, donde se puede ver la elevación del terreno, imagen utilizada por la Aplicación GlobalMapper 21, para generar el archivo de elevación del terreno .DXF (ver Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/ Mod_Ruido/Arch_DEM). La información de elevación del terreno se descarga vía online desde la dirección: <https://search.asf.alaska.edu/#/>, donde se usa como dato de elevación la información extraída de imágenes de radar ALOS PALSAR con resolución espacial de 12.5 m.

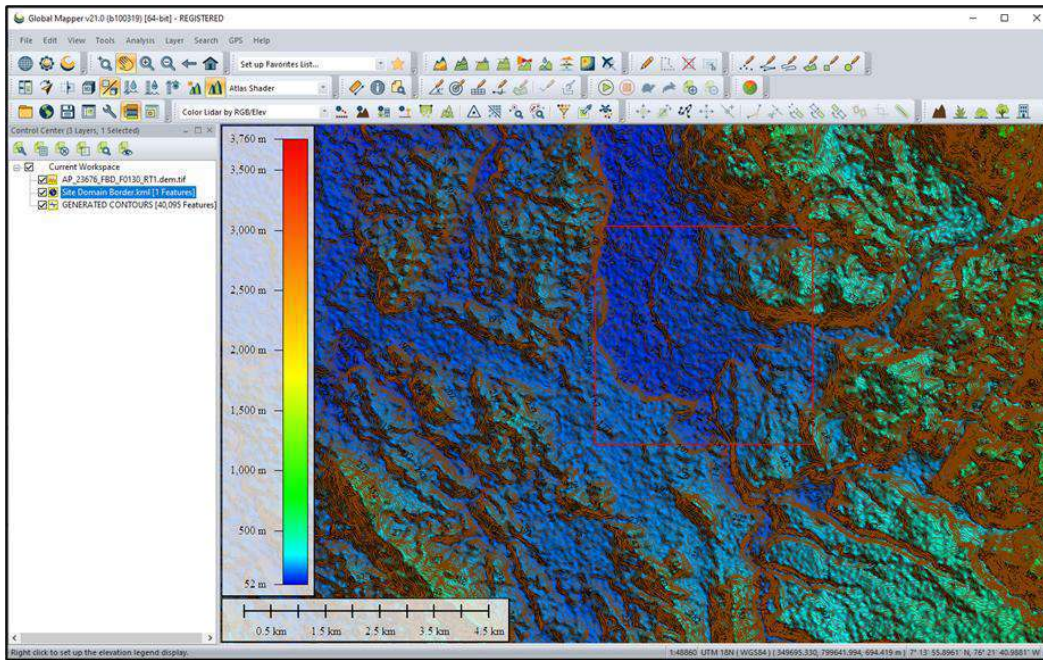


Figura 5.301. Software utilizado para la generación del archivo digital del terreno (DEM) del área donde se desea correr el modelo de ruido.

Fuente: Global Mapper - ALOS PALSAR.

En la [Figura 5.302](#), se muestra la salida entregada por la aplicación SoundPLAN Essential, después de estimar las diferentes cotas mediante el uso de los puntos de nivel importados desde el archivo .DXF. Para el proceso anterior se emplea la interfaz dispuesta por la aplicación para dicha tarea.

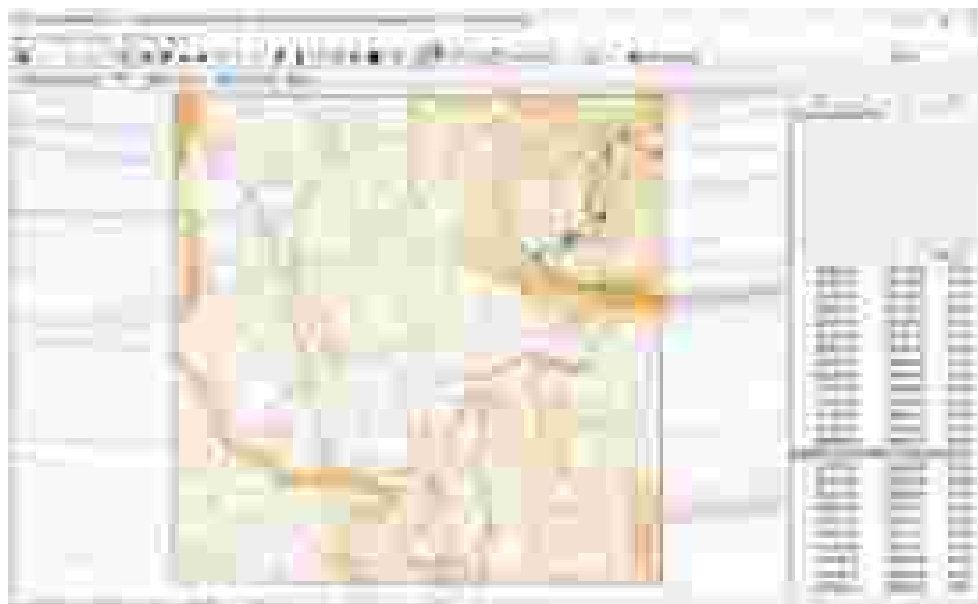


Figura 5.302 Salida entregada por el procesador de terreno implementado en la aplicación.
Fuente: SoundPLAN Essential.

B. Ingreso de fuentes y receptores

La [Figura 5.303](#) y [Figura 5.304](#) muestran las entradas de las fuentes y receptores utilizados como insumos por la aplicación SoundPLAN Essential.

En la [Figura 5.304](#) se muestran los treinta (30) receptores seleccionados, estos se encuentran clasificados de la siguiente manera: del REC1 al REC5 corresponden a las cinco (5) ubicaciones para la calibración del modelo CM1 a CM5, y los restantes veinticinco (25), REC6 a REC30, corresponden a ubicaciones seleccionadas con el fin de ver los niveles de ruido en estas ubicaciones y como la construcción del proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá influye en relación con su entorno.

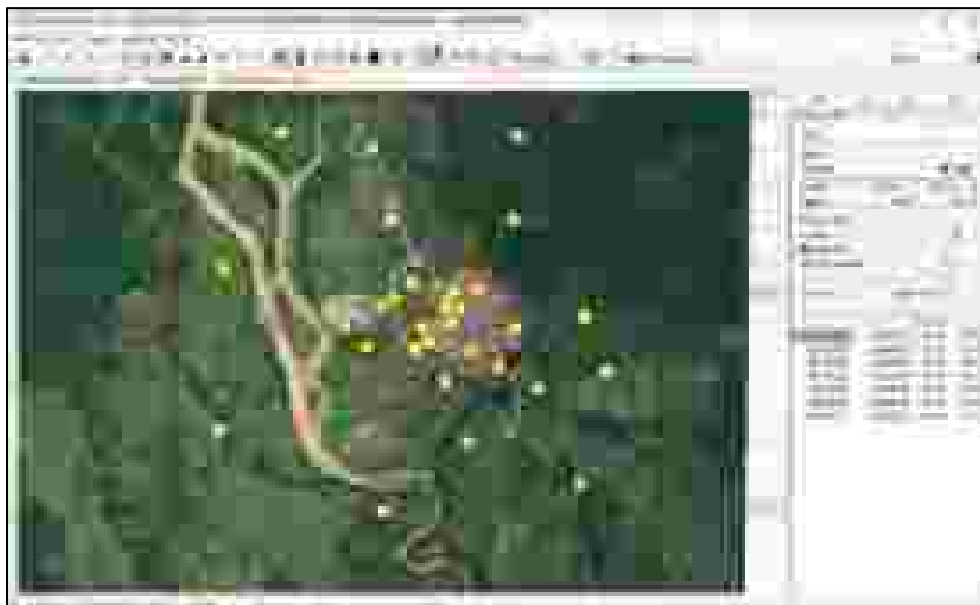


Figura 5.303 Fuentes ingresadas en la aplicación para ser utilizadas dentro del desarrollo del modelo de ruido.

Fuente: SoundPLAN Essential

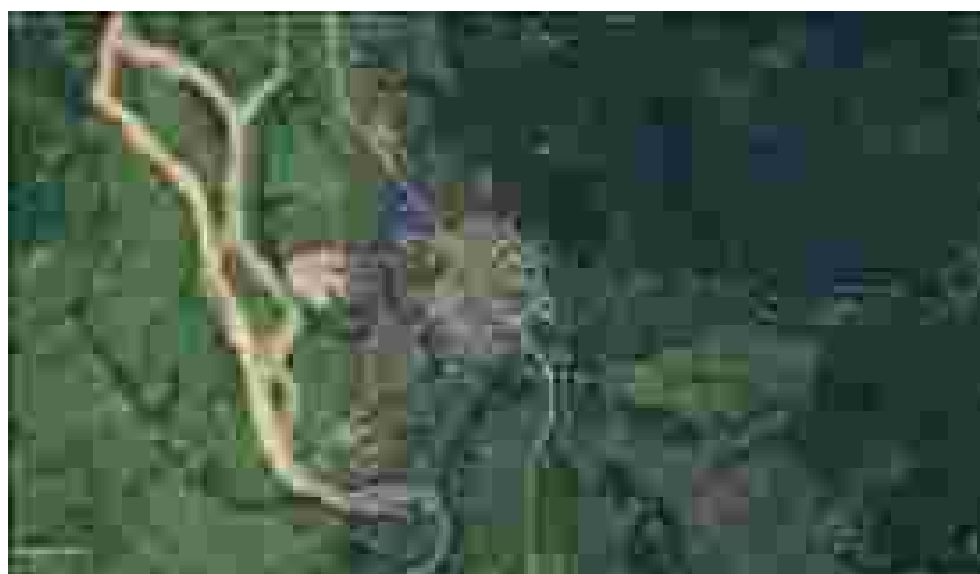


Figura 5.304 Receptores ingresados en la aplicación para ser utilizadas dentro del desarrollo del modelo de ruido.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

C. Ejecución del modelo de ruido

La malla de cálculo fue configurada a 4 metros de altura sobre el nivel del terreno del área de modelación. El espaciado de malla fue igual a 10 metros en el eje "x", como en el eje "y", además se tuvieron en cuenta los parámetros generales siguientes en el modelado:

- Estándar industrial: ISO 9613 (International Organization for Standardization: ISO, 1996).
- Estándar ruido vial: RS90 (Norma Alemana de Ruido en Carreteras).
- Tolerancia: 0.1 dB
- Radio máximo de búsqueda: 1000 metros.
- Orden de reflexión: Escogido de orden 1 en base a lograr un equilibrio entre el detalle de los resultados y tiempo de procesamiento del modelo, además por tratarse de un área rural no hay zonas de reflexión importantes.
- Meteorología: Humedad relativa %=85, temperatura en grados centígrados $T=27^{\circ}\text{C}$, dirección del viento en grados predominante del norte y sur y presión atmosférica $mbar=1000$.
- Tiempo de referencia: Diurno (7-21) y nocturno (21-7) acorde a lo establecido en la Res. 627. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 7 de abril de 2006) Parámetros evaluados: $L_{(Aeq,D)}$ y $L_{(Aeq,N)}$, nivel jornada diurna y nivel jornada nocturna respectivamente.
- Atenuación en las edificaciones: ISO 9613-2

Atenuación en el área industrial: ISO 9613-2

Una vez se ha ingresado toda la información requerida para correr el modelo, la aplicación SoundPLAN Essential muestra la ventana capturada en la [Figura 5.305](#), en la cual se pueden seleccionar los resultados deseados.

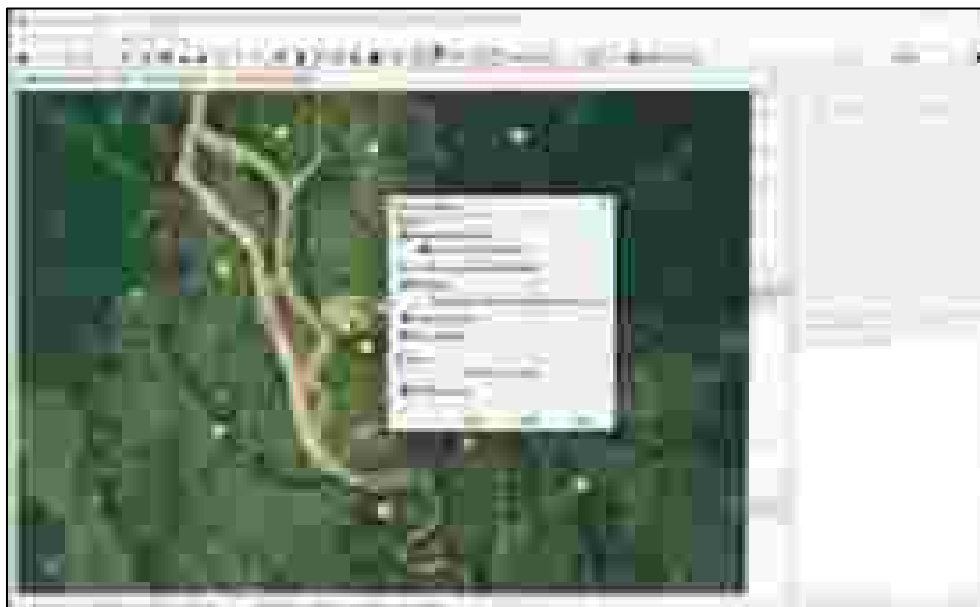


Figura 5.305 Ejecución del modelo de ruido. Fuente: SoundPLAN Essential.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Una vez concluida la ejecución del modelo continúa el proceso de validación del modelo, para lo cual lo primero que se hace es estimar los resultados de las mediciones ambientales realizadas, y paso seguido se procede a comparar con los niveles predichos por el modelo desarrollado.

