

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POSTGRADO EN INGENIERÍA VIAL



Bdigital.ula.ve

TESIS DE MAESTRÍA

**APLICACIÓN DE SENSORES REMOTOS EN MANTENIMIENTO VIAL.  
CARRETERA T007, TRAMO LA VICTORIA - TOVAR, MÉRIDA – VENEZUELA**

Autor:

Ing. Luis Alejandro Velázquez Núñez

Tutor:

Prof. Msc. Jorge Arturo Carrero Marquina

Mérida, marzo de 2026

C.C.Reconocimiento



TESIS DE MAESTRÍA

---

APLICACIÓN DE SENSORES REMOTOS EN MANTENIMIENTO VIAL.  
CARRETERA T007, TRAMO LA VICTORIA - TOVAR, MÉRIDA – VENEZUELA

---

Para la obtención del grado  
Magister en Ingeniería Vial

Presentada por:  
Ing. Luis A. Velázquez N.

en la  
Maestría en Ingeniería Vial  
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes

Dirigida por:  
Tutor: Msc. Jorge A. Carrero M.

Mérida, marzo de 2026

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
EL PROBLEMA .....	2
1.1 Planteamiento del problema .....	2
1.2 Justificación.....	5
1.2.1 Importancia estratégica regional y nacional .....	5
1.2.2 Importancia para el sector agrícola .....	7
1.2.3 Aportes a la gestión del mantenimiento vial .....	7
1.3 Objetivos .....	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos .....	8
1.4 Alcance de la investigación .....	9
CAPÍTULO II.....	11
MARCO TEÓRICO .....	11
2.1 Antecedentes .....	11
2.1.1 Casos de estudio .....	12
2.1.2 Análisis de los estudios consultados.....	16
2.2 Bases teóricas.....	18
2.2.1 Mantenimiento vial.....	19
2.2.2 Estructuras de drenaje vial y control de erosión.....	20
2.2.3 Fundamentos de la observación terrestre remota .....	23
2.2.4 Plataformas de visualización y datos geoespaciales.....	30

2.2.5 Características del tramo de carretera en estudio.....	33
2.2.6 Estrategia integral de mantenimiento y mitigación de riesgos .....	47
CAPÍTULO III.....	49
METODOLOGÍA.....	49
3.1 Enfoque de la investigación.....	49
3.2 Diseño de la investigación.....	50
3.3 Area de estudio .....	50
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	51
3.5 Fuentes de información.....	52
3.6 Protocolo de aplicación .....	52
3.6.1 Fase 1: Reconocimiento del área de estudio .....	53
3.6.2 Fase 2: Modelado digital para obtención del mapa base .....	53
3.6.3 Fase 3: Descripción física y operacional del tramo .....	53
3.6.4 Fase 4: Análisis hidrogeomorfológico integral y diagnóstico funcional de infraestructura.....	54
3.6.5 Fase 5: Validación técnica de campo y correlación geológica.....	54
3.6.6 Fase 6: Construcción de la Cartografía Geológica-Geomorfológica.....	55
3.6.7 Fase 7: Formulación de propuestas de intervención.....	55
3.6.8 Fase 8: Criterios y metodología para la aplicación de sensores remotos .....	55
3.7 Consideraciones finales del capítulo.....	56
RESULTADOS .....	57
4.1 Reconocimiento del área de estudio (Fase 1) .....	57
4.1.1 Reconocimiento remoto y análisis documental .....	57
4.1.2 Visita de campo de reconocimiento .....	58
4.2 Modelado digital para obtención del mapa base (Fase 2) .....	60
4.3 Descripción física y operacional del tramo (Fase 3) .....	63
4.3.1 Características geométricas de la vía .....	63

4.3.2 Obras de paso .....	66
4.3.3 Condición operacional y deterioro de la infraestructura vial .....	67
4.4 Análisis hidrológico-geomorfológico integral. Integración de teledetección y validación técnica en campo (Fase 4).....	74
4.4.1 Análisis descriptivo de microcuencas por teledetección.....	74
4.4.2 Diagnóstico en campo y evaluación de obras de drenaje .....	93
4.4.3 Evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de las cuencas seleccionadas y su incidencia en la vulnerabilidad de la infraestructura vial, carretera T007, tramo La Victoria – Tovar .....	100
4.4.4 Análisis multitemporal del comportamiento del río Mocotíes y su interferencia con la infraestructura vial.....	123
4.5 Validación técnica de campo y correlación geológica (Fase 5).....	149
4.5.1 Visita técnica de comprobación (Ficha N° 02): Validación vial y toponímica	149
4.5.2 Visita técnica de comprobación (Ficha N° 03): Caracterización geológica y geomorfológica.....	151
4.5.3 Caso representativo de validación: Cuenca de la quebrada San José.....	154
4.5.4 Análisis de correlación y ajuste del modelo de detección.....	159
4.6 Construcción de la Cartografía Geológica-Geomorfológica (Fase 6).....	160
4.6.1 Integración geológica y geomorfológica.....	160
4.6.2 Infraestructura e hidrología de riesgo.....	160
4.7 Formulación de propuestas de intervención (Fase 7).....	164
4.7.1 Gestión y control unificado de microcuencas .....	164
4.7.2 Propuestas de intervención basadas en el análisis multitemporal del comportamiento del río Mocotíes.....	200
4.7.3 Propuestas de intervención para mejorar la condición operacional (mantenimiento vial) .....	214
4.8 Metodología y criterios para la aplicación de sensores remotos (Fase 8).....	215
4.8.1 Criterios de idoneidad y captura de datos .....	216

4.8.2 Estándares de identificación visual y espectral .....	216
4.8.3 Metodología operativa para el cálculo de incidencia fluvial .....	216
4.8.4 Criterios de gestión de incertidumbre y autogestión.....	217
4.8.5 Síntesis de la hoja de ruta estratégica .....	217
CAPÍTULO V .....	219
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	219
5.1 Conclusiones Generales .....	219
5.2 Recomendaciones Generales .....	223
5.2.1 Recomendaciones de ingeniería estructural .....	223
5.2.2 Recomendaciones de gestión y operación.....	224
5.2.3 Recomendaciones para futuras investigaciones .....	224
REFERENCIAS .....	226
ANEXOS .....	232
Anexo A. Resumen de los estudios analizados.....	232
Anexo B. Resumen de daños por la vaguada de 2021.....	234
Anexo C. Análisis descriptivo de microcuencas por teledetección.....	235
C.1 Cuenca: Quebrada La Parada. Progresiva 4+250 - 4+500.....	235
C.2 Cuenca: Quebrada Carmania/Los Cedros. Progresiva 5+500 - 5+750.....	237
C.3 Cuenca: Quebrada Los Aponcio. Progresiva 8+250.....	240
C.4 Cuenca: Quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva 15+000 .....	243
Anexo D. Diagnóstico en campo y evaluación de obras de drenaje .....	246
D.1 Quebrada Los Aponcio. Progresiva: 8+250. Diagnóstico geotécnico e hidráulico .....	246
D.2 Quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva: 15+000. Diagnóstico geomorfológico e hidráulico .....	247
D.3 Quebrada La Jabonera (Prg. 17+750). Análisis geológico e hidrológico de la cuenca.....	249
D.4 Quebrada Los Higueros. Progresiva: 18+000.....	250

D.5 Quebrada Blanca. Progresiva: 19+125. Análisis hidrológico .....	250
Anexo E. Evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de la quebrada.....	252
E.1 Quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva 11+250 .....	252
Anexo F. Análisis multitemporal del comportamiento fluvial del río Mocotíes y su interferencia con la infraestructura vial .....	256
F.1 Evaluación morfológica del río Mocotíes: Tramo Prg. 1+500 – 2+500 .....	256
F.2 Morfodinámica y riesgo en el tramo Prg. 2+500 – 3+250.....	257
F.3 Evaluación geomorfológica y estabilidad relativa: tramo Prg. 3+500 – 4+250.	259
F.4 Análisis Morfodinámico del Río Mocotíes: Tramo PR 6+750 – 10+750.....	260
F.5 Evaluación de bajo riesgo: tramo Prg. 13+000 – 13+500.....	262
Anexo G. Formulación de propuestas de intervención basadas en el análisis descriptivo de microcuencas por teledetección, diagnóstico en campo y evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de las cuencas .....	264
G.1 Propuestas de intervención basadas en el análisis descriptivo de microcuencas por teledetección .....	264
G.2 Propuestas de intervención basadas en el diagnóstico en campo y evaluación de obras de drenaje.....	267
G.3 Propuestas de intervención basadas en la evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de las cuencas .....	270
G.4 Propuestas de intervención basadas en el análisis multitemporal del comportamiento del río Mocotíes.....	272

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Vía alterna de la carretera Troncal 001</i> .....	6
<b>Figura 2.</b> <i>Vialidad Regional</i> .....	7
<b>Figura 3.</b> <i>Dique de retención de sedimentos. Santa Cruz de la Zarza, Toledo, España</i> .....	21
<b>Figura 4.</b> <i>Dique de retención de sedimentos. Barranco de las Ovejas, Alicante, España</i> .....	21
<b>Figura 5.</b> <i>Imagen de satélite. Valle del Mocotíes</i> .....	25
<b>Figura 6.</b> <i>Fotografía aérea. Santa Cruz de Mora. Misión 010488 (1996)</i> .....	26
<b>Figura 7.</b> <i>Mapa de Isoyetas de la Cuenca del Río Guaraque - Período 1965-1996</i> ...	41
<b>Figura 8.</b> <i>Tragedia de agosto de 2021 en Tovar</i> .....	44
<b>Figura 9.</b> <i>Tragedia de agosto de 2021 en Tovar</i> .....	44
<b>Figura 10.</b> <i>Área de estudio</i> .....	51
<b>Figura 11.</b> <i>Diagrama de flujo del protocolo metodológico para la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial</i> .....	52
<b>Figura 12.</b> <i>Obra de paso en quebrada El Peñón/San Rafael</i> .....	58
<b>Figura 13.</b> <i>Mapa base</i> .....	62
<b>Figura 14.</b> <i>Perfil de elevación</i> .....	64
<b>Figura 15.</b> <i>Curvas con radios menores a los permitidos entre progresivas 14+250 y 15+000</i> .....	66
<b>Figura 16.</b> <i>Cajón de paso y Alcantarilla</i> .....	67
<b>Figura 17.</b> <i>Falla tipo piel de cocodrilo</i> .....	67
<b>Figura 18.</b> <i>Bache profundo</i> .....	68
<b>Figura 19.</b> <i>Falla en acceso a cajón de paso</i> .....	68
<b>Figura 20.</b> <i>Deformaciones en el pavimento</i> .....	68
<b>Figura 21.</b> <i>Obstrucción de cunetas</i> .....	69
<b>Figura 22.</b> <i>Obstrucción de drenaje transversal</i> .....	69
<b>Figura 23.</b> <i>Obstrucción de drenaje transversal</i> .....	70
<b>Figura 24.</b> <i>Acumulación de desechos y vegetación en drenaje transversal</i> .....	70
<b>Figura 25.</b> <i>Invasión de vegetación en curva, generando pérdida de visibilidad</i> .....	70
<b>Figura 26.</b> <i>Señalización vertical</i> .....	71
<b>Figura 27.</b> <i>Señalización vertical</i> .....	71
<b>Figura 28.</b> <i>Demarcación horizontal borrosa</i> .....	72
<b>Figura 29.</b> <i>Demarcación horizontal borrosa</i> .....	72

<b>Figura 30.</b> <i>Demarcación horizontal borrosa y pérdida de reflectantes</i> .....	72
<b>Figura 31.</b> <i>Intersección semaforizada</i> .....	73
<b>Figura 32.</b> <i>Sistema de alumbrado apagado (izquierda) y encendido (derecha)</i> .....	73
<b>Figura 33.</b> <i>Microcuencas seleccionadas para el estudio</i> .....	76
<b>Figura 34.</b> <i>Cuenca quebrada El Barro. Progresiva 2+250</i> .....	77
<b>Figura 35.</b> <i>Mapa de pendientes</i> .....	78
<b>Figura 36.</b> <i>Cuenca: quebrada El Diamante Progresiva 3+250 - 4+000</i> .....	79
<b>Figura 37.</b> <i>Mapa de pendientes</i> .....	81
<b>Figura 38.</b> <i>Cuenca: quebrada No identificada. Progresiva 6+500</i> .....	82
<b>Figura 39.</b> <i>Mapa de pendientes</i> .....	83
<b>Figura 40.</b> <i>Cuenca: quebrada El Tabacal. Progresiva 9+000 – 9+250</i> .....	85
<b>Figura 41.</b> <i>Mapa de pendientes</i> .....	86
<b>Figura 42.</b> <i>Cuenca: quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva 11+250 – 11+500</i> ..	88
<b>Figura 43.</b> <i>Mapa de pendientes</i> .....	89
<b>Figura 44.</b> <i>Cuenca: quebrada Cacagüito. Progresiva 14+250</i> .....	90
<b>Figura 45.</b> <i>Mapa de pendientes</i> .....	92
<b>Figura 46.</b> <i>Vegetación en el cauce y presencia de bambú en la margen izquierda</i> .....	94
<b>Figura 47.</b> <i>Alcantarilla en la quebrada Carmania/Los Cedros. Presencia de ramas y hojas en el lecho</i> .....	94
<b>Figura 48.</b> <i>Entrada obstruida</i> .....	95
<b>Figura 49.</b> <i>Salida obstruida por vegetación y desechos sólidos</i> .....	95
<b>Figura 50.</b> <i>Agrietamiento en el pavimento</i> .....	95
<b>Figura 51.</b> <i>Eje hidráulico del flujo desplazado hacia el margen izquierdo</i> .....	96
<b>Figura 52.</b> <i>Vegetación aguas abajo del puente</i> .....	96
<b>Figura 53.</b> <i>Filita de gran tamaño golpeando el pilar central</i> .....	97
<b>Figura 54.</b> <i>Poca acumulación de material depositado aguas abajo del cajón</i> .....	97
<b>Figura 55.</b> <i>Cajón de 3 celdas. Bloques de gran tamaño</i> .....	98
<b>Figura 56.</b> <i>Vista aguas arriba del cajón. Bloques de granito de gran tamaño</i> .....	98
<b>Figura 57.</b> <i>Fractura del muro central con exposición y corrosión del acero de refuerzo</i> .....	98
<b>Figura 58.</b> <i>Hundimiento de calzada</i> .....	99
<b>Figura 59.</b> <i>Quebrada El Barro en 1996 y 2016</i> .....	101
<b>Figura 60.</b> <i>Quebrada El Barro en 2021 y 2023</i> .....	101
<b>Figura 61.</b> <i>Puente de concreto armado en quebrada El Barro</i> .....	103

<b>Figura 62.</b> <i>Quebrada Carmania/Los Cedros</i> .....	104
<b>Figura 63.</b> <i>Quebrada. Progresiva 6+500</i> .....	107
<b>Figura 64.</b> <i>Fotografía aérea, quebrada No identificada, progresiva 6+500</i> .....	109
<b>Figura 65.</b> <i>Quebrada Los Aponcio. Cuenca alta</i> .....	111
<b>Figura 66.</b> <i>Quebrada Los Aponcio. Cuenca baja</i> .....	113
<b>Figura 67.</b> <i>Quebrada El Tabacal. Cuenca alta</i> .....	115
<b>Figura 68.</b> <i>Quebrada El Tabacal. Cuenca baja</i> .....	117
<b>Figura 69.</b> <i>Quebrada Cacagüito. Cuenca alta</i> .....	119
<b>Figura 70.</b> <i>Daños por impacto al pilar central</i> .....	121
<b>Figura 71.</b> <i>Quebrada El Peñón/San Rafael</i> .....	122
<b>Figura 72.</b> <i>Fotografía aérea de 1952. Trazado vial para el momento y en la actualidad</i> .....	123
<b>Figura 73.</b> <i>Variación geométrica del cauce</i> .....	125
<b>Figura 74.</b> <i>Paleocauces, erosión lateral e inestabilidad en ladera</i> .....	126
<b>Figura 75.</b> <i>Riesgo hidráulico y estructural</i> .....	127
<b>Figura 76.</b> <i>Amenaza a la infraestructura del puente</i> .....	129
<b>Figura 77.</b> <i>Paleocauces y riesgo de erosión lateral</i> .....	129
<b>Figura 78.</b> <i>Aproximación activa del río Mocotíes</i> .....	130
<b>Figura 79.</b> <i>Paleocauces</i> .....	131
<b>Figura 80.</b> <i>Dinámica del río Mocotíes</i> .....	132
<b>Figura 81.</b> <i>Dualidad en el comportamiento del río</i> .....	133
<b>Figura 82.</b> <i>Control geotécnico natural</i> .....	134
<b>Figura 83.</b> <i>Paleocauces observados</i> .....	135
<b>Figura 84.</b> <i>Acercamiento significativo y riesgo de erosión</i> .....	136
<b>Figura 85.</b> <i>Distancia de seguridad moderada</i> .....	137
<b>Figura 86.</b> <i>Paleocauces y bajo riesgo observado</i> .....	138
<b>Figura 87.</b> <i>Reactivación de paleocauce</i> .....	139
<b>Figura 88.</b> <i>Bifurcación del cauce</i> .....	140
<b>Figura 89.</b> <i>Dinámica fluvial y amenaza estructural</i> .....	141
<b>Figura 90.</b> <i>Paleocauces observados y amenaza estructural</i> .....	142
<b>Figura 91.</b> <i>Riesgo de desborde</i> .....	142
<b>Figura 92.</b> <i>Brazo de desborde</i> .....	143
<b>Figura 93.</b> <i>Acercamiento del río</i> .....	144
<b>Figura 94.</b> <i>Acercamiento del río y riesgo de erosión lateral</i> .....	145

<b>Figura 95.</b> <i>Proximidad del río y riesgo urbano</i> .....	145
<b>Figura 96.</b> <i>Paleocauces observados</i> .....	146
<b>Figura 97.</b> <i>Control geológico del trazado del río</i> .....	147
<b>Figura 98.</b> <i>Acercamiento crítico del río</i> .....	148
<b>Figura 99.</b> <i>Obra de paso en quebrada Cacagüito</i> .....	150
<b>Figura 100.</b> <i>Presencia de granito y filita en la microcuenca</i> .....	157
<b>Figura 101.</b> <i>Depósito de pie de vertiente</i> .....	158
<b>Figura 102.</b> <i>Vegetación como indicador geomorfológico secundario</i> .....	158
<b>Figura 103.</b> <i>Alcantarilla de arco metálico corrugado revestida en concreto en cabezales y laterales</i> .....	158
<b>Figura 104.</b> <i>Escenario geológico-geomorfológico. Escala 1:25.000</i> .....	162
<b>Figura 105.</b> <i>Escenario geológico-geomorfológico. Escala 1:10.000</i> .....	163
<b>Figura 106.</b> <i>Ubicación de dos de los diques de retención de sedimentos y muros de encauzamiento</i> .....	170
<b>Figura 107.</b> <i>Ubicación de los diques de retención de sedimentos</i> .....	171
<b>Figura 108.</b> <i>Puente de concreto armado en quebrada El Barro</i> .....	173
<b>Figura 109.</b> <i>Ubicación de uno de los diques de retención de sedimentos y muros de encauzamiento</i> .....	175
<b>Figura 110.</b> <i>Ubicación de los diques de retención de sedimentos</i> .....	176
<b>Figura 111.</b> <i>Ubicación del dique de retención de sedimentos, muro de encauzamiento y aletas de la alcantarilla propuesta</i> .....	178
<b>Figura 112.</b> <i>Ubicación del dique de retención de sedimentos y muro de encauzamiento</i> .....	181
<b>Figura 113.</b> <i>Sedimentos y colmatación aguas arriba y aguas abajo del cajón de paso</i> .....	182
<b>Figura 114.</b> <i>Propuesta de reubicación del puente y extensión de aletas en el puente actual</i> .....	184
<b>Figura 115.</b> <i>Ubicación de los diques de retención de sedimentos</i> .....	186
<b>Figura 116.</b> <i>Ubicación de los diques de retención y cunetas de pie de terraplén</i> .....	186
<b>Figura 117.</b> <i>Daños por impacto al pilar central</i> .....	186
<b>Figura 118.</b> <i>Prolongación de las aletas de entrada y cunetas de pie de terraplén</i> .....	188
<b>Figura 119.</b> <i>Ubicación del dique de retención de sedimentos y pedraplén</i> .....	202
<b>Figura 120.</b> <i>Ubicación del pedraplén</i> .....	203
<b>Figura 121.</b> <i>Ubicación del pedraplén</i> .....	204

<b>Figura 122.</b> <i>Punto de aproximación focal. Monitoreo periódico requerido</i> .....	205
<b>Figura 123.</b> <i>Estabilidad longitudinal y lateral del río</i> .....	205
<b>Figura 124.</b> <i>Segmento de bajo riesgo hídrico</i> .....	207
<b>Figura 125.</b> <i>Ubicación del pedraplén y canalización</i> .....	207
<b>Figura 126.</b> <i>Ubicación del pedraplén</i> .....	208
<b>Figura 127.</b> <i>Ubicación del dique lateral</i> .....	209
<b>Figura 128.</b> <i>Ubicación del pedraplén</i> .....	210
<b>Figura 129.</b> <i>Ubicación del pedraplén</i> .....	211
<b>Figura 130.</b> <i>Ubicación del pedraplén</i> .....	211

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Sensores para la detección de daños viales</i> .....	27
<b>Tabla 2.</b> <i>Plataformas de visualización y datos geoespaciales</i> .....	33
<b>Tabla 3.</b> <i>Crecimiento histórico de la población en el Municipio Tovar (1786-2024)</i> .....	35
<b>Tabla 4.</b> <i>Formaciones geológicas, características geotécnicas y riesgos principales</i> ..	39
<b>Tabla 5.</b> <i>Historial de eventos hidrometeorológicos significativos en la cuenca del Mocotíes (1910- 2021)</i> .....	43
<b>Tabla 6.</b> <i>Principales mecanismos de deterioro del pavimento flexible. Tramo La Victoria – Tovar</i> .....	46
<b>Tabla 7.</b> <i>Patologías de pavimento asfáltico y su etiología climática y de tráfico</i> .....	47
<b>Tabla 8.</b> <i>Técnicas e instrumentos de Información</i> .....	51
<b>Tabla 9.</b> <i>Ficha técnica de visita de campo N° 01</i> .....	59
<b>Tabla 10.</b> <i>Pendientes máximas</i> .....	65
<b>Tabla 11.</b> <i>Relación velocidad-fricción-peralte-radio mínimo en carreteras</i> .....	66
<b>Tabla 12.</b> <i>Descripción de las características de la cuenca El Cacique/El Silencio</i> .....	88
<b>Tabla 13.</b> <i>Características de la ladera, granulometría aportada e implicación al cauce</i> .....	91
<b>Tabla 14.</b> <i>Base de datos georreferenciada utilizada</i> .....	124
<b>Tabla 15.</b> <i>Ficha técnica de visita de campo N° 02</i> .....	150
<b>Tabla 16.</b> <i>Datos generales de la ficha N° 03</i> .....	152
<b>Tabla 17.</b> <i>Localización del punto de validación</i> .....	152
<b>Tabla 18.</b> <i>Validación geológica y litológica</i> .....	153
<b>Tabla 19.</b> <i>Validación geomorfología y relieve</i> .....	153
<b>Tabla 20.</b> <i>Validación hidrología y drenaje</i> .....	153
<b>Tabla 21.</b> <i>Conclusiones y aplicación cartográfica</i> .....	154
<b>Tabla 22.</b> <i>Matriz de correlación técnica (Teledetección vs. Fase de Campo)</i> .....	159
<b>Tabla 23.</b> <i>Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada El Barro</i> .....	165
<b>Tabla 24.</b> <i>Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada El Diamante</i> .....	166
<b>Tabla 25.</b> <i>Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada No identificada</i> .....	166
<b>Tabla 26.</b> <i>Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada El Tabacal</i> .....	167

<b>Tabla 27.</b> <i>Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada El Cacique/El Silencio</i> .....	168
<b>Tabla 28.</b> <i>Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada Cacagüito</i> .....	168
<b>Tabla 29.</b> <i>Simbología empleada para la representación gráfica de las obras de ingeniería</i> .....	169
<b>Tabla 30.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Barro</i> .....	192
<b>Tabla 31.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Diamante</i> .....	192
<b>Tabla 32.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada La Parada</i> .....	193
<b>Tabla 33.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada Carmania/Los Cedros</i> .....	193
<b>Tabla 34.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada No identificada</i> .....	194
<b>Tabla 35.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada Los Aponcio</i> .....	194
<b>Tabla 36.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Tabacal</i> .....	195
<b>Tabla 37.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Cacique/El Silencio</i> .....	196
<b>Tabla 38.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada Cacagüito</i> .....	196
<b>Tabla 39.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Peñón/San Rafael</i> .....	197
<b>Tabla 40.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada La Jabonera</i> .....	198
<b>Tabla 41.</b> <i>Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada Los Higueros</i> .....	198
<b>Tabla 42.</b> <i>Resumen general de obras de ingeniería</i> .....	199
<b>Tabla 43.</b> <i>Simbología empleada para la representación gráfica de las obras de ingeniería</i> .....	201
<b>Tabla 44.</b> <i>Recomendaciones de intervención estructural</i> .....	212
<b>Tabla 45.</b> <i>Resumen de obras de defensa fluvial</i> .....	213
<b>Tabla 46.</b> <i>Riesgo por deterioro del pavimento y drenajes</i> .....	214
<b>Tabla 47.</b> <i>Riesgo por deficiencia en la seguridad vial</i> .....	215
<b>Tabla 48.</b> <i>Síntesis de criterios y metodología para la gestión vial mediante sensores remotos</i> .....	217

## RESUMEN

La presente investigación abordó la problemática del deterioro vial en Venezuela, específicamente en la Carretera Troncal 007, tramo La Victoria - Tovar, estado Mérida. Esta vía representa un eje estratégico para la economía agrícola y la conectividad regional, cuya estabilidad se ve constantemente amenazada por la actividad de la Falla de Boconó, el relieve montañoso abrupto y una alta pluviosidad. El objetivo general del trabajo fue proponer un modelo de gestión para el mantenimiento vial mediante el análisis de imágenes satelitales y fotografías aéreas, permitiendo identificar, clasificar y cartografiar deterioros en la superficie y su área de influencia.

La metodología se definió como una investigación de tipo aplicada y descriptiva, bajo un enfoque mixto y un diseño no experimental de corte transversal. El aporte central de este trabajo consistió en el desarrollo de un protocolo metodológico estructurado en ocho fases secuenciales, las cuales integran: 1) Reconocimiento del área de estudio, 2) Modelado digital para obtención del mapa base, 3) Descripción física y operacional del tramo, 4) Análisis hidrogeomorfológico integral y diagnóstico funcional de infraestructura, 5) Validación técnica de campo y correlación geológica, 6) Construcción de la Cartografía Geológica-Geomorfológica, 7) Formulación de propuestas de intervención y 8) Metodología y criterios para la aplicación de sensores remotos. Este marco de trabajo permite transformar la observación satelital y el diagnóstico de campo en un sistema de soporte para la toma de decisiones, transitando de una gestión correctiva a una preventiva mediante herramientas de libre acceso. La población de estudio comprendió los 20,35 km del tramo vial y sus unidades hidrológicas asociadas.

Los principales resultados revelaron deficiencias críticas en la geometría de la vía, con pendientes que alcanzan el 15% y radios de curvatura mínimos de 33 m, valores que incumplen la normativa nacional y elevan el riesgo de accidentes. Mediante el análisis multitemporal del río Mocotíes (2012-2023), se identificaron zonas de vulnerabilidad extrema, destacando la progresiva 1+250, donde la distancia entre el cauce y el terraplén se redujo de 110 m a solo 5 m. Asimismo, se detectó un deterioro generalizado del pavimento por fatiga y una obstrucción severa del sistema de drenaje por falta de mantenimiento rutinario.

Las conclusiones del estudio determinan que la inestabilidad del tramo en estudio la Troncal 007 es un proceso cíclico derivado de la interacción entre una geología fracturada, suelos saturados y una gestión vial correctiva. Se concluye que el uso de sensores remotos es una herramienta de bajo costo y alta eficacia para el monitoreo preventivo en zonas de difícil acceso. Como recomendaciones, se propone una jerarquización de intervenciones: prioridad máxima para el mantenimiento de drenajes y seguridad vial; prioridad estructural para la construcción de

pedraplenes de protección en estribos de puentes y zonas de socavación inminente (Prg. 1+250, 5+500 y 17+000); y el uso de estabilización biológica con bambú en zonas de llanura de inundación para mitigar la energía del flujo.

Palabras clave: Sensores remotos, mantenimiento vial, modelo de gestión vial, Troncal 007, teledetección, riesgo geológico, mantenimiento preventivo, río Mocotíes.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

## INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial constituye un activo estratégico para el desarrollo socioeconómico de cualquier nación, siendo el soporte físico que garantiza la movilidad de bienes, servicios y personas. Según autores como Pazzanese (2017) y Tori (2018), el mantenimiento de estas redes enfrenta una crisis global de inversión y deterioro estructural, una realidad que se agudiza en entornos geodinámicos complejos. En este contexto, la Carretera Troncal 007, en el tramo La Victoria-Tovar, representa el eje articulador del Valle del Mocotíes y un canal fundamental para la seguridad alimentaria regional (Contreras y Gutiérrez, 2008). No obstante, su estabilidad está comprometida por la interacción entre una geología fracturada por la Falla de Boconó y patrones climáticos de alta pluviosidad, factores que someten a la vía a un estado de vulnerabilidad recurrente.

A pesar de su importancia estratégica, el modelo de gestión vial aplicado históricamente en Venezuela ha sido predominantemente correctivo. Existe una brecha crítica en la planificación: la falta de datos técnicos actualizados y la dificultad de realizar inspecciones exhaustivas en terrenos montañosos han relegado las acciones preventivas. Esta deficiencia quedó evidenciada en eventos catastróficos documentados por Laffaille et al. (2005) y Blanco (2021), donde los deslaves de 2005 y 2021 demostraron que las técnicas tradicionales de mantenimiento son insuficientes si no se comprenden los procesos morfohidrológicos y la meteorización profunda de unidades como el Granito de Tovar y la Asociación Mucuchachí (Pabón, 2007; Medina et al., 2015). La ausencia de herramientas de monitoreo de bajo costo representa el principal obstáculo para transitar hacia un mantenimiento preventivo y eficiente.

Motivado por la necesidad de optimizar recursos y mejorar la seguridad ciudadana, el presente estudio propone un cambio de paradigma mediante el uso de la teledetección. El propósito central es validar un modelo de gestión fundamentado en sensores remotos, aprovechando la capacidad de estas tecnologías para evaluar la geometría vial, monitorear la dinámica de los cauces adyacentes y cartografiar riesgos ambientales de forma no destructiva (Schnebele et al., 2015; FlyPix AI, 2025a). A diferencia de los levantamientos topográficos convencionales, este estudio emplea herramientas de libre acceso como los datos de las plataformas *ArcGis Earth*, *Google Earth Pro* y Modelos de Elevación Digital (USGS, s.f.), permitiendo identificar puntos críticos y amenazas geológicas con alta cobertura espacial. Con ello, se busca proporcionar a los tomadores de decisiones una metodología científica capaz de anticipar riesgos estructurales y garantizar la operatividad de una vía vital para la conectividad de los Andes venezolanos.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

La infraestructura vial constituye el eje fundamental para la integración social, el intercambio comercial y la capacidad de respuesta ante emergencias en los sistemas de movilidad modernos. No obstante, el mantenimiento de estas redes enfrenta hoy un desafío global, donde los métodos de inspección visual tradicionales resultan insuficientes para cubrir grandes extensiones con la frecuencia necesaria. Esta crisis de inversión, que afecta desde potencias como Estados Unidos y Europa hasta naciones vecinas como Colombia, adquiere niveles de severidad en Venezuela. En el estado Mérida, la falta de una planificación preventiva compromete la seguridad vial e incrementa los costos operativos y la huella de carbono debido a la ineficiencia en el transporte.

La presente investigación se enfoca en el tramo La Victoria – Tovar de la carretera Troncal 007, una arteria vital emplazada en el Valle del Mocotíes. Este sector se caracteriza por una complejidad geológica extrema, influenciada directamente por la Falla de Boconó y un relieve montañoso abrupto que favorece aludes torrenciales y fallas de borde recurrentes. Ante este escenario, donde la gestión administrativa suele verse limitada por la escasez de recursos, la teledetección emerge como una herramienta transformadora de bajo costo, capaz de proporcionar una evaluación no destructiva y de amplia cobertura espacial para la identificación precisa de patologías viales.

A través de la aplicación de sensores remotos, este estudio se propone, además de diagnosticar el estado actual del tramo vial, establecer criterios metodológicos que permitan priorizar las intervenciones de mantenimiento en una de las zonas de mayor riesgo geotécnico de los Andes venezolanos. A continuación, se detalla el planteamiento del problema, la justificación, los objetivos que guían esta investigación y el alcance de la misma.

#### **1.1 Planteamiento del problema**

Las carreteras son la columna vertebral del comercio, la conectividad social y la respuesta de emergencia en la sociedad moderna. Sin embargo, su deterioro continuo, causado por las cargas del tráfico y las condiciones ambientales, exige un mantenimiento regular y una planificación estratégica. Históricamente, este proceso ha sido laborioso y costoso, basándose en métodos de evaluación de exámenes visuales y mediciones puntuales que, aunque valiosos, carecen de la cobertura integral y la frecuencia necesarias para una gestión óptima de grandes redes viales.

Esta crisis de infraestructura no es exclusiva de las economías en desarrollo. En el contexto internacional, específicamente en Estados Unidos, el Departamento de Transporte calcula que las carreteras y puentes enfrentan un retraso de 808.200 millones de dólares en inversiones, con casi 143.000 puentes necesitados de reparaciones urgentes (Pazzanese, 2017). En Europa, se estima que el 30% de los puentes se encuentran en mal estado (Tori, 2018). Por su parte, en países vecinos como Colombia, el descuido en el mantenimiento se ha vinculado a bajos réditos políticos, donde se prioriza la inauguración de obras nuevas sobre la conservación de las existentes (Clavijo, 2019).

En Venezuela, y específicamente en el estado Mérida, la falta de mantenimiento vial es una situación crítica que se manifiesta en el deterioro de autopistas, calles y avenidas, produciendo consecuencias negativas en la seguridad, la economía y la calidad de vida. El deterioro aumenta el riesgo de accidentes por huecos y fallas, eleva los costos de transporte y el consumo de combustible, y afecta la salud ambiental al obligar a los vehículos a operar fuera de su rango óptimo de eficiencia, incrementando la emisión de CO<sub>2</sub>. Además, la necesidad de reparaciones no planificadas implica un mayor consumo de energía y materiales, aumentando la huella de carbono del sector.

Todo ello está influenciado por factores de origen natural, fallas en el mantenimiento y actividades humanas, los cuales deben ser investigados tomando en cuenta las particularidades regionales. En el caso de esta investigación, el objeto de estudio es el tramo La Victoria – Tovar de la carretera Troncal 007. Esta zona, caracterizada por un relieve montañoso abrupto, es altamente susceptible a procesos de inestabilidad geológica y geomorfológica.

La vía se encuentra influenciada por la Falla de Boconó, cuya actividad tectónica debilita el terreno y desencadena deslizamientos (Laffaille et al., 2005). Geomorfológicamente, el relieve de valles en "V" con pendientes pronunciadas canaliza el agua hacia la vía, aumentando la erosión. Históricamente, el Valle del Mocotíes ha sufrido aludes torrenciales y flujos de detritos debido a que gran parte de la carretera está construida sobre conos de deyección inestables (Pabón, 2007). Estos factores, sumados a la alta pluviosidad y las crecidas del río Mocotíes, provocan fallas de borde y el colapso recurrente de la calzada.

A nivel de gestión, el estado de la carretera refleja una ausencia de planificación preventiva. La presencia de vegetación en las cunetas y el mal estado de puentes y drenajes impiden el desalojo de las aguas, acelerando el deterioro. Asimismo, actividades humanas como la construcción de viviendas en laderas y el tráfico pesado constante en una vía ya debilitada, agravan la situación. Esta deficiencia administrativa suele responder a la

insuficiencia de recursos o a la preeminencia de prioridades gerenciales por encima de las técnicas.

Si bien no está al alcance modificar la asignación de recursos públicos, un aporte en la planificación podría generar cambios positivos a bajo costo. En este escenario, la teledetección emerge como una solución transformadora. Se define como la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde plataformas remotas y ofrece una evaluación no destructiva con gran cobertura espacial (Chuvieco, 2000).

Mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución, se propone la detección, clasificación y cuantificación precisa de los daños en el tramo La Victoria - Tovar. La implementación de sensores remotos representa un método alternativo de bajo costo frente al sistema tradicional de inspecciones de campo, permitiendo realizar diagnósticos oportunos para garantizar la seguridad, la economía y la calidad de vida de los ciudadanos de la zona.

En virtud de la problemática expuesta, donde la interacción entre el complejo entorno geológico del Valle del Mocotíes y la ausencia de una gestión preventiva comprometen la integridad de la Troncal 007, surge la necesidad de evaluar nuevas alternativas tecnológicas para la supervisión de la infraestructura. Por lo tanto, con el propósito de alcanzar el objetivo general de aplicar sensores remotos para identificar, clasificar y cartografiar los deterioros del tramo La Victoria–Tovar, se formulan las siguientes interrogantes que guían el curso de la presente investigación:

¿Cuál es el alcance de los sensores remotos para diagnosticar la interacción entre los factores de inestabilidad geológica y el deterioro físico de la calzada en el tramo La Victoria–Tovar?

¿En qué medida coinciden los hallazgos obtenidos mediante la interpretación de sensores remotos con las condiciones reales observadas durante las visitas de campo en el sector estudiado?

¿De qué manera la información recolectada a través de la teledetección permite definir y priorizar las labores de mantenimiento vial necesarias para garantizar una gestión eficiente?

¿Cuáles son los criterios técnicos y metodológicos óptimos para integrar el uso de sensores remotos como una herramienta estándar de apoyo en la planificación de acciones de mantenimiento vial?

## **1.2 Justificación**

La infraestructura vial es uno de los activos más importantes que tiene un país, por lo tanto, es necesario garantizar su adecuada conservación a través de mantenimientos periódicos, rutinarios y oportunos. El mantenimiento oportuno ahorra costos futuros de intervenciones mayores como rehabilitación o reconstrucción total de tramos de carreteras. Adicionalmente, un buen mantenimiento preserva las condiciones de servicio adecuadas que inciden en la seguridad de los usuarios, así como en los costos de operación vehicular y la calidad del ambiente. Es indispensable realizar labores de mantenimiento preventivas, con acciones a corto, mediano y largo plazo.

Una red vial en buen estado es esencial para la seguridad vial y movilidad de los usuarios. Los pavimentos con baches, grietas o hundimientos, tramos de vía con derrumbes o deslizamientos, pueden causar accidentes, lesiones y muertes. Transitar por una vía en estado óptimo también es indispensable para la eficiencia del transporte, ya que los vehículos pueden circular a velocidades seguras y eficientes, lo que reduce el tiempo de viaje y los costos de transporte, que se traduce en una mejora en la calidad de vida de los ciudadanos, por lo que las personas pueden desplazarse con más facilidad y seguridad, bien sea con fines laborales, educativos o recreacionales.

Es necesario así, que los planes de mantenimiento se fundamenten en el análisis de los daños presentes en las vías y así poder destinar recursos para mantenimiento y conservación de la vialidad, antes de que sea necesario realizar rehabilitaciones o incluso reconstrucciones si la vía llega a un estado de deterioro muy avanzado. El tramo de la Troncal 007 entre la Hacienda La Victoria y Tovar es una vía crucial para la región andina de Venezuela, con importancia tanto regional como nacional.

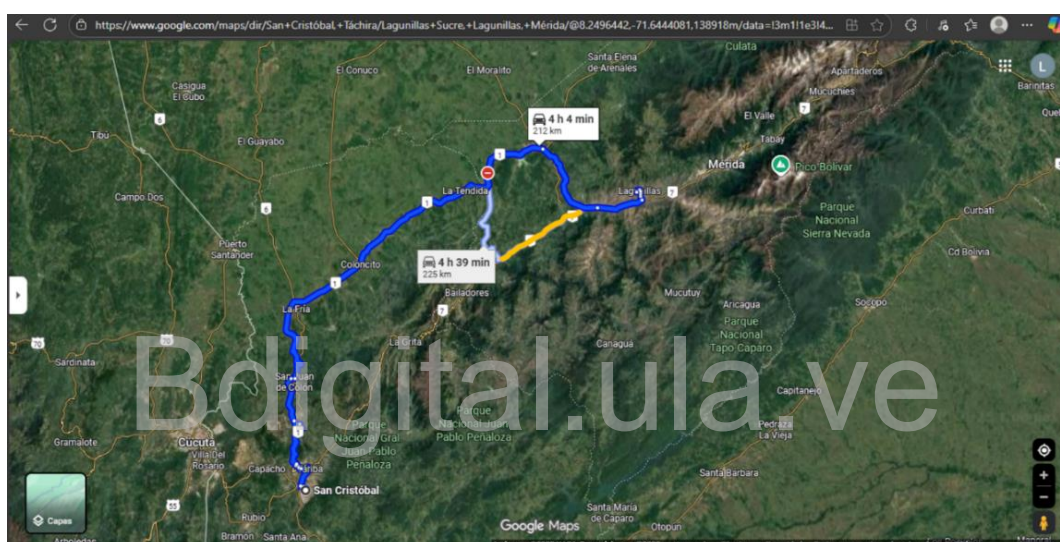
### **1.2.1 Importancia estratégica regional y nacional**

La vía entre La Victoria y Tovar, tramo de la Troncal 007 en estudio, es una ruta de comunicación alterna fundamental para el estado Mérida y la región andina. Su importancia se destaca particularmente cuando la Local 008, la vía que conecta Mérida con El Vigía, para luego conectar con la Troncal 001 (la principal arteria vial que conecta el centro y occidente del país con la ciudad de Mérida), se ve afectada. Los cierres o interrupciones en la Local 008 (para luego acceder a la Troncal 001), causados por deslizamientos, accidentes o eventos naturales, resaltan

el papel vital de la Troncal 007 en relación con la conectividad, ya que es el principal camino alternativo.

A nivel nacional, esta vía es una ruta de conectividad estratégica. La Troncal 007 es parte del tramo que enlaza a Mérida con El Vigía, desde donde se puede continuar hacia el estado Táchira, una de las principales fronteras con Colombia. Por lo tanto, el tramo de la Troncal 007 actúa como un desvío esencial para mantener la comunicación y el flujo de personas y bienes hacia y desde la frontera, garantizando la conectividad con un estado fronterizo clave, como se muestra en la Figura 1.

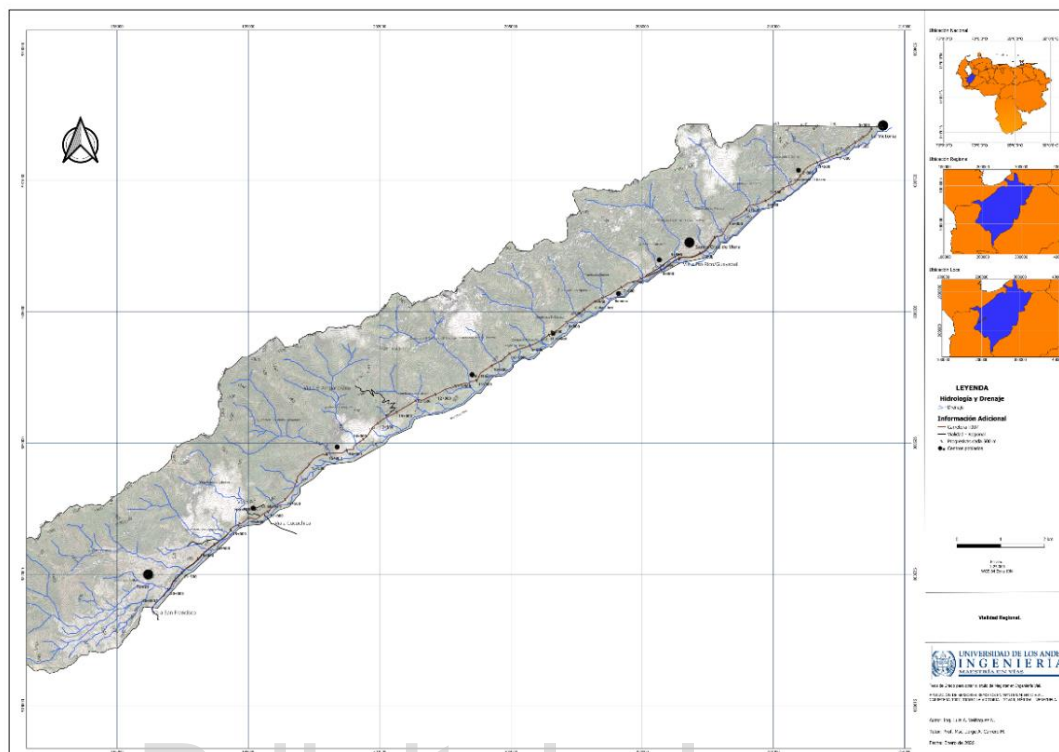
**Figura 1.** Vía alterna de la carretera Troncal 001



**Nota.** Ruta principal Mérida – San Cristóbal (color azul oscuro). Tramo La Victoria – Tovar (color amarillo), Tramo Tovar - Caño El Tigre (color azul claro). Adaptado de Google Maps.

A nivel de la red vial regional, la Troncal 007 ejerce una función articuladora al servir como eje de conectividad longitudinal en el valle del Mocotíes. Su alineamiento se desarrolla en ambos márgenes del río Mocotíes, enlazando centros poblados y nodos logísticos clave. Específicamente, en la margen izquierda, la vía vincula directamente a las poblaciones de Tovar, Santa Cruz de Mora, y El Amparo/Zea, incluyendo además el punto estratégico de la sede de Protección Civil (PC) del sector Mocotíes. Paralelamente, en la margen derecha, la Troncal 007 proporciona acceso a núcleos poblacionales y sectores de menor jerarquía como Puerto Rico, El Guayabal, Cucuchica y San Francisco. El mapa de la vialidad a nivel regional se observa en la Figura 2.

**Figura 2. Vialidad Regional**



### 1.2.2 Importancia para el sector agrícola

El área de Tovar y sus alrededores, conocida como el Valle del Mocotíes, es una de las principales zonas agrícolas del estado Mérida. La región produce una gran variedad de rubros entre las que destacan zanahorias, papas, repollo, frutas y café. La vía de la Troncal 007 es el principal canal para el transporte de estos productos agrícolas hacia los mercados del centro y occidente de Venezuela, incluyendo estados como Aragua, Carabobo y Distrito Capital. Sin la operatividad de esta vía, la distribución de alimentos se vería gravemente comprometida, afectando la seguridad alimentaria a nivel regional y nacional. Con lo antes señalado, se pone de manifiesto que la falta de mantenimiento y los problemas geológicos y geomorfológicos en este tramo, además de ser un problema local, tienen implicaciones de seguridad vial, económica y de conectividad a nivel regional y nacional.

### 1.2.3 Aportes a la gestión del mantenimiento vial

Los sensores remotos ofrecen una solución innovadora para el mantenimiento de la vialidad. Estos permiten recopilar datos sobre el estado de las carreteras sin necesidad de

desplegar equipos o personal en el terreno. Los sensores remotos pueden reducir los costos de mantenimiento de la vialidad al permitir que los equipos y el personal se concentren en las áreas que realmente necesitan atención, ya que gran parte del reconocimiento de campo puede hacerse desde una oficina. Estos pueden ayudar a identificar los problemas en las carreteras antes de que se conviertan en un peligro para los usuarios, esto con miras a realizar mantenimiento preventivo.

De allí la relevancia de este trabajo, ya que los sensores remotos pueden proporcionar datos e información en tiempo real. Su utilización, enfocada al mantenimiento vial, puede aportar datos confiables que permitan gestionar labores para definir un mantenimiento oportuno, a un bajo costo, lo que permite a los responsables del mantenimiento tomar decisiones más informadas e inmediatas.

En el caso del estado Mérida, los sensores remotos podrían utilizarse para monitorear el estado de las carreteras en las zonas montañosas, las cuales son particularmente de difícil acceso, lo que dificulta el mantenimiento preventivo. Además de las ventajas mencionadas anteriormente, es importante destacar que la tecnología de sensores remotos está en constante evolución, lo que significa que se están desarrollando nuevos sensores con mayor precisión, resolución y capacidad de medición.

### **1.3 Objetivos**

A continuación, se presentan los lineamientos que orientan el desarrollo de la investigación, desglosados en un objetivo general y sus correspondientes objetivos específicos.

#### **1.3.1 Objetivo general**

Aplicar sensores remotos para el mantenimiento vial en el tramo La Victoria-Tovar de la carretera T007, en Mérida-Venezuela, con el fin de identificar, clasificar y cartografiar deterioros y patologías actuales y potenciales, en la superficie del tramo vial y su área de influencia.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Identificar mediante el uso de sensores remotos los problemas actuales y potenciales, naturales y antrópicos, con fines correctivos.
2. Comprobar mediante visita de campo los problemas actuales y potenciales con fines correctivos.
3. Comparar los problemas actuales y potenciales obtenidos mediante el uso de sensores remotos y a través de la observación directa en campo.

4. Definir a partir de los datos recopilados por los sensores remotos y visitas de campo, las labores de mantenimiento vial a seguir para garantizar una gestión de mantenimiento eficiente en el tramo de vía estudiado.

5. Establecer la metodología y criterios para la aplicación de sensores remotos como herramienta de apoyo en la planificación de acciones de mantenimiento vial.

#### **1.4 Alcance de la investigación**

El presente estudio se centra en el análisis y la caracterización de los problemas de la Troncal 007, específicamente en el tramo entre la Hacienda La Victoria y Tovar, en el estado Mérida, Venezuela. La investigación se limita al uso de sensores remotos, empleando imágenes satelitales de libre acceso y fotografías aéreas para la recopilación de datos. Las fuentes de información primaria son estas imágenes, y no se utilizaron otros tipos de sensores como LiDAR, escáneres láser o radares terrestres, debido a restricciones presupuestarias y dificultad para conseguir estos equipos.

El alcance del análisis está orientado a caracterizar y proponer planes y programas de mantenimiento vial. Estos se basan en la información que se pueda extraer de las imágenes, tales como patrones de inestabilidad mediante la identificación de fracturas, fallas geológicas, cicatrices de deslizamientos de tierra que hayan ocurrido en el pasado, flujos de lodo, geomorfología y drenaje, a través de la observación del curso de las quebradas y los cambios en las pendientes del terreno que puedan afectar la estabilidad de la vía.

El presente estudio tiene como propósito fundamental el desarrollo y la validación de una metodología para la evaluación de problemas en la vía mediante el uso de sensores remotos, y la propuesta de soluciones conceptuales derivadas de dicho análisis. En virtud de este enfoque metodológico, la investigación no incluirá la toma de muestras de suelo en campo, la realización de estudios geotécnicos directos, ni el diseño detallado de elementos de ingeniería vial (como puentes, cunetas, alcantarillas y sistemas de drenaje), ni elementos de diseño geométrico. Estas actividades se excluyen debido a que su naturaleza es de diseño e implementación de ingeniería a nivel de proyecto ejecutivo, lo cual está fuera del alcance y del fin último de este trabajo, que es la generación de una herramienta de gestión y evaluación remota. La información geológica y geomorfológica se obtendrá de manera indirecta, a partir de la interpretación de las características del terreno en las imágenes remotas.

El trabajo se concentró en el tramo de la Troncal 007 entre La Victoria y Tovar, en el estado Mérida, que está emplazado en una zona de valle intramontano y que ha sido históricamente afectado por procesos geodinámicos. Se investigó hasta qué punto la información

provista por los sensores remotos es útil para identificar la ubicación, extensión y tipo de problemas (deslizamientos, hundimientos, erosión remontante) y para priorizar las acciones de mantenimiento y mitigación. La investigación no abordó el análisis de costos y presupuestos de las obras de mantenimiento propuestas.

La selección del tramo de vía entre La Victoria y Tovar es estratégica debido a que representa un caso de estudio ideal para la aplicación de la metodología propuesta. Esta sección de la vía concentra una alta densidad de eventos geodinámicos recurrentes, como deslizamientos y derrumbes, lo que la define como un espacio natural para validar la utilidad de los sensores remotos en la identificación de riesgos y en la planificación del mantenimiento vial en zonas montañosas con condiciones similares en todo el país.

Los resultados de esta investigación proporcionan una metodología aplicable este tramo de la Troncal 007, y también sientan las bases para que futuros estudios utilicen la misma tecnología en otras áreas de alto riesgo geotécnico en Venezuela y Latinoamérica. El estudio buscó demostrar que una herramienta de bajo costo, como las imágenes satelitales, puede ser crucial para la toma de decisiones en la gestión de infraestructura vial, especialmente en países con recursos limitados para la inversión en mantenimiento.

Bdigital.ula.ve

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

La comprensión integral de la estabilidad y conservación de la infraestructura vial en entornos de alta complejidad geodinámica exige un abordaje multidisciplinario que trascienda la ingeniería civil convencional. El presente capítulo constituye el soporte conceptual y referencial de la investigación, estructurándose sobre la convergencia de la gestión estratégica del mantenimiento vial, las ciencias de la observación terrestre remota y la caracterización físico-natural del área de influencia, como tres ejes fundamentales.

En primer término, se exponen los antecedentes de la investigación, donde se contrastan las metodologías de inventario manual tradicionales con los avances contemporáneos en teledetección. A través del análisis de siete casos de estudio globales y regionales, se fundamenta la transición de un modelo de mantenimiento correctivo hacia un modelo preventivo y predictivo, capaz de identificar patologías mediante herramientas de teledetección y modelos digitales de elevación antes de que comprometan la seguridad del usuario.

Posteriormente, se desarrollan las bases teóricas que definen los principios físicos de la percepción remota, detallando las capacidades de resolución espacial, espectral y temporal de las plataformas satelitales y aéreas. Este marco permite justificar la selección de herramientas como *ArcGIS Earth* y *Google Earth Pro* como insumos clave para la evaluación de la red vial.

Finalmente, se examina la interacción crítica entre la Falla de Boconó, la litología metamórfica e ígnea de la región y el régimen pluviométrico del Valle del Mocotíes. Estos factores definen la vulnerabilidad intrínseca de la vía y permiten establecer una etiología técnica de las patologías viales del tramo La Victoria-Tovar de la Troncal 007, sirviendo como base para la propuesta de una estrategia de gestión de riesgos e infraestructura.

#### 2.1 Antecedentes

En Venezuela son escasos los estudios e investigaciones que abordan el deterioro de la red vial, aunque este problema es evidente a lo largo y ancho del país. Al ser la infraestructura vial de un país de tal importancia para su desarrollo, se han realizado estudios por entidades públicas y privadas en diferentes partes del mundo, mostrando resultados preocupantes.

El uso de sensores remotos orientados a temas relacionados con vialidad ha sido utilizado principalmente en el área de pavimentos, transporte y planificación urbana, siendo el mantenimiento vial un tema poco desarrollado y con numerosos campos de aplicación.

En relación con el uso de sensores remotos aplicados al mantenimiento y gestión de la infraestructura de transporte, la literatura técnica reciente evidencia una evolución significativa en el monitoreo de pavimentos rígidos y flexibles, así como en la supervisión de estructuras y derechos de vía. La implementación de estas tecnologías ha permitido transitar de métodos de inspección visual subjetivos hacia sistemas de evaluación cuantitativos y automatizados, optimizando la precisión en la detección de patologías y la eficiencia en la planificación de intervenciones. A continuación, se presentan siete casos de estudio que fundamentan la viabilidad técnica y económica de la teledetección como herramienta estratégica para la conservación vial:

### **2.1.1 Casos de estudio**

#### **Caso de Estudio 1. Mapeo del estado del pavimento mediante análisis espectral**

En la investigación realizada por Pan et al. (2016), el propósito fue demostrar la viabilidad de utilizar datos multiespectrales de alta resolución para mapear el estado del pavimento de asfalto en diferentes etapas de envejecimiento, con el fin de correlacionar los cambios en la firma espectral del asfalto con su nivel de deterioro, lo que podría servir como un dato de apoyo para los departamentos de mantenimiento vial. Para lograrlo, los autores utilizaron datos multiespectrales del satélite WorldView-2. A partir de mediciones de campo, se creó una biblioteca espectral de referencia que contenía firmas para el asfalto en diversas etapas de envejecimiento (preliminar, moderado, avanzado) y para otras superficies. Se aplicó la técnica *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA) para analizar la composición de cada píxel de la imagen y determinar el porcentaje de cada tipo de superficie.

Los resultados demostraron que los pavimentos de asfalto en diferentes etapas de envejecimiento presentaban características espectrales distintas. La técnica MESMA logró identificar y mapear con éxito el asfalto en las etapas de envejecimiento estudiadas. Por ejemplo, en el área de estudio, se determinó que la mayoría del pavimento en una de las carreteras se encontraba en las etapas "preliminar" y "moderada," lo que indicaba un estado de "aceptable" (Pan et al, 2016). Este estudio concluye que el monitoreo de la condición del asfalto desde el espacio es posible y proporciona datos cuantitativos valiosos para la toma de decisiones, facilitando la transición hacia un modelo de mantenimiento preventivo.