D. Resultados mediciones de ruido ambiental

I. Selección de los Sitios de Medición

El sitio de medición se selecciona teniendo en cuenta las zonas de influencia aledañas y áreas de interés para el proyecto, con el fin de calibrar el modelo; la identificación de los puntos seleccionados se muestra en la Tabla 5.235, mientras en la Tabla 5.231, se muestra su georreferenciación.

Tabla 5.234 Ubicación de los puntos de monitoreo

PUNTO DE MEDICIÓN	IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO
PUNTO 1 (CM1)	Costado del río
PUNTO 2 (CM2)	Costado sobre vía al mar al interior del municipio
PUNTO 3 (CM3)	Costado de la calle 14
PUNTO 4 (CM4)	Costado sobre vía al mar al exterior del municipio
PUNTO 5 (CM5)	Costado de la calle 10

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

II. Resultados de las mediciones ambientales.

A continuación, en la Tabla 5.235, se resume los valores promedio de las mediciones para los cinco puntos de medición.

Tabla 5.235 Resultados de mediciones para calibración del modelo.

PUNTO DE MEDICIÓN	PERIODO	$L_{Aeq,T}$ dB(A)	U_M dB(A)
CM1	Diurno	61.9	±0.8
CM2		69.2	±0.9
CM3		57.9	±1.0
CM4		70.9	±0.8
CM5		53.8	±1.7

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

III. Resultados del modelo de ruido.

Para el desarrollo del modelo de ruido, se un solo escenario, el cual se describe a continuación.

Escenario 1: Se realiza bajo las condiciones de medición, las cuales se caracterizaron por el flujo vehicular de las vías ingresadas, adicionalmente se incluye las fuentes asociadas a los ríos Mutatá y Caño Bijara o Riosucio.

Escenario 2: Incluye las fuentes del escenario 1, más las asociadas a la construcción de la variante.

Para el desarrollo del modelo, se establece una zona de modelación equivalente a (4.0 km de base por 4 km de alto) 16 km², la cual se encuentra que es apropiada, para evaluar el efecto de la distancia entre fuente y receptor apropiadamente. Encontrándose, además que más allá de estos límites establecidos, la influencia por parte de los niveles de ruido generados por la operación del proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá resultan en aporte despreciables inferiores a 0.3 dBA. En cuanto a los receptores, se seleccionaron 30 por conveniencia, para mostrar tanto los puntos donde se realizaron mediciones de ruido ambiental y para calibración (1 a 5) como otros adicionales (25 puntos).

Pero cabe resaltar que el modelo internamente estima los niveles de ruido para los mapas mostrados para una cantidad de 161160 ubicaciones o receptores, información que es imposible mostrar en forma de tabla. Por lo anterior solo se muestran en forma tabular los resultados de las 30 ubicaciones seleccionadas, las cuales permiten identificar las predicciones del modelo para los niveles de ruido en posiciones específicas dentro de la zona de modelación.

E. Resultados para escenario 1, condiciones actuales.

En la [Figura 5.306](#), se muestran los niveles de ruido predichos por el modelo de ruido desarrollado con la ayuda del SoundPlan Essential para la ubicación del Punto 7, tanto para el periodo diurno como nocturno. Mientras en la [Figura 5.307](#), se muestra la totalidad de los resultados para las treinta (30) ubicaciones seleccionadas como receptores, las cuales se muestran también en forma tabular en la Tabla 5.236.

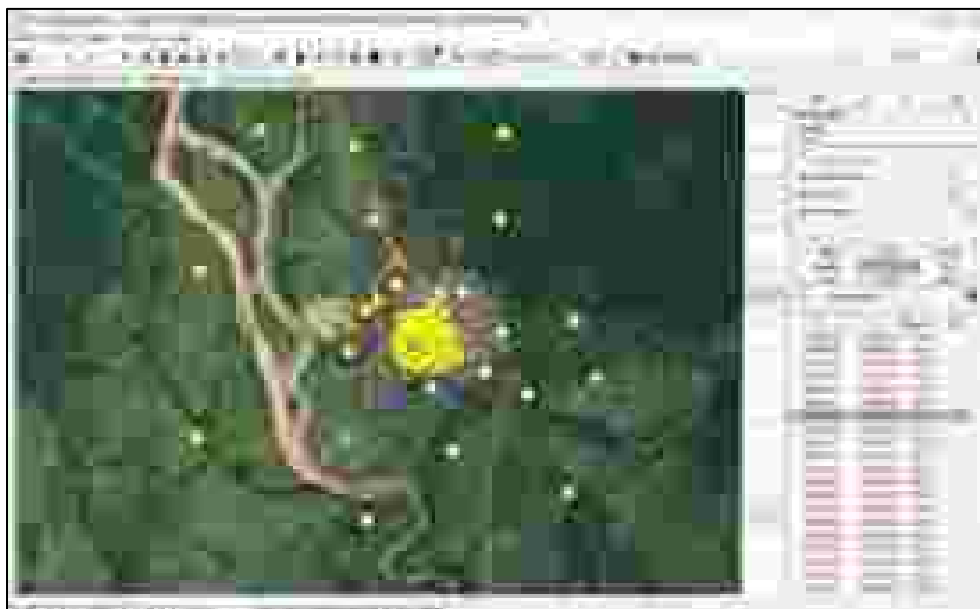


Figura 5.306 Nivel de ruido predicho por el modelo en la ubicación del Punto 7, escenario 1.
Fuente: SoundPLAN Essential.

En la [Figura 5.307](#), se muestran los límites más restrictivos que corresponden al Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado para zona rural habitada destinada a explotación agropecuaria, que corresponde a 55 dBA para el periodo diurno (delimitada con color rojo), mientras para el periodo nocturno el límite permisible es de 45 dBA (delimitada en color verde claro), donde se puede ver que las zonas se extienden alrededor de los ejes viales y de los ríos. Como se puede observar las líneas para el límite nocturno están más alejadas que las diurnas lo cual indica que la zona de incumplimiento para el periodo nocturno es más extensa.



Figura 5.307 Nivel de ruido predicho por el modelo para la totalidad de las 30 ubicaciones, escenario 1.

Fuente: SoundPLAN Essential.

Tabla 5.236 Niveles de ruido predichos por el modelo para los 30 receptores seleccionados, escenario 1.

Nº	Nombre del receptor	Lado del m.	Tipo	Límite		Nivel		Confiere	
				Día	Noche	Día	Noche	Día	Noche
				dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB(A)	dB	dB
1	REC1	-	GF	60	70	60.3	66.7	-	-
2	REC2	-	GF	60	70	71.2	66.7	-	-
3	REC3	-	GF	60	70	58.9	53.6	-	-
4	REC4	-	GF	60	70	71.7	66.1	-	-
5	REC5	-	GF	60	70	54.1	48.8	-	-
6	REC6	-	GF	65	50	63.3	57.5	-	7.8
7	REC7	-	GF	65	50	53.9	48.5	-	-
8	REC8	-	GF	65	50	58.8	54.4	-	4.6
9	REC9	-	GF	65	50	61.3	56.2	-	8.2
10	REC10	-	GF	65	50	51.7	46.5	-	-
11	REC11	-	GF	65	50	53.9	48.4	-	-
12	REC12	-	GF	65	50	61.2	55.7	-	6.7
13	REC13	-	GF	65	50	58.7	54.3	-	4.3
14	REC14	-	GF	65	50	61.5	56.1	-	9.0
15	REC15	-	GF	65	50	58.8	54.5	-	4.2
16	REC16	-	GF	65	50	47.7	42.5	-	-
17	REC17	-	GF	65	50	60.0	54.6	-	4.6
18	REC18	-	GF	65	45	52.3	47.1	-	2.1
19	REC19	-	GF	65	45	45.7	41.1	-	-
20	REC20	-	GF	65	45	43.1	38.2	-	-
21	REC21	-	GF	65	45	38.6	35.9	-	-
22	REC22	-	GF	65	45	39.7	27.2	-	-
23	REC23	-	GF	65	45	34.4	30.6	-	-
24	REC24	-	GF	65	45	52.5	47.0	-	2.6
25	REC25	-	GF	65	45	41.3	36.2	-	-
26	REC26	-	GF	65	45	42.8	40.5	-	-
27	REC27	-	GF	65	45	31.1	26.8	-	-
28	REC28	-	GF	65	45	43.6	41.3	-	-
29	REC29	-	GF	65	45	42.7	37.3	-	-
30	REC30	-	GF	65	45	41.3	36.1	-	-

Fuente: SoundPLAN Essential.

De la Tabla 5.236, se muestra que en ninguna de las 30 ubicaciones seleccionadas se supera el límite permisible en el periodo diurno, mientras en el periodo nocturno se supera en 10 de las 30, lo que muestra que los niveles de ruido para las ubicaciones clasificadas en el sector B y D, en los cuales se supera están influenciados por el flujo vehicular y en menor medida por el ruido generado por el río Mutatá.

Para desplegar los mapas de ruido, se requiere la configuración de la escala de colores, para lo cual se tiene en cuenta la paleta de colores establecida en el anexo 5 de la Resolución 0627 de 2006, de forma descriptiva y convertida a escala RGB, como se muestra en la Tabla 5.237.

Tabla 5.237 Escala de colores empleada para la generación de los mapas de ruido.

ZONA DE RUIDO		DESCRIPCIÓN	ESCALA RGB			COLOR DE MUESTRA
LI dB(A)	LS dB(A)		R (0-255)	G (0-255)	B (0-255)	
<35		Verde claro	40	239	71	
35	40	Verde	0	143	57	
40	45	Verde oscuro	0	51	33	
45	50	Amarillo	255	233	0	
50	55	Ocre	185	147	90	
55	60	Naranja	239	127	26	
60	65	Cinabrio	230	46	0	
65	70	Carmin	162	35	29	
70	75	Rojo lila	180	76	138	
75	80	Azul	34	113	179	
80	85	Azul oscuro	30	45	110	

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Una vez establecida la escala de colores, se procede a la elaboración de los mapas de ruido para los periodos diurno y nocturno, y los resultados se muestran en la [Figura 5.308](#) y [Figura 5.309](#).



Figura 5.308 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 1.

Fuente: SoundPLAN Essential®.

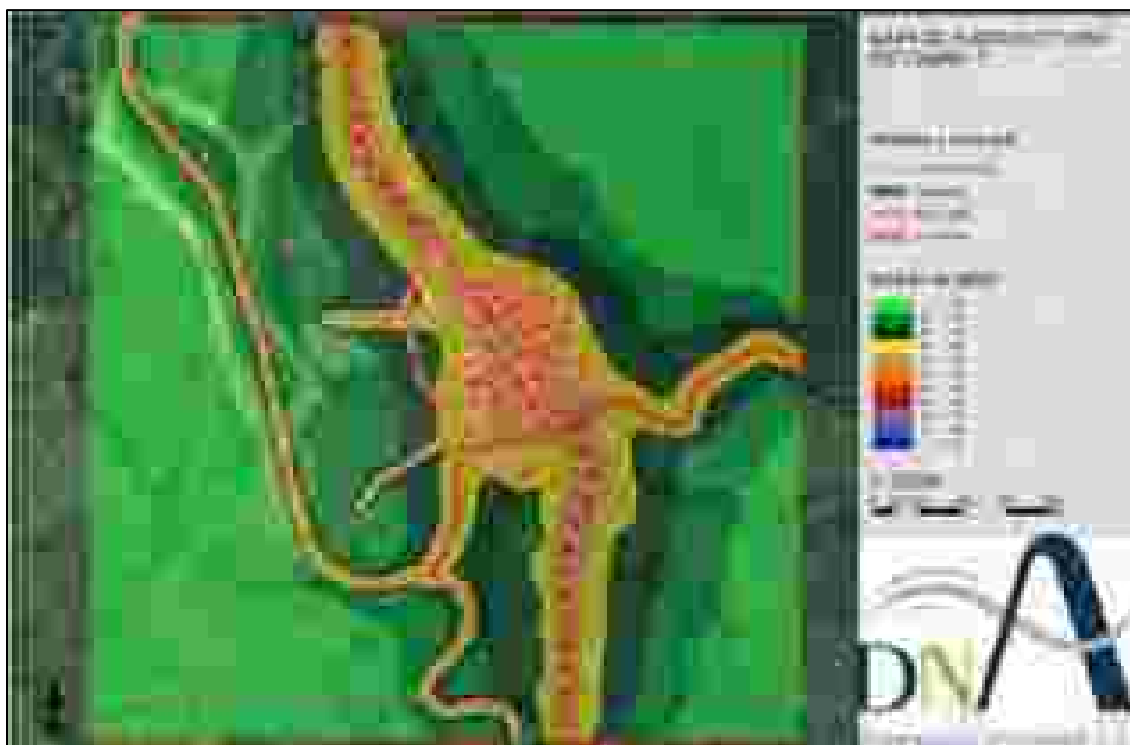


Figura 5.309 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo nocturno, escenario 1.