## **Caso de Estudio 2. Revisión de metodologías de teledetección para la gestión de pavimentos**

En el estudio realizado por Schnebele et al. (2015), el objetivo principal fue servir de puente entre los procedimientos tradicionales de evaluación de carreteras y las metodologías de teledetección. A través de una revisión exhaustiva de la literatura, el estudio buscó consolidar las técnicas de investigación actuales que facilitan la adopción de la teledetección en la gestión de pavimentos. En cuanto a la metodología empleada, el estudio revisa y sintetiza una amplia gama de investigaciones que utilizan diversas tecnologías de teledetección, como el radar de apertura sintética (SAR), LIDAR y el análisis de imágenes con software geoespacial para identificar defectos comunes en el pavimento, como baches, fisuras y parches. El artículo analiza cómo estas tecnologías se aplican para la detección de estos defectos y cómo pueden mejorar la eficiencia del proceso de evaluación. Los autores concluyen que las técnicas de teledetección, si bien no pueden reemplazar por completo los métodos geotécnicos tradicionales, ofrecen un nuevo potencial para que los gestores de pavimentos evalúen grandes áreas en poco tiempo. El uso de estas metodologías permite reducir la cantidad o el tamaño de las áreas que requieren inspecciones manuales o visitas al sitio (Schnebele et al., 2015). Se valida que la teledetección es una herramienta no destructiva que proporciona una gran cobertura espacial, permitiendo una evaluación frecuente y cuantitativa del estado de la infraestructura vial.

## **Caso de Estudio 3. Predicción del estado en carreteras sin pavimentar**

La investigación de Fiorentini y Losa (2025), tuvo como objetivo proponer un modelo de aprendizaje automático para predecir las condiciones de las carreteras sin pavimentar utilizando imágenes satelitales. Su objetivo era abordar la necesidad de una gestión eficiente de caminos rurales, especialmente en países en desarrollo, donde estas redes son predominantes y su mantenimiento es un desafío logístico. Aunque los detalles específicos de la metodología no se describen, el enfoque implica el uso de modelos de aprendizaje automático y datos satelitales para correlacionar las características visuales de las imágenes con las condiciones del camino, como el desgaste o los baches. El estudio demostró el valor de la teledetección más allá de las infraestructuras de alta tecnología. La aplicación de modelos de aprendizaje automático a imágenes satelitales para predecir el estado de carreteras sin pavimentar representa una solución escalable y de bajo costo para gestionar grandes redes en áreas remotas. Esta capacidad de la tecnología para adaptarse a diferentes contextos demuestra su versatilidad y relevancia en la optimización del mantenimiento vial a escala global.

#### **Caso de Estudio 4. Auscultación de pavimentos mediante interpretación de imágenes**

En la investigación realizada por Berrio y Ussa (2020), el propósito fundamental fue proponer una metodología basada en el uso de herramientas de teledetección para optimizar la identificación de patologías en la infraestructura vial, buscando superar las limitaciones de objetividad y velocidad de los métodos de inspección visual tradicionales. El objetivo se centró en implementar sensores remotos que permitieran una evaluación técnica más ágil, precisa y económica del pavimento mediante el procesamiento y análisis de imágenes capturadas de la superficie. Metodológicamente, los autores establecieron un protocolo para la detección, clasificación y cuantificación de fallas superficiales sin requerir presencia física exhaustiva, validando cómo los datos obtenidos de forma remota alimentan inventarios de daños confiables e identifican zonas críticas de intervención inmediata. Los autores desarrollaron un algoritmo capaz de analizar las imágenes de la superficie de pavimentos rígidos con la capacidad de detectar, medir y clasificar cuatro tipos de fallas en el pavimento, a través de dos métodos de análisis, con diferente precisión y tiempo de procesamiento. Esta técnica resultó especialmente valiosa para la gestión de redes extensas donde el mantenimiento oportuno es crucial. Los resultados demostraron que la teledetección permite una identificación efectiva de patologías con una visión integral, reduciendo riesgos para el personal y optimizando los tiempos de diagnóstico. Asimismo, se constató que la calidad de la información es suficiente para sustentar planes de mantenimiento preventivo y correctivo, mejorando la eficiencia operativa y financiera. El estudio concluye que estas herramientas representan un avance significativo al permitir la transición de un modelo correctivo a uno de planificación estratégica, garantizando mayor durabilidad de la vía y seguridad para los usuarios mediante intervenciones escalables, rápidas y precisas (Berrio y Ussa, 2020).

#### **Caso de Estudio 5. Captura de información de infraestructura para el transporte, a través de técnicas de teledetección. Caso de estudio: Cálculo de invasión al derecho de vía.**

En la investigación desarrollada por González et al. (2014), el propósito central fue evaluar el potencial de las técnicas de teledetección para la captura de información de infraestructura, específicamente para el cálculo de invasiones al derecho de vía. El objetivo se enfocó en proponer una metodología que permitiera identificar asentamientos o estructuras no autorizadas dentro de las zonas de reserva de las carreteras, utilizando datos geoespaciales para mejorar la gestión y seguridad del tramo vial. Metodológicamente, el estudio empleó

imágenes de satélite de alta resolución y ortofotos, las cuales fueron procesadas mediante sistemas de información geográfica (SIG) para realizar mediciones precisas entre el eje de la carretera y las construcciones aledañas. Los autores establecieron protocolos de clasificación digital para delimitar la franja del derecho de vía y detectar discrepancias entre la normativa legal y la realidad física del terreno. Los resultados demostraron que la teledetección permite una vigilancia continua y exhaustiva de grandes extensiones de red vial, identificando puntos críticos de invasión que serían difíciles de detectar mediante recorridos terrestres convencionales. La investigación logró cuantificar áreas invadidas y categorizar el tipo de riesgo asociado, optimizando la capacidad de respuesta de las autoridades competentes. El estudio concluye que el uso de sensores remotos es una herramienta indispensable para la administración de la infraestructura, ya que proporciona pruebas técnicas objetivas para la recuperación de espacios y la planificación de futuras ampliaciones, garantizando el cumplimiento de las normativas de seguridad vial y la protección de los activos del Estado (González et al., 2014).

#### **Caso de Estudio 6. Aplicación de la fotogrametría con drones para el control deformacional de estructuras**

En el trabajo realizado por Sancho et al. (2021), se buscó desarrollar una metodología innovadora para el control de movimientos y deformaciones en estructuras y taludes utilizando técnicas fotogramétricas con drones. Se propuso validar esta metodología mediante la comparación con técnicas de auscultación clásicas y su aplicación a un caso de estudio. El estudio se basó en el uso de fotogrametría con drones y la técnica *Structure From Motion* (SFM), que permite la creación de nubes de puntos y modelos 3D de alta calidad. Se señala que el uso de drones con sistemas RTK es crucial para lograr una alta precisión, ya que esto permite la georectificación directa de las nubes de puntos sin la necesidad de puntos de control terrestre extensos. El estudio de caso se centró en el monitoreo de una presa de concreto, logrando una precisión de deformación de  $\pm 2$  mm. Esta investigación confirmó que la fotogrametría con drones es una herramienta aplicable para el control deformacional de estructuras y que abre la puerta a la monitorización de otras infraestructuras a gran escala, como puentes y taludes (Sancho et al., 2021). Los autores afirman que esta técnica proporciona una alternativa de alta precisión a los métodos de auscultación tradicionales, permitiendo la inspección detallada de componentes críticos de la infraestructura vial. Es importante destacar que, si bien este estudio no se encuentra circunscrito específicamente al ámbito de la vialidad, su relevancia reside en la comprobación práctica de los niveles de precisión milimétrica alcanzables mediante sensores remotos. Esta ventaja tecnológica es perfectamente extrapolable a la gestión del mantenimiento vial,

permitiendo detectar deformaciones estructurales en la calzada o fallas de borde con un rigor técnico incluso superior al de los métodos convencionales.

### **Caso de Estudio 7. Planificación vial regional y gestión geoméricamente limitada en los Pueblos del Sur (Mérida)**

La investigación, enmarcada en el Programa de Desarrollo para los Pueblos del Sur del Estado Mérida, desarrollada en el apartado de vialidad por Carrero (1990), tuvo como propósito evaluar de forma exhaustiva la red vial existente en la región. El objetivo fue establecer un inventario vial cualitativo y cuantitativo que facilitara la toma de decisiones estratégicas para el diseño y ejecución de obras que optimizaran el funcionamiento de la red, apoyando la estructuración de los núcleos poblados y la comercialización de la producción agropecuaria. En cuanto a la metodología empleada, se llevó a cabo un reconocimiento expedito del 98% de la red vial existente. El análisis se centró en la evaluación de la red, que se originó como caminos de bestias sin seguir normas geométricas, resultando en carreteras que solo pueden ser recorridas por vehículos de doble tracción. La evaluación destacó la fuerte limitación impuesta por la conformación orográfica altamente montañosa y la necesidad de una red cónsona para el transporte. El estudio identificó y desarrolló nueve propuestas viales de alta importancia estratégica. Este estudio se enfocó en la gestión vial tradicional, basado en trabajo de campo manual y modelos de gestión sin apoyo de teledetección (Corporación de Los Andes, 1990). Los resultados demostraron que la red vial actual está severamente comprometida por pendientes extremas (hasta 15% e incluso 35% en la vía El Morro-Los Nevados) y radios de curvatura muy cortos (entre 8 m y 12 m). Las nueve propuestas se enfocaron en la corrección geométrica radical mediante la construcción de variantes (Quirorá, La Veguilla, Mesa Moreno, El Morro) que reducen las pendientes a un rango del 6%-9% y eliminan decenas de curvas regresivas, logrando disminuir tiempos de acceso significativamente (por ejemplo, Pueblo Nuevo-Chacantá se reduce en 2-3 horas). El estudio concluyó que la inversión debe focalizarse en estas correcciones de trazado para convertir la red en una estructura vial funcional y segura, adaptando el diseño a las limitaciones geográficas.

#### **2.1.2 Análisis de los estudios consultados**

Los estudios revisados revelan que las plataformas de teledetección no son competidoras, sino herramientas complementarias que operan en escalas distintas. Los satélites sobresalen en la macroevaluación; su principal ventaja es la cobertura masiva, lo que permite el monitoreo de miles de kilómetros de carretera, la detección de puntos críticos de accidentes y la

evaluación de peligros a nivel de red. Esta capacidad de observación constante y a gran escala permite a los gestores viales obtener una visión completa de la actualidad de toda la infraestructura (González, 2025). Por otro lado, las imágenes capturadas con drones son la herramienta de elección para la microevaluación. Su principal ventaja es la capacidad de obtener una resolución ultra alta, con precisión incluso milimétrica, necesaria para la inspección detallada de estructuras críticas como puentes o taludes.

Al contrastar estos avances con el Caso 7, que representa el método tradicional basado en trabajo de campo manual (Carrero, 1990), se evidencia una brecha significativa en eficiencia y precisión. Mientras que el enfoque tradicional requiere reconocimientos físicos expeditos que pueden ser limitados por la geografía orográfica y consumen altos recursos temporales, los Casos 1 al 6 demuestran que la integración tecnológica permite una transición de un modelo correctivo a uno de planificación estratégica.

La principal diferencia radica en la capacidad de procesamiento: los métodos tecnológicos permiten cuantificar deterioros antes de que sean visibles al ojo humano (Caso 1) y realizar inventarios de daños automatizados que eliminan la subjetividad del inspector (Caso 4). Por lo tanto, una estrategia de gestión vial óptima debe superar las limitaciones del inventario manual cualitativo del pasado, combinando la macroevaluación satelital para identificar áreas problemáticas y el despliegue de drones para inspecciones de alta precisión en ubicaciones específicas, garantizando así la durabilidad de la infraestructura y la seguridad de los usuarios.

### **Contribuciones de los estudios previos**

Los estudios analizados demuestran de manera indudable que la teledetección es una herramienta fundamental y de valor inmediato para la gestión del mantenimiento vial, debido a que ha sido probada en una amplia gama de aplicaciones, desde el mapeo a gran escala de la condición del pavimento a través del análisis espectral, hasta el monitoreo estructural con precisión milimétrica. La teledetección ofrece la oportunidad de transformar los enfoques correctivos en estrategias preventivas, lo que conduce a una gestión más eficiente, rentable y, en última instancia, a una infraestructura vial más segura para todos los usuarios. En el anexo A se presenta una tabla con el resumen de los estudios analizados.

En síntesis, la gestión de la infraestructura vial enfrenta desafíos globales y nacionales que impactan directamente en la seguridad pública y la viabilidad económica, lo que ha impulsado la transición del mantenimiento tradicional correctivo, que interviene solo cuando el daño es avanzado, hacia un modelo preventivo y estratégico. Las tecnologías de observación remota emergen como una solución innovadora y una necesidad estratégica ante el

financiamiento insuficiente, ya que permiten optimizar recursos al detectar señales iniciales de deterioro no visibles al ojo humano. Al aprovechar la capacidad de los sensores remotos para la adquisición de datos frecuentes y con gran cobertura espacial, se facilita este cambio de patrón hacia la prevención (González, 2025), transformando la supervisión de la red mediante una planificación óptima que reduce costos operativos y aumenta la seguridad de los usuarios. Esta evolución tecnológica, demostrada a través de los diversos casos de estudio analizados, representa la herramienta fundamental para abordar las limitaciones críticas del sector y garantizar la durabilidad de los activos viales.

## **2.2 Bases teóricas**

El desarrollo de la presente investigación se fundamenta en una estructura conceptual que integra la ingeniería vial convencional, la dinámica geológica de los Andes venezolanos y las tecnologías de observación terrestre remota. Esta sección establece el marco técnico necesario para comprender cómo la interacción entre factores climáticos extremos y una geología estructural compleja condiciona la operatividad de la Troncal 007 en el tramo La Victoria-Tovar.

En primer lugar, se aborda la gestión del mantenimiento vial no solo como un conjunto de actividades reparadoras, sino como una disciplina predictiva esencial para la preservación de la infraestructura. Se detalla la importancia de los sistemas de drenaje y las obras de control de erosión, como los diques de retención de sedimentos, elementos críticos en una cuenca de respuesta hidrológica rápida como la del río Mocotíes.

Posteriormente, se fundamentan los principios de la teledetección, analizando las capacidades de los sensores activos y pasivos para la detección de patologías viales. Este análisis se complementa con una evaluación técnica de las plataformas geoespaciales actuales, como *ArcGIS Earth* y *Google Earth Pro*, determinando su alcance en términos de resolución espacial, espectral y temporal para el monitoreo de riesgos.

Asimismo, se caracteriza el entorno físico del área de estudio, vinculando la historia de la Troncal 007 con la actividad tectónica de la Falla de Boconó y la litología local de filitas y granitos. Esta base teórica permite sustentar la transición de un mantenimiento correctivo tradicional hacia un modelo de gestión de riesgos integral.

Finalmente, se exponen las estrategias de mitigación estructurales y no estructurales, subrayando la necesidad de implementar Sistemas de Alerta Temprana (SAT) y medidas de bioingeniería. Este enfoque proactivo busca optimizar la respuesta institucional y comunitaria ante la vulnerabilidad del tramo vial, transformando la información técnica derivada de

sensores remotos en herramientas prácticas para la planificación del mantenimiento preventivo frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

### **2.2.1 Mantenimiento vial**

El mantenimiento vial es un conjunto de actividades y técnicas diseñadas para preservar, reparar y mejorar la infraestructura de las carreteras, con el fin primordial de asegurar su funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil (Euroinnova International Online Education, s.f.). Se trata de una disciplina vital para la ingeniería civil que abarca una serie de intervenciones que pueden clasificarse en varios tipos principales (Romero, 2023).

El primer tipo, es el mantenimiento preventivo, que se basa en inspecciones regulares y el conocimiento del comportamiento de los materiales para realizar labores antes de que el deterioro se vuelva significativo. Un ejemplo clásico de este tipo de mantenimiento es el sellado de pequeñas fisuras para evitar la infiltración de agua, o la limpieza de cunetas para asegurar el correcto drenaje. Su objetivo es evitar que los daños menores se conviertan en problemas estructurales graves. Por otro lado, el mantenimiento correctivo busca reparar el daño una vez que ya ha ocurrido. Algunos ejemplos, son el relleno de baches y la reparación de grietas que se han agravado. Aunque es necesario, este tipo de mantenimiento es evidentemente menos eficiente y más costoso que el preventivo, ya que el daño ya ha afectado la estructura de la vía. Por último, se encuentra el mantenimiento de emergencia o la rehabilitación. Este representa las acciones de mayor envergadura, que se realizan cuando el deterioro es extenso o estructural. Estas operaciones implican la renovación de capas del pavimento, la modernización de sistemas de drenaje o la sustitución de estructuras falladas.

Los beneficios de una gestión eficiente del mantenimiento vial se extienden a múltiples áreas. Una carretera bien mantenida es, por definición, una carretera más segura, lo que se traduce en una reducción de accidentes. El transporte de productos y personas se beneficia de una red vial fluida, lo que optimiza la logística y reduce los costos operativos tanto para empresas como para personas, evidenciando una notable mejora económica. Además, las intervenciones de mantenimiento realizadas a tiempo son significativamente más económicas que la reconstrucción completa de tramos deteriorados, lo que mejora la durabilidad de la infraestructura y maximiza la vida útil de la estructura vial (Romero, 2023)

Existe una notable necesidad de una gestión de mantenimiento vial más inteligente y eficiente. El futuro de la gestión vial se orienta hacia el uso intensivo del análisis de datos para optimizar las intervenciones, la utilización de materiales sostenibles y la implementación de técnicas más avanzadas.

## 2.2.2 Estructuras de drenaje vial y control de erosión

### a) Obra de drenaje transversal (ODT)

Es una obra de sección cerrada que tiene por objeto restituir la continuidad del cauce natural que ha sido interrumpido por la infraestructura de la carretera, permitiendo el paso del caudal de diseño (Ministerio de Fomento, s.f.). Entre las obras de drenaje transversal más comunes se encuentran:

- **Puentes.** Son obras de ingeniería de grandes dimensiones diseñadas para salvar obstáculos como ríos o valles. Técnicamente, se definen como estructuras con una luz superior a 10 metros entre sus apoyos finales, relacionadas con caudales permanentes de gran magnitud (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2014).
- **Pontones.** Se clasifican como estructuras de paso con una luz intermedia. La normativa técnica establece que su longitud libre se encuentra en el rango de los 3 a los 10 metros, funcionando como una transición entre las alcantarillas y los puentes (Instituto Nacional de Vías [INVIAS], 2009).
- **Alcantarillas.** Es el tipo de obra de drenaje transversal más común, definida como un conducto (circular, rectangular o abovedado) que permite el paso de la escorrentía a través de los terraplenes de la vía. Su luz suele definirse entre 1 y 3 metros (Ministerio de Fomento, 2011).
- **Cajones de paso.** También conocidos como *box culverts*, son estructuras de sección rectangular construidas *in situ* o prefabricadas. Se utilizan para manejar caudales significativos y arrastre de sedimentos, pudiendo configurarse en una o varias celdas para incrementar su capacidad hidráulica (Ponce, 2008).

### b) Obras de control de erosión y estabilización de cauces

- **Diques de retención de sedimentos (DRS).** Un dique de retención de sedimentos es una estructura transversal, similar a una pequeña presa, construida directamente sobre el lecho de un cauce o torrente (ver Figuras 3 y 4). Su objetivo principal es interceptar y almacenar grandes volúmenes de material sólido como sedimentos, rocas, troncos, que son movilizados durante crecidas súbitas o eventos torrenciales intensos, como los que se evidencian en el piedemonte andino (Pizarro, et al. 2003). El propósito fundamental de los diques de retención de sedimentos consta de tres funciones vitales para la ingeniería de control de torrentes. En primer lugar, cumplen un rol esencial en el control de transporte sólido, pues su uso principal es interceptar

y evitar que la carga sólida, movilizada por crecidas súbitas, alcance y comprometa la integridad de infraestructuras críticas aguas abajo, tales como puentes, alcantarillas o zonas urbanas, lo que se traduce en una significativa prolongación de la vida útil de estas obras.

Adicionalmente, contribuyen a la estabilización del lecho del cauce. Al retener los sedimentos, el dique ayuda a disminuir la pendiente longitudinal natural, reduciendo la velocidad de la corriente, lo que, a su vez, minimiza la socavación o erosión del fondo.

Finalmente, son elementos clave en la corrección de torrentes ya que son estructuras diseñadas específicamente para mitigar la respuesta hidrológica violenta de las cuencas. Este enfoque preventivo y correctivo es particularmente crucial en las quebradas que atraviesan áreas vulnerables a deslaves, como las que se encuentran en el Valle del Mocotíes en el estado Mérida. Estas obras están diseñadas para gestionar y mitigar la energía del agua en movimiento (torrentes, ríos, laderas) y controlar el transporte de material.

**Figura 3.** Dique de retención de sedimentos. Santa Cruz de la Zarza, Toledo, España



**Figura 4.** Dique de retención de sedimentos. Barranco de las Ovejas, Alicante, España



Fuente: [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-restauracion/restauracion-hidrologico-forestal/rhf\\_caracteristicas\\_correccion\\_cauces.html](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-restauracion/restauracion-hidrologico-forestal/rhf_caracteristicas_correccion_cauces.html)

- **Torrenteras.** Son obras de drenaje longitudinal (paralelas a la dirección del flujo de la escorrentía) cuya función es recoger las aguas y conducir las hacia abajo del talud,

generalmente incluyendo elementos como canales en gradería o saltos, para disipar la energía del flujo del agua de manera segura y evitar la erosión en el pie del talud o en la descarga final (MTC, s.f.).

- **Diques de control de erosión.** Un dique de control de erosión (o dique de consolidación/estabilización) es una estructura más pequeña y continua en serie que los DRS, cuyo propósito primario es detener o prevenir la incisión (erosión lineal) del fondo del cauce y consolidar los márgenes inestables.

Los diques de control de erosión cumplen funciones cruciales para la estabilidad geomorfológica de los cauces torrenciales, especialmente en regiones propensas a eventos de remoción en masa. En primer lugar, facilitan la consolidación de laderas al estabilizar activamente los taludes del cauce, lo cual es fundamental para prevenir deslizamientos e inestabilidades laterales, un factor de riesgo muy común y visible tras los deslaves, como los acontecidos en el Valle del Mocotíes. Además, logran una efectiva reducción de velocidad al generar una serie continua de saltos o escalones artificiales a lo largo de la pendiente. Este diseño reduce drásticamente la energía cinética del flujo de agua, minimizando su capacidad para socavar y arrastrar material (MITECO, s.f.).

Finalmente, contribuyen a la preparación para revegetación. Al disminuir la fuerza erosiva, crean un ambiente hidráulico más estable que facilita la sedimentación de suelos finos, preparando las condiciones óptimas para el establecimiento de vegetación en riberas y laderas, lo que asegura un control de la erosión a largo plazo mediante soluciones biológicas.

- **Cámaras de sedimentación para alcantarillas.** Una cámara de sedimentación, también conocida como desarenador o sumidero de sedimentos, es una estructura de pretratamiento que se ubica justo en la entrada de una alcantarilla o en la línea de drenaje. La cámara de sedimentación es una estructura de pretratamiento vital, cuyo propósito se centra, en primer lugar, en la protección de obras de drenaje transversal. Actúa como un filtro hidráulico y físico al incorporar una fosa o sumidero en su base, la cual está estratégicamente diseñada para reducir temporalmente la velocidad del agua y permitir la transición hacia un régimen de flujo que favorezca el control de sedimentos (Chow, 1994).

Esta disminución de la velocidad permite que los sólidos gruesos (arena, grava y detritos) se decanten y se depositen en el fondo de la cámara antes de que el flujo ingrese al conducto principal. Según los principios de la hidráulica de canales, este

proceso asegura la prevención de obstrucciones, ya que la retención de material evita la colmatación física y la consecuente reducción de la capacidad de flujo de la alcantarilla, ya sea de sección tubular o de cajón (Chow, 1994). De esta manera, se mantiene su eficiencia hidráulica y se minimizan los elevados costos del mantenimiento correctivo. Por último, su diseño debe considerar la fase de mantenimiento, pues la estructura tiene que facilitar la limpieza periódica del material sólido que se acumula en el sumidero.

### **2.2.3 Fundamentos de la observación terrestre remota**

Para comprender la gestión vial de una forma más actualizada, es indispensable comprender los conceptos de la teledetección y las fuentes de datos geoespaciales.

La teledetección, también conocida como percepción remota, es una técnica que permite obtener información sobre un objeto o una zona de la superficie terrestre sin que exista contacto físico entre el sensor y el objeto (*National Aeronautics and Space Administration, 2023*). Esta tecnología utiliza diferentes formas de datos, como fotografías, registros eléctricos, magnéticos o electromagnéticos, para capturar características físicas o biológicas de elementos en la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo.

El principio fundamental de esta tecnología es la interacción de la energía electromagnética con los objetos. Elementos como rocas, vegetación, agua y construcciones absorben, reflejan o emiten energía de manera única, dependiendo de la longitud de onda y las características del material. Esta interacción crea una firma espectral particular, que se puede leer en las imágenes (Hernández, 2008).

Los sensores remotos se clasifican en dos categorías principales según su fuente de energía:

Los sensores pasivos, miden la energía radiante reflejada o emitida por el sistema Tierra-Atmósfera. Dependen de una fuente de energía externa, generalmente la luz solar, para iluminar el objeto de estudio. Ejemplos incluyen los sensores de los satélites Landsat y Terra.

Los sensores activos, proporcionan su propia fuente de energía para la iluminación, lo que les permite operar de día o de noche y en la mayoría de las condiciones atmosféricas. La mayoría operan en la región de las microondas del espectro electromagnético. Ejemplos notables incluyen altímetros láser, sistemas LiDAR y RADAR (*National Aeronautics and Space Administration, 2023*).

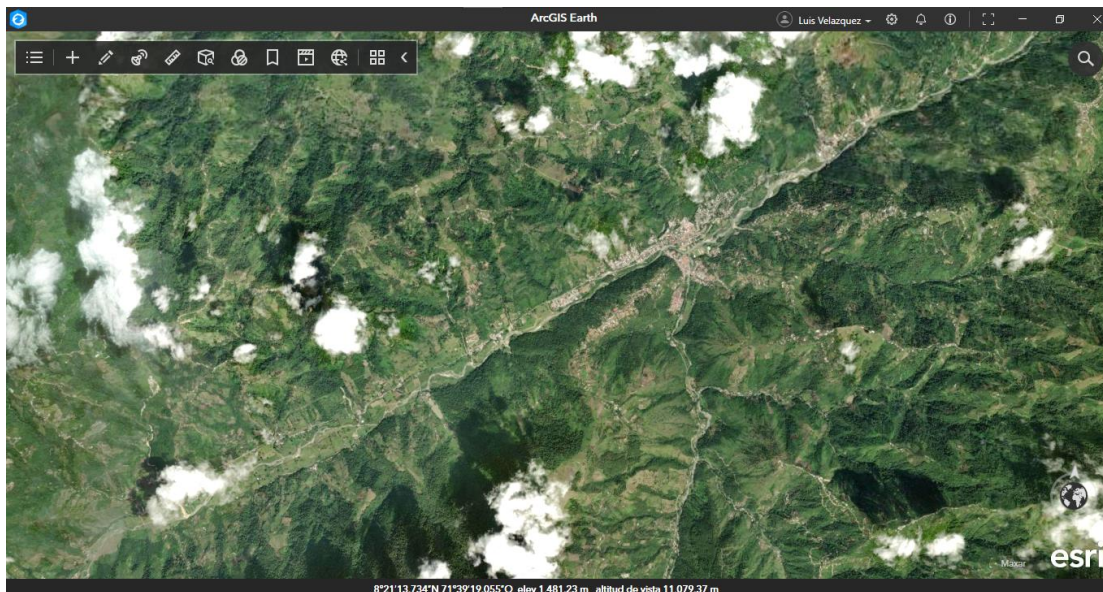
La implementación práctica de estos sensores depende directamente de las plataformas de transporte en las que sean instalados, las cuales determinan la escala, la periodicidad y la resolución de la información capturada. En el ámbito de la ingeniería vial, estas plataformas se dividen principalmente en espaciales y aéreas, dando origen a los dos insumos fundamentales para el análisis geoespacial: las imágenes satelitales y las fotografías aéreas.

#### **a) Imágenes satelitales**

Las imágenes satelitales son una de las formas de datos más comunes en la teledetección, obtenidas por sensores a bordo de satélites que orbitan la Tierra. Un ejemplo de imagen satelital puede observarse en la Figura 5. La utilidad y calidad de estas imágenes se evalúan a través de cuatro tipos de resolución:

- Resolución espacial. Define el tamaño del área en la superficie terrestre que está representada por un solo píxel en la imagen. Se presenta como un valor único que representa la longitud de un lado de un cuadrado.
- Resolución espectral. Se refiere al número y al ancho de las bandas espectrales que el sensor es capaz de detectar. Una mayor resolución espectral implica una gama más angosta de longitudes de onda para cada canal, lo que permite la discriminación más fina de diferentes tipos de materiales (*National Aeronautics and Space Administration, 2023*).
- Resolución radiométrica. Describe la capacidad del sensor para discriminar diferencias en la energía o radiancia. Un sensor con una mejor resolución radiométrica es más sensible a las pequeñas variaciones de energía, lo que resulta en una imagen más nítida.
- Resolución temporal. La frecuencia con la que el satélite revisa y toma una nueva imagen de un área determinada. La periodicidad de revisión varía ampliamente entre satélites, desde cada 16 días para Landsat hasta varias veces al día para otros sensores (*National Aeronautics and Space Administration, 2023*).

**Figura 5.** Imagen de satélite. Valle del Mocotíes



**Nota.** Captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

#### b) Fotografías aéreas

La fotografía aérea es un caso particular de la teledetección y su forma inicial, con una historia que se remonta a mediados del siglo XIX. A diferencia de las imágenes satelitales, que a menudo son capturadas por dispositivos de barrido, la fotografía aérea utiliza cámaras fotográficas con tecnología óptica como sensor remoto, típicamente montadas en aviones o, más recientemente, en drones. La principal ventaja de la fotografía aérea es su resolución espacial superior, ya que los sensores operan a una altitud mucho menor (Rasillad y Orla, 2023). Los drones, en particular, pueden volar a baja altura para generar datos de alta resolución de forma más rápida, económica y con mayor independencia de las condiciones atmosféricas, como la cobertura de nubes (Wingtra, s.f.). En la Figura 6 se observa una fotografía aérea de Santa Cruz de Mora del año 1996.

**Figura 6.** Fotografía aérea. Santa Cruz de Mora. Misión 010488 (1996)



*Fuente: Protección Civil, estado Mérida*

### **Catálogo de sensores para la detección de daños viales**

Diversas herramientas y tecnologías de sensores son empleadas en la inspección de carreteras, cada una con características y aplicaciones únicas. La Tabla 1 resume las tecnologías más relevantes para la detección de daños (FlyPix AI, 2025b).

**Tabla 1. Sensores para la detección de daños viales**

<b>Tecnología</b>	<b>Puntos Clave</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Aplicación en Mantenimiento Vial</b>
Cámaras	Usa cámaras de alta resolución o de teléfonos inteligentes	Aprovecha dispositivos comunes, es rentable y escalable para redes de carreteras extensas.	Detección de daños superficiales (grietas, baches) y generación de mapas de condiciones.
LiDAR (Detección y rango de luz)	Utiliza láseres para crear una nube de puntos 3D de alta resolución.	Funciona eficientemente a velocidades de conducción, ofrece perfiles detallados y no se ve afectado por las condiciones de iluminación.	Detección precisa de baches, grietas e irregularidades en la superficie 3D.
GPR. (Radar de penetración terrestre)	Detecta daños en el subsuelo mediante ondas de radar.	Identifica problemas estructurales ocultos como grietas y huecos en el pavimento, sin necesidad de interrumpir el tráfico.	Análisis de la salud estructural de las carreteras y detección de defectos en las capas subsuperficiales.
Escáneres Láser (Pavimetría LCMS-2)	Escanean superficies de carreteras en 3D para detectar daños.	Captura datos a altas velocidades del vehículo y mide con precisión la profundidad y el ancho del daño.	Detección y medición de grietas, baches y surcos a gran escala.

### c) Comparación entre fotografías aéreas e imágenes de satélite

La información obtenida de fotografías aéreas e imágenes satelitales presenta semejanzas en su propósito, que es capturar una vista de la Tierra desde arriba, pero difieren considerablemente en sus características y aplicaciones. La principal diferencia radica en el punto de captura. Las fotografías aéreas se toman desde plataformas de baja altitud como aviones o drones, mientras que las imágenes satelitales se obtienen desde satélites en órbita.

#### **Ventajas y desventajas de ambos tipos de sensores remotos**

La eficacia de la teledetección en la gestión de infraestructuras viales depende directamente de la selección del sensor adecuado, balanceando la precisión necesaria para detectar patologías locales frente a la capacidad de cobertura requerida para el análisis regional de cuencas. A continuación, se presenta un análisis comparativo entre las fotografías aéreas y las imágenes satelitales, evaluando sus capacidades operativas, resoluciones espaciales y limitaciones logísticas. Este contraste permite fundamentar el uso de ambos sistemas en el presente estudio.

- **Fotografías aéreas**

- Ventajas de las fotografías aéreas. La principal ventaja es la alta resolución y detalle, lo que permite identificar objetos pequeños con gran precisión. Por ejemplo, en lo referente a problemas presentes en una vía, con énfasis en el

mantenimiento, las fotografías aéreas permiten detectar defectos en el pavimento como baches, grietas o hundimientos. También pueden encontrarse problemas estructurales en elementos como puentes, ya sean grietas, o corrosión. Además, puede observarse el estado de la señalización y demarcación en la vía, vegetación presente en drenajes longitudinales, entre otros.

Otra ventaja es el control sobre la captura. Las fotografías aéreas se pueden tomar en momentos específicos y bajo condiciones climáticas favorables (cuando no hay nubes), ya que el vuelo es controlado por el usuario. Esto es ideal para proyectos que requieren datos en una fecha determinada.

Adicionalmente, al tomar imágenes con superposición, es posible crear modelos 3D del terreno (fotogrametría), lo que permite una visión tridimensional y la extracción de datos de elevación de alta precisión.

- Desventajas de las fotografías aéreas. La principal desventaja es que el área de cobertura suele ser limitada. Cada fotografía cubre un área relativamente pequeña, lo que hace que los proyectos a gran escala sean costosos y lentos. Un problema adicional, es que el uso de aviones o drones, junto con el personal especializado que los opera, puede ser costoso. También puede haber restricciones legales y meteorológicas, pueden existir regulaciones sobre el vuelo en ciertas zonas, y las malas condiciones climáticas como viento o lluvia, impiden la captura de las imágenes.
- **Imágenes satelitales**
  - Ventajas de las imágenes satelitales. Principalmente, las imágenes satelitales tienen una amplia cobertura. Un solo satélite puede cubrir grandes extensiones de terreno, lo que es ideal para el mapeo regional o global. Las imágenes satelitales pueden capturar datos multispectrales. Muchos de los satélites capturan datos en múltiples bandas del espectro electromagnético (infrarrojo, térmico), lo que permite analizar características del terreno que no son visibles al ojo humano, como el estado de la vegetación, la humedad del suelo o la temperatura superficial. Con relación a problemas presentes en una vía, las imágenes satelitales son muy efectivas para monitorear el entorno de la vía e identificar riesgos naturales. Se pueden detectar zonas de inundación o deslizamientos de tierra que puedan haber impactado o amenacen potencialmente la vía, permitiendo una respuesta rápida ante emergencias.

Otro punto a favor de las imágenes satelitales es la existencia de datos históricos. Hay una gran cantidad de imágenes satelitales archivadas a lo largo de décadas, lo que facilita el estudio de cambios temporales en el uso del suelo, la deforestación, la expansión urbana, entre otros.

- Desventajas de las imágenes satelitales. En primer lugar, se encuentra la dependencia del paso del satélite. La adquisición de datos está limitada por el período de revisita del satélite sobre una zona, lo que puede no coincidir con el momento deseado o no contar con imágenes recientes del área de interés. Otro aspecto negativo puede ser la resolución espacial, que, aunque ha mejorado, es generalmente menor que la de las fotografías aéreas. Por último, están las limitaciones por nubosidad. Las imágenes ópticas no pueden ver a través de las nubes, lo que a menudo dificulta la obtención de datos en áreas con nubosidad alta.
- **Descripción de elementos obtenibles de cada técnica**
  - De fotografías aéreas. Debido a su alta resolución y el ángulo de captura controlable, las fotografías aéreas permiten una visión detallada que facilita la identificación de objetos muy pequeños. La visión estereoscópica que proporcionan es única y fundamental para la creación de modelos 3D precisos y la extracción de elevaciones detalladas.
  - De imágenes satelitales. La principal ventaja de las imágenes satelitales es la obtención de información multispectral, ya que capturan datos más allá del espectro visible, lo que permite detectar problemas viales y ambientales de forma indirecta, a una escala amplia y a lo largo del tiempo. Mediante el uso de imágenes satelitales se pueden detectar problemas de drenaje y humedad. Por ejemplo, el análisis de bandas de infrarrojo de onda corta (SOIR) es muy efectivo para detectar áreas de humedad en el suelo adyacentes a la vía. Esto puede indicar problemas de drenaje subterráneo o filtraciones de agua que, con el tiempo, debilitan la estructura del pavimento y causan fallas como baches y grietas. Este tipo de análisis no es posible con una fotografía aérea estándar. Utilizando imágenes satelitales también se pueden monitorear cambios en la cobertura vegetal. Se puede utilizar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para evaluar la salud de la vegetación en los márgenes de la carretera. Un aumento o disminución de la vegetación puede indicar cambios en

los patrones de drenaje, o erosión, que podrían afectar la estabilidad de los taludes de la vía (NASA Applied Sciences, s.f.).

Las imágenes satelitales también permiten hacer estudios de cambio a gran escala. Al tener una cobertura global y un historial de décadas, son ideales para analizar el impacto del crecimiento urbano o la deforestación en las cercanías de la infraestructura vial. Permiten estudiar si la expansión de un poblado o un cambio en el uso del suelo está aumentando la carga de tráfico sobre una carretera, lo que podría justificar un mantenimiento preventivo o la expansión de esta.

Otras aplicaciones más específicas permiten la detección de contaminantes en la vía. El análisis multiespectral puede ayudar a detectar derrames de productos químicos o contaminantes a lo largo de la vía, permitiendo una respuesta rápida para mitigar el daño ambiental. Por ejemplo, ciertas firmas espectrales pueden indicar la presencia de hidrocarburos. Imágenes de satélite incluso pueden medir la temperatura del pavimento. Esto es útil para comprender cómo el estrés térmico afecta la vida útil del asfalto, un factor clave en la planificación del mantenimiento a largo plazo. En resumen, mientras las fotografías aéreas son cruciales para una inspección detallada, las imágenes satelitales ofrecen una visión amplia y temporal invaluable para el mantenimiento predictivo y el monitoreo de las condiciones ambientales a gran escala que afectan la integridad de la vía.

Las tecnologías de teledetección no se limitan a la detección de daños. Su implementación permite un cambio fundamental hacia el mantenimiento preventivo. En lugar de esperar a que los problemas sean evidentes, los satélites y las fotografías aéreas pueden proporcionar un monitoreo continuo de las carreteras, detectando el desgaste mucho antes de que se convierta en un problema crítico de seguridad (Gonzalez, 2025). Este enfoque permite a las autoridades tomar decisiones con criterio, programar reparaciones de manera óptima para minimizar las interrupciones del tráfico y prolongar la vida útil de la estructura vial (FlyPix AI, 2025a).

#### **2.2.4 Plataformas de visualización y datos geoespaciales**

El ámbito de la teledetección se compone de diversas plataformas que ofrecen diferentes capacidades, fuentes de datos y modelos de acceso. A continuación, se describen las plataformas utilizadas en este trabajo.

### **a) ArcGIS Earth**

Es una aplicación de escritorio y móvil gratuita de ESRI, diseñada específicamente para la visualización y exploración geoespacial en 3D con un enfoque en la simplicidad y la inmediatez, sirviendo como una herramienta complementaria de las capacidades de *ArcGIS Pro*. Su principal objetivo es permitir a los usuarios examinar un globo terráqueo interactivo en 3D para monitorizar operaciones y mejorar la toma de decisiones (*Environmental Systems Research Institute* [ESRI], s.f.). A diferencia de *ArcGIS Pro*, que es la aplicación de escritorio profesional completa para análisis SIG (Sistemas de Información Geográfica) avanzados, *ArcGIS Earth* se centra en una experiencia de usuario ligera para el trabajo con datos en 3D (*Environmental Systems Research Institute* [ESRI], s.f.).

Las principales características de *ArcGIS Earth* se centran en un flujo de trabajo intuitivo y accesible, destacando su capacidad de Visualización 3D nata y simple (no es una función añadida o un complemento, sino el modo de operación fundamental del software), ya que está diseñado para ser "primero en 3D", facilitando la exploración de datos y el contenido de *ArcGIS Living Atlas of the World* (*Environmental Systems Research Institute* [ESRI], s.f.). Además, ofrece una amplia compatibilidad de datos, permitiendo la visualización de formatos estándar SIG como KML/KMZ y Shapefile (Morales, 2015). La plataforma también incluye funcionalidades de análisis exploratorio básico, como herramientas 3D interactivas para medir distancias, crear perfiles de elevación y realizar análisis de visibilidad (línea de visión y cuenca visual). Finalmente, soporta la colaboración y gestión de proyectos geoespaciales al permitir agregar marcadores, editar propiedades KML y facilitar la compartición de imágenes del mapa y espacios de trabajo para la planificación y la generación de informes (*Environmental Systems Research Institute* [ESRI], s.f.).

### **b) Google Earth Pro**

Es una plataforma de software de escritorio disponible de forma gratuita para usuarios con necesidades avanzadas (Google, s.f.). Combina de manera fluida fotografía aérea, imágenes satelitales, topografía 3D, datos geográficos y *Street View* para crear un lienzo del mundo real que ayuda a la toma de decisiones. Sus principales características incluyen la capacidad de importar y exportar datos GIS (Sistemas de Información Geográfica) en formatos como KML y KMZ, lo que lo convierte en una herramienta versátil para el análisis y la visualización de datos geoespaciales propios.

Una de sus capacidades más destacadas es el acceso a imágenes históricas que se remontan a 1984 para imágenes satelitales y a la década de 1930 para algunas áreas (Google

Maps Platform, s.f.). Esto permite a los usuarios visualizar el cambio de un lugar a lo largo del tiempo.

### **c) Bing Satellite**

Es un servicio de representación cartográfica ofrecido dentro de la plataforma *Bing Maps*, desarrollada por *Microsoft*. Su principal función es proporcionar vistas aéreas e imágenes satelitales de alta resolución de la Tierra, permitiendo a los usuarios visualizar el mundo real desde una perspectiva cenital, más allá del tradicional mapa de calles. Este servicio es fundamental para explorar lugares, obtener una conciencia situacional del entorno y, en algunos casos, ofrecer vistas 3D con texturas obtenidas mediante fotografía aérea para un mayor fotorrealismo. Estas capacidades son utilizadas tanto para la navegación personal como para integrar geolocalización en aplicaciones y soluciones empresariales (Microsoft, s.f.).

### **d) El Programa Landsat del USGS**

El programa Landsat es un esfuerzo conjunto entre el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y la NASA, que ha proporcionado un registro continuo y gratuito de la superficie terrestre desde 1972. Los satélites Landsat orbitan la Tierra en una órbita heliosincrónica, lo que les permite pasar por el ecuador a la misma hora local en cada revolución y lograr una cobertura completa del planeta aproximadamente cada 18 días (U.S. Geological Survey [USGS], s.f.). La principal contribución del programa Landsat es su extenso archivo de 50 años de datos, lo que es muy valioso para el análisis de cambios a gran escala. Los productos generados a partir de las imágenes de los satélites se albergan en el USGS *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center* y están libremente disponibles para el público, lo que fomenta el acceso abierto a la información con fines científicos y de toma de decisiones (National Land Imaging Program, s.f.).

### **Comparación de plataformas de observación geoespacial**

Para facilitar la comprensión de las capacidades y propósitos de cada herramienta, la Tabla 2 ofrece una comparación resumida de las plataformas analizadas.

**Tabla 2. Plataformas de visualización y datos geoespaciales**

Plataforma	Propósito Principal	Fuentes de Datos	Tipo de Acceso	Relevancia para el Mantenimiento Vial
<i>Google Earth Pro</i>	Visualización, creación y gestión de datos geoespaciales.	Imágenes satelitales, fotografía aérea, datos 3D.	Gratuito para uso avanzado; requiere descarga.	Ideal para el análisis visual detallado, la planificación de rutas y la visualización de datos GIS.
<i>ArcGIS Earth</i>	Visualización y exploración geoespacial intuitiva en 3D; colaboración y gestión de datos geoespaciales simples.	Contenido de ArcGIS Living Atlas, formatos SIG comunes (KML/KMZ, Shapefile), servicios web de Esri.	Gratuito; requiere descarga.	Útil para la presentación de soluciones conceptuales en 3D y el análisis exploratorio básico (perfiles de elevación, mediciones de la infraestructura vial).
<i>Bing Satellite</i>	Servicio web de mapas y búsqueda de ubicaciones.	Conjuntos de datos propietarios licenciados.	Gratis en su versión web; uso restringido para desarrollo y mapeo.	Puede servir como fondo para el mapeo, pero con fuertes restricciones de licencia.
<i>USGS Landsat</i>	Registro global y continuo de la superficie terrestre.	Sensores en órbita heliosincrónica (Landsat 8, 9, etc.).	Datos de acceso libre y gratuito.	Invaluable para el análisis de cambios a largo plazo, el monitoreo a gran escala del crecimiento urbano y el impacto ambiental.

### 2.2.5 Características del tramo de carretera en estudio

#### a) Historia y relevancia de la carretera Troncal 007 en el eje Tovar-Hacienda La Victoria: impacto en el desarrollo regional de Mérida

La concepción de la Carretera Trasandina se enmarca en un contexto de modernización y centralización del estado venezolano a principios del siglo XX. El Plan Nacional de Carreteras del gobierno del General Juan Vicente Gómez representó una iniciativa sin precedentes en su alcance y visión. Inaugurada el 24 de julio de 1925, la Trasandina fue una de las obras cumbre de este plan, con un trazado original de 1260 kilómetros. La justificación de la obra fue doble: por un lado, una necesidad de integración política y militar y, por otro lado, el desarrollo social y comercial, buscando facilitar el acceso a cada región para potenciar su economía (Contreras y Gutiérrez, 2008).

La Carretera Troncal 007, conocida históricamente como la Carretera Trasandina, es una de las vías de comunicación más importantes y estratégicas de Venezuela. Con una extensión de 1539 kilómetros, esta arteria vial atraviesa la Cordillera de la Costa y la Cordillera de los

Andes, conectando la capital, Caracas, con la frontera colombiana en San Antonio del Táchira y pasando por estados clave como Mérida y Táchira. Para el propósito de esta investigación, solo se describirá el tramo que discurre por el Valle del Mocotíes, específicamente los 20,35 kilómetros que separan la Hacienda La Victoria de la población de Tovar.

- La materialización del eje vial en Mérida

El trazado de la Troncal 007 a través de Mérida fue un factor determinante para el desarrollo del Valle del Mocotíes, una región cuya economía y vida social estaban históricamente atadas a una red precaria de transporte a lomo de animales de carga, como mulas, burros o caballos. La carretera, al atravesar el estado y conectar las capitales de sus distritos, posicionó a Tovar como un punto crucial en la comunicación terrestre. Este nuevo eje vial fue una herramienta para reestructurar la geografía social y económica de la zona, permitiendo una conectividad que antes era impensable y que acortó drásticamente los tiempos de viaje.

Un ejemplo tangible que representa de la transformación que trajo la Carretera Troncal 007 a la región es La Hacienda La Victoria. La hacienda ya era un importante centro de producción de café antes de la llegada de la vía. A pesar de que la hacienda no fue construida a raíz de la carretera, su consolidación como un centro de acopio y su papel en el desarrollo agrícola regional se vieron profundamente beneficiados por la nueva conectividad.

La Carretera Troncal 007 simplificó la logística, facilitando el transporte de insumos y la exportación del café a mercados nacionales e internacionales, superando las limitaciones anteriores (Contreras y Gutiérrez, 2008). Actualmente, la hacienda es un patrimonio arquitectónico y cultural, que alberga museos y un núcleo universitario que rinde homenaje a su historia.

- Dinámica económica y comercial

La carretera Troncal 007 actuó como un motor para la economía del Valle del Mocotíes, facilitando la transición de un sistema comercial rudimentario a una economía de mercado más integrada. La vía transformó las cadenas de valor y redefinió las relaciones comerciales al reducir los costos y el tiempo de transporte de los productos (Cilento y Martín, 2018), permitiendo así a la región, conocida por sus cultivos de tubérculos, granos y café, acceder a nuevos mercados, tanto nacionales como internacionales. Esto a su vez generó una serie de efectos en cadena que moldearon la economía local, por ejemplo, el

Municipio Tovar se convirtió en el principal centro de venta automotor del estado Mérida, esto como una consecuencia directa de la demanda generada por la nueva infraestructura de transporte motorizado, que facilitó el comercio y el movimiento de personas, creando una dinámica de negocios que gira en torno a la carretera. La vía unió ciudades y estimuló una economía que hoy depende intrínsecamente de su funcionalidad.

- Crecimiento poblacional y asentamientos urbanos

La carretera ha sido un factor determinante en la configuración demográfica del Municipio Tovar. La vía sirvió como una columna vertebral que articuló el crecimiento de la población en la región, la cual ha crecido de 100 habitantes en 1786 a casi 50,000 en 2024. La Tabla 3 muestra este crecimiento a lo largo del tiempo, evidenciando una tendencia sostenida, con tasas de crecimiento del 4.6% y 4.8% en periodos de 10 años.

**Tabla 3.** *Crecimiento histórico de la población en el Municipio Tovar (1786-2024)*

Período	Año	Población Aproximada
Pre-fundación	1786	100
Post-independencia	1832	2,708
Fin S. XIX	1873	5,193
Censo	1990	25,000
Censo	2001	32,500
Crecimiento	2011	38,455
Crecimiento	2013	41,867
Censo	2018	50,397
Proyección	2021	46,000
Proyección	2024	48,395

La alta densidad poblacional, de 263.01 habitantes por km<sup>2</sup> en 2024, convierte a Tovar en el segundo municipio más denso de Mérida, solo superado por Libertador. Este crecimiento no ha sido uniforme; la gran mayoría de la población (84.39%) se concentra en la ciudad de Tovar, que funciona como un centro urbano que brinda servicios esenciales a los municipios vecinos de Rivas Dávila, Antonio Pinto Salinas, Guaraque y Zea. La Troncal 007 es la principal vía que facilita esta centralidad, permitiendo la

accesibilidad a servicios como instituciones de seguridad, telecomunicaciones y banca, lo que explica la distribución de la población y el papel de Tovar como el centro urbano más importante de la región.

- Rol social

Más allá de su función económica, la carretera ha sido un elemento de cohesión social y un eje importante de servicio a la comunidad. Tovar, al ser el principal centro de servicios, depende de la Troncal 007 para movilizar a la población y garantizar el acceso a la atención médica, la educación y mercados. La Hacienda La Victoria, situada en el tramo de estudio, ofrece un caso de estudio sobre el papel de la infraestructura y sus puntos de referencia en la respuesta a desastres. En 2005, la hacienda sirvió como un centro de refugiados para decenas de familias que perdieron sus hogares debido a una tragedia climática similar a la de 2021.

#### **b) Ubicación del tramo vial en estudio: Troncal 007 - La Victoria a Tovar**

El tramo en estudio de la Troncal 007, con una longitud de 20,35 km, es una vía de gran importancia para el estado Mérida, Venezuela, ya que conecta a diversos poblados y zonas agrícolas del Valle del Mocotíes. Este comienza en el Municipio Antonio Pinto Salinas (Progresiva 0+000), cerca de la Hacienda La Victoria, y se extiende hasta Tovar, capital del Municipio Tovar (Progresiva 20+350). La altitud del punto inicial es 537 m.s.n.m y la altitud del punto final es 927 m.s.n.m, Además sirve como la principal vía de acceso para varios pueblos, aldeas y comunidades rurales, como Santa Cruz de Mora, El Peñón, San Francisco, Las Vegas de Las González, Villa El Socorro, El Tabacal, San Diego, San Pedro, Puerto Rico. Esta conectividad es crucial para el transporte de personas y productos agrícolas.

#### **c) Análisis geoestructural y litológico de la Troncal 007, Tramo La Victoria-Tovar, Estado Mérida, Venezuela**

A continuación, se describe la caracterización geológica del tramo de la Troncal 007 que conecta La Victoria con Tovar en el estado Mérida, Venezuela. La estabilidad de esta infraestructura vial está intrínsecamente condicionada por un marco geológico complejo y dinámico, resultado de la tectónica de placas. La ruta atraviesa rocas metamórficas e ígneas, así como depósitos sedimentarios cuaternarios. La principal causa de inestabilidad no radica únicamente en los tipos de roca, sino en la interacción crítica entre la intensa actividad tectónica regional, la avanzada meteorización de la roca madre y la influencia de factores climáticos.

La formación geológica más relevante en la vía es la asociación metamórfica Mucuchachí (Schubert, 1980), incluyendo también la intrusión ígnea mayor granítica, cuyas propiedades de foliación, fracturamiento y profunda meteorización las hacen propensas a la erosión y los deslizamientos. También son relevantes los depósitos cuaternarios, que, al no estar consolidados, son extremadamente vulnerables a procesos geomorfológicos degradacionales e inundaciones, un riesgo que se ha manifestado con consecuencias trágicas en la región de Tovar. Los riesgos a lo largo del tramo son principalmente caídas de roca y deslizamientos de laderas en las zonas de macizo rocoso (Laffaille et al., 2005), y deslaves e inundaciones en las áreas de valle.

Por lo tanto, cualquier estrategia de mitigación de riesgos debe ser diferenciada, implementando soluciones de ingeniería geotécnica específicas para cada tipo de material y considerando un enfoque de gestión de riesgos que se anticipe a la interacción entre la geología y los eventos climáticos extremos.

- **Marco geológico estructural de la Cordillera de Mérida**

La geología del occidente de Venezuela, particularmente en la Cordillera de Mérida, se distingue por su complejidad y por la presencia de un registro estratigráfico que abarca desde el Precámbrico hasta el Cenozoico. A diferencia de otras secciones de la cordillera andina que presentan una morfología de plegamiento uniforme, los Andes venezolanos son el resultado de la fracturación de enormes bloques de la corteza, intercalados con fosas tectónicas. Esta estructura particular le confiere un aspecto geomorfológico muy accidentado, con implicaciones directas en la estabilidad del terreno. Las rocas más antiguas, de edad Precámbrica, se encuentran en formaciones como la Asociación Sierra Nevada, mientras que el Paleozoico está bien representado en los Andes de Mérida con rocas sedimentarias y pizarras metamorfoseadas (Aranguren, 2013).

- **La Falla de Boconó**

Es el accidente geológico más prominente y distintivo de Venezuela. Esta falla, que se extiende por más de 500 kilómetros en dirección suroeste-noreste, es una falla de rumbo-deslizamiento que ejerce una influencia fundamental en la estructura de los Andes venezolanos (Alvarado et al., 2015). La actividad de esta megaestructura es el motor principal que crea las condiciones de inestabilidad inherente en el macizo andino. El movimiento de la falla y la interacción de sus estructuras secundarias, han provocado un intenso fracturamiento y una trituración generalizada de la roca en su corredor de

influencia, que en algunos sectores puede alcanzar de 1 a 5 kilómetros de ancho (Chacón y Uzcátegui, 2013).

La presencia de esta falla y sus zonas de influencia explica por qué las rocas de la región, incluso los macizos aparentemente consolidados, poseen una debilidad estructural preexistente. Esta condición de fracturamiento masivo y roca dañada es la que predispone el terreno, haciéndolo vulnerable a la acción de otros agentes geológicos. La vía Troncal 007 atraviesa diversas unidades litológicas y también cruza este corredor de deformación tectónica activa, donde el material rocoso está inherentemente debilitado y, por ende, más susceptible a los movimientos de masa.

- **Caracterización litológica y formaciones geológicas del tramo La Victoria-Tovar**

El tramo de la Troncal 007 entre La Victoria y Tovar se emplaza sobre un conjunto de formaciones rocosas que determinan su comportamiento geotécnico. Las unidades más relevantes son las siguientes (formaciones metamórficas antiguas, Precámbrico – Paleozoico):

- **Asociación Mucuchachí**

Con una edad que oscila entre los 300 y 250 millones de años (Carbonífero-Pérmico), esta unidad se formó en un ambiente marino. Su secuencia litológica está compuesta por pizarras, filitas, esquistos micáceos y cuarcitas, con colores que van de gris a gris azulado y verdoso. Estas rocas se encuentran intensamente plegadas y han sido afectadas por metamorfismo regional, lo que les ha conferido una textura laminada. Es de hacer notar la predominancia de la filita y pizarra sobre el resto de las rocas mencionadas.