Fuente: SoundPLAN Essential®.

La misma información mostrada en la [Figura 5.308](#) y [Figura 5.309](#), se despliega en las [Figura 5.310](#) y [Figura 5.311](#), pero para la elaboración de estas últimas se hace uso de la herramienta Google Earth.

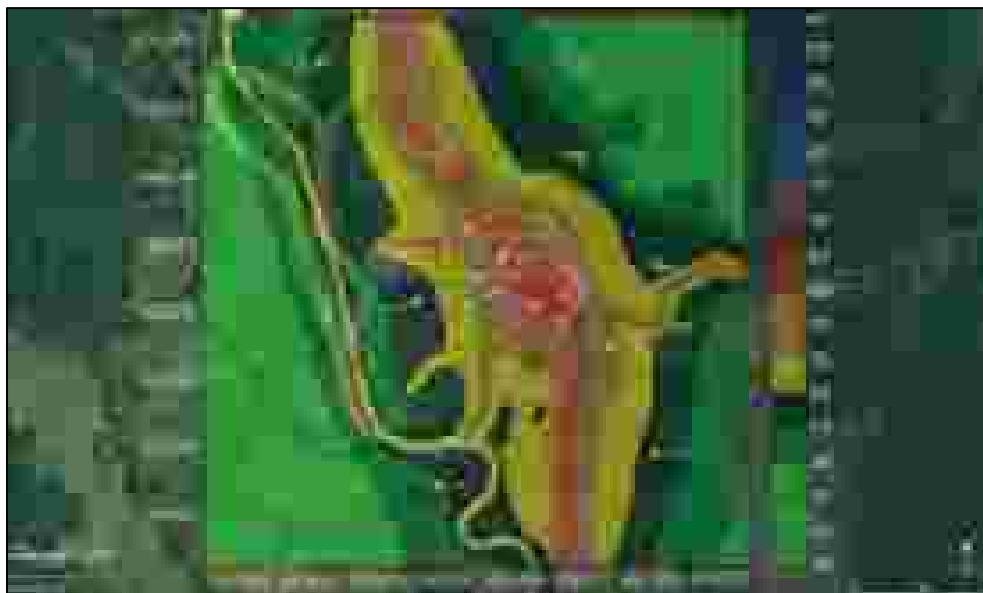


Figura 5.310 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 1.
Fuente: Google Earth.



Figura 5.311 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo nocturno, escenario 1.
Fuente: Google Earth.

IV. Validación de la modelación

El proceso de validación se basó en la comparación entre los receptores medidos en campo y los receptores predichos por el modelo predictivo. Como condición de validez, es internacionalmente aceptado que la máxima diferencia entre el punto medido y simulado

sea 3 dB. Posteriormente, se calculó la incertidumbre del mapa de ruido siguiendo la metodología establecida por Ausejo. Este método tiene en cuenta las incertidumbres aportadas por el proceso de medición y el proceso de simulación.

El cálculo de la incertidumbre de medición (u_M o U) se realiza de acuerdo con las directrices estipuladas por la Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement teniendo en cuenta las aportaciones hechas por el proceso de medición y por el instrumento de medida. La incertidumbre de simulación (u_S) es calculada a partir de la incertidumbre total expandida del mapa de ruido y de la incertidumbre de medida (u_M). La incertidumbre total expandida del mapa es determinada empíricamente usando un factor de cobertura $k=2$ sobre la base de la probabilidad de que los datos tienen una dispersión menos de 95,45%. Finalmente, el cálculo de la incertidumbre se realiza con las siguientes ecuaciones:

$$U_T = u_T \cdot k$$

$$U_S = u_S \cdot k$$

$$u_T = \sqrt{u(M)^2 + u(S)^2}$$

Donde U_T es la incertidumbre total expandida del mapa de ruido, u_T es la incertidumbre total del mapa de ruido, $u(M)$ es la incertidumbre de medición, $u(S)$ es la incertidumbre del proceso de simulación y U_S es la incertidumbre expandida del proceso de simulación.

En la Tabla 5.238, se hace la comparación entre los valores medidos y simulados mediante la aplicación SoundPLAN Essential, se puede observar que todos los valores del periodo diurno se encuentran dentro de la diferencia esperada de 3 dB(A).

De acuerdo con lo anterior, debido a la concordancia entre los datos predichos por el modelo para el periodo diurno y los medidos, se considera que el modelo se encuentra ajustado y es válido.

Tabla 5.238 Comparación mediciones vs. valores simulados mediante el SoundPLAN Essential.

PUNTO DE MEDICIÓN	PERIODO	VALOR MEDIDO dB(A)	VALOR SIMULADO dB(A)	DIFERENCIA dB(A)	DIFERENCIA PERMITIDA dB(A)
1 (CM1)	Diurno	61.9	60.3	1.6	3.0
2 (CM2)	Diurno	69.2	71.2	2.0	3.0
3 (CM3)	Diurno	57.9	58.9	1.0	3.0
4 (CM4)	Diurno	70.9	71.7	0.8	3.0
5 (CM5)	Diurno	53.8	54.1	0.3	3.0

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Las incertidumbres de medición, simulación y total se tabulan en la Tabla 5.239. La incertidumbre de medida se estimó a partir de la incertidumbre estimada para las diferentes mediciones realizadas, mientras para la incertidumbre de simulación se tomó un valor de ± 2 dBA (valor tomado del documento European Commission Working Group Assessment

of Exposure to Noise (WG-AEN)). En la Figura 20, se muestran las mediciones realizadas y su incertidumbre de medición asociada para el periodo diurno.

Tabla 5.239 Mediciones de ruido con sus incertidumbres estimadas

PUNTO DE MEDICIÓN	PERIODO	LAeq (dBA)	INCERTIDUMBRE DE MEDIDA (U_M)	INCERTIDUMBRE SIMULACIÓN (U_S)	INCERTIDUMBRE TOTAL (U_T)
1 (CM1)	Diurno	61.9	0.8	2.0	2.2
2 (CM2)	Diurno	69.2	0.9	2.0	2.2
3 (CM3)	Diurno	57.9	1.0	2.0	2.2
4 (CM4)	Diurno	70.9	0.8	2.0	2.2
5 (CM5)	Diurno	53.8	1.7	2.0	2.6

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

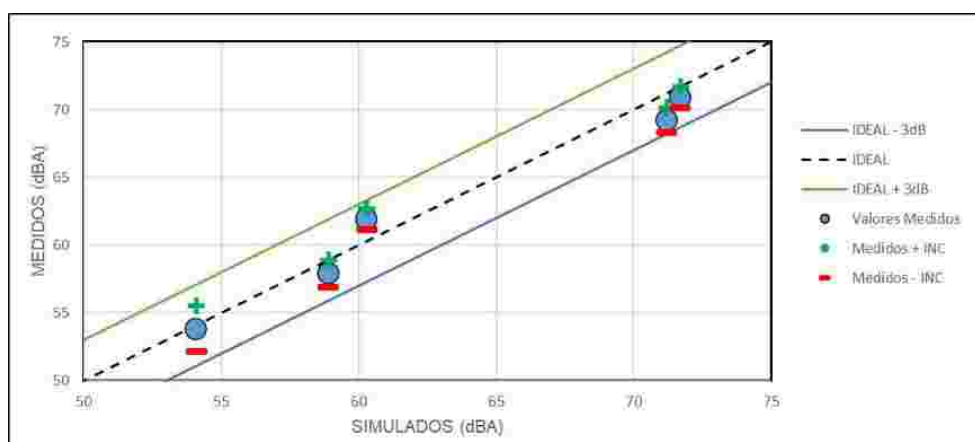


Figura 5.312 Mediciones de ruido para el periodo diurno con sus incertidumbres asociadas

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Mediciones de ruido para el periodo diurno con sus incertidumbres asociadas

En la Figura 5.313, se muestran los intervalos de incertidumbre total para las mediciones realizadas durante el periodo diurno.

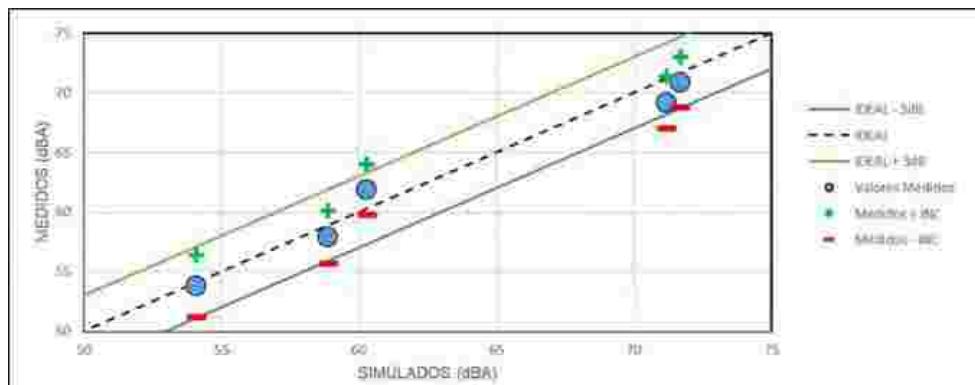


Figura 5.313 Mediciones de ruido para el periodo diurno para la incertidumbre total

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Como se puede observar en la Figura 5.312 y Figura 5.313, los valores medidos se encuentran dentro del intervalo de ± 3 dB. Los criterios de validación incluyen los dados por la recomendación de la WG-AEN, los cuales son el asociado a la incertidumbre de medición y el de la diferencia entre los valores medidos y simulados. Al analizar los resultados se encuentra que ambos criterios se cumplen y se puede afirmar que la simulación es válida, lo anterior dado el hecho de que el valor de incertidumbre asociada a cada medición es inferior a ± 5 dB (criterio 1), y adicionalmente la diferencia entre los valores simulados y medidos es inferior a ± 3 dB (criterio 2).

F. Resultados para el escenario 2

A continuación, se determina la potencia acústica asociada a la maquinaria que se empleará durante la etapa de construcción del proyecto modificación de licencia Variante Mutatá.

I. Estimación potencia acústica de maquinaria

De la anterior, se indica que durante la etapa de construcción se deben desarrollar varias actividades entre las que se incluyen excavaciones, transporte de materiales, construcción de estructuras, instalación de pavimento flexible, etc. Para el desarrollo de las actividades mencionadas se requiere del uso maquinaria la cual se describe y tabula en la Tabla 5.240.

Tabla 5.240 Equipos empleados durante la etapa de construcción.

MAQUINA	CANTIDAD	Etapas en la que se emplea
Cortadora de concreto	1	Preliminares
Cortadora de disco para piso	1	Preliminares
Fresadora de pavimento	1	Preliminares
Retroexcavadora	3	Excavaciones y movimientos tierra
Bulldozer CAT D6H	1	Excavaciones y movimientos tierra
Motoniveladora	1	Excavaciones y movimientos tierra
Vibrocompactador	1	Excavaciones y movimientos tierra
Compactador Vibratorio Ingersoll Rand DD-110HF	1	Nivelación
Compactador tipo Canguro	1	Nivelación
Mezcladora de trompo de 1.5 sacos	1	Nivelación
Vibrador de concreto a gasolina	1	Nivelación
Compactador neumático	1	Nivelación
Compactador de rodillo	1	Nivelación
Compactador tipo Rana a gasolina	1	Nivelación
Grúa telescópica 20 ton	1	Soporte y redes
Carro grúa 8 ton	1	Soporte y redes
Cortadora de lámina eléctrica	1	Soporte y redes
Cortadora de Angulo Eléctrica	1	Soporte y redes
Cortadora de Tubo Eléctrica	1	Soporte y redes
Motobomba 2"	1	Soporte
Compresor (barrido y soplado)	1	Soporte
Compresor neumático	1	Soporte
Asfaltadora Finisher	1	Pavimentación
Equipo de pintura (Compresor)	1	Señalización

Fuente: AUTOPISTAS URABÁ SAS, 2024.

En la Figura 5.314, se muestra el resumen de las potencias acústicas de las fuentes tabuladas, las cuales en función del número de horas de operación durante el periodo diurno

se debe ajustar los niveles de potencia acústica ingresados. Por ejemplo, para la fuente asociada a Retroexcavadora, que operará en promedio por día durante 8 h en el periodo diurno, se debe ajustar el nivel de presión acústica a 14 h respectivamente, de la misma forma se debe ajustar las potencias acústicas a una distancia de 0 m.