- **El granito de Tovar**

El granito de Tovar, clasificado dentro de las intrusiones graníticas que componen el batolito de Mérida, representa un cuerpo de roca ígnea plutónica cuya edad se sitúa en el Paleozoico Superior (Carbonífero Tardío-Pérmico Temprano), contemporánea con el magmatismo final de la Orogenia Hercínica (Pabón, 2007). Litológicamente, se describe como un granitoide que varía de monzogranito a granodiorita, exhibiendo una textura holocristalina y masiva. Su composición principal incluye cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita, confiriéndole una alta resistencia mecánica en estado fresco. Sin embargo, su comportamiento geotécnico está dominado por una marcada susceptibilidad a la meteorización profunda, apoyada por la multiplicidad de fracturas existentes, generando suelos residuales francoarenosos y de baja cohesión.

Esta alteración reduce drásticamente su capacidad geotécnica, haciendo que las laderas donde se encuentra sean altamente propensas a procesos de inestabilidad y remoción en masa, especialmente bajo condiciones de alta humedad o sismicidad (Medina et al., 2015).

○ **Depósitos cuaternarios**

La Troncal 007 en su recorrido por los fondos de valle se asienta sobre depósitos cuaternarios, identificados por diferentes tipos de unidades geomorfológicas deposicionales. Estos materiales provienen del río Mocotíes y sus afluentes, y están localizados en ambas márgenes del río. Los suelos de estos depósitos son de textura francosa y franco-arcillosa y carecen de consolidación, lo que los hace inestables (Molina et al., 2013). La principal amenaza asociada a estos depósitos es su alta susceptibilidad a la inundación y a la generación de flujos de lodo. Los eventos catastróficos, conocidos genéricamente como deslaves, que han afectado al municipio Tovar, están directamente vinculados al comportamiento de estos materiales bajo la influencia de lluvias torrenciales. A diferencia de los riesgos de caída de roca en los macizos consolidados, el peligro es la movilización masiva de barro, rocas y sedimentos, que puede arrasar con infraestructuras y zonas pobladas, como se evidenció en las tragedias del 2005 y 2021.

Las formaciones geológicas, características geotécnicas y riesgos principales en el tramo de estudio se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Formaciones geológicas, características geotécnicas y riesgos principales

Formación/Asociación	Tipología de Roca	Edad Geológica	Características Geotécnicas Clave	Riesgos Principales
Asociación Mucuchachí	Metamórfica	Paleozoico Superior (Carbonífero-Pérmico)	Intensamente plegada y laminada, baja resistencia debido a la foliación y metamorfismo.	Deslizamientos de ladera (por inestabilidad estructural), erosión, fallas planares.
Granito de Tovar	Ígnea Plutónica	Paleozoico Superior	Roca dura y masiva en fresco, alta susceptibilidad a meteorización profunda y fracturamiento.	Deslizamientos de suelos residuales (suelos arenosos), caída de bloques, erosión.
Depósitos Cuaternarios	Sedimentos no consolidados	Cuaternario	Aluviones, textura franco-arcillosa, naturaleza suelta	Flujos de lodo (deslaves), Inundaciones

- **Descripción de las rocas presentes**

Las rocas que predominan en este tramo son de origen metamórfico e ígneo, lo que refleja la intensa actividad tectónica y los procesos geológicos que han dado forma a esta cordillera. Algunas de las rocas que se pueden encontrar incluyen:

- **Granito.** A lo largo de la cordillera hay intrusiones de rocas graníticas. Estos cuerpos de roca ígnea se formaron por el enfriamiento lento de magma en las profundidades de la corteza terrestre. Se pueden encontrar en forma de afloramientos rocosos más resistentes a la meteorización. Si bien el granito es una roca ígnea intrusiva de alta resistencia y baja porosidad en estado masivo, su estabilidad se ve comprometida por la presencia de discontinuidades estructurales, como fallas o fracturas. Estos planos de debilidad son generados por la descompresión y los esfuerzos tectónicos a los que está sometido el macizo rocoso.
- **Filita.** Estas rocas metamórficas se formaron a partir de la transformación de rocas sedimentarias de grano fino, como las lutitas, bajo condiciones de baja temperatura y presión. Se pueden identificar por su aspecto laminado y su característico brillo sedoso, lo que las hace particularmente susceptibles a la meteorización y a los deslizamientos de laderas.

La presencia de estas rocas, combinada con la actividad de la Falla de Boconó, genera un paisaje de fuertes pendientes y, a su vez, una alta propensión a riesgos geológicos como lo son los movimientos de masa, los cuales son una característica recurrente en este tramo de vía.

**d) Aspectos climatológicos para el mantenimiento vial en el tramo La Victoria-Tovar, Estado Mérida**

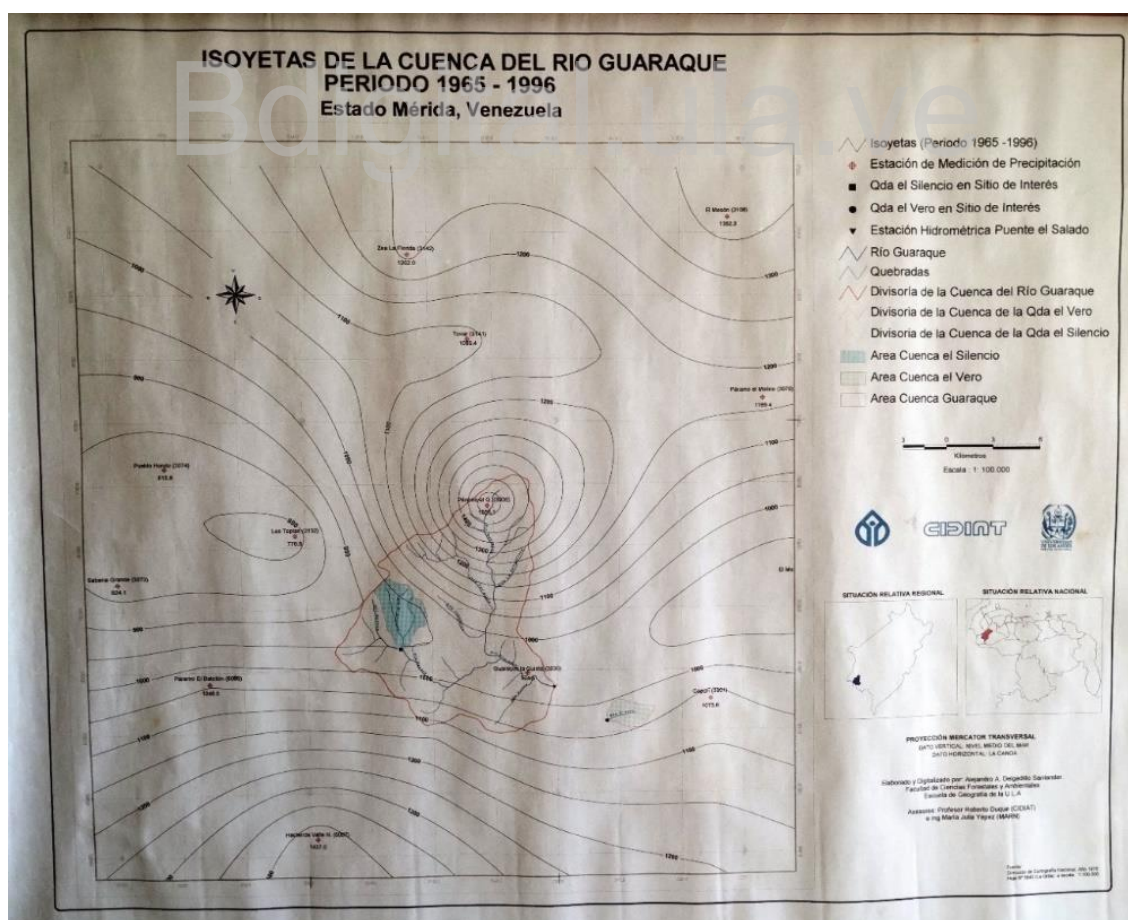
El clima de Venezuela varía significativamente con la altitud, un factor clave en la Cordillera de Mérida. La temperatura media anual se reduce en las zonas altas. Por ejemplo, en los valles andinos a mayor altitud, la temperatura promedio anual es menor a 18°C, mientras que en las áreas más bajas puede superar los 27°C (Aranguren et al., 2012).

Este tramo de la Troncal 007 se encuentra en un entorno de alta pluviosidad, con la vertiente derecha registrando un promedio anual de precipitación de 1670 mm. Diariamente, la previsión meteorológica para Tovar ilustra un ciclo de alta exposición a la radiación solar por la

mañana. Por la tarde, la probabilidad de lluvias y tormentas aumenta significativamente, generando una dinámica de calor y humedad que afecta directamente a la estructura del pavimento y la estabilidad de los taludes adyacentes (Meteored, s.f.).

El patrón de precipitación descrito se contextualiza y valida cartográficamente mediante el mapa de isoyetas de la cuenca del río Guaraque - Período 1965-1996 (Delgadillo A, s.f.), extrapolable al río Mocotíes. Este mapa (Figura 7) detalla la distribución espacial de la precipitación media anual en la zona de estudio, confirmando que el entorno de Tovar, La Victoria y la Troncal 007 se ubican en una región pluviométrica elevada. Las isoyetas revelan un núcleo de alta precipitación en la cuenca alta (superando los 1500 mm/año), con valores que se mantienen consistentemente altos en las áreas circundantes. Esta alta tasa de precipitación intensifica la escorrentía superficial y la saturación del suelo, representando un factor crítico para el diseño de drenajes, la erosión de taludes y la degradación acelerada de la infraestructura vial, especialmente la estructura del pavimento expuesta a los ciclos de humedad y temperatura.

**Figura 7.** Mapa de Isoyetas de la Cuenca del Río Guaraque - Período 1965-1996



Fuente: Delgadillo, A.

### **La causalidad de los eventos meteorológicos extremos**

Una revisión del historial de desastres revela que los eventos más destructivos en la cuenca del Mocotíes no siempre coinciden con la época de lluvias. Por ejemplo, la catástrofe de febrero de 2005 fue causado por lluvias anómalas que ocurrieron en lo que tradicionalmente se considera la estación seca. Esto demuestra que la planificación de mantenimiento no puede limitarse a la temporada de lluvias, sino que debe operar bajo un estado de preparación constante. El fenómeno de 2005, activado por una vaguada atmosférica, generó lluvias extraordinarias que actuaron como el detonante de un proceso de movimientos de masa y fuerte erosión en las vertientes del valle (Laffaille et al., 2005).

Además de la precipitación, la geomorfología de la cuenca amplifica el riesgo. La orientación suroeste-noreste del valle y su ubicación paralela a los corredores de vientos y bajas presiones intensifica los efectos de la lluvia. Esta particularidad geográfica convierte a la cuenca en un sistema amplificador, que canaliza y acelera el escurrimiento y la infiltración del agua, lo que explica por qué los eventos en el Valle del Mocotíes son desproporcionadamente más severos en comparación con otras regiones andinas afectadas por las mismas condiciones atmosféricas (Laffaille et al., 2005).

La falta de datos meteorológicos históricos fiables y a largo plazo para la región, a excepción de registros parciales o de corta duración en algunas estaciones, obliga a complementar el análisis con crónicas históricas y estudios cualitativos. Esta aproximación multidisciplinaria, que integra el conocimiento científico con el registro histórico de eventos catastróficos, es fundamental para una comprensión completa del riesgo.

- **Geomorfología y unidades hidrográficas de la cuenca del río Mocotíes**

La cuenca del río Mocotíes es una unidad hidrográfica de 511 km<sup>2</sup> con un relieve montañoso que oscila entre 300 y 3600 metros sobre el nivel del mar. La topografía está marcada por un amplio valle aluvial, con la Troncal 007 asentada en áreas de alto riesgo, como los conos de deyección de las quebradas. La confluencia del río Mocotíes con numerosos afluentes, como las quebradas El Peñón/San Rafael, Cacagüito, El Tabacal, Guaimaral, Carmania/Los Cedros, Mejías, y San Francisco, crea un entorno geológico propenso a flujos de detritos y desbordamientos.

- **Antecedentes históricos de eventos hidrometeorológicos extremos**

El tramo La Victoria-Tovar no es vulnerable a un evento aislado, sino que se encuentra inmerso en un patrón histórico de riesgo. Se han documentado al menos 18 eventos

hidroclimáticos significativos en la cuenca del Mocotíes entre 1910 y 2021. La tragedia del Mocotíes de 2005 es el precedente más severo. Este evento causó la pérdida de al menos 500 vidas en el valle del Mocotíes. Más recientemente, en agosto de 2021, las intensas lluvias generaron nuevos deslaves e inundaciones, con un impacto crítico en la región. El municipio Tovar fue el más afectado, con al menos 20 fallecidos y la Troncal 007 quedando inhabilitada por derrumbes y deslizamientos de tierra y rocas. Estos eventos, tanto el de 2005 como el de 2021, demuestran que el riesgo es una amenaza constante y recurrente, no un caso aislado. Una revisión histórica sugiere un período de retorno de 40 a 50 años para eventos de magnitud moderada (Laffaille et al., 2005). La Tabla 5 muestra la recurrencia de estos desastres, mientras que las Figuras 8 y 9 muestran los daños que dejó la tragedia de agosto de 2021 en Tovar.

**Tabla 5. Historial de eventos hidrometeorológicos significativos en la cuenca del Mocotíes (1910- 2021)**

<b>Año del Evento</b>	<b>Causa Climatológica</b>	<b>Impacto Principal en la Vialidad y la Región</b>	<b>Consecuencias Humanas y Materiales</b>
1910	Evento hidroclimático extremo	Desbordamientos, destrucción de infraestructura	Pérdidas documentadas
1933	Evento hidroclimático extremo	Desbordamientos, destrucción de infraestructura	Pérdidas documentadas
1951	Lluvias anómalas en época de sequía	Desbordamientos, afectación de la región	Afectación similar al evento de 2005
2005	Vaguada atmosférica, lluvias anómalas	Aludes de lodo, carreteras cortadas (Autopista Rafael Caldera, carretera trasandina), infraestructura destruida	Al menos 500 muertos en el Valle del Mocotíes; más de 100 heridos y damnificados
2021	Lluvias torrenciales	Derrumbes, deslizamientos, afectación directa de la Troncal 007 y otras vías	Al menos 20 muertos en Mérida, con la mayoría en Tovar; 17 desaparecidos; 657 viviendas afectadas

**Figura 8.** *Tragedia de agosto de 2021 en Tovar*



Fuente: <https://www.cinco8.com/periodismo/los-desplazados-ambientales-de-tovar/>

**Figura 9.** *Tragedia de agosto de 2021 en Tovar*



Fuente: <https://www.diariolasamericas.com/america-latina/lluvias-arrasan-el-pueblo-tovar-los-andes-venezuela-n4230644>

#### **e) Vulnerabilidad del tramo de estudio**

La ubicación geográfica de la carretera Troncal 007 en el corazón de los Andes venezolanos, una región con alta fragilidad geológica y sísmica, la hace inherentemente vulnerable a los fenómenos naturales. Esta debilidad estructural se evidenció durante la tragedia del Mocotíes en agosto de 2021, cuando lluvias torrenciales causaron deslizamientos masivos de lodo y rocas, dejando a la vía principal completamente intransitable en varios tramos (Blanco, 2021). Los efectos de esta vaguada fueron devastadores y multidimensionales, las comunidades quedaron incomunicadas, el suministro de servicios

básicos se interrumpió y las pérdidas humanas fueron significativas, tal como se detalla en el consolidado de impactos del Anexo B.

Esta vulnerabilidad no es el resultado de un factor aislado, sino de un proceso secuencial y cíclico impulsado por las condiciones geológicas de la región. El marco tectónico de la Falla de Boconó y sus estructuras asociadas es la causa fundamental que debilita estructuralmente el macizo rocoso. Las zonas de roca triturada generadas por el movimiento de las fallas poseen una baja resistencia mecánica y son altamente susceptibles a la meteorización química y física. El alto grado de fracturación en las rocas acelera la infiltración del agua y facilita la descomposición de los minerales, dando lugar a la formación de suelos residuales de menor resistencia en la superficie (Dugarte et al., 2015). En este contexto, las lluvias extremas actúan como el detonante que desencadena los movimientos de masa en un terreno preconditionado para el colapso, explicando por qué los deslizamientos son un problema recurrente en la vía.

Debido a esta interacción, el análisis geotécnico permite identificar riesgos diferenciados según la naturaleza del material subyacente. Los taludes excavados en macizos rocosos consolidados están sujetos primordialmente a caídas de rocas, mientras que las laderas de suelos residuales y los depósitos no consolidados de los valles son vulnerables a deslizamientos y flujos de lodo bajo condiciones de saturación hídrica. En este sentido, el deterioro de la carretera responde a una interacción compleja entre el clima, el terreno y las características del material. Por ejemplo, el calor diurno suaviza la carpeta asfáltica, haciéndola más susceptible a la formación de roderas (VISE, 2017). Estas deformaciones y las grietas existentes actúan como canales para que el agua de las fuertes precipitaciones se infiltre en la estructura del pavimento, debilitándola y acelerando el agrietamiento por fatiga.

Finalmente, este proceso se agrava con la inestabilidad del entorno. La sobresaturación del suelo por la infiltración masiva de agua reduce la resistencia al corte del terreno, lo que conduce a los catastróficos movimientos de masa, como los deslaves y los flujos de detritos observados en el pasado. Estos eventos, al movilizar grandes cantidades de material rocoso, no solo cierran la vía, también causan daños físicos severos a la estructura de la carretera (Roa, 2022). En resumen, la Troncal 007 en el tramo La Victoria-Tovar se asienta sobre un entorno intrínsecamente inestable donde los riesgos son bimodales, caídas de roca en secciones de macizo ígneo-metamórfico, y deslaves e inundaciones en áreas de depósitos cuaternarios.

### f) Patologías de la infraestructura vial y su relación con el clima

La vía del tramo La Victoria-Tovar, construida en su mayoría con pavimento flexible, es vulnerable a una serie de fallas directamente relacionadas con las condiciones climáticas y geológicas de la zona. Los principales mecanismos de deterioro se resumen en la Tabla 6 y las principales patologías de pavimento asfáltico se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 6.** Principales mecanismos de deterioro del pavimento flexible. Tramo La Victoria – Tovar

Tipo de Patología	Mecanismo de Deterioro/Falla Específica	Origen Principal/Relación con el riesgo
Macroscópica /Estructural	Deformación permanente (Ahuellamiento)	Alta temperatura y carga pesada: La temperatura suaviza el asfalto, causando deformación plástica bajo la carga repetida del tráfico. Facilita la acumulación de agua.
Macroscópica/Estructural	Fisuración por fatiga (Piel de Cocodrilo)	Presión hidráulica del agua: Red de grietas interconectadas. El agua infiltrada y bajo presión por el paso vehicular destruye la estructura interna.
Macroscópica/Química	Daños por infiltración de agua	Oxidación y envejecimiento: El agua altera las propiedades químicas y físicas del cemento asfáltico, acelerando el daño estructural y la oxidación.
Localizada/Funcional	Huecos y baches	Pérdida de soporte por agua: Son el resultado final de la fatiga. La infiltración de agua socava la base debajo del asfalto, causando el colapso puntual de la capa de rodadura.
Localizada/Funcional	Baches mal reparados	Fallas en la ejecución de mantenimiento: Reparaciones deficientes (sin retirar el material dañado y sin sellado) que reintroducen agua, acelerando la formación de nuevas fallas.
Localizada/Interfaz	Falla de pavimento en acceso a puentes	Consolidación diferencial y saturación: Asentamiento del terraplén de acceso (material de relleno) debido a la saturación y la carga cíclica, creando un desnivel en la interfaz con la estructura rígida del puente.

**Tabla 7. Patologías de pavimento asfáltico y su etiología climática y de tráfico**

<b>Patología de Pavimento</b>	<b>Causa Primaria</b>	<b>Agravantes climáticos/geológicos del Mocotíes</b>
Fisuración por fatiga	Cargas de tráfico pesadas y repetidas	Acumulación de agua de alta precipitación, que genera presión y rompe la estructura del pavimento.
Deformación permanente (roderas)	Cargas de tráfico y propiedades del cemento asfáltico	Altas temperaturas de la región, que suavizan la mezcla asfáltica y la hacen más susceptible a la deformación.
Daños por infiltración de agua	Presencia de poros y fisuras en el asfalto	Régimen de lluvias extremas y sostenidas que facilitan la infiltración y el daño químico al asfalto.
Derrumbes/Deslaves	Inestabilidad del suelo y taludes	Precipitación intensa que satura el terreno, reduciendo la resistencia y provocando movimientos de masa en un valle de geología inestable.

### 2.2.6 Estrategia integral de mantenimiento y mitigación de riesgos

La historia de la vialidad en el Mocotíes demuestra que la reparación correctiva y el bacheo son medidas insuficientes frente a la magnitud de los eventos recurrentes. Se requiere un cambio fundamental hacia un modelo de mantenimiento preventivo. Este enfoque implica revisiones regulares y pequeñas reparaciones, como la limpieza de drenajes o el sellado de grietas, para evitar que las fallas menores se conviertan en problemas graves.

La gestión del agua y la estabilización de los taludes son el núcleo de cualquier estrategia de mantenimiento a largo plazo. Las soluciones de ingeniería deben ser proactivas y multidimensionales. Dentro de estas soluciones, se tienen:

**Medidas estructurales:** que requieren la construcción o modificación física de infraestructura (diques, reforzamiento de puentes).

**Medidas no estructurales (regulatorias):** que implican políticas, leyes o planificación territorial (ordenamiento del suelo).

**Medidas de control (hidrológica/bioingeniería):** las cuales implican acciones enfocadas en la gestión de procesos naturales para mitigar la amenaza (manejo de agua, reforestación).

Más allá de las soluciones de ingeniería, la estabilidad de la vía depende de una gestión de riesgos integral. La implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) es crucial para traducir la información técnica y científica en advertencias prácticas y oportunas. Estos sistemas, equipados con sensores meteorológicos e hidrológicos, pueden medir parámetros clave y alertar

a las autoridades y a las comunidades en riesgo antes de un evento (PNUD - Climate Promise, 2025). Un plan de respuesta efectivo debe involucrar a las autoridades municipales, estatales y nacionales, así como a las comunidades.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

## **CAPÍTULO III METODOLOGÍA**

El presente capítulo expone la ruta sistemática y los procedimientos técnicos seguidos para alcanzar los objetivos planteados en la investigación. De acuerdo con Hernández-Sampieri (2014), la metodología constituye el plan de acción para recolectar y analizar datos, asegurando que los hallazgos posean el rigor científico necesario para la toma de decisiones en ingeniería.

En este contexto, el marco metodológico describe inicialmente el enfoque mixto que rige el estudio, integrando el análisis cuantitativo de sensores remotos con la interpretación cualitativa del entorno. Posteriormente, se detalla el diseño no experimental y el alcance descriptivo-aplicado que permite caracterizar el tramo La Victoria-Tovar de la Troncal 007. Finalmente, se presenta el protocolo de aplicación estructurado en ocho fases secuenciales, el cual operacionaliza el uso de la teledetección como herramienta estratégica para la gestión vial. Este protocolo permite un análisis integral al vincular la dinámica del río Mocotíes con el comportamiento hidrogeomorfológico de sus microcuencas tributarias, integrando la identificación de geformas críticas y la evaluación de los procesos de inestabilidad de vertiente que impactan directamente la operatividad de la infraestructura.

### **3.1 Enfoque de la investigación**

El estudio se aborda bajo un enfoque mixto, el cual no busca reemplazar a las aproximaciones cuantitativa o cualitativa, sino utilizar las fortalezas de ambas, combinándolas para lograr una perspectiva más amplia y profunda del fenómeno (Hernández-Sampieri, 2014).

**Ruta cuantitativa:** Se utiliza para la recolección de datos que requieren medición numérica y análisis espacial. Se centra en el procesamiento de datos geoespaciales mediante sensores remotos, mediciones de geoposicionamiento (GPS) y la cuantificación de variables morfométricas y de deterioro vial.

**Ruta cualitativa:** Se enfoca en comprender los fenómenos a través de los contextos y el entorno. Se aplica en la interpretación de los factores que causan el deterioro y en la obtención de información contextual a través de la revisión documental y entrevistas no estructuradas con los pobladores locales.

**Triangulación de datos:** Este enfoque permite una correlación consistente entre los problemas detectados de forma remota y las causas físicas y geológicas validadas en el terreno.

### **3.2 Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación es no experimental de corte transeccional o transversal. De acuerdo con Hernández-Sampieri (2014), es no experimental debido a que se realiza sin la manipulación deliberada de variables, observando los fenómenos en su contexto natural para analizarlos. Es transeccional porque la recolección de datos ocurre en un solo momento o tiempo único, con el propósito de describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. El diseño integra la investigación documental, a través de la revisión bibliográfica sistemática sobre mantenimiento vial, geomorfología y teledetección y la investigación de campo, mediante la recolección de datos primarios directamente en la Troncal 007 para la validación de los hallazgos remotos.

La presente investigación posee un alcance descriptivo. Según Hernández-Sampieri (2014), los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades y las características de perfiles, procesos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. En este sentido, el proyecto detalla la situación actual de la Troncal 007, interpretando la incidencia de factores geológicos, geomorfológicos y antrópicos.

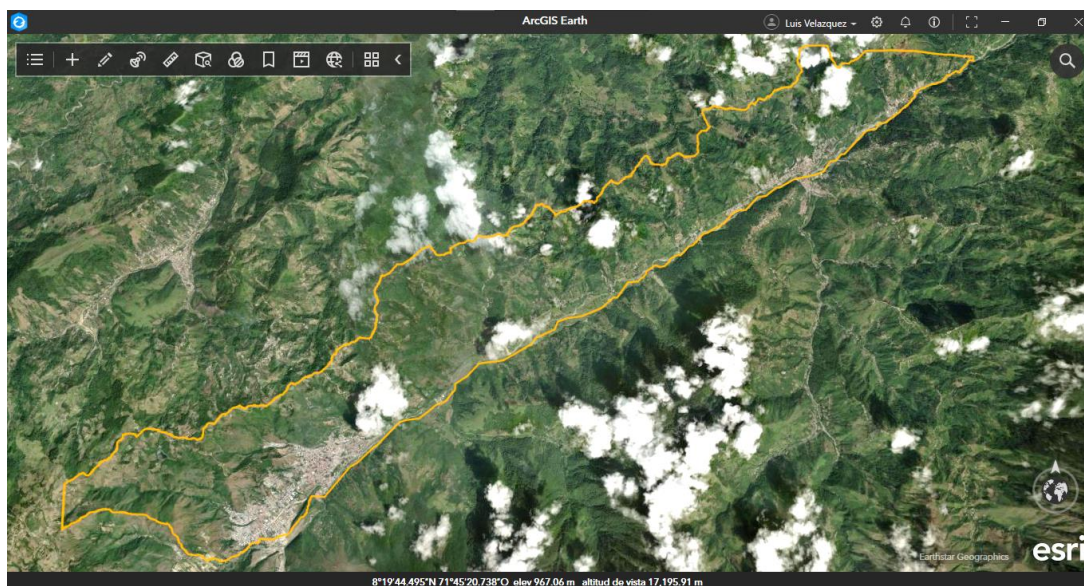
Asimismo, posee un carácter aplicado, ya que está orientada a proponer soluciones técnicas de ingeniería y el establecimiento de criterios metodológicos para la aplicación de sensores remotos, ofreciendo una solución práctica para la gestión vial regional.

### **3.3 Area de estudio**

La investigación se desarrolla como un estudio de caso, centrado en el tramo La Victoria-Tovar de la Troncal 007. Este diseño se justifica por la complejidad geomorfológica del área y la necesidad de desarrollar una metodología que sea transferible a otros tramos viales con desafíos de gestión similares en el contexto nacional.

El área comprende un segmento crítico de la carretera Troncal 007, específicamente entre las progresivas Prg. 0+000 y Prg. 20+350 (aprox. 20 km), como se muestra en la Figura 10. Geográficamente, se localiza en el estado Mérida, Venezuela, abarcando el tramo vial y el sistema de microcuencas tributarias situadas en la margen izquierda del río Mocotíes. La delimitación responde a la alta recurrencia de eventos hidrometeorológicos y la inestabilidad observada en esta vertiente.

**Figura 10. Área de estudio**



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

### 3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos seleccionados permiten capturar datos tanto de la dimensión física como de la remota, y se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8. Técnicas e instrumentos de Información**

Técnica	Instrumento	Objetivo Principal
Observación	Fichas técnicas	Estructurar el registro de los datos de campo. La Ficha N° 01 se enfoca en el reconocimiento y validación de los factores externos (geológicos, geomorfológicos, drenaje) detectados por teledetección.  La Ficha N° 02 se centra en la comprobación y georreferenciación precisa de los problemas viales actuales y potenciales.
Georreferenciación	GPS (Geoposicionamiento)	Obtener coordenadas geográficas aproximadas (Datum WGS84) para la georreferenciación de los hallazgos y la posterior elaboración cartográfica detallada.
Observación y visitas de campo	Fotografías y registro fotográfico	Documentar visualmente los problemas viales, las obras de drenaje y los factores externos (inestabilidad de taludes, ocupación antrópica), sirviendo como evidencia de apoyo a la validación <i>in situ</i> .
Entrevistas	Entrevistas no estructuradas	Recopilar datos toponímicos (nombres de quebradas, sectores) y contextuales (historial de problemas) de los pobladores locales, complementando la información técnica.

### 3.5 Fuentes de información

Dentro de los tipos de información se tienen las fuentes primarias y secundarias. Dentro de las fuentes primarias se encuentran los datos obtenidos directamente en el trabajo de campo, como registros de GPS, fotografías originales e interpretación directa de imágenes satelitales. En relación a fuentes secundarias, se tienen la bibliografía especializada, cartografía oficial, fotografías aéreas históricas e imágenes de satélite de plataformas institucionales (Hernández-Sampieri, 2014).

### 3.6 Protocolo de aplicación

El protocolo de aplicación constituye la ruta operativa diseñada para dar cumplimiento a los objetivos de la investigación mediante una estructura lógica de ocho fases interconectadas. Este procedimiento sistematiza el uso de la teledetección y el análisis geoespacial como herramientas fundamentales para el diagnóstico de la Troncal 007, permitiendo la transición desde el reconocimiento digital del terreno hasta la formulación de soluciones de ingeniería específicas. Cada etapa del protocolo integra criterios de validez científica basados en la ruta mixta de Hernández-Sampieri (2014), asegurando la correlación entre la interpretación remota de geformas y la realidad física observada en el tramo vial. Para la explicación del protocolo, en la Figura 11 se muestran las fases que se siguieron para el cumplimiento de los objetivos planteados en la presente investigación.

**Figura 11.** Diagrama de flujo del protocolo metodológico para la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial



**Nota.** Representación esquemática de las ocho fases secuenciales diseñadas para la evaluación de la Troncal 007, integrando la teledetección, el análisis hidrogeomorfológico y la validación de campo.

### **3.6.1 Fase 1: Reconocimiento del área de estudio**

Acción: Delimitación geográfica y técnica del tramo vial.

Procedimiento: Definir el área de influencia directa e indirecta del tramo La Victoria-Tovar. Establecer las coordenadas UTM de control y realizar una revisión de la cartografía histórica disponible para contextualizar la evolución del trazado.

Instrumento: Sistemas de Información Geográfica (SIG) y archivos técnicos.

Criterio Sampieri: Definición del alcance de la investigación, el cual se clasifica como descriptivo al buscar especificar las propiedades y perfiles de los procesos y objetos sometidos a análisis (Hernández-Sampieri, 2014).

Resultado esperado: Delimitación precisa del área de estudio y de las progresivas (Prg. 0+000 a 20+350).

### **3.6.2 Fase 2: Modelado digital para obtención del mapa base**

Acción: Generación del entorno topográfico y morfométrico digital.

Procedimiento: Procesar Modelos de Elevación Digital (DEM) para la obtención de curvas de nivel, mapas de pendientes y la delimitación de las unidades espaciales de análisis hidrológico.

Instrumento: Sensores satelitales y algoritmos de interpolación espacial.

Criterio Sampieri: Corresponde a la fase de recolección de datos, donde se seleccionan fuentes secundarias bajo un enfoque cuantitativo para medir la realidad física de manera objetiva (Hernández-Sampieri, 2014).

Resultado esperado: Mapa base con relieve y red hídrica integrada al trazado vial.

### **3.6.3 Fase 3: Descripción física y operacional del tramo**

Acción: Diagnóstico del estado de servicio de la infraestructura vial.

Procedimiento: Ejecutar un inventario de daños en la calzada (piel de cocodrilo, fisuras, baches) y evaluar la funcionalidad de las obras de drenaje transversal para identificar puntos de colmatación y pérdida de capacidad hidráulica.

Instrumento: Planillas de inspección visual y cámara fotográfica.

Criterio Sampieri: Aplicación de un diseño no experimental, observando los fenómenos y su deterioro tal y como se dan en su contexto natural para su posterior análisis (Hernández-Sampieri, 2014).

Resultado esperado: Cuadro diagnóstico de la vulnerabilidad operacional y estructural del tramo.

### **3.6.4 Fase 4: Análisis hidrogeomorfológico integral y diagnóstico funcional de infraestructura**

Acción: Caracterización multivariable de cuencas, geoformas, dinámicas fluviales y validación técnica *in situ* de patologías viales.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Evaluación de microcuencas (remoto): Mapear fallas y fracturas geológicas, identificar cicatrices de deslizamientos, formación de cárcavas y evaluar la actividad antrópica (uso del suelo y deforestación) que altera la escorrentía.

Identificación de geoformas (remoto): Localizar conos de deyección, terrazas aluviales y depósitos de pie de vertiente (coluviones).

Análisis fluvial (remoto): Medir márgenes de amortiguamiento, detectar paleocauces reactivados y analizar la reflectancia para ubicar sedimentación masiva.

Validación y diagnóstico funcional (campo): Inspección física de obras de drenaje transversal y plataforma vial. Identificación de fallas estructurales por impacto, procesos de colmatación, socavación de estribos y detección de anomalías subsuperficiales (hundimientos) no perceptibles por sensores remotos.

Instrumento: Imágenes de sensores remotos de alta resolución y software de análisis espacial, fichas de inspección técnica de campo y registro fotográfico de alta fidelidad.

Criterio Sampieri: Se fundamenta en un diseño transeccional descriptivo y de campo, cuya finalidad es indagar la incidencia de las variables y verificar la realidad física del área en un momento único (Hernández-Sampieri, 2014).

Resultado esperado: Cartografía de procesos morfodinámicos y matriz diagnóstica de vulnerabilidad estructural en puntos críticos.

### **3.6.5 Fase 5: Validación técnica de campo y correlación geológica**

Acción: Comprobación *in situ* y análisis litológico-estructural.

Procedimiento: Realizar visitas de campo focalizadas para confirmar la presencia de filitas y granitos. Validar las dimensiones de las geoformas detectadas remotamente y documentar la interacción real del río con los estribos de puentes y terraplenes.

Instrumento: Libreta de campo, GPS y cámara fotográfica.

Criterio Sampieri: Representa la recolección de datos en el campo, necesaria para fortalecer la validez del estudio mediante la observación directa y la triangulación de información (Hernández-Sampieri, 2014).

Resultado esperado: Registro técnico y validación de la influencia geológica en la inestabilidad vial.

### **3.6.6 Fase 6: Construcción de la Cartografía Geológica-Geomorfológica**

Acción: Integración sistémica del riesgo vial.

Procedimiento: Ejecutar una superposición de capas que integre la dinámica del cauce principal con la actividad de las microcuencas sobre la infraestructura.

Instrumento: Análisis multicriterio espacial y herramientas de geoprocésamiento y software SIG.

Criterio Sampieri: Se enmarca en el análisis de los datos, donde se organizan y relacionan las variables para dar respuesta a la pregunta de investigación (Hernández-Sampieri, 2014).

Resultado esperado: Mapa de síntesis de riesgos.

### **3.6.7 Fase 7: Formulación de propuestas de intervención**

Acción: Diseño técnico de medidas de mitigación estructural y no estructural.

Procedimiento: Dimensionar propuestas de ingeniería (pedraplenes, diques de retención de sedimentos, muros de protección) y soluciones de bioingeniería (siembra de bambú y/o especies nativas) según la tipología del riesgo detectado.

Instrumento: Catálogo técnico de obras hidráulicas y criterios de diseño geotécnico.

Criterio Sampieri: Constituye la fase de elaboración de resultados y recomendaciones, donde se transforman los hallazgos analizados en soluciones prácticas al problema planteado (Hernández-Sampieri, 2014).

Resultado esperado: Plan de intervención unificado con justificación técnica por progresiva crítica.

### **3.6.8 Fase 8: Metodología y criterios para la aplicación de sensores remotos**

Acción: Estandarización del modelo de gestión vial basado en la integración de fases.

Procedimiento:

Consolidación metodológica: Sistematizar los hallazgos de las fases de reconocimiento (Fase 1), modelado (Fase 2) y diagnóstico (Fases 3, 4 y 5) para establecer estándares de identificación visual y espectral que permitan el monitoreo preventivo continuo.

Protocolización del análisis morfodinámico: Integrar la cartografía de riesgos (Fase 6) con el cálculo sistemático del margen de amortiguamiento y la categorización de la incidencia fluvial, diferenciando las amenazas por flujo longitudinal o perpendicular a la vía.

Gestión de incertidumbre y autogestión: Definir protocolos de respuesta ante limitaciones climáticas (registros históricos) y establecer criterios para la localización remota de áreas de préstamo (sedimentos detectados en Fase 4) para la ejecución de las propuestas de intervención (Fase 7).

Instrumento: Guía técnica operativa y hoja de ruta estratégica para la gestión de activos viales.

Criterio Sampieri: Asegura la confiabilidad y la replicabilidad de la investigación, permitiendo que el método integral, compuesto por las ocho fases, pueda ser transferido y utilizado en contextos de riesgo geodinámico similares con resultados consistentes (Hernández-Sampieri, 2014).

Resultado esperado: Protocolo estandarizado de monitoreo y gestión de anticipación para la sostenibilidad operativa de la Troncal 007.

### **3.7 Consideraciones finales del capítulo**

Una vez establecida la ruta metodológica, el enfoque mixto y el diseño no experimental que rigen esta investigación, se dispone de un marco de trabajo sólido y replicable. La estructuración del protocolo en ocho fases secuenciales permite transformar la observación remota y la validación de campo en un sistema de soporte para la toma de decisiones en ingeniería civil. En consecuencia, el siguiente capítulo presenta los Resultados, derivados de la aplicación rigurosa de esta metodología, donde se analizan las vulnerabilidades detectadas en el tramo de estudio de la Troncal 007 y se exponen las soluciones técnicas recomendadas para garantizar su estabilidad y operatividad ante la dinámica hídrica y geomorfológica del sector.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

El presente capítulo constituye el núcleo de la investigación, donde se exponen los hallazgos derivados de la aplicación sistemática del protocolo metodológico definido en el apartado anterior. De acuerdo con Hernández-Sampieri (2014), esta etapa permite la transformación de los datos recolectados en información con valor científico, facilitando el análisis de las variables en su contexto natural. En este sentido, los resultados se presentan siguiendo una secuencia lógica que transita desde la caracterización física inicial hasta la formulación de criterios técnicos para la gestión de activos viales mediante sensores remotos.

El análisis aquí expuesto integra la evaluación multitemporal de la dinámica del río Mocotíes y el comportamiento hidrogeomorfológico de sus microcuencas tributarias. A través de la triangulación de datos obtenidos por teledetección y validación de campo, se identifican los puntos críticos de inestabilidad, las geoformas de riesgo y los procesos de degradación estructural en la Troncal 007. Finalmente, la discusión de estos resultados fundamenta el diseño de propuestas de intervención específicas, orientadas a garantizar la integridad física y operatividad de la infraestructura vial ante las amenazas geomorfológicas propias del entorno andino.

#### **4.1 Reconocimiento del área de estudio (Fase 1)**

##### **4.1.1 Reconocimiento remoto y análisis documental**

Esta fase inicial se fundamenta en la ruta cuantitativa de investigación, orientada a establecer una línea base técnica del tramo La Victoria-Tovar mediante la observación no intrusiva (Hernández Sampieri et al., 2014). El procedimiento se divide en tres ejes fundamentales:

- Revisión bibliográfica y documental: Se procedió a recopilar y analizar información técnica sobre mantenimiento vial y geodinámica externa. Se consultaron los fundamentos de la observación terrestre remota detallados en el apartado 2.2.3 para sustentar la selección de herramientas de análisis (Chuvienco, 2000).
- Criterios de selección de sensores: Para el análisis del tramo, se priorizaron imágenes de alta resolución espacial disponibles a través de las plataformas *ArcGIS Earth* y *Google Earth Pro*. La elección de estos sensores se basó en su capacidad para identificar elementos geométricos críticos, tales como radios de curvatura y pendientes del terreno, fundamentales para el diagnóstico de la seguridad vial.

- Análisis hidrogeomorfológico de microcuencas: Se utilizaron modelos de elevación digital (DEM) para la delimitación y caracterización de las microcuencas que interceptan al tramo de estudio. Este análisis permitió evaluar el comportamiento de las cuencas de drenaje, identificando patrones de escorrentía, áreas de aporte y la respuesta hidrológica ante eventos extraordinarios. Mediante la comparación multitemporal de imágenes, se analizó la evolución del cauce del río y su interacción con las laderas, permitiendo prever zonas de socavación o sedimentación que amenacen la integridad de la vía.

#### 4.1.2 Visita de campo de reconocimiento

Se efectuó un recorrido exploratorio con el objetivo de verificar la accesibilidad y las condiciones generales del entorno vial, lo cual permitió elaborar un inventario preliminar de los problemas que afectaban a la carretera. Asimismo, se llevó a cabo la verificación *in situ* y la complementación de los factores geológicos, geomorfológicos y de drenaje que habían sido obtenidos previamente mediante teledetección, centrando el análisis en las causas del deterioro observado. Finalmente, se realizó la recolección inicial de datos primarios a través de coordenadas GPS y un registro fotográfico, del cual se presenta un ejemplo en la Figura 12.

**Figura 12.** *Obra de paso en quebrada El Peñón/San Rafael*



Como parte de la fase de validación terrestre, se elaboró la Ficha VC-LV-TVR-01 (ver Tabla 9), la cual documenta el levantamiento de datos primarios en el tramo La Victoria-Tovar. El registro evidencia una estrecha correspondencia entre la información remota y la realidad física del entorno vial, destacando la identificación de factores geodinámicos y antrópicos que comprometen la infraestructura. Se determinó que la inestabilidad de las laderas y la obstrucción

de los drenajes longitudinales son los principales agentes de degradación en la zona. La información recabada, georeferenciada bajo el datum WGS84, permitió transitar de una evaluación descriptiva a una fase de diagnóstico multicausal, esencial para la construcción posterior de la cartografía de síntesis.

### Ficha técnica de visita de campo N° 01

**Tabla 9.** Ficha técnica de visita de campo N° 01

<b>Datos Generales de la Ficha</b>	
<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Identificación de la ficha	VC-LV-TV-01
Proyecto/Tesis	Aplicación de sensores remotos en mantenimiento vial. Carretera T007, tramo La Victoria - Tovar, Mérida – Venezuela
Fecha de visita	Lunes 8 de septiembre de 2025
Hora de Inicio/Fin	9:00 AM – 3:00 PM
Investigador(es) Responsable(s)	Ing. Luis Velázquez, Msc. Jorge Carrero
Personal de apoyo	Arq. Claudia Castro
Condiciones climáticas	Soleado, jornada favorable para inspección.
<b>Localización y Propósito</b>	
<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Zona de estudio/Tramo Vial	La Victoria - Municipio Tovar
Ubicación Política	Estado Mérida, Venezuela
Coordenadas GPS (Datum)	8.424495°, -71.603971° - 8.325988°, -71.751457° WGS84
Propósito de la visita	Verificación <i>in situ</i> y complementación de la información geológica, geomorfológica y de drenaje obtenida por teledetección.
Metodología empleada	Geoposicionamiento (GPS), Inspección Visual y Fotográfica.
<b>Hallazgos Geológicos y Geomorfológicos</b>	
<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Problemas Geológicos/Geomorfológicos	Taludes inestables con evidencia de deslizamientos superficiales.
Condición de taludes	Evidencia de inestabilidad y socavamiento por cursos de agua cercanos.
Tipo de fenómeno	Deslizamientos superficiales y socavamiento hídrico.
Litología/Suelo	Filita y granito. Suelos arcillosos y arenosos.
Fotografía de referencia	Códigos de fotos de taludes inestables

<b>Hallazgos Antrópicos y de Drenaje</b>	
<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Problemas antrópicos detectados	Ocupación en las laderas cercanas a la vía.
Condición del drenaje	Deficiencias en el sistema de drenaje.
Causas de obstrucción	Acumulación de vegetación, basura y sedimentos en cunetas y drenajes.
Efecto en el terreno	El sistema de drenaje comprometido favorece la saturación del terreno.
<b>Conclusiones y Propósito de los Datos</b>	
<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Validación de la información remota	Los hallazgos confirmaron la presencia de problemas geológicos y geomorfológicos detectados previamente por sensores remotos.
Uso de los datos recabados	Correlacionar anomalías de sensores remotos con las causas reales en el terreno.
Implicación en las soluciones	Crucial para proponer soluciones de mantenimiento que aborden las causas de los problemas y no solo reparen los daños superficiales del pavimento.
Observaciones adicionales	El recorrido se centró en el reconocimiento de la zona de estudio y en la identificación y caracterización de los factores externos que inciden en la estabilidad vial.

## **4.2 Modelado digital para obtención del mapa base (Fase 2)**

### **Obtención del mapa base**

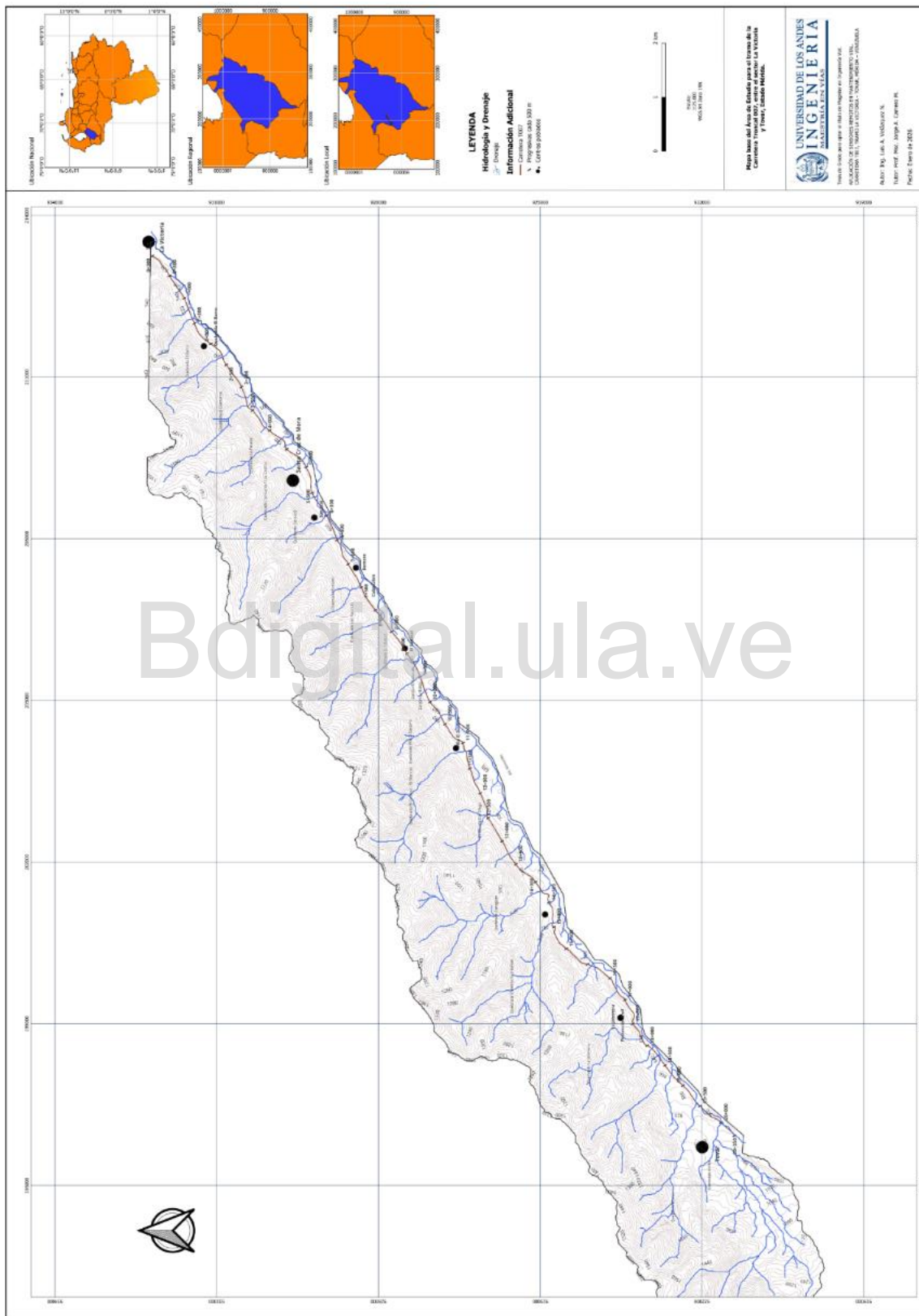
Para la creación del mapa base se utilizó el software *QGIS*, acrónimo de *Quantum GIS*, el cual es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre y código abierto. El proceso de creación del mapa comenzó con la descarga de Modelos de Elevación Digital (DEM). Para la aplicación efectiva de esta metodología, es necesario contar con fuentes de datos geoespaciales que permitan la obtención de la topografía del terreno desnudo (*Bare Earth*). El criterio técnico fundamental es el uso de sensores de radar con longitud de onda en Banda L, cuya capacidad de penetración en la cobertura vegetal permite identificar, a diferencia de los sensores ópticos tradicionales, fallas geológicas, paleocauces y cicatrices de deslizamientos que permanecen ocultos bajo la cobertura vegetal. En el marco de esta investigación, se seleccionaron los productos del satélite *ALOS PALSAR* (resolución de 12.5 m) por su disponibilidad y precisión. No obstante, la validez del protocolo propuesto es extensible a cualquier plataforma satelital que opere bajo estas características de radiofrecuencia. Una vez que el DEM se cargó en *QGIS*, el siguiente paso fue la digitalización de los elementos del proyecto, como el tramo de vía y los drenajes, que se dibujaron como capas de líneas sobre el

DEM. A partir de la vía, se asignaron progresivas, lo que permitió medir la distancia a lo largo de la ruta, una herramienta crítica para el análisis y la planificación. Finalmente, para visualizar la topografía del terreno de manera clara, se utilizaron las herramientas de QGIS para generar curvas de nivel directamente desde el DEM, creando líneas que conectan puntos de igual altitud y que, junto con las demás capas, conforman el mapa base completo. Además, a partir de bases de datos geográficos provenientes del proyecto colaborativo OpenStreetMap (OSM) se obtuvo la información para ubicar los poblados cercanos al tramo de vía del estudio. El mapa base puede observarse en la Figura 13.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

Figura 13. Mapa base



### **4.3 Descripción física y operacional del tramo (Fase 3)**

La operatividad y seguridad de este tramo de la Troncal 007 están intrínsecamente ligadas a su configuración geométrica y a su estado de conservación superficial. Ante la inexistencia de planos de proyecto actualizados, la caracterización de los parámetros de diseño horizontal y vertical se realizó mediante técnicas de digitalización cartográfica y análisis altimétrico digital. Este procedimiento permitió contrastar las dimensiones reales de la infraestructura, tales como el número de canales, pendientes longitudinales y radios de curvatura, con las especificaciones técnicas establecidas en la normativa venezolana vigente. De esta manera, se identificaron puntos críticos donde el diseño geométrico actual compromete la eficiencia del flujo vehicular y la estabilidad de la plataforma vial.

No obstante, la relevancia estratégica de esta fase dentro de la metodología radica en la ejecución del inventario de patologías y condición operacional, cuyo propósito es capturar variables críticas de alta resolución que superan la capacidad de detección de los sensores remotos de escala regional. Mientras que la teledetección identifica amenazas macro, como deslizamientos, dinámica de vertientes o migración de cauces, la inspección directa permite evaluar el estado de servicio, caracterizando el deterioro de la carpeta de rodamiento mediante la identificación de fallas del pavimento (piel de cocodrilo, baches, fisuras) y deficiencias en la demarcación horizontal; elementos que impactan la seguridad vial y que son imperceptibles en imágenes de resolución media. La inspección directa permite localizar fallas de borde incipientes y procesos de colmatación en las obras de drenaje transversal. Este registro es fundamental, ya que una obra de paso obstruida o un estribo socavado representan riesgos estructurales de origen subsuperficial que el sensor remoto no puede parametrizar de forma aislada.

Por consiguiente, la Fase 3 actúa como el eslabón de validación operativa, proporcionando los datos de microescala necesarios para realizar un diagnóstico preciso y multidimensional. Esta información permite determinar si la vulnerabilidad de la vía se debe a un agente externo, como amenaza hidrogeomorfológica detectada remotamente, o a una deficiencia intrínseca de mantenimiento y capacidad estructural del tramo vial.

#### **4.3.1 Características geométricas de la vía**

##### **a) Número de canales**

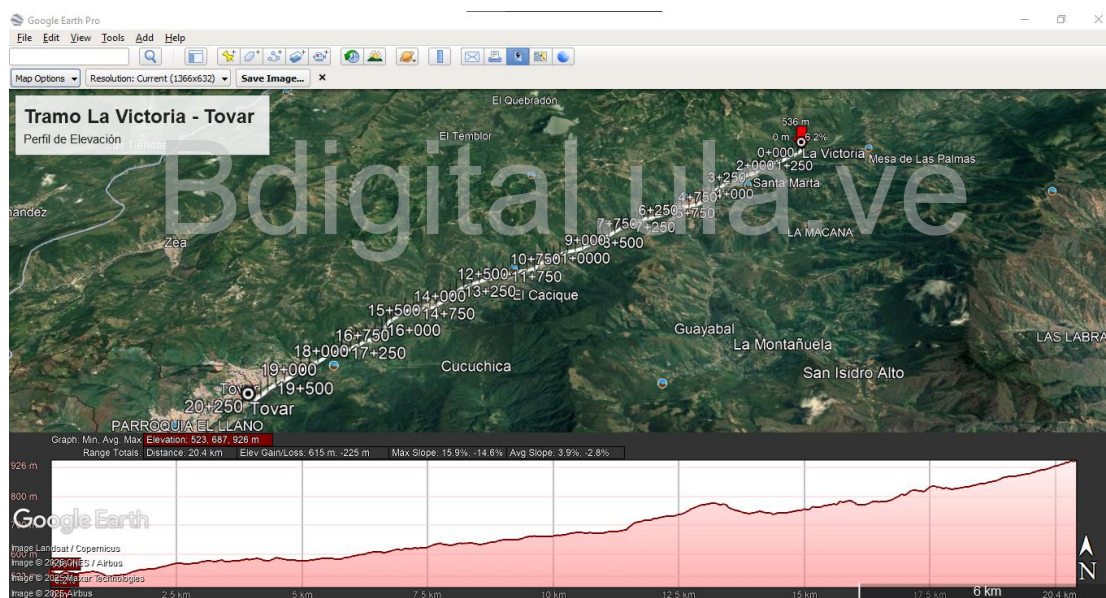
En casi su totalidad, la vía es de un solo canal por sentido de circulación (dos canales en total), lo que limita su capacidad y dificulta el paso de vehículos grandes, especialmente en zonas de alta pendiente o con curvas cerradas, a excepción de los tramos entre las

progresivas 4+250 – 6+250 (cerca de Santa Cruz de Mora) y 18+250 - 20+350, (próximo a la llegada a Tovar), donde presenta dos canales por circulación y una medianera.

## b) Pendientes

- **Perfil de elevación.** Las pendientes longitudinales del tramo en estudio fueron determinadas a través del perfil de elevación generado con la herramienta de análisis altimétrico de *Google Earth Pro* (ver Figura 14). Este enfoque fue adoptado ante la ausencia de un levantamiento topográfico reciente de la vía o de planos de proyecto, permitiendo la extracción de los datos altimétricos aproximados, necesarios para la evaluación geométrica de la carretera y sus parámetros de diseño vial (Cáceres, 2018).

**Figura 14.** Perfil de elevación



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software *Google Earth Pro* (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

- **Evaluación de las pendientes e incumplimiento normativo.** El trazado de la Troncal 007 se adapta al relieve de la zona, caracterizado por ser una región de montañas y valles intramontanos, por lo que, el tramo presenta pendientes pronunciadas y constantes en varios segmentos. La pendiente máxima es de 15% y se presenta entre las progresivas 11+250 y 11+500. Los tramos de progresivas 13+250-13+500, 15+500-15+750 y 17+000-17+250 presentan pendientes de 14%.

Estos valores contravienen las especificaciones técnicas para el diseño de carreteras, contenidas en la Normas para el Proyecto de Carreteras (MTC 1997), la cual establece un máximo del 12% para vías en terreno montañoso. Además, hay numerosos tramos con pendientes entre 7% y 10%. La Tabla 14.1 de la norma venezolana, a continuación, resume los valores de pendiente máxima permitidos y resalta el incumplimiento detectado.