Por otro lado, a modo de ejemplo para la fuente asociada al Retroexcavadora se indica que el nivel de presión sonora de la fuente se debe ingresar de tal forma que a 10 m de ésta el valor que predice el modelo debe ser de 67.84 dB(A), con lo cual el nivel de presión sonora de la fuente a 0 m debe ser de 95.8 dB(A) (aplicando un coeficiente de directividad $Q = 2$). Para estimar la potencia acústica de la fuente a 0 m se emplea la Ecuación 1.

La ecuación empleada para ajustar el nivel de presión sonora de la fuente es la siguiente:

$$L_w = L_{Aeq} + 20 * \log_{10}(r) + 10 * \log_{10}(4 * \pi) - 10 * \log_{10}(Q) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

L_w : Potencia total de la fuente, dBA.

L_{Aeq} : Nivel de presión acústica medido a la distancia de r , dBA.

r : Distancia desde la fuente al punto de medición, m.

Q : Coeficiente de directividad, en la Figura 23, se muestra cómo se debe seleccionar dicho valor, para el caso de este trabajo se asume un valor de 2 para todas las fuentes.

Por otro lado, para ajustar el nivel L_w , en función del tiempo se emplean las siguientes relaciones:

$$L_{w_{ajustado\_Diurno}} = 10 * \log_{10} \left(\frac{1}{14} * (10^{0.1 * L_w} + (14 - t) * 10^{0.1 * 0.0}) \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde t es el tiempo que la fuente permanece operando durante el periodo de las 14 h.



Figura 5.314 Biblioteca de emisión del SoundPlan Essential
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

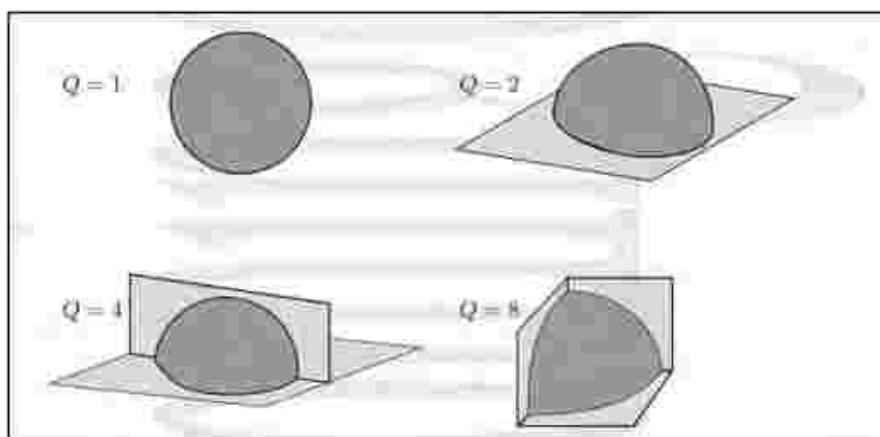


Figura 5.315 Algunos ejemplos de fuentes direccionales en las que la emisión es uniforme en determinados rangos de direcciones.

Fuente: <http://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf>.

Adicionalmente al ajuste de la fuente por distancia, se debe realizar el ajuste por el tiempo de operación usando la Ecuación 2, con lo que para la fuente asociada a la Retroexcavadora esta queda en 95.2 dB(A). De lo anterior se requiere ajustar el valor dado

en la biblioteca del SoundPlan mediante un factor de 27.3 dB(A) como se muestra en la Figura 5.316, para el periodo diurno.



Figura 5.316 Ajuste a la fuente de generador en función del tiempo de operación.

Fuente: SoundPlan Essential

En la Tabla 5.241 se muestra para todas las fuentes la potencia sonora para los análisis de frecuencias en octavas, mientras en la Tabla 5.242, se muestra la potencia total, ajustada por distancia y tiempo de operación.

Tabla 5.241 Potencias sonoras de las fuentes en octavas

Identificación del equipo	1/1 espectro de octavas en dBA								Distancia a la fuente	Fuente de datos	Identificación en la fuente de datos
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz			
Cortadora de concreto	0.00	0.00	0.00	81.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.00	7 m	Quieter Type Wire Saw or Diamond Wire Saw
Cortadora de disco para piso	0.00	0.00	0.00	81.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.00	7 m	
Fresadora de pavimento	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	104.00	0 m	Milling machine
Retroexcavadora	47.80	49.90	55.37	60.77	63.00	61.20	59.97	48.89	67.84	10 m	C2.8 Wheeled backhoe loader
Bulldozer CAT D6H	0.00	0.00	0.00	111.00	0.00	0.00	0.00	0.00	111.00	0 m	D6/D6 XE Track-Type Tractors
Motoniveladora	0.00	0.00	0.00	110.00	0.00	0.00	0.00	0.00	110.00	0 m	140 Motor Grader Specifications
Vibrocompactador	57.80	59.90	63.37	69.77	72.00	73.20	68.97	61.89	77.72	10 m	C2.42 Hydraulic vibratory compactor (tracked excavator)
Compactador Vibratorio Ingersoll Rand DD-110HF	0.00	0.00	0.00	108.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.00	0 m	Compactor
Compactador tipo Canguro	0.00	0.00	0.00	83.70	0.00	0.00	0.00	0.00	83.70	7 m	Compactor
Mezcladora de trompo de 1.5 sacos	0.00	0.00	0.00	85.00	0.00	0.00	0.00	0.00	85.00	2 m	Mezcladoras
Vibrador de concreto a gasolina	0.00	0.00	0.00	83.70	0.00	0.00	0.00	0.00	83.70	7 m	Compactor
Compactador neumático	0.00	0.00	0.00	108.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.00	0 m	Compactor
Compactador de rodillo	0.00	0.00	0.00	108.00	0.00	0.00	0.00	0.00	108.00	0 m	Compactor
Compactador tipo Rana a gasolina	0.00	0.00	0.00	83.70	0.00	0.00	0.00	0.00	83.70	7 m	Compactor
Grúa telescópica	51.80	52.90	58.40	60.80	62.00	58.20	50.00	38.90	66.62	10 m	C4.46 Mobile telescopic crane
Carro grúa	53.80	59.90	62.40	59.80	64.00	64.20	57.00	48.90	69.84	10 m	C4.43 Wheeled mobile crane
Cortadora de lámina eléctrica	0.00	0.00	0.00	113.00	0.00	0.00	0.00	0.00	113.00	0 m	Cortador de metal
Cortadora de ángulo eléctrica	0.00	0.00	0.00	113.00	0.00	0.00	0.00	0.00	113.00	0 m	Cortador de metal
Cortadora de Tubo eléctrica	0.00	0.00	0.00	113.00	0.00	0.00	0.00	0.00	113.00	0 m	Cortador de metal
Motobomba 2"	0.00	0.00	0.00	80.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.00	7 m	MOTOBOMBA AUTOCEBANTE
Compresor (barrido y soplado)	0.00	0.00	0.00	70.00	0.00	0.00	0.00	0.00	70.00	17 m	Soplador
Compresor neumático	0.00	0.00	0.00	102.00	0.00	0.00	0.00	0.00	102.00	0 m	Compressor
Asfáltadora Finisher	51.80	60.90	63.40	68.80	71.00	70.20	63.00	54.90	75.63	10 m	C5.30 Asphalt paver (+ tipper lorry)
Equipo de pintura (Compresor)	0.00	0.00	0.00	97.00	0.00	0.00	0.00	0.00	97.00	0 m	Compresor 2 hp

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tabla 5.242 Potencia total de las fuentes ajustada por distancia y tiempo de operación.

PERIODO DIURNO									
Identificación del equipo	L _{Aeq} (dBA)	Distancia a la fuente (n) (m)	Tiempo operación (h)	Tiempo sin operación (h)	Coefficiente de directividad Q	Potencia ajustada a 0 m L _w (dBA)	Potencia ajustada a 14 h periodo diurno L _{wajustado} (dBA)	Ajuste (dBA)	Corrección a L _{Aeq} para obtener L _w ajustado (dBA)
Cortadora de concreto	81.00	7	12.00	2.00	2	105.9	105.2	-0.7	24.2
Cortadora de disco para piso	81.00	7	12.00	2.00	2	105.9	105.2	-0.7	24.2
Fresadora de pavimento	104.00	0	12.00	2.00	2	104.0	103.3	-0.7	-0.7
Retroexcavadora	67.84	10	12.00	2.00	2	95.8	95.2	-0.7	27.3
Bulldozer CAT D6H	111.00	0	12.00	2.00	2	111.0	110.3	-0.7	-0.7
Motoniveladora	110.00	0	12.00	2.00	2	110.0	109.3	-0.7	-0.7
Vibrocompactador	77.72	10	12.00	2.00	2	105.7	105.0	-0.7	27.3
Compactador Vibratorio Ingersoll Rand DD-110HF	108.00	0	12.00	2.00	2	108.0	107.3	-0.7	-0.7
Compactador tipo Canguro	83.70	7	12.00	2.00	2	108.6	107.9	-0.7	24.2
Mezcladora de trompo de 1.5 sacos	85.00	2	12.00	2.00	2	99.0	98.3	-0.7	13.3
Vibrador de concreto a gasolina	83.70	7	12.00	2.00	2	108.6	107.9	-0.7	24.2
Compactador neumático	108.00	0	12.00	2.00	2	108.0	107.3	-0.7	-0.7
Compactador de rodillo	108.00	0	12.00	2.00	2	108.0	107.3	-0.7	-0.7
Compactador tipo Rana a gasolina	83.70	7	12.00	2.00	2	108.6	107.9	-0.7	24.2
Grúa telescópica	66.62	10	12.00	2.00	2	94.6	93.9	-0.7	27.3
Carro grúa	69.84	10	12.00	2.00	2	97.8	97.2	-0.7	27.3
Cortadora de lámina eléctrica	113.00	0	12.00	2.00	2	113.0	112.3	-0.7	-0.7
Cortadora de ángulo eléctrica	113.00	0	12.00	2.00	2	113.0	112.3	-0.7	-0.7
Cortadora de Tubo eléctrica	113.00	0	12.00	2.00	2	113.0	112.3	-0.7	-0.7
Motobomba 2"	80.00	7	12.00	2.00	2	104.9	104.2	-0.7	24.2
Compresor (barrido y soplado)	70.00	17	12.00	2.00	2	102.6	101.9	-0.7	31.9
Compresor neumático	102.00	0	12.00	2.00	2	102.0	101.3	-0.7	-0.7
Asfáltadora Finisher	75.63	10	12.00	2.00	2	103.6	102.9	-0.7	27.3
Equipo de pintura (Compresor)	97.00	0	12.00	2.00	2	97.0	96.3	-0.7	-0.7

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para las demás fuentes dadas en la [Tabla 5.243](#), se realiza el mismo procedimiento descrito para la fuente de Retroexcavadora.

Nota: Toda la información mostrada en la [Tabla 5.243](#) y Tabla 5.244, se puede consultar en Anexos_C5_1/5_1_10_Atmosfera/Mod_Ruido/Cálculos. en el archivo Datos emisión equipos.xlsx.

Una vez determinada la potencia acústica ajustada de cada una de las fuentes puntuales, el paso a seguir es distribuir las a lo largo del proyecto, para lo cual su potencia se convirtió en su equivalente como fuente de área y los resultados se muestran en la Tabla 5.244. Adicionalmente, como se puede observar en la Tabla 5.244, no todas las fuentes se incluyeron, ya que todas no se dan de forma simultánea, y se omitieron las de las etapas iniciales y finales que son de menor potencia.

Tabla 5.243 Potencias ajustadas de las fuentes puntuales convertidas en fuentes de área, escenario 2



Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Una vez cargada toda la información se procede a ejecutar el modelo para el escenario 2. Los resultados, se muestran en la Figura 25, donde se despliegan los niveles de ruido predichos para la ubicación del Punto 7, para el periodo diurno y nocturno. Mientras en la [Figura 5.317](#), se muestra la totalidad de los resultados para las treinta (30) ubicaciones seleccionadas como receptores, las cuales se muestran también en forma tabular en la [Figura 5.317](#).