**Tabla 10. Pendientes máximas**

Pendientes Máximas	
Terreno llano	De 2% a 3%
Terreno ondulado	De 3% a 7%
Terreno montañoso	De 7% a 12%

*Fuente: Normas para el Proyecto de Carreteras. MTC 1997*

### c) Radios de curvatura

Los radios de curvatura de las curvas horizontales fueron determinados mediante un proceso de digitalización cartográfica. Ante la ausencia de planos de proyecto o un levantamiento topográfico reciente, se procedió a digitalizar el eje de la vía directamente sobre la imagen satelital de *Google Earth Pro* (Mejía, 2023). Posteriormente, el trazado digital (polilínea) fue exportado en formato KML/KMZ a AutoCAD, donde se utilizaron las herramientas de geometría del software para cuantificar el valor (aproximado) de los radios de curvatura efectivos en cada segmento curvo, permitiendo la evaluación de la geometría horizontal conforme a la normativa vigente.

La vía posee radios de curvatura reducidos para ajustarse a la orografía. El tramo presenta radios de curvatura menores a los permitidos por la norma venezolana para este tipo de carretera y velocidad de diseño (40 km/h, tomada de la señalización de la vía). El mínimo radio de curvatura es de 33 m y se encuentra entre las progresivas 14+750 y 15+000, como se muestra en la Figura 15. Igualmente, hay un radio de curvatura de 35 m entre las progresivas 14+250 y 14+500 (ver Figura 15). Además, hay otros radios reducidos como 38 m, 45 m, 58 m, 61 m, 66 m y 68 m. Estas curvas cerradas, sumadas a las pendientes, son puntos críticos para la seguridad vial y hacen que la carretera sea más vulnerable a deslizamientos y a la pérdida de estabilidad. La Tabla 12.3 de las Normas para el Proyecto de Carreteras (MTC 1997), que se presenta a continuación resume los valores de radio mínimo permitidos y resalta el incumplimiento detectado.

**Tabla 11.** Relación velocidad-fricción-peralte-radio mínimo en carreteras

Relación velocidad-fricción-peralte-radio mínimo en carreteras.				
Velocidad de diseño (km/h)	factor de fricción	Peralte máximo (%)	i+f	Radio mínimo (m)
30	0.171	10	0.271	26
40	0.165	10	0.265	48
50	0.159	10	0.259	76
60	0.153	10	0.253	112
70	0.146	10	0.246	157
80	0.14	10	0.24	210
90	0.134	10	0.234	273
100	0.128	10	0.228	346
110	0.121	10	0.221	431
120	0.115	10	0.215	527

Fuente: Normas para el Proyecto de Carreteras (MTC 1997)

**Figura 15.** Curvas con radios menores a los permitidos entre progresivas 14+250 y 15+000

**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

#### 4.3.2 Obras de paso

A lo largo del recorrido, existen numerosas obras de paso para sortear quebradas y otros cauces de agua. Estas obras, en su mayoría cajones de paso, puentes de concreto armado y alcantarillas, son elementos críticos de la infraestructura, ya que su integridad depende del buen

estado de los sistemas de drenaje y de la estabilidad del terreno. Dos ejemplos de algunas de las obras de paso se muestran en la Figura 16.

**Figura 16.** *Cajón de paso y alcantarilla.*



#### 4.3.3 Condición operacional y deterioro de la infraestructura vial

El tramo de la carretera analizado se mantiene operativo y transitable, sin presentar elementos de peligro inminente que impidan la circulación, tales como fallas graves en puentes, fallas de borde o huecos de gran magnitud que comprometan totalmente la seguridad vial. Sin embargo, la infraestructura exhibe un deterioro generalizado cuya causa principal es la evidente falta de mantenimiento rutinario y preventivo.

- **Deterioro estructural del pavimento**

El estado del pavimento indica un agotamiento estructural por fatiga y falta de mantenimiento.

- **Fallas por fatiga:** Se observa la presencia recurrente de fallas tipo piel de cocodrilo y fisuras, señalando el límite de vida útil de la carpeta de rodamiento, como se observa en la Figura 17.

**Figura 17.** *Falla tipo piel de cocodrilo*



- **Pérdida de material:** En varios puntos se aprecian baches profundos (huecos) y parches que han fallado, resultado de una falta de intervención oportuna (ver Figura 18).
- **Deformaciones:** Se evidencian deformaciones y ondulaciones en la superficie (ver Figura 20), así como fallas en el pavimento en los accesos a puentes o cajones de paso (ver Figura 19), lo que sugiere problemas de asentamiento diferencial y escaso mantenimiento de las losas de transición.

**Figura 18.** *Bache profundo*



**Figura 19.** *Falla en acceso a cajón de paso*



**Figura 20.** *Deformaciones en el pavimento*



- **Drenaje y despeje de vía**

El sistema de drenaje longitudinal y la limpieza de la faja de dominio presentan serias deficiencias:

- **Obstrucción de drenajes:** Se constata la obstrucción severa de drenajes longitudinales (ver Figura 21) y transversales (ver Figuras 22, 23 y 24) por la acumulación de sedimentos, vegetación y desechos sólidos. Esta falta de despeje compromete la operatividad del sistema, facilita la infiltración de agua a la subrasante y acelera la degradación del pavimento.

**Figura 21.** *Obstrucción de cunetas*



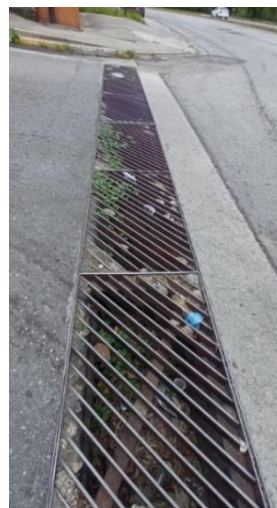
**Figura 22.** *Obstrucción de drenaje transversal*



**Figura 23.** *Obstrucción de drenaje transversal*



**Figura 24.** *Acumulación de desechos y vegetación en drenaje transversal*



- **Invasión de vegetación:** La vegetación alta invade el canal de circulación en tramos rurales, afectando la visibilidad en las curvas y el ancho efectivo de la vía (ver Figura 25).

**Figura 25.** *Invasión de vegetación en curva, generando pérdida de visibilidad*



- Señalización y seguridad vial

El estado de los dispositivos de seguridad es dispar. La señalización vial, demarcación horizontal y elementos urbanos se describen a continuación.

- **Señalización vertical:** Existe una buena cobertura de señalización vertical (preventiva, reglamentaria e informativa) en el tramo. No obstante, muchas señales muestran deterioro y falta de mantenimiento (ver Figuras 26 y 27).

**Figura 26. Señalización vertical**



**Figura 27. Señalización vertical**



- **Demarcación horizontal:** La seguridad nocturna está comprometida debido a la demarcación horizontal (pintura) borrosa o ausente y la pérdida de reflectantes (ojos de gato) en el pavimento, lo que dificulta la guía y canalización del tráfico (ver Figuras 28, 29 y 30).

**Figura 28.** Demarcación horizontal borrosa



**Figura 29.** Demarcación horizontal borrosa



**Figura 30.** Demarcación horizontal borrosa y pérdida de reflectantes



- **Elementos urbanos:** Los tramos urbanos cuentan con sistemas de semáforos (ver Figura 31) y postes de iluminación (ver Figura 32). Sin embargo, no se pudo verificar la funcionalidad o mantenimiento del sistema de alumbrado en algunos sectores

**Figura 31.** *Intersección semaforizada*



**Figura 32.** *Sistema de alumbrado apagado (izquierda) y encendido (derecha)*



#### **4.4 Análisis hidrológico-geomorfológico integral. Integración de teledetección y validación técnica en campo (Fase 4)**

La presente sección fundamenta el diagnóstico de riesgo mediante un análisis multitemporal comparativo, empleando sensores remotos y fotogrametría histórica para cuantificar la evolución de las amenazas que convergen sobre la carretera T007. Este enfoque permite documentar la transición de un escenario de riesgo latente en la década de los 90 hacia una condición de vulnerabilidad crítica en la actualidad, impulsada por la degradación de la cobertura vegetal, la expansión antrópica y la reactivación de procesos erosivos de gran escala.

El estudio revela una importante y preocupante memoria hidráulica en el sistema fluvial, donde el río Mocotíes ha retomado paleocauces y ensanchado su sección transversal (al igual que las quebradas afluentes), reduciendo los márgenes de seguridad en puntos específicos de 110 m a escasos 5 m de distancia horizontal respecto al terraplén vial. A través de la evaluación de casos críticos, desde la inestabilidad de laderas graníticas de 2.20 Ha en la cuenca de la quebrada Cacagüito hasta el ataque directo a estribos de puentes en las progresivas 5+500 y 17+000, se establece la base técnica para demostrar que la infraestructura actual se enfrenta a un régimen de energía hidráulica que supera sus capacidades de diseño originales, exigiendo una reingeniería de las protecciones marginales y los sistemas de drenaje transversal.

##### **4.4.1 Análisis descriptivo de microcuencas por teledetección**

El presente estudio se enfocó en la descripción técnica y geotécnica de las microcuencas seleccionadas que, por sus características morfológicas, geológicas y antrópicas, representan las fuentes de amenaza más significativas, tanto actuales como potenciales, para la estabilidad y operatividad de la infraestructura vial en estudio. Para este análisis inicial, se empleó la teledetección, utilizando imágenes satelitales de alta resolución obtenidas de las plataformas *ArcGIS Earth* y *Google Earth Pro*. La observación remota permitió evaluar las variables clave de inestabilidad, tales como la litología, los sistemas de fracturamiento, las pendientes, las evidencias de movimientos en masa (cicatrices y depósitos coluviales) y la influencia de la actividad agrícola. Es importante señalar que esta sección se limita a la caracterización de las microcuencas tributarias, por lo que la evaluación del comportamiento hidrológico y la dinámica morfosedimentaria del río Mocotíes será abordada en un apartado posterior de este capítulo.

Las cuencas objeto de estudio presentan una litología dominante y contrastante, caracterizada por la presencia de filita y granito.

La filita es una roca metamórfica foliada de bajo a medio grado (una gradación entre la pizarra y el esquisto), resultante del metamorfismo regional de rocas sedimentarias pelíticas (lutitas ricas en arcilla). Su textura está definida por una marcada esquistosidad y foliación, que es producto de la alineación preferencial de filosilicatos (cristales muy finos de moscovita y clorita).

Desde una perspectiva geotécnica, esta estructura confiere a la filita una baja resistencia intrínseca y marcada anisotropía. La foliación actúa como un sistema de planos de debilidad primario que controla su comportamiento mecánico, haciéndola altamente susceptible a la inestabilidad y al fallo geotécnico, especialmente el deslizamiento, planar o rotacional, particularmente cuando estos planos están orientados desfavorablemente respecto a la pendiente. Además, es muy propensa a la meteorización química avanzada, lo que conduce a su rápida descomposición en suelos residuales arcillosos de baja resistencia al corte cuando se saturan (Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], s.f.).

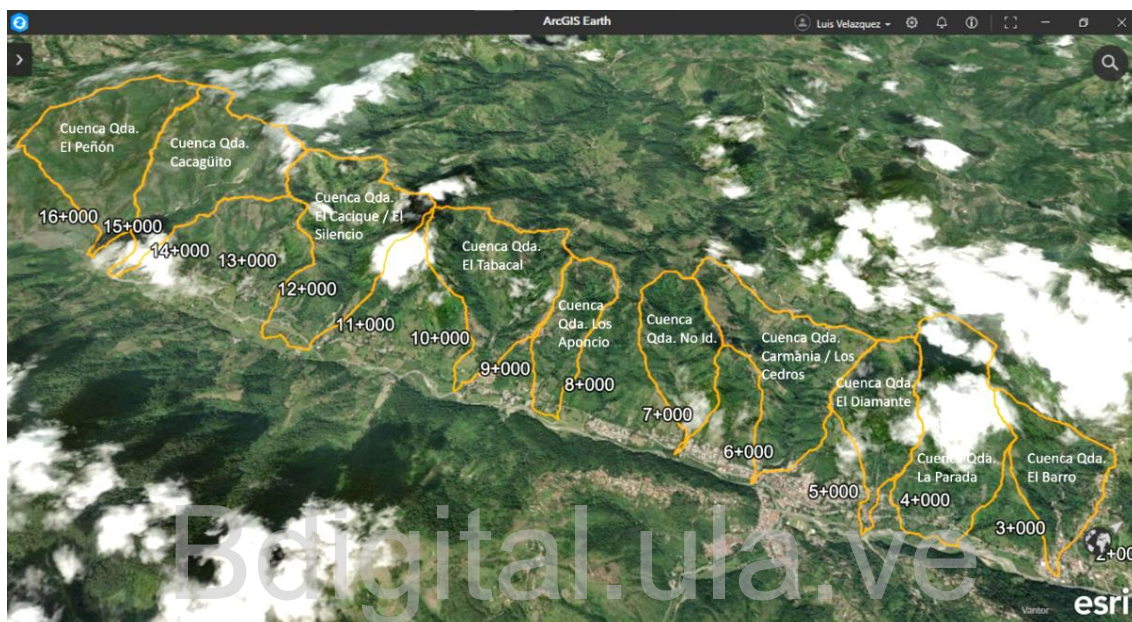
El granito es una roca ígnea plutónica de composición félsica y textura fanerítica, caracterizada por su alta cristalinidad y su composición esencial de cuarzo, feldespato y mica. En términos geotécnicos, la roca intacta de granito posee una alta resistencia a la compresión y una baja porosidad, confiriéndole una excelente competencia y durabilidad frente a la meteorización física y química.

Sin embargo, el comportamiento del macizo rocoso granítico, la masa de roca *in situ*, está gobernado por la presencia de discontinuidades secundarias como diaclasas y fallas, (Hoek y Bray, 1981). Un macizo granítico se vuelve inestable cuando se encuentra altamente fracturado, ya que estas discontinuidades, que actúan como planos de debilidad, reducen drásticamente la resistencia al corte de la masa rocosa por debajo de la resistencia de la roca intacta. La inestabilidad se manifiesta frecuentemente en fallos por cuña o caídas de bloques, siendo el grado de fracturación, la orientación de las discontinuidades y la presencia de agua los factores críticos que comprometen la estabilidad del talud o la fundación.

Para efectos de la presente sección, de las 10 microcuencas analizadas, mostradas en la Figura 33, se exponen a continuación los resultados detallados de las seis microcuencas con mayor representatividad técnica y variabilidad de riesgo geodinámico identificadas en el tramo de estudio. Esta selección responde a un criterio de jerarquización fundamentado en la singularidad de los procesos detectados mediante el modelo de teledetección propuesto, abarcando factores críticos como las litologías mixtas, las dinámicas de aporte granulométrico dual, la vulnerabilidad social masiva y asimetrías climáticas. Las seis microcuencas a desarrollar en esta sección son las correspondientes a las quebradas El Barro, El Diamante, No Identificada,

El Tabacal, El Cacique/El Silencio y Cacagüito. El inventario restante, correspondiente a las quebradas La Parada (Prg. 4+250), Carmania/Los Cedros (Prg. 5+500), Los Aponcio (Prg. 8+250) y El Peñón/San Rafael (Prg. 15+000), se ha integrado en el Anexo C debido a que presentan patrones de riesgo ya tipificados en los casos principales.

**Figura 33.** Microcuencas seleccionadas para el estudio



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

**a) Cuenca: Quebrada El Barro. Progresiva 2+250**

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.395190°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.647466°
- Descripción técnica de la microcuenca hidrográfica: La unidad de análisis corresponde a la microcuenca ubicada en la progresiva 2+250 de la vía (ver Figura 34). Este análisis se centra en el elevado riesgo hidrosedimentológico, evidenciado por el aporte masivo de material al cauce principal, y la vulnerabilidad social y de infraestructura concentrada en la zona de descarga.

**Figura 34.** Cuenca quebrada El Barro. Progresiva 2+250

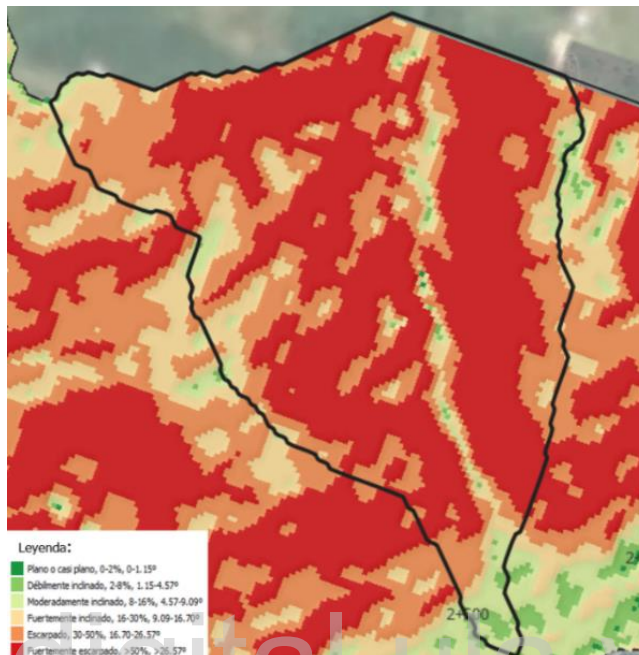


**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Características geológicas y estructurales: El marco geológico de la cuenca establece una alta susceptibilidad a la inestabilidad superficial y la generación de sedimentos.
  - Litoestructura: La litología dominante es filita, aunque también existe granito en la parte superior de la cuenca.
  - Geología estructural (discontinuidades): Se observan dos orientaciones predominantes de fracturas. La densidad de fracturas es similar en ambas orientaciones, lo que implica una fragmentación homogénea del macizo rocoso, facilitando la infiltración del agua.
- Meteorización y suelos: Ambas orientaciones presentan un relieve con bordes redondeados. Este es un fuerte indicativo de meteorización química intensa, la cual genera un suelo residual arcilloso. El suelo resultante tiene alta propensión a la falla por saturación, materializada por deslizamientos superficiales, y a la erosión laminar, a pesar de la densa cobertura vegetal.
- Geomorfología, pendientes y riesgo de inestabilidad: La morfología, marcada por pendientes y la alta actividad del cauce, define el riesgo hidrosedimentológico.
  - Morfometría y pendientes: La forma de la cuenca es relativamente irregular. La cuenca presenta fuertes pendientes (ver Figura 35), las cuales garantizan una alta

energía de escurrimiento y la capacidad de movilización de grandes volúmenes de detritos.

**Figura 35. Mapa de pendientes**



- Patrón de drenaje: La orientación de los drenajes tiende a ser paralela a angular, lo que sugiere un fuerte control estructural.
- Procesos de ladera y carga sólida: Se observan varios puntos con pérdida de vegetación, los cuales son cicatrices de deslizamientos recientes o incipientes, estos son la fuente principal de material que alimenta el cauce.
- Evidencia hidrosedimentológica: La sección del cauce del drenaje principal se observa ancha y se infiere que aporta una gran cantidad de material. Esto indica que la cuenca opera en un régimen de alta carga sedimentaria (flujos de detritos y escombros) con una capacidad erosiva y de transporte elevada.
- Riesgo a la vía: El material desprendido de las áreas inestables es transportado por el cauce torrencial, lo que supone una amenaza de obstrucción o daño estructural a la obra de paso de la vía.
- Vulnerabilidad crítica y factor antrópico: La vulnerabilidad se concentra en la zona de descarga, donde convergen el peligro natural y la ocupación humana.
  - Ocupación de zonas de riesgo (vulnerabilidad social): Se observa la presencia de viviendas emplazadas en el cono de deyección (la parte baja y más plana donde

el material se deposita). Esta ubicación es intrínsecamente de alto riesgo ante flujos de detritos y avenidas torrenciales.

- Actividad antrópica: La actividad agrícola es baja, y gran parte de la cuenca mantiene vegetación muy espesa, lo que ayuda a mitigar la erosión superficial.
- Vulnerabilidad de infraestructura: Una vialidad interna (el acceso a un puente) se observa en la parte baja de la cuenca, y su trazado coincide con la dirección del drenaje. Esta ubicación la hace un punto de extrema vulnerabilidad a la socavación y al impacto directo de flujos y detritos.

**b) Cuenca: Quebrada El Diamante. Progresiva 3+250 - 4+000**

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.408482°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.629279°
- Descripción técnica de la microcuenca hidrográfica: La unidad de análisis corresponde a la microcuenca ubicada entre las progresivas 3+250 y 4+000 de la vía, drenando en la zona cercana a Santa Cruz de Mora, como se observa en la Figura 36. Este análisis destaca la fragilidad estructural segmentada, la alta susceptibilidad del suelo y la amenaza de deslizamientos reactivables.

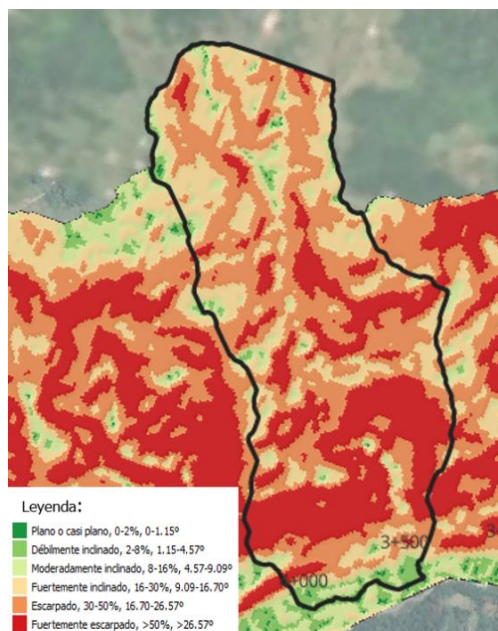
**Figura 36.** Cuenca: quebrada El Diamante Progresiva 3+250 - 4+000



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

- Características geológicas y estructurales: El marco geológico de la cuenca establece una condición de alta susceptibilidad a la inestabilidad y la meteorización.
  - Litoestructura: La litología dominante es filita, aunque también se observa granito en la parte superior de la cuenca.
  - Geología estructural (discontinuidades): El sistema de fracturamiento es segmentado a lo largo del eje longitudinal de la cuenca, y no hay una orientación predominante de mayor densidad. En la parte baja, se observa una orientación predominante de fracturas que se desarrolla en dirección paralela a la longitud de la cuenca. Esto crea una debilidad estructural a lo largo del cauce principal, aumentando el riesgo de socavación lateral e inestabilidad de los taludes del canal. En la parte alta se observan múltiples orientaciones, específicamente Noreste-Suroeste (NE-SO) y Noroeste-Sureste (NO-SE), lo que indica un macizo rocoso más complejo y fragmentado en la cabecera.
- Meteorización y suelos: La cuenca en general presenta un relieve con bordes redondeados y muy irregular. Este rasgo, junto con la litología de filita, es un indicativo de meteorización química avanzada. El suelo residual es de naturaleza arcillosa, siendo altamente propenso a la erosión laminar cuando se desprotege, y a la falla por saturación, generando deslizamientos superficiales.
- Geomorfología, pendientes y riesgo de inestabilidad: La cuenca combina la morfología elongada con fuertes pendientes y evidencias de procesos de remoción en masa.
  - Morfometría y pendientes: La cuenca es alargada. El relieve presenta fuertes pendientes en general (ver Figura 37). Estas condiciones imponen una alta energía al escurrimiento, lo que potencia la erosión y la velocidad de los movimientos en masa.

**Figura 37. Mapa de pendientes**



- Patrón de drenaje: La orientación de los drenajes tiende a ser paralela a angular, lo que está condicionado por la estructura de la filita. Sin embargo, la red de drenaje no es muy densa, lo que sugiere un drenaje más concentrado en el cauce principal y sus tributarios mayores, pudiendo generar altos picos de caudal durante eventos de lluvia.
- Procesos de ladera (inestabilidad histórica y reciente)
  - Inestabilidad histórica (coluviones). Se observan varios puntos de vegetación espesa que se ubican en lo que parecen ser zonas de depósito de material deslizado anteriormente (señalados en color blanco). Estos depósitos coluviales son inherentemente inestables y susceptibles a la reactivación al aumentar la carga o la presión de poros por saturación.
  - Inestabilidad reciente (deslizamiento). Se localiza una zona desprovista de vegetación en la parte baja de la cuenca, en el margen derecho de la quebrada. Esta cicatriz coincide con el punto de pendiente más fuerte y es una señal clara de un deslizamiento reciente que aportó material al cauce, incrementando el riesgo de obstrucción.
- Vulnerabilidad antrópica y procesos erosivos críticos: La actividad humana en la cuenca genera una amenaza continua de aporte de sedimentos finos.
  - Actividad agrícola (focos de riesgo): Se observa actividad agrícola en varios puntos. La deforestación por esta actividad expone el suelo arcilloso subyacente

a la acción de la precipitación, haciéndolo propenso a la erosión laminar, lo que genera una fuente constante de sedimentos finos hacia el sistema de drenaje.

- Cobertura vegetal: La cuenca tiene vegetación muy espesa en gran parte, lo que ayuda a anclar las laderas.

**c) Cuenca: Quebrada No identificada. Progresiva 6+500**

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.393510°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.651131°
- Descripción técnica de la microcuenca hidrográfica: La unidad de análisis corresponde a la microcuenca ubicada entre las progresivas 6+250 y 6+500 de la vía, como se muestra en la Figura 38. Esta cuenca se caracteriza por la litología de filita, una combinación de mayor densidad y longitud de fracturas en la orientación Suroeste-Noreste, fuertes pendientes y la vulnerabilidad crítica de viviendas ubicadas en la ladera, además del riesgo de aporte de detritos a la vía. Este análisis se centra en la alta vulnerabilidad social debido a la ocupación de zonas de riesgo, la inestabilidad geotécnica asociada a la filita y la amenaza erosiva que podría afectar la infraestructura vial.

**Figura 38.** Cuenca: quebrada No identificada. Progresiva 6+500

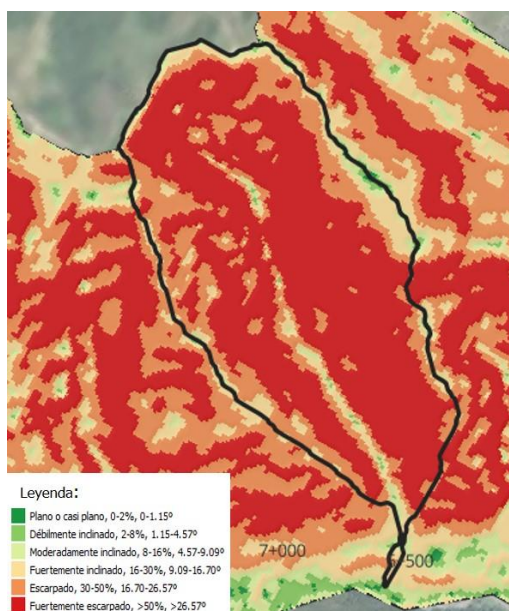


**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Características geológicas y estructurales: El comportamiento de la cuenca está fuertemente definido por la roca metamórfica y la geometría de su fracturamiento.
  - Litoestructura: La litología dominante en la cuenca es filita, aunque también se observa granito en la parte superior izquierda de la cuenca.
  - Geología estructural (discontinuidades). Se identifican dos orientaciones predominantes de fracturas.
 

Orientación Suroeste-Noreste (SO-NE): Este sistema combina la mayor densidad de fracturas con la mayor longitud de estas. Esta convergencia de características, mayor fragmentación y mayor continuidad, define el sector más estructuralmente frágil y propenso a la inestabilidad en la cuenca. Esta vertiente (SO-NE) presenta un relieve con más aristas, lo que, en contraste con el relieve redondeado de cuencas anteriores, podría indicar un menor grado de meteorización química o una mayor resistencia mecánica superficial, a pesar de la fragilidad estructural. El relieve redondeado en el sector opuesto y la geología de filita sugieren la presencia de suelos residuales arcillosos en la mayor parte de la cuenca, altamente susceptibles a la erosión.
- Geomorfología, pendientes y riesgo de inestabilidad: La morfología y los procesos activos definen un escenario de alto riesgo de transporte de sedimentos.
  - Pendientes. La cuenca presenta fuertes a muy fuertes pendientes, con valores generalizados mayores al 50% (ver Figura 39). Estas pendientes actúan como el principal motor de los procesos gravitacionales y la velocidad de la escorrentía.

**Figura 39.** Mapa de pendientes



- Patrón de drenaje. La orientación de los drenajes tiende a ser paralela a angular, lo que confirma un fuerte control estructural ejercido por los planos de debilidad de la filita y las fracturas, resultando en una rápida concentración del flujo.
- Procesos erosivos críticos

En la orientación SO-NE, la más frágil estructuralmente, se observa el inicio de una cárcava. Este punto marca una erosión concentrada activa que, de no controlarse, podría evolucionar rápidamente en las laderas.