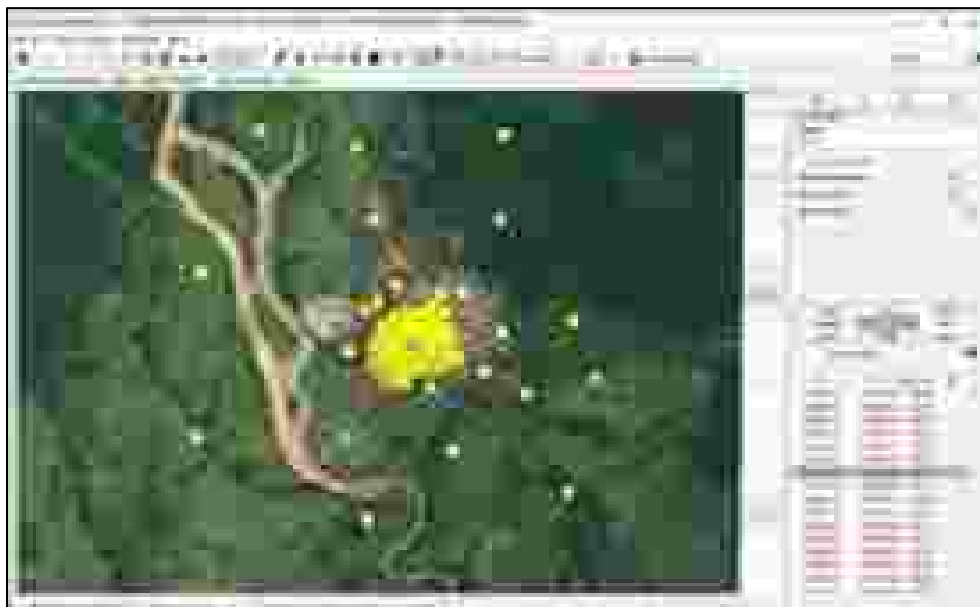


Figura 5.317 Nivel de ruido predicho por el modelo en la ubicación del Punto 7, escenario 2.
Fuente: SoundPLAN Essential.

Si se comparan los valores mostrados para el escenario 1 con respecto al escenario 2, para la ubicación punto 7, se muestra un incremento de 3.7 dBA en periodo diurno (ocasionado por la operación de la maquinaria y flujo vehicular adicional asociado al proceso de construcción de la variante).

En la [Figura 5.318](#), se pueden observar las múltiples fuentes ingresadas como son las barras rojas que representan fuentes de área y las líneas dobles que representan vías.



Figura 5.318 Nivel de ruido predicho por el modelo para la totalidad de las 30 ubicaciones, escenario 2.

Fuente: SoundPLAN Essential.

En la [Figura 5.318](#), se muestran los limites más restrictivos que corresponden al Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado subsector Rural habitada destinada a explotación agropecuaria, que corresponde a 55 dBA para el periodo diurno (delimitada con color rojo), donde se puede ver que las zonas se extienden alrededor de los ejes viales y las zonas de construcción de la variante.

Tabla 5.244 Niveles de ruido predichos por el modelo para las ubicaciones seleccionadas, escenario 2.

Nº	Nombre del receptor	Lado del río	Pais	Límite		Nivel		Condición	
				Di	Noche	Di	Noche	Di	Noche
1	REC1	-	GF	80	70	63.5	50.7	-	-
2	REC2	-	GF	80	70	71.4	55.7	-	-
3	REC3	-	GF	80	70	67.2	53.6	-	-
4	REC4	-	GF	80	70	71.3	58.1	-	-
5	REC5	-	GF	80	70	74.3	48.8	-	-
6	REC6	-	GF	85	50	63.3	47.4	-	7.5
7	REC7	-	GF	84	50	67.6	48.8	-	-
8	REC8	-	GF	86	50	60.2	54.4	-	4.4
9	REC9	-	GF	86	50	61.3	56.3	-	6.3
10	REC10	-	GF	85	50	55.7	48.3	-	-
11	REC11	-	GF	85	50	58.8	45.4	-	-
12	REC12	-	GF	84	50	63.5	55.7	-	3.7
13	REC13	-	GF	86	50	63.3	54.3	-	4.3
14	REC14	-	GF	86	50	61.3	58.0	-	6.0
15	REC15	-	GF	85	50	60.1	54.3	-	4.3
16	REC16	-	GF	85	50	57.3	47.5	-	-
17	REC17	-	GF	84	50	60.1	54.5	-	4.5
18	REC18	-	GF	85	45	52.8	47.1	-	2.1
19	REC19	-	GF	85	45	47.5	41.1	-	-
20	REC20	-	GF	85	45	48.9	38.2	-	-
21	REC21	-	GF	85	45	48.0	35.0	-	-
22	REC22	-	GF	85	45	35.1	27.2	-	-
23	REC23	-	GF	85	45	38.0	30.5	-	-
24	REC24	-	GF	85	45	52.8	47.0	-	3.0
25	REC25	-	GF	85	45	44.8	38.2	-	-
26	REC26	-	GF	85	45	41.4	40.5	-	-
27	REC27	-	GF	85	45	32.8	25.8	-	-
28	REC28	-	GF	85	45	44.1	41.2	-	-
29	REC29	-	GF	85	45	43.3	37.3	-	-
30	REC30	-	GF	85	45	42.3	38.1	-	-

Fuente: SoundPLAN Essential.

Al analizar los resultados de la Tabla 5.244, se encuentra un comportamiento similar al grado de cumplimiento mostrado en la Tabla 5.245 para el Escenario 1.

Con el fin de tener una mejor visualización del cambio en los niveles que se generarán durante el periodo de construcción se muestra la Tabla 5.245, donde se marcan con color naranja los receptores donde se van a presentar los mayores incrementos, cabe resaltar que esos incrementos no provocan que se superen los límites permisibles para el periodo diurno en ningún receptor similar al escenario 1. Mientras en el periodo nocturno el comportamiento es similar al del escenario 1, ya que no se incluyen nuevas fuentes, debido a que el proceso de construcción se desarrollará en periodo diurno entre las 7:00 y 19:00.

ID	Name	Age	Gender	Physical Examination		Vital Signs		Laboratory Tests		Imaging Studies		Treatment		Follow-up	
				Height (cm)	Weight (kg)	BP (mmHg)	HR (b/min)	Temp (°C)	SpO2 (%)	Hb (g/L)	Hct (%)	WBC (10 ⁹ /L)	CRP (mg/L)	Chest X-ray	ECG
001	John Doe	45	Male	175	75	120/80	72	38.5	98	14	40	10	10	10	10
002	Jane Smith	32	Female	160	60	110/70	68	37.8	97	12	35	8	8	8	8
003	Robert Johnson	58	Male	180	80	130/90	75	39.0	96	15	45	12	12	12	12
004	Emily White	28	Female	155	55	105/65	65	37.5	98	11	30	7	7	7	7
005	Michael Brown	40	Male	170	70	125/85	70	38.2	97	13	40	9	9	9	9
006	Sarah Green	35	Female	165	65	115/75	70	37.9	97	12	35	8	8	8	8
007	David Lee	50	Male	175	75	120/80	72	38.5	98	14	40	10	10	10	10
008	Olivia Hall	25	Female	150	50	100/60	60	37.2	99	10	25	6	6	6	6
009	James King	60	Male	185	85	135/95	78	39.2	95	16	50	13	13	13	13
010	Ava Wilson	30	Female	160	60	110/70	68	37.8	97	12	35	8	8	8	8

En la [Figura 5.319](#) y [Figura 5.320](#), se muestra los resultados del modelo de ruido, donde se despliega el mapa de ruido para el periodo diurno y nocturno (similar al del escenario 1).

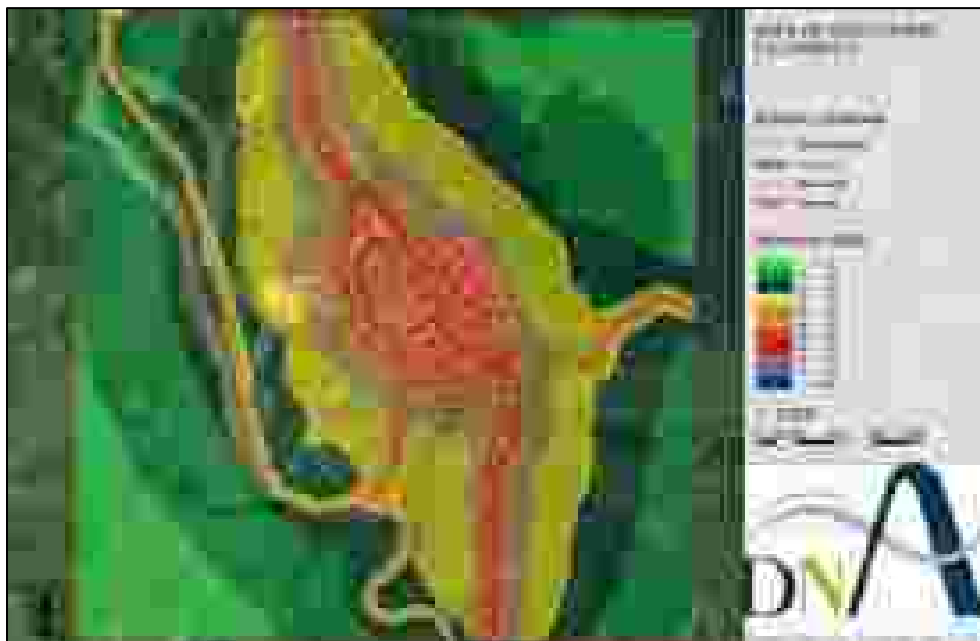


Figura 5.319 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 2.

Fuente: SoundPLAN Essential®.



Figura 5.320 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo nocturno, escenario 2.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

La misma información mostrada en la [Figura 5.321](#) y [Figura 5.322](#), se despliega en la [Figura 5.323](#) y [Figura 5.324](#), con la diferencia que se utiliza Google Earth para su presentación, y

en la cual se puede identificar más claramente las zonas de mayor nivel de ruido. Las zonas con mayor nivel de ruido son las aledañas a los ejes viales, así como la zona de construcción de la variante.

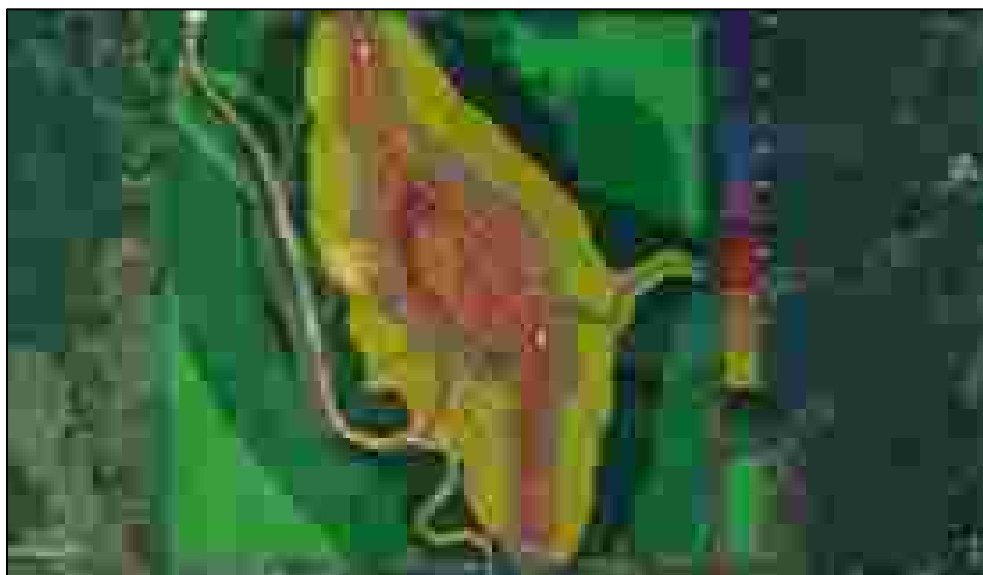


Figura 5.321 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 2.
Fuente: Google Earth.

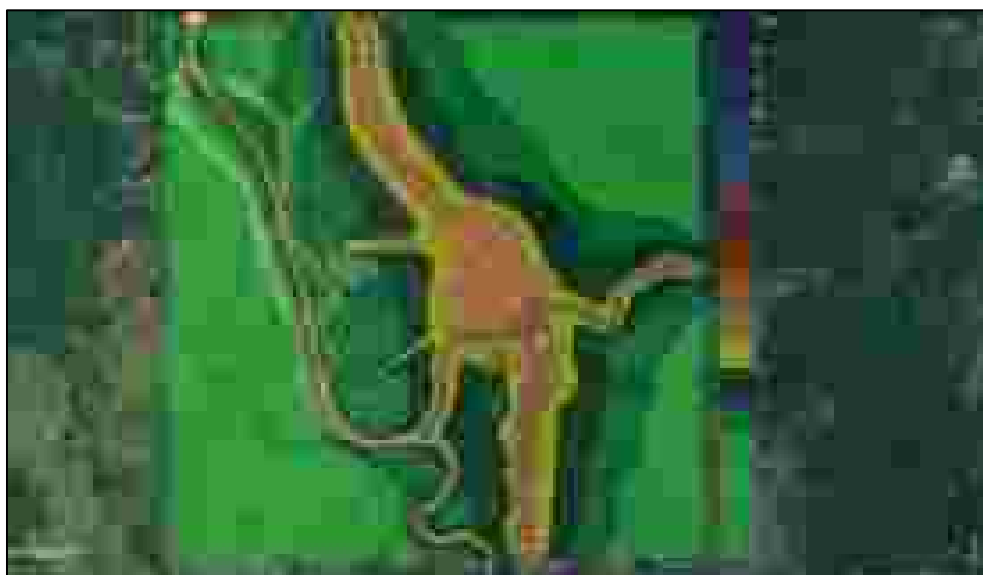


Figura 5.322 Mapa de ruido generado alrededor de las diferentes fuentes para el periodo diurno, escenario 2.
Fuente: Google Earth

Por otro lado, en la [Figura 5.323](#) y [Figura 5.324](#) se muestran las zonas hasta donde los niveles de ruido para las fuentes modeladas, luego de propagarse llegan a alcanzar los 55

dBa o más en periodo 65 dBA o más respectivamente en el periodo diurno. Dicha zona es contigua a la zona de construcción, a los ejes viales existentes y quebradas.

Como se observa la zona de afectación directa está ubicada en Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado, para el cual en periodo diurno se tiene un límite de 65 dBA. La zona de predicción del modelo hasta de 65 dBA o más será contigua al trazado de la variante, sin alcanzar a perjudicar la población existente.

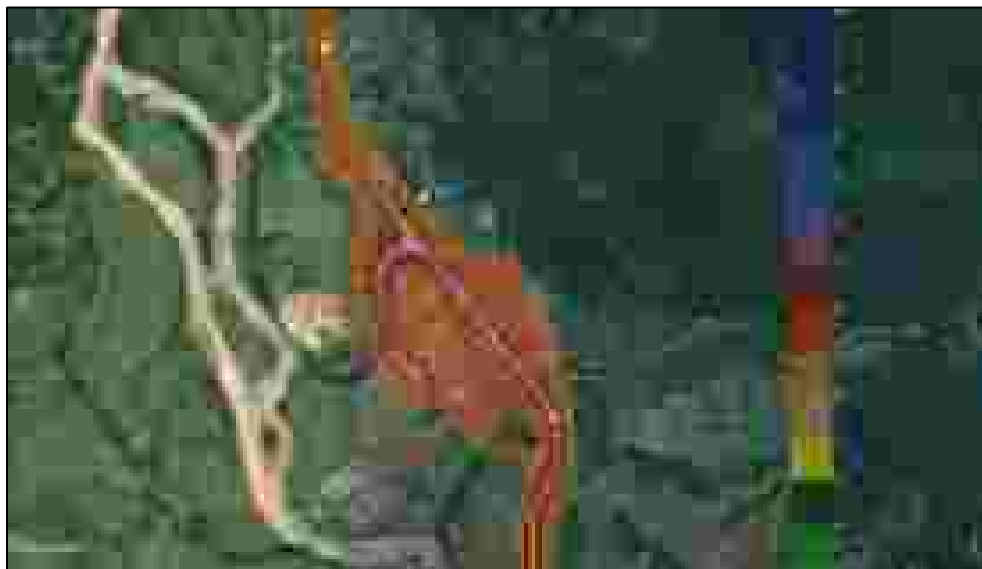


Figura 5.323 Zona con niveles de ruido de hasta 55 dBA en periodo diurno, escenario 2.
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

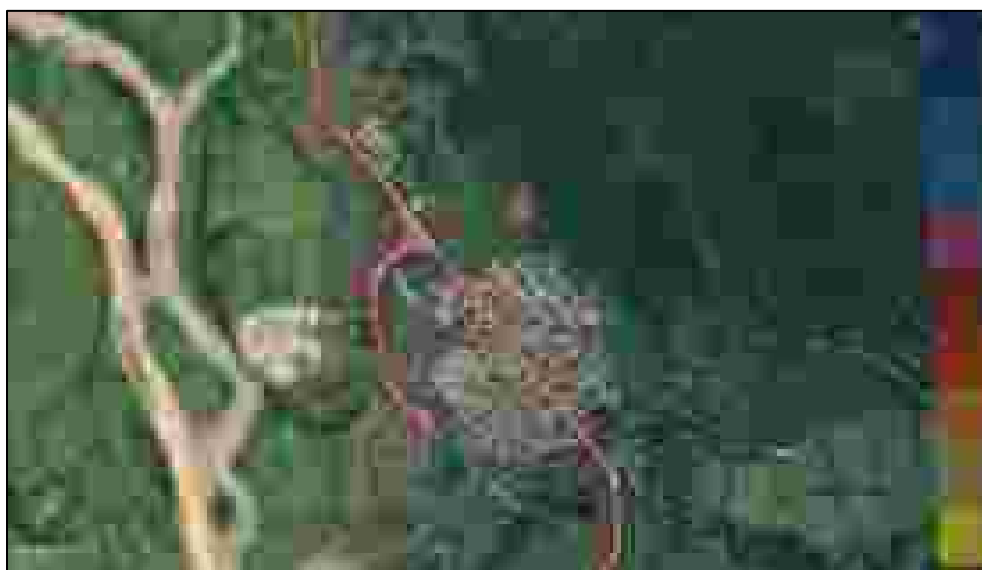


Figura 5.324 Zona con niveles de ruido de hasta 65 dBA en periodo diurno, escenario 2
Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

G. Incremento de los niveles de ruido en la zona cercana asociados a la construcción del proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá.

Con el fin de determinar la zona en la cual se evidenciarán los mayores impactos o incrementos en los niveles de ruido actuales, producto de las actividades constructivas que se desarrollarán durante el escenario 2, con respecto al escenario actual (escenario 1), el resultado se muestra en la [Figura 5.325](#).

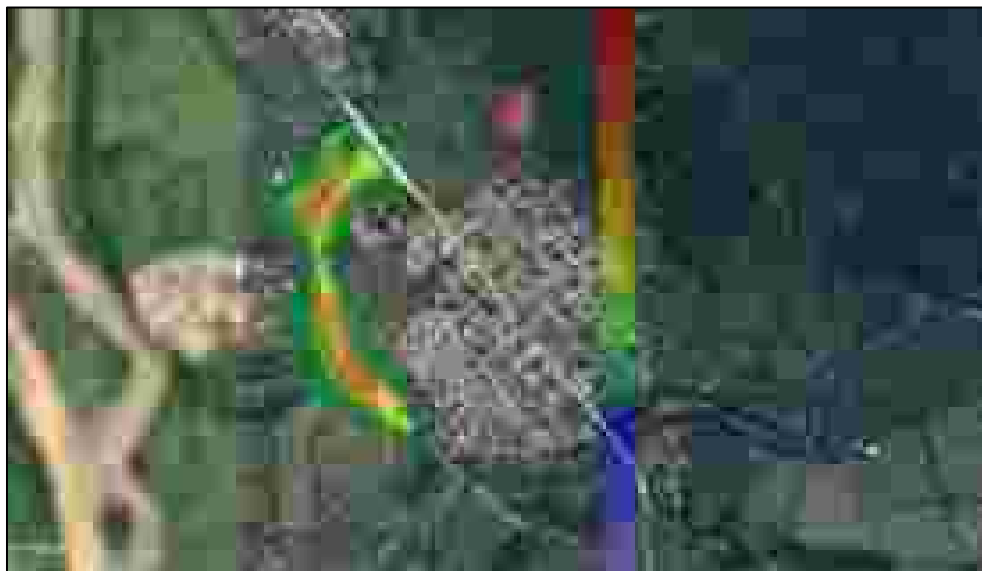


Figura 5.325 Mapa de distribución espacial de la afectación de operación del proyecto, comparación de escenario 2 y 1, periodo diurno

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la [Figura 5.325](#), se evidencian las zonas donde la construcción del proyecto puede generar incrementos hasta del orden de 9 dBA, los cuales en su totalidad alrededor de la zona de construcción de la variante.

I. Conclusiones

Se logró obtener el mapa de ruido de la zona en la cual se va ubica el proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá el cual permitió identificar que es una zona influenciada principalmente por ruido proveniente del flujo vehicular de la vía al mar, y en menor proporción por los ejes viales empleados internos del municipio. También destacan como fuentes de ruido de la zona de modelación los aportes de las fuentes hídricas, siendo más representativa la del río Mutatá.

El mayor incremento por ruido por parte del proyecto Modificación de la Licencia Ambiental Variante Mutatá en la fase de operación, se presentará en la zona contigua al mismo en un radio de 0.14 km en el periodo diurno para un nivel de 55 dBA, pero dicha zona se caracteriza por una baja densidad poblacional, y su uso de suelo es principalmente de carácter industrial.

El grado de cumplimiento de la Resolución 627 de 2006 está supeditado principalmente al uso del suelo y a las fuentes presentes, de los resultados de la modelación se puede extraer que los niveles permisibles se superan solo en el periodo nocturno en ubicaciones

clasificadas como sector B y D, y los sobrepasos se deben principalmente al ruido generado por las fuentes existentes. El aporte generado por la construcción de la variante es tal que su contribución no genera que se alcancen a superar los límites permisibles en el periodo diurno, que es el periodo de construcción del proyecto.

5.1.10.7 Vibraciones

5.1.10.7.1 Selección y ubicación de sitios de medición

Las mediciones se realizan en los sitios definidos en conjunto con la empresa y el Laboratorio Diagnóstico Ambiental S.A.S. En la Tabla 5.246, se tabula la ubicación y georreferenciación de los puntos de medición seleccionados.

Tabla 5.246 Identificación y georreferenciación de los puntos de medición de vibraciones

Punto	COORD. CTM12	
	X	Y
VB1	4620287,09	2359683,91
VB2	4619905,88	2359991,00
VB3	4620483,48	2360135,09

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

En la [Figura 5.326](#) y en la Tabla 5.246 se muestra la ubicación de los puntos de muestreo.



Figura 5.326 Ubicación de puntos de medición, vista Satelital

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.7.2 Equipos utilizados durante la medición

Para la realización del trabajo de campo, se requirió de los equipos y materiales que se relacionan a continuación:

Tabla 5.247 Descripción de los equipos de medición empleados

Equipo	Imagen	Descripción
Sensor de aceleración (acelerómetro Svantek SV85)		El SV 85 es un acelerómetro triaxial basado en IEPE diseñado para mediciones de vibraciones de uso general con el analizador de cuatro canales SVAN 958A. El acelerómetro piezoeléctrico industrial hermetic sealed piezoeléctrico industrial hermetic es adecuado para monitorizar ambiente industrial. La masa de la señal está aislada de la superficie de montaje y de la carcasa exterior para evitar bucles de masa.

Equipo	Imagen	Descripción
Analizador de vibraciones SVAN 958A		El analizador de sonido y vibraciones de cuatro canales SVAN 958A de clase 1 está diseñado para todas las aplicaciones que requieren una evaluación simultánea de sonido y vibraciones clase 1. Cada uno de los cuatro canales de entrada se puede configurar de forma independiente para la detección de sonido o vibración con diferentes filtros y constantes de tiempo del detector RMS, lo que proporciona a los usuarios una enorme flexibilidad de medición. La verdadera ventaja del SVAN 958A es la capacidad de realizar análisis avanzados simultáneamente al modo de medidor de nivel. En la práctica, esto permite al usuario obtener resultados de banda ancha como Leq, RMS, LMax, LMin, LPeak junto con análisis de cuatro canales como FFT o análisis de banda de octava.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.7.3 Identificación de los puntos

En la Tabla 5.248, se presenta la ubicación e identificación de las ubicaciones de monitoreo seleccionadas.

Tabla 5.248 Descripción de los sitios de muestreo

Punto 1 - VB1									
Punto	Punto 1	Nombre	VB1	Departamento	Antioquia	Municipio	Mutatá	Vereda	N/A
Altitud (m.s.n.m.)	122	COORD. WGS 84	N		7°14'31.71"			Vivienda familiar con dos habitaciones, cocina integral, sala comedor, cuarto de lavado de ropa y un baño; cuenta con una sola planta, tejas en asbesto, soportes de madera en el techo, estructura en cemento y ladrillo.	
			W		76°26'20.42"				
Altura del suelo (m)	0	MAGNA SIRGAS CTM12	X		4620287.05				
			Y		2359683.91				
Punto 2 - VB2									
Punto	Punto 2	Nombre	VB2	Departamento	Antioquia	Municipio	Mutatá	Vereda	N/A
Altitud (m.s.n.m.)	126	COORD. WGS 84	N		7°14'41.60"			Vivienda familiar con tres habitaciones, sala comedor, un baño, patio de ropa, estructura nueva, conformado por cemento, ladrillos y revoque.	
			W		76°26'32.91"				
Altura del suelo (m)	0	MAGNA SIRGAS CTM12	X		4619905.88				
			Y		2359991.01				
Punto 3 - VB3									
Punto	Punto 3	Nombre	VB3	Departamento	Antioquia	Municipio	Mutatá	Vereda	N/A
Altitud (m.s.n.m.)	136	COORD. WGS 84	N		7°14'46.43"			Vivienda familiar de dos plantas con tres habitaciones, sala comedor, cocina integral, baño, patio para ropa, ante	
			W		76°26'14.14"				
Altura del suelo (m)	0	MAGNA SIRGAS CTM12	X		4620483.48				
			Y		2360135.09				

					jardín; vivienda de las de 10 años de antigüedad

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

5.1.10.7.4 Normatividad o marco normativo

En la Tabla 5.249, se tabulan los valores de referencia o permisibles para la velocidad de vibración para diferentes tipos de edificaciones y frecuencias.

Tabla 5.249 Valores de referencia para la velocidad de vibración pico en mm/seg, de las cimentaciones frente a duraciones de corta duración

Valores de referencia para la velocidad de vibración en mm/s, de las cimentaciones frente a vibraciones de corta duración					
Tipo de edificio	Cimientos			Nivel de techo del piso más alto habitable - vibraciones horizontales en dos direcciones y en general todas las frecuencias	Forjados o techos - vibración vertical en el centro y en general todas las frecuencias
	Valor máximo de las 3 componentes del vector velocidad				
	frecuencias				
	≤10Hz	10 a 15 Hz	50 a 100* Hz		
Edificios usados para actividades industriales y edificios industriales (Line 1)	20	20 a 40	40 a 50	40	
Edificios de viviendas y otros similares en su construcción y/o su utilización. Edificios con enlucidos (Line 2)	5	5 a 15	15 a 20	15	20
Edificios especialmente sensibles a las vibraciones (Line 3)	3	3 a 8	8 a 10	8	
*para frecuencia superiores a 100Hz se debe aplicar, como mínimo, los valores de referencia para 100 Hz					

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Para el estudio actual aplican los estándares identificados por Line 2, los cuales corresponden a los aplicables a “Edificios de viviendas y otros similares en su construcción y/o su utilización. Edificios con enlucidos”.

A. Resultados mediciones

En esta sección se exponen los resultados de las medidas de vibraciones realizadas, teniendo en cuenta que todos los suelos son tipo concreto, tomando estas como una medida de línea base.

I. Resultados para el Punto 1 "VB1"

En la Tabla 5.250, se encuentra el resultado de la medición realizada para el Punto 1 - VB1 descrito en la Tabla 5.246, donde se realiza el análisis para el componente donde hubo mayor velocidad de vibración pico para los cuatro rangos de frecuencias mostrados, mientras en la Tabla 5.251 se muestran los resultados de las mediciones según el estándar DIN 4150-3, y donde se puede observar como las líneas de vibración de los ejes X, Y y Z, están muy por debajo de la línea de comparación L2-Edificios residenciales (mostrada en color naranja).

Tabla 5.250 Velocidad de vibración en la componente predominante en VB1

Velocidad de vibración pico en mm/s				
Valores normativos	≤10 Hz	10 a 50 Hz	50 a 100 Hz	≥ 100 Hz
	5 mm/s	5 a 15 mm/s	15 a 20 mm/s	20 mm/s
Velocidad de vibración pico	0.378210 mm/s	0.000842 mm/s	0.000045 mm/s	0.000005 mm/s
Dictamen	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

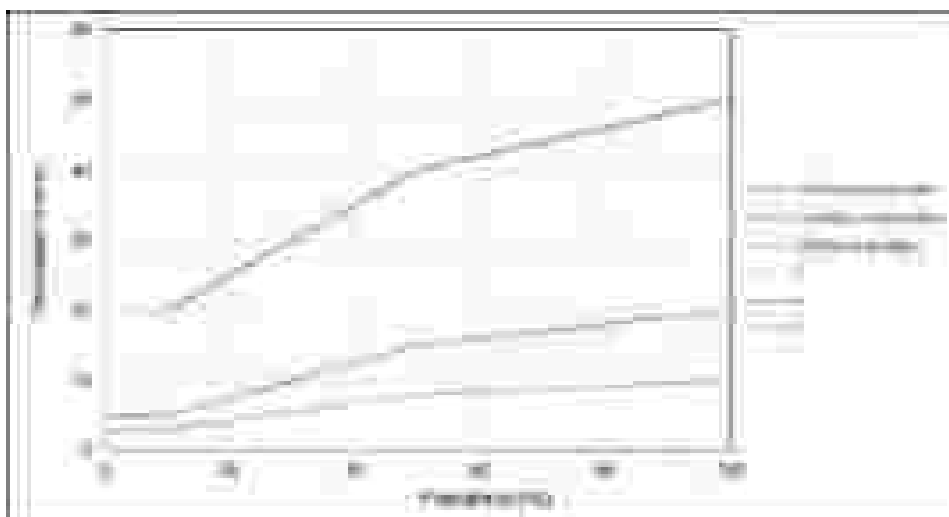


Figura 5.327 Velocidad de vibración en las componentes x, y, z en función de la frecuencia – punto de medida 1

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tal y como se puede observar la velocidad de vibración para la primera medición realizada, dio como resultado el cumplimiento para las componentes X, Y y Z indicando que la vivienda no se encuentra en riesgo estructural que afecte la estabilidad de esta, la máxima velocidad de vibración se da en el eje X (ver Tabla 5.251), pero de igual forma no logra superar los límites máximos establecidos en el estándar DIN 4150-3.

Tabla 5.251 Resumen de aceleraciones máximas por ejes para el Punto 1

FRECUENCIAS	Eje X	Eje Y	Eje Z	Máximo
≤10 Hz	0.378210	0.201566	0.115337	0.378210
10 a 50 Hz	0.000258	0.000161	0.000842	0.000842
50 a 100 Hz	0.000006	0.000006	0.000045	0.000045
>100	0.000001	0.000001	0.000005	0.000005

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

II. Resultados para el Punto 2 "VB2"

En la Tabla 5.252, se encuentra el resultado de la medición realizada para el Punto 2 – VB2 descrito en la Tabla 5.246, donde se realiza el análisis para el componente donde se presenta mayor velocidad de vibración pico para los cuatro rangos de frecuencias mostrados, mientras en la Tabla 5.253 se muestran los resultados de las mediciones según el estándar DIN 4150-3, y donde se puede observar como las líneas de vibración de los ejes X, Y y Z, están muy por debajo de la línea de comparación L2-Edificios residenciales (mostrada en color naranja).

Tabla 5.252 Velocidad de vibración en la componente predominante en Punto VB2

Velocidad de vibración pico en mm/s				
Valores normativos	≤10 Hz	10 a 50 Hz	50 a 100 Hz	≥ 100 Hz
	5 mm/s	5 a 15 mm/s	15 a 20 mm/s	20 mm/s
Velocidad de vibración pico	0.273289 mm/s	0.000808 mm/s	0.000045 mm/s	0.000005 mm/s
Dictamen	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

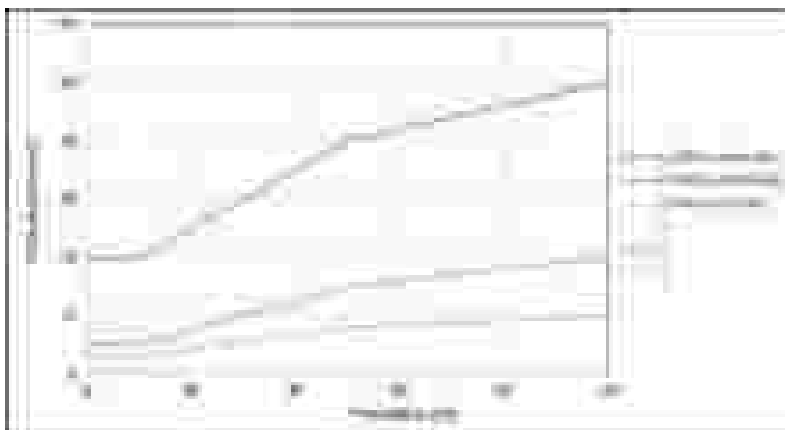


Figura 5.328 Velocidad de vibración en las componentes x, y, z en función de la frecuencia – punto de medida 2

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tal y como se puede observar la velocidad de vibración para la segunda medición realizada, dio como resultado el cumplimiento para las componentes X, Y y Z indicando que la vivienda no se encuentra en riesgo estructural que afecte la estabilidad de esta, la máxima velocidad de vibración se da en el eje X, pero de igual forma no logra superar los límites máximos establecidos en el estándar DIN 4150-3.

Tabla 5.253 Resumen de aceleraciones máximas por ejes para el Punto 1.

FRECUENCIAS	Eje X	Eje Y	Eje Z	Máximo
≤10 Hz	0.273289	0.131675	0.085703	0.273289
10 a 50 Hz	0.000215	0.000150	0.000808	0.000808
50 a 100 Hz	0.000006	0.000006	0.000045	0.000045
>100	0.000001	0.000001	0.000005	0.000005

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

III. Resultados para el Punto 3 "VB3"

En la Tabla 5.254, se encuentra el resultado de la medición realizada para el Punto 3 -VB3 descrito en la Tabla 5.246, donde se realiza el análisis para el componente donde se presenta mayor velocidad de vibración pico para los cuatro rangos de frecuencias mostrados, mientras en la Tabla 5.255 se muestran los resultados de las mediciones según el estándar DIN 4150-3, y donde se puede observar como las líneas de vibración de los ejes X, Y y Z, están por debajo de la línea de comparación L2-Edificios residenciales (mostrada en color naranja).

Tabla 5.254 Velocidad de vibración en la componente predominante para el Punto 3

Velocidad de vibración pico en mm/s				
Valores normativos	≤10 Hz	10 a 50 Hz	50 a 100 Hz	≥ 100 Hz
	5 mm/s	5 a 15 mm/s	15 a 20 mm/s	20 mm/s
Velocidad de vibración pico	0.275150 mm/s	0.000775 mm/s	0.000038 mm/s	0.000005 mm/s
Dictamen	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

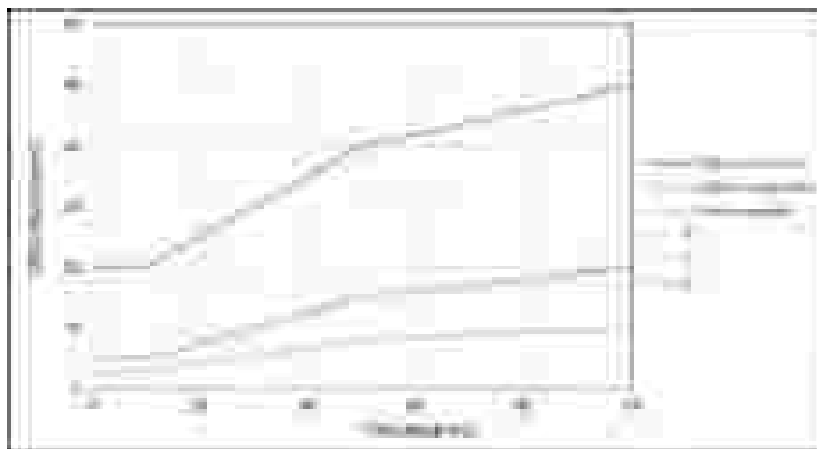


Figura 5.329 Velocidad de vibración en las componentes X, Y y Z en función de la frecuencia para el punto de medición 3.

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

Tal y como se puede observar la velocidad de vibración para la tercera medición realizada, dio como resultado el cumplimiento para las componentes X, Y y Z indicando que la vivienda no se encuentra en riesgo estructural que afecte la estabilidad de esta, la máxima velocidad de vibración se da en el eje X (ver Tabla 11), pero de igual forma no logran superar los límites máximos establecidos en el estándar DIN 4150-3.

Tabla 5.255 Resumen de aceleraciones máximas por ejes para el Punto 3.

FRECUENCIAS	Eje X	Eje Y	Eje Z	Máximo
≤10 Hz	0.275150	0.088082	0.051191	0.275150
10 a 50 Hz	0.000224	0.000131	0.000775	0.000775
50 a 100 Hz	0.000006	0.000006	0.000038	0.000038
>100	0.000001	0.000001	0.000005	0.000005

Fuente: Alternativa Ambiental S.A.S., 2025.

i. Conclusiones

En general las mediciones arrojaron como resultado el cumplimiento de la normativa DIN 4150-3 en materia de velocidad de vibraciones, se debe de tener en cuenta que las viviendas están catalogadas como edificaciones residenciales.

En cuanto al nivel de cumplimiento es alto, además las aceleraciones máximas presentadas no alcanzan a llegar al 10% de los valores permisibles, lo cual denota unos niveles bajos de vibraciones que permiten inferir que el nivel de afectación estructural actual por vibraciones es bajo y se puede calificar como seguro.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, C. (2010). *Identificación de áreas prioritarias de conservación enfocadas hacia la conectividad estructural del corredor Encenillo (Municipios de La Calera, Guasca, Sopo, Sesquilé, Guatavita), Cundinamarca*. Bogotá.
- AECOM, C. (2016). *Estudios para el volumen IV - UF4 Mar2*.
- AHG GROUP. (2023). *Estudio hidrogeológico para determinar la posible existencia de manantiales en el área de influencia del proyecto Variante Mutatá, Antioquia Unidad Funcional 4*. Bogotá.
- (2004). *Air quality model performance evaluation, Meteorol. Atmos. Phys.*, vol. 87.
- Alcaldía de Mutatá. (2000). *Acuerdo No.11 Plan de Ordenamiento Territorial Municipio de Mutatá*. Mutatá, Antioquia .
- Alconada Magliano, M. M., Damiano, F., & Fagundo Castillo, J. R. (2016). *Estudio del suelo en el paisaje regional como base para definir su manejo Agropecuario - Forestal*. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Amaya, G., Tamayo, C. R., Vélez, M. V., Vélez, J. I., & Álvarez, O. D. (2009). *Modelación del comportamiento hidrológico de tres cuencas en el Urabá Antioqueño-Colombia. Avances en recursos hidráulicos*, 19.
- APHA. A. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th Ed. Washington, D. C.: American Public Health Association.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2016). *Guía para el diligenciamiento y presentación del modelo de datos geográficos*. Bogotá.
- Ayora, M. (2010). *Análisis De Aguas*. Departamento de Química Física y Analítica Universidad de Jaén, 11. . Obtenido de Recuperado de: <http://www4.ujaen.es/~mjayora>
- (2007). B. Grašič, M. Zlata Božnar, P. Mlakar, and G. Tinarelli, "Re-evaluation of the Lagrangian particle modelling system on an experimental campaign in complex terrain," *Nuovo Cim. della Soc. Ital. di Fis. C*, vol. 30, no. 6, pp. 557–575.
- Barco, O., & Cuartas, L. (1998). *Estimación de la Evaporación en Colombia*. . Medellín: Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Bilotta, G. (2018). *Comprender la influencia de los sólidos suspendidos en la calidad del agua y la biota acuática*.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Desing (5th Ed.)*. McGraw-Hill.
- Bureau of Land Management, United States Department of Interior . (1980). *Visual Simulation Techniques* . Washington D.C : Government Printing Office .
- Castaño, O., Cárdenas, G., Hernández, E. J., & Castro, F. (2004). *Reptiles en el Chocó Biogeográfico*. En *Reptiles en el Chocó Biogeográfico*. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

- Castro, J. (2021). *Estándares de calidad del agua, asociados a metales y metaloides, para el uso del agua en la preservación de la fauna y flora en Colombia*.
- (1998). Chávez y Jaramillo.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Clarke, R. T. (Septiembre de 1983). Formely Hydrological Science Bulletin. *Hydrological sciences journal des sciences hydrologiques, Hydrological Sciences Journal*, 28(3). doi:<https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080/02626668309491974>
- Concejo Municipal de Mutatá. (2016). *Acuerdo No. 011 de 2016*. Mutatá.
- CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA e INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. (2002). *Zonificación de los conflictos de uso de las tierras del país. Capítulo IV, Uso adecuado y conflictos de uso de las tierras en Colombia*. Bogotá.
- CORTOLIMA. (2009). *Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la Microcuenca de las quebradas las Panelas y la Balsa*. Ibagué: Corporación Autónoma Regional del Tolima.
- (2016). D. A. Sanchez and D. R. Wilcken, "Evaluación de tres modelos de micro-escala (AERMOD, CALINE4 y R-LINE) en su aplicación a las vías principales de la Ciudad de Bogotá," *Univ. la Salle*, p. 102.
- Das, B. M. (2015). *Principles of Foundation Engineering (8th Ed)*. Cengage Learning.
- Departament of Environmental Quality. (1994). *Issue Paper: Hydrogen Ion Concentration (Ph)*. Portland, Oregón.
- Dirección de Geoamenazas, Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:25.000*. Bogotá: SGC.
- E. P. A. (EPA), "Appendix F to Part 50—Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Nitrogen Dioxide in the Atmosphere (Gas Phase Chemiluminescence). (1983).
- ESRI, Maxar Technologies. (2021). *World Imagery [Mapa base] en el municipio de Mutatá, Antioquia*. Obtenido de <https://www.esri.com>
- Estrella-Parra, E., Flores-Cruz, M., & Blancas-Flores, G. (2019). The Tillandsia genus: history, uses, chemistry, and biological activity. *Boletín latinoamericano y del caribe de plantas medicinales y aromáticas* , 239-264.
- Etter, A. (1991). *Introducción a la ecología del paisaje. Un marco de integración para los levantamientos ecológicos*. Bogotá.
- Fetter, C. (1988). *Applied hydrogeology*. New York: Company Mac Millam Publiling.
- Foster, S., & Hirata, R. (1988). *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using avaiable data*. Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences.

- García, A. (2022). *Regeneración y reutilización de aguas contaminadas mediante la aplicación de tratamientos físicos, químicos y biológicos de bajo coste y respetuosos con el medio ambiente*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Gobernación de Antioquia. (2012). *Cartoantioquia: Ortofotografías del departamento de Antioquia*. Medellín.
- Gonzalez, A. (1999). *Estimativos de Parámetros Efectivos de Resistencia con el SPT*. Bogotá: X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana - SCI - SCG.
- Howard, A. D. (1967). *Watershed drainage patterns*. AAPG Bulletin, 51, 2246-2259. Reprinted by permission of the American Association of Petroleum Geologist and Datapages, Inc.
- ibid. (s.f.).
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*.
- IDEAM. (2013). *Lineamiento conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*.
- IDEAM. (2015). *Fenoles en el agua por extracción y destilación*.
- IDEAM. (2021). *Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua*.
- IDEAM. (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*.
- IDEAM. (2023). *Hoja metodológica del indicador índice de calidad del agua (Versión 1,2). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia*.
- IGAC. (2000). *Análisis químicos*. Óp. cit., Perfil A-34. Colombia.
- IGAC. (2007). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento de Antioquia*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- IGAC, 2021. *Clasificación de las Tierras por su Capacidad de Uso*. (s.f.).
- INERCO Consultoría Colombia. (2019). *Estudio de Impacto Ambiental para la construcción de la Variante Mutatá (UF4), para el proyecto Autopista al Mar 2*. Bogotá.
- INGEOMINAS. (1999). *Geología del departamento de Antioquia*.
- INGEOMINAS. (2000). *Atlas de aguas subterráneas de Colombia. Mapa de unidades hidrogeológicas. Plancha 5-04*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua*. Bogotá: IDEAM.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI, IGAC. (2010). *Grupo Interno de trabajo levantamiento de suelos. Instructivo para los levantamientos de suelos, manual de códigos. Versión 1*. Bogotá: El Instituto.
- INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, IGAC. INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. MINISTERIO DE

- AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, MAVDT. (2010). *Protocolo de degradación de suelos y tierras por erosión*. Bogotá.
- Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales . (2020). *Estudio de Impacto Ambiental para el área de Perforación Exploratoria COR-15*.
- Inteinsa. (2024). *Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes, Terraplenes y Zonas de Disposición de Materiales - I-2807-VM-VOL V Rev3*. Medellín: Consorcio Mar 2.
- Jaramillo Uribe, M., Vélez Upegui, J. I., & Vélez Otálvaro, M. V. (2004). *Estimación de caudales mínimos usando un modelo distribuido de tanques*. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente.
- Jaramillo, R. A., & Cháves, C. B. (1988). Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. . *Cenicafé*, 224-230.
- Jiménez , M., & Vélez, M. (2006). *Análisis comparativo de indicadores de calidad del agua*.
- LANDSAT/Google Earth. (2020). *Imagen satelital de Mutatá, Antioquia*. Extraída de Google Earth. Obtenido de Google Earth: <https://earth.google.com>
- Larrea-Murrell, J. A.-B.-Á.-H.-P. (2013). *Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura*.
- MAVDT. (2004). *Resolución 865. Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones*. Bogotá D.C.: Ministerios de Ambiente.
- METEOBLUE. (2023). *Datos de simulación meteorológica* . Obtenido de <https://content.meteoblue.com/es/investigacion-educacion/especificaciones/origen-de-los-datos/datos-de-simulacion-meteorologica>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,. Resolución 2154. (2010). Bogotá, D. C.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible,. Resolución 2254. (2017). Bogotá, D. C., Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,. Resolución 650. (2010). Bogotá, D. C. Colombia.
- Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial, Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. (octubre, 2010). Bogotá .
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. (2012). Resolución 1415 (17, agosto, 2012). Por la cual se modifica y actualiza el modelo de almacenamiento geográfico (Geodatabase) contenido en la Metodología general para la Presentación de Estudios Ambientales adoptada mediante la Resolución 1503 del 4/08/10. *Diario oficial*, 1-2.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Decreto 948. (1995).
- Monografías*. (2024). Obtenido de La Atmósfera Terrestre.
- Monsalve, G. (2009). *Hidrología en la Ingeniería*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- NOAA, National Oceanic & Atmospheric Administration. (2017). *Description of changes to Ocean Niño Index (ONI)*. Obtenido de

https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. (s.f.). *Portal de suelos*. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>

Ortíz Palacios, J. (2016). *Ajuste al Plan de Ordenamiento Territorial, del municipio de Mutatá, para facilitar y promover el desarrollo urbano y el acceso a vivienda de las familias del municipio, en especial las de menores recursos en el marco de la ley 1537 del 2012 y la ley 1753*. Mutatá.

Pettitt, A. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Society: Series C (Applied Statistics)*, 126-135.

(2005). R. E. Morris, D. E. Mc Nally, T. W. Tesche, G. Tonnesen, J. W. Boylan, and P. Brewer, "Preliminary Evaluation of the Community Multiscale Air Quality Model for 2002 over the Southeastern United States," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 55, no. 11, pp. 169.

Ramírez, A., & Viña, G. (1998). *Limnología colombiana, Aportes a su Conocimiento y Estadísticas de Análisis*. Bogotá, Colombia. 293 p.: Panamericana, Formas e Impresos S.A.

Resolución 1541 de 2013," Bogotá DC, 2013. (s.f.).

Reyes, A., Barroso, F., & Carvajal, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.

Rodier J, Legube B, Merlet N. . (1998). *Análisis de las aguas, aguas naturales, aguas residuales, aguas de mar*. Barcelona: Omega, S.A.

Rojo, J. D. (2000). *Algunas metodologías para cuantificar la evapotranspiración media multianual en Colombia*. Bogotá.

Roldán, G. (1992). *Fundamentos de limnología neotropical primera edición*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.

Sánchez, O., Herzing, M., Peters, E., Marquez, R., & Zambrano, L. (2007). *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Impresora y Encuadernadora Progreso S.A.

Schumm, S. (1977). *The fluvial system*. Nueva York: Jhon Wiley & Sons.

Servicio Geológico Colombiano. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá.

SGC. (2003). *Leyenda de Vulnerabilidad*.

SGC. (2007). *GEOLOGÍA DE LA PLANCHAS 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33, 34 Y 40. PROYECTO: "EVOLUCIÓN GEOHISTÓRICA DE LA SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA"*.

SGC. (2013). *GEOLOGÍA DE LA PLANCHA 114 DABEIBA*.

SGC. (2023). *Mapa Geológico de Colombia 2023. Escala 1:1 500 000*.

- SGC. (2025). *Catálogo de sismicidad del Servicio Geológico Colombiano*.
- SGC, 2018. (s.f.).
- Singh, V. (2016). *Hanbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill Education.
- SoundPLAN Essential, 2017. (s.f.).
- Struckmeier, W., & Margat, J. (1995). *Hydrogeological Maps: A Guideline and Standard Leyend*. Hannover.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. Wiley & Sons, Inc.
- Toth, J. (1963). A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins. *J.Geophys.Res.*, 68.
- Tóth, J. (2000). *Las aguas subterráneas como agente geológico: causas procesos y manifestaciones*. Boletín Geológico y Minero, Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- United Nations Environment Programme – UNEP. (2005). *Manual de Estadísticas Ambientales*. Santa Cruz de la Sierra.
- United States Environmental Protection Agency, “40 CFR Appendix A-1 to Part 50 - Reference Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Ultraviolet Fluorescence Method),”. (2010).
- United States Environmental Protection Agency, “40 CFR Appendix C to Part 50 - Measurement Principle and Calibration Procedure for the Measurement of Carbon Monoxide in the Atmosphere (Non-Dispersive Infrared Photometry). (2011).
- United States Environmental Protection Agency, “40 CFR Appendix J to Part 50 - Reference Method for the Determination of Particulate Matter as PM10 in the Atmosphere,”. (1987).
- US EPA, “List of Designated Reference and Equivalent Methods,” . (2023).
- UT. ESTUDIOS AMBIENTALES MAR2. (2017). *Estudio de impacto Ambiental para la construcción de la variante Mutatá (UF-4) para el proyecto Autopista al Mar 2*. Bogotá.
- Vargas Quintero, M. C. (2010). *Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de ls Acuíferos a la Contaminación*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Vargas, R., & Diaz-Granados, M. (1997). *Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Santa Fe de Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.
- Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey*. (2nd ed.). Academic Press.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems (3rd ed.)*. Academic Press.



**ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA
MODIFICACIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DEL
PROYECTO "CONSTRUCCIÓN DE LA VARIANTE MUTATÁ
(UF4) DE LA CONCESIÓN AUTOPISTA AL MAR 2"**



- WMO. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial.
- World Bank Group & Solargis. (12 de 12 de 2024). *Global Solar Atlas*. Obtenido de <https://globalsolaratlas.info/map>
- Yeomans, W. (1986). *Visual Impact Assessment: Changes in natural and rural environment*. New York: John Wiley and sons.