- Riesgo a la vía. El material desprendido de esta incipiente cárcava es la fuente de detritos que será transportada por el cauce, constituyendo una amenaza directa de colmatación u obstrucción para la obra de paso de la vía.
- Vulnerabilidad social y factor antrópico

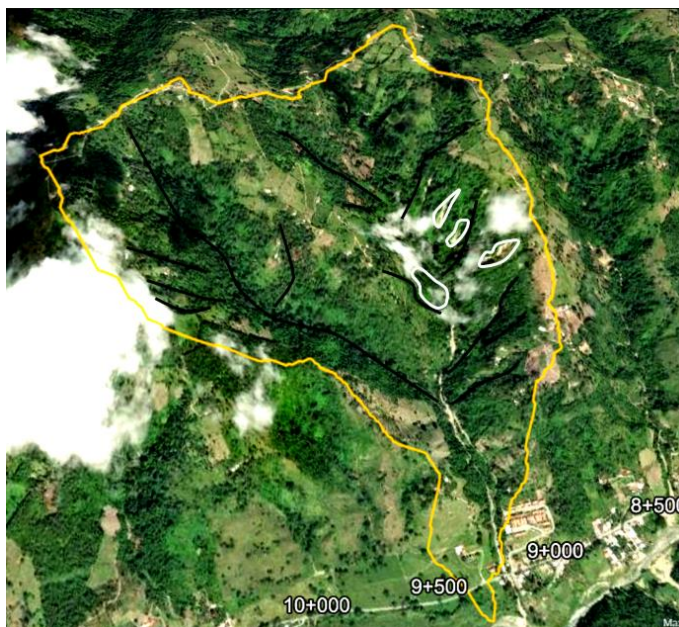
La ocupación del territorio introduce un componente de riesgo social crítico. El factor más crítico de esta cuenca es la presencia de una cantidad importante de viviendas ubicadas en las laderas de la quebrada, invadiendo lo que se considera zonas de riesgo por movimiento en masa, inundación o flujo de detritos.

- Actividad agrícola. La actividad agrícola es baja, probablemente restringida por las pendientes extremas.
- Cobertura vegetal. La vegetación es muy espesa en la parte alta, lo que confiere estabilidad a la cabecera, pero disminuye significativamente a partir de la zona media. Esta reducción de la masa boscosa en las laderas medias incrementa la exposición del suelo arcilloso a la erosión.

#### **d) Cuenca: Quebrada El Tabacal. Progresiva 9+000 - 9+250**

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.381244°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.671091°
- Descripción técnica de la microcuenca hidrográfica: La unidad de análisis corresponde a la microcuenca ubicada entre las progresivas 9+000 y 9+250 de la vía, drenando en el sector El Tabacal a través de la quebrada homónima (ver Figura 40). Este análisis se centra en la estabilidad geotécnica, la amenaza erosiva y el riesgo hidrosedimentológico sobre la infraestructura vial.

**Figura 40.** Cuenca: quebrada El Tabacal. Progresiva 9+000 – 9+250



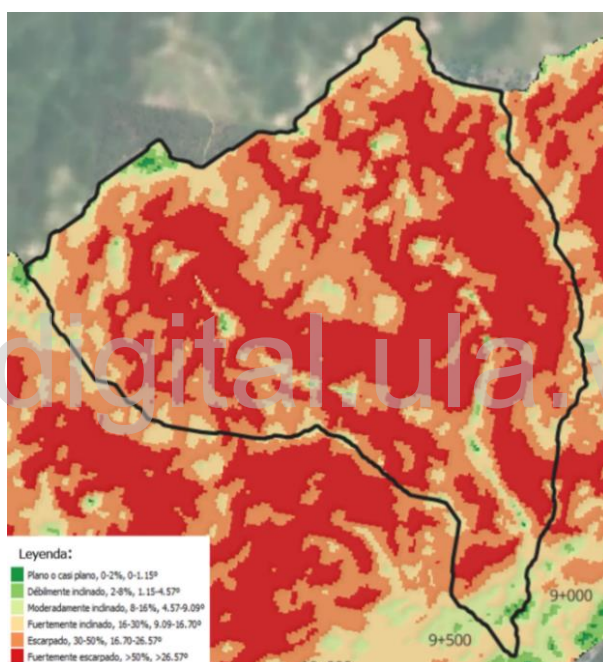
**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Características geológicas y estructurales: El comportamiento de la cuenca está influenciado por la combinación de dos litologías y un intenso fracturamiento.
  - Litoestructura: La litología dominante es una mezcla de filita en las partes inferior y media de la cuenca, y granito en la parte superior.
  - Geología estructural (discontinuidades). Se identifican dos sistemas de fracturas (diaclasas) que controlan la inestabilidad y el drenaje. La orientación suroeste-noreste (SO-NE) corresponde al sistema con mayor densidad de fracturamiento (más fracturas por unidad de área). Esta alta densidad crea una masa rocosa más fragmentada, favoreciendo la entrada de agua y, por ende, la meteorización y el inicio de procesos de remoción en masa. La orientación noroeste-sureste (NO-SE) corresponde al sistema de fracturas de mayor longitud y continuidad lateral. Esta continuidad permite la formación de bloques de roca de mayor tamaño y planos de falla extensos.
- Meteorización. El relieve redondeado en ambas orientaciones, combinado con la vegetación espesa, sugiere una alta intensidad de meteorización química. Este proceso resulta en la generación de suelos arcillosos, de baja permeabilidad y alta

plasticidad, los cuales son propensos a la erosión laminar al ser expuestos, y a la inestabilidad al saturarse.

- Geomorfología, pendientes y riesgo de inestabilidad: La morfología es crítica y favorece procesos rápidos de remoción en masa y erosión.
  - Pendientes. La cuenca presenta fuertes a extremadamente fuertes pendientes, con valores que oscilan entre 30% y 50%, superando el 50% en numerosas áreas, como se muestra en la Figura 41. Estas pendientes son la fuerza principal para la inestabilidad y la alta velocidad de escurrimiento.

**Figura 41.** Mapa de pendientes



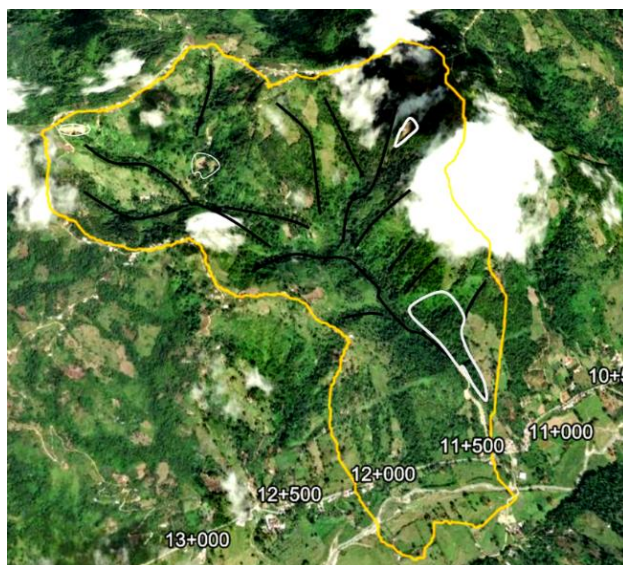
- Patrón de drenaje. La orientación de los drenajes tiende a ser subparalela a angular, lo que sugiere un fuerte control estructural ejercido por los dos sistemas de fracturas predominantes.
- Procesos erosivos críticos: En la zona (SO-NE) se localiza el desarrollo de tres cárcavas activas, (señaladas en color blanco, en la ladera). Estas estructuras son el resultado de la erosión concentrada que profundiza y ensancha rápidamente los canales, evidenciando una alta tasa de erosión. El material desprendido por la actividad de las cárcavas es la fuente primaria de la carga sólida que será transportada por la quebrada El Tabacal, con el potencial de afectar la obra de paso de la vía, ya sea por impacto directo, colmatación u obstrucción.

- Factor antrópico y cobertura vegetal: La cobertura vegetal es en general densa, pero la deforestación y el tipo de suelo crean focos de vulnerabilidad:
  - Cobertura vegetal y suelo: Ambas orientaciones presentan vegetación espesa, aunque la vertiente SE-NO muestra una cubierta más densa, lo que sugiere un mayor espesor de suelo en respuesta a la orientación de las masas de aire y la humedad.
  - Vulnerabilidad por arcilla. Dado que el suelo es intrínsecamente arcilloso, producto de la meteorización química avanzada, es altamente propenso a la erosión laminar cuando se remueve la cubierta vegetal.
  - Intervención antrópica. Aunque la actividad agrícola es baja, los puntos de intervención son estratégicos y críticos. En la cima de la montaña (parte central), hay presencia de actividad agrícola que interrumpe la protección natural en la zona de cabecera de la cuenca. En la parte baja de la cuenca, hay un área importante deforestada. Estos focos de deforestación en suelos arcillosos incrementan la escorrentía superficial y maximizan el riesgo de erosión laminar y flujos de detritos que alimentan las cárcavas y el cauce principal.

**e) Cuenca: Quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva 11+250**

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.371823°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.686710°
- Descripción técnica de la microcuenca hidrográfica: La unidad de análisis corresponde a la microcuenca ubicada entre las progresivas 11+250 y 12+000 de la vía, drenando en el sector Villa El Socorro a través de la quebrada El Cacique/El Silencio (ver Figura 42).

**Figura 42.** Cuenca: quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva 11+250 – 11+500



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Características geológicas y estructurales

Litoestructura: La litología dominante en la cuenca corresponde a filita, con presencia de granito en la parte superior izquierda de la cuenca.

Geología estructural (discontinuidades). La cuenca se caracteriza por una baja densidad de fracturamiento general, lo que indica que el control principal sobre la escorrentía y los procesos de inestabilidad podrían estar dominados por la foliación y no por el sistema de diaclasas.

- Control climático y edafológico (meteorización diferencial)

Se observa una clara asimetría geomorfológica en la cuenca, probablemente inducida por la interacción entre la orografía y la climatología (vientos alisios) en el Valle del Mocotíes.

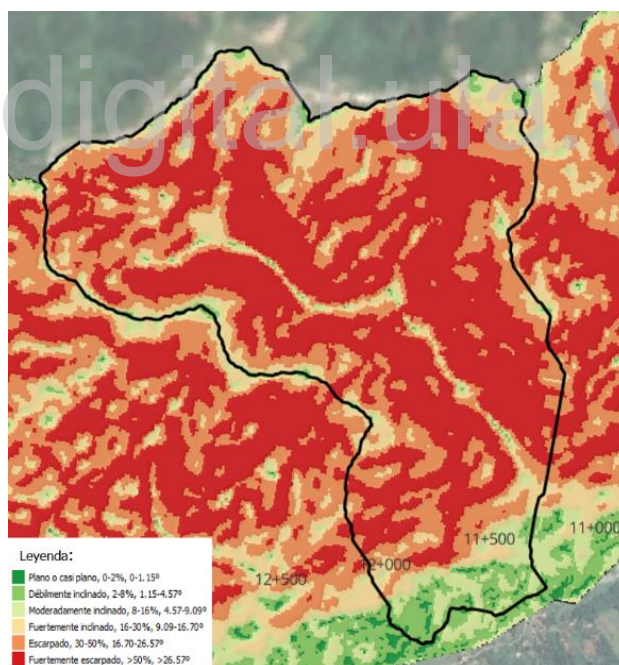
**Tabla 12.** Descripción de las características de la cuenca El Cacique/El Silencio

Sector	Orientación	Morfología del Relieve	Edafología y Meteorización	Implicación Antrópica
Suroeste-Noreste (SO-NE)	Sotavento (Inferencia)	Relieve angular (presencia de aristas y crestas).	Menor exposición a la precipitación. Roca menos meteorizada superficialmente. Suelo más delgado.	Baja aptitud agrícola.
Suroeste-Noreste (SO-NE)	Sotavento (Inferencia)	Relieve angular (presencia de aristas y crestas).	Menor exposición a la precipitación. Roca menos meteorizada superficialmente. Suelo más delgado.	Baja aptitud agrícola.

La alta precipitación en el sector Noroeste-Sureste ha generado un suelo arcilloso que, al ser expuesto por las actividades agrícolas, es altamente propenso a la erosión laminar y la erosión en surcos, aumentando significativamente la carga de sedimentos finos transportados.

- Patrón de drenaje. La red de drenaje principal y sus afluentes muestran una tendencia a un patrón subparalelo a angular. Esto sugiere que la pendiente es el principal factor de control del escurrimiento, aunque la estructura geológica (la foliación y las diaclasas) modula ligeramente la dirección del flujo.
- Pendientes. La cuenca presenta un alto grado de escarpamiento o energía del relieve. Las pendientes generales varían de 30% a 50% ( $17^\circ$  a  $27^\circ$ ). Se identifican numerosos sectores con pendientes superiores al 50% ( $>27^\circ$ ), clasificados como fuertemente escarpados, como se puede observar en la Figura 43. Esta condición se traduce en un tiempo de concentración hidráulica bajo y un alto potencial erosivo y torrencial, lo que resulta en hidrogramas de respuesta rápida y pico elevado durante las tormentas.

**Figura 43.** Mapa de pendientes



- Riesgo geomorfológico y proceso de Inestabilidad: El sector SO-NE presenta evidencias de un proceso de remoción en masa (deslizamiento) anterior, cuyo material depositado ahora constituye una fuente de sedimentos no consolidados (depósito coluvial) susceptible de ser reactivado y movilizado por el escurrimiento,

afectando potencialmente la obra de paso o la infraestructura vial. Esto configura un riesgo de inundación aluvial y afectación estructural.

**f) Cuenca: Quebrada Cacagüito. Progresiva 14+250**

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.358437°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.710785°
- Descripción técnica de la cuenca hidrográfica: La unidad de análisis descarga en la carretera a la altura de la progresiva 14+250, en el sector Cacagüito, cerca del núcleo poblacional de El Peñón, como se muestra en la Figura 44.

**Figura 44.** Cuenca: quebrada Cacagüito. Progresiva 14+250



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Características geológicas y estructurales: El comportamiento de la cuenca está regido por la litología y la geometría del fracturamiento.  
Litoestructura: La litología dominante en la cuenca es granito. Esto confiere un macizo rocoso con alta resistencia intrínseca, pero cuya estabilidad en masa y comportamiento hidrológico están supeditados a la densidad y orientación de las discontinuidades.  
Geología estructural y red de drenaje. Se identifican dos sistemas de diaclasas o juegos de fracturas predominantes, que controlan el desarrollo de la red de drenaje, con un patrón inferido subdendrítico. La densidad de las fracturas es similar en ambos sistemas.

La orientación Noroeste-Sureste (NO-SE) corresponde al sistema de fracturas de mayor longitud y continuidad lateral. Esta continuidad estructural favorece la inestabilidad en grandes bloques y planos de deslizamiento, siendo la orientación crítica para la estabilidad de la carretera debido a su alineación hacia la misma. La orientación y las fuertes pendientes (30% a 50%) de las laderas dirigen los procesos gravitacionales y el escurrimiento directamente a la infraestructura vial.

La orientación Suroeste-Noreste (SO-NE) corresponde al sistema de fracturas donde la densidad es similar al NO-SE, pero su menor longitud puede resultar en bloques más pequeños, aunque no se observa una diferencia notable en la angularidad o redondeamiento de las rocas. Este sector es la fuente principal de los materiales provenientes del deslizamiento activo.

- **Procesos geomórficos e hidrológicos:** La cuenca es un sistema activo que moviliza una carga de sedimentos dual. En cuanto a procesos de remoción y transporte, se observa la presencia de un deslizamiento de extensión importante y cárcavas activas, lo que implica una acumulación significativa de detritos y una alta tasa de erosión concentrada. La morfología de la cuenca canaliza estos detritos al cauce principal, infiriendo un régimen torrencial en el colector durante eventos de alta precipitación. En la microcuenca, existe una segmentación clara en la naturaleza de la carga sólida, como se muestra en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Características de la ladera, granulometría aportada e implicación al cauce

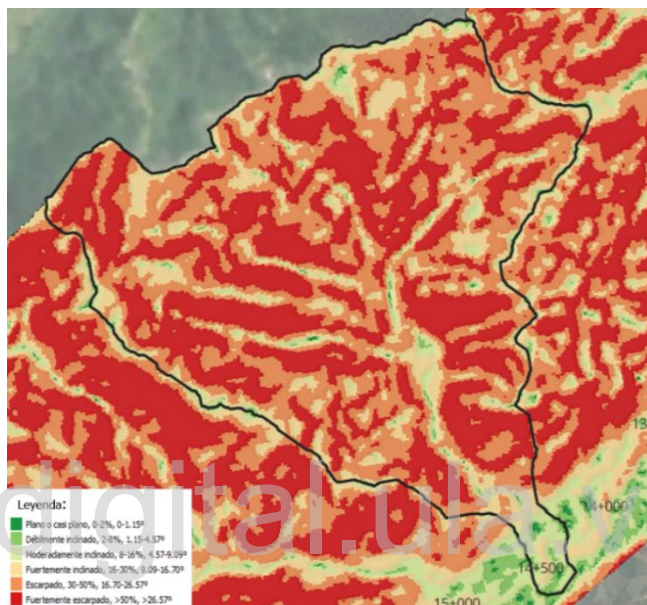
Sector	Características de la Ladera	Granulometría Aportada	Implicación Geotécnica
SO-NE	Deslizamiento activo, cárcavas, vegetación espesa.	Materiales Gruesos (bloques, gravas).	Aporte de escombros de deslizamiento; requiere contención de volumen.
NO-SE	Fuertes pendientes (30%-60%), agricultura, fracturas largas.	Materiales Finos (arena, limos).	Erosión superficial intensa; alto riesgo directo a la carretera.

- **Impacto antrópico y vulnerabilidad:** El uso del suelo en la vertiente más crítica exagera el riesgo geotécnico.

Actividad agrícola. El sector Noroeste-Sureste (NO-SE) es más propenso a desarrollar actividades agrícolas. Esta intervención antrópica degrada el espesor de los bosques y remueve la protección del suelo, intensificando los procesos de erosión laminar y en surcos.

- Vulnerabilidad a la carretera. El área que tiene mayor efecto sobre la estabilidad de la carretera es la correspondiente a la dirección NO-SE debido a la combinación de pendientes críticas, de 30% a 50% (ver Figura 45), orientación directa hacia la infraestructura y aporte de sedimentos finos por la degradación del bosque, lo que puede colmatar drenajes y socavar la calzada.

**Figura 45.** Mapa de pendientes



### g) Implicaciones de la singularidad para la mitigación

A pesar de la proximidad geográfica y la homogeneidad litológica de las cuencas estudiadas (granito o filita), el análisis detallado de las imágenes satelitales y fotografías aéreas, los parámetros geomorfológicos y estructurales, revela que cada unidad hidrográfica posee una singularidad geotécnica. Las variaciones en la densidad y orientación de las discontinuidades secundarias (fracturas), junto con las diferencias en la exposición climática y el grado de meteorización diferencial, resultan en mecanismos de fallo y riesgos distintos. Mientras una cuenca puede requerir mitigación por transporte de escombros de deslizamiento (materiales gruesos), la contigua puede exigir estrategias contra la erosión superficial intensa en suelos arcillosos. Por consiguiente, la planificación e implementación de medidas de mitigación y obras de ingeniería dirigidas a la protección de la vía deben diseñarse e implementarse de forma particular y específica para cada cuenca, desestimando soluciones generalizadas.

Para garantizar la transitabilidad y seguridad de la vía a largo plazo, se recomienda un cambio de enfoque hacia una gestión de riesgos integral y proactiva. Las acciones deben

priorizar el mantenimiento preventivo, a través de la implementación rigurosa y constante de un programa de limpieza de drenajes, sellado de fisuras y obras de protección de taludes. También se debe invertir en soluciones de ingeniería propuestas en este capítulo. Además, es importante desarrollar capacidades de monitoreo y alerta. Implementar un Sistema de Alerta Temprana que combine el monitoreo de precipitaciones e hidrología con una estrategia de comunicación efectiva para las autoridades y la población local. Por último, es necesario fortalecer la coordinación interinstitucional, asegurando que los planes de respuesta a desastres sean coordinados y eficientes entre los distintos niveles de gobierno y las comunidades, evitando la interrupción de la asistencia durante las emergencias.

#### **4.4.2 Diagnóstico en campo y evaluación de obras de drenaje**

La presente sección de este estudio se enfocó en validar *in situ* los problemas viales, tanto actuales como potenciales, previamente identificados a través del análisis de teledetección con imágenes satelitales. Para ello, se realizó una visita de campo donde también se realizó el diagnóstico funcional de las obras de drenaje transversal en los puntos críticos de la infraestructura vial. Esta fase de documentación permitió verificar y detallar el estado funcional de estas estructuras, registrando las evidencias de deterioro, como fallas estructurales, u obstrucción por acumulación de sedimentos o desechos, que impactan directamente en la estabilidad de la plataforma vial.

De las 10 unidades inspeccionadas, se han seleccionado cinco casos críticos que evidencian fallas estructurales por impacto, procesos de corrosión avanzada, insuficiencia por colmatación y daños colaterales a la carpeta asfáltica. Estos casos corresponden a las cuencas de las quebradas Carmania/Los Cedros, No identificada, El Tabacal, El Cacique/El Silencio y Cacagüito. Los diagnósticos de las quebradas Los Aponcio (Prg. 8+250), El Peñón (Prg. 15+000), La Jabonera (Prg. 17+750), Los Higueros (Prg. 18+000) y Quebrada Blanca (19+125) se incluyen en el anexo D, al representar condiciones que complementan la base de datos de la investigación, sin alterar los hallazgos críticos expuestos en esta sección.

##### **a) Quebrada Carmania/Los Cedros. Progresiva: 5+500**

La quebrada Carmania/Los Cedros, ubicada en la progresiva 5+500, drena una cuenca caracterizada por una composición litológica heterogénea. Predomina la matriz de filitas, que es la fuente principal de la carga de sedimentos finos. En el sector superior derecho de la cuenca, la presencia de afloramientos graníticos contribuye con clastos más gruesos y resistentes al lecho. En la parte baja, la quebrada ha generado un cono de deyección, sobre el cual se asienta

el sector Carmania. Este emplazamiento geomorfológico sobre material no consolidado confiere una vulnerabilidad intrínseca elevada al sector ante eventos de flujos de detritos y crecidas extraordinarias. Adicionalmente, la presencia de bambú en la margen izquierda sugiere una posible intervención previa de bioingeniería orientada a la estabilización de taludes y el control de la erosión lateral (ver Figura 46).

**Figura 46.** *Vegetación en el cauce y presencia de bambú en la margen izquierda*



La obra de drenaje transversal consiste en una alcantarilla tubular de concreto armado, con una sección circular de aproximadamente 3 m de diámetro, confinada por muros de concreto. A pesar de que la inspección visual no revela daños estructurales evidentes en la alcantarilla, se constata una acumulación significativa de material orgánico como ramas y hojas, además de desechos antrópicos en la entrada (ver Figura 47). Esta obstrucción es un factor crítico de riesgo hidráulico, ya que reduce la sección transversal útil y la capacidad de diseño de la alcantarilla. Bajo condiciones de picos de caudal, esta reducción puede conducir al represamiento, el desborde sobre la plataforma vial o la socavación en el terraplén.

**Figura 47.** *Alcantarilla en la quebrada Carmania/Los Cedros. Presencia de ramas y hojas en el lecho*



**b) Quebrada No identificada. Progresiva: 6+500**

En esta cuenca, la obra de paso es una alcantarilla. Tanto la entrada como la salida se encuentran cubiertas de vegetación y con una cantidad importante de desechos sólidos (ver Figuras 48 y 49). Se observa que la sección está obstruida. En las imágenes satelitales de varios años, se observa que la calzada suele tener presencia constante de agua, lo que puede explicar las grietas transversales que se observan en el pavimento (Figura 50).

**Figura 48. Entrada obstruida****Figura 49. Salida obstruida por vegetación y desechos sólidos****Figura 50. Agrietamiento en el pavimento**

**c) Quebrada El Tabacal. Progresiva: 9+000**

La quebrada El Tabacal, localizada en la progresiva 9+000, se distingue por un aporte significativo de material de granulometría fina, lo que sugiere la predominancia litológica de filitas en su cuenca de captación. La obra de drenaje transversal en este punto es un puente de concreto armado, lo que proporciona una sección libre superior a la de un cajón.

La quebrada presenta problemas críticos de dinámica fluvial y gestión de la vegetación. La obstrucción del flujo es notoria tanto aguas arriba como aguas abajo de la estructura, debido a la acumulación de material depositado y el crecimiento de vegetación densa.

El hallazgo más relevante es la migración lateral del cauce. Se ha constatado que el eje hidráulico del flujo se ha desplazado hacia el margen izquierdo (ver Figura 51), lo que genera una desalineación con respecto a la sección central del puente. A pesar de esta tendencia de desplazamiento, se observa simultáneamente erosión activa en el margen derecho de la quebrada, lo que indica una inestabilidad generalizada de las riberas. La vegetación aguas abajo del puente es abundante, como se muestra en la Figura 52.

**Figura 51.** *Eje hidráulico del flujo desplazado hacia el margen izquierdo*



**Figura 52.** *Vegetación aguas abajo del puente*



**d) Quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva: 11+250**

La quebrada El Cacique/El Silencio, ubicada en la progresiva 11+250, se caracteriza por una compleja composición litológica. Si bien la teledetección a través de imágenes satelitales fotografías y aéreas sugiere la predominancia de granito en las cotas superiores, la inspección de campo confirmó la presencia de filita, indicando una unidad geológica mixta en la cuenca de captación.

La obra de drenaje transversal en este punto es un cajón multicelda de tres secciones con aletas. A diferencia de otras quebradas, la sección inmediatamente aguas abajo del cajón presenta un lecho revestido y ausencia de acumulación significativa de material depositado (ver Figura 54).

Sin embargo, la estructura del cajón es incompatible con el régimen de transporte de carga gruesa de la quebrada. Los grandes bloques de roca movilizados por el flujo, característicos del material granítico, convierten los muros centrales o pilares en obstáculos críticos susceptibles a impacto. Esta vulnerabilidad se ha materializado en un fallo estructural evidente, documentado mediante el registro fotográfico que muestra un bloque de filita de gran tamaño que impactó directamente un pilar, como se observa en la Figura 53, comprometiendo su integridad estructural.

**Figura 53.** *Filita de gran tamaño golpeando el pilar central*



**Figura 54.** *Poca acumulación de material depositado aguas abajo del cajón*



**e) Quebrada Cacagüito. Progresiva: 14+250**

La quebrada Cacagüito, localizada en la progresiva 14+250, está dotada con una obra de drenaje transversal que consiste en un cajón multicelda de tres secciones con aletas, como se muestra en la Figura 55. Esta unidad hidrológica presenta un alto riesgo estructural e hidráulico debido a su régimen de transporte de carga gruesa (ver Figura 56), evidenciado por la presencia de grandes bloques de granito aguas arriba y aguas abajo de la estructura, además de material depositado en la entrada.

La configuración de celdas es inadecuada para la geomorfología de la cuenca, ya que los muros centrales o pilares actúan como puntos focales de impacto y obstrucción. Esta hipótesis se valida mediante la inspección de campo, que reveló la fractura del muro central con exposición y corrosión del acero de refuerzo, como se evidencia en la Figura 57.

**Figura 55.** *Cajón de 3 celdas. Bloques de gran tamaño*



**Figura 56.** *Vista aguas arriba del cajón. Bloques de granito de gran tamaño*



**Figura 57.** *Fractura del muro central con exposición y corrosión del acero de refuerzo*



**f) Limitación entre observación remota y manifestación geotécnica****Hundimiento de la calzada entre progresivas 14+250 y 14+500**

La inspección de campo evidenció una falla estructural crítica que no pudo ser identificada mediante el procesamiento y análisis de las imágenes satelitales disponibles. Se detectó un hundimiento localizado en la calzada entre las progresivas 14+250 y 14+500 (ver Figura 58).

Este fallo es indicativo de un colapso subsuperficial o de una pérdida de soporte geotécnico que, al momento de la captura satelital, no había generado una deformación superficial lo suficientemente extensa o una alteración en la vegetación colindante que se tradujera en un cambio detectable en la imagen de satélite. El problema se manifiesta en una curva saliente. Del lado interno, existe corte en material de terraza aluvial y relleno del lado externo. Del lado externo hay un talud de gran altura. Se presume la causa del hundimiento por realizar el relleno con material arenoso. Esto confirma que el monitoreo remoto debe ser complementado obligatoriamente con la verificación de campo para la detección temprana de anomalías estructurales incipientes de naturaleza subsuperficial.

**Figura 58.** *Hundimiento de calzada*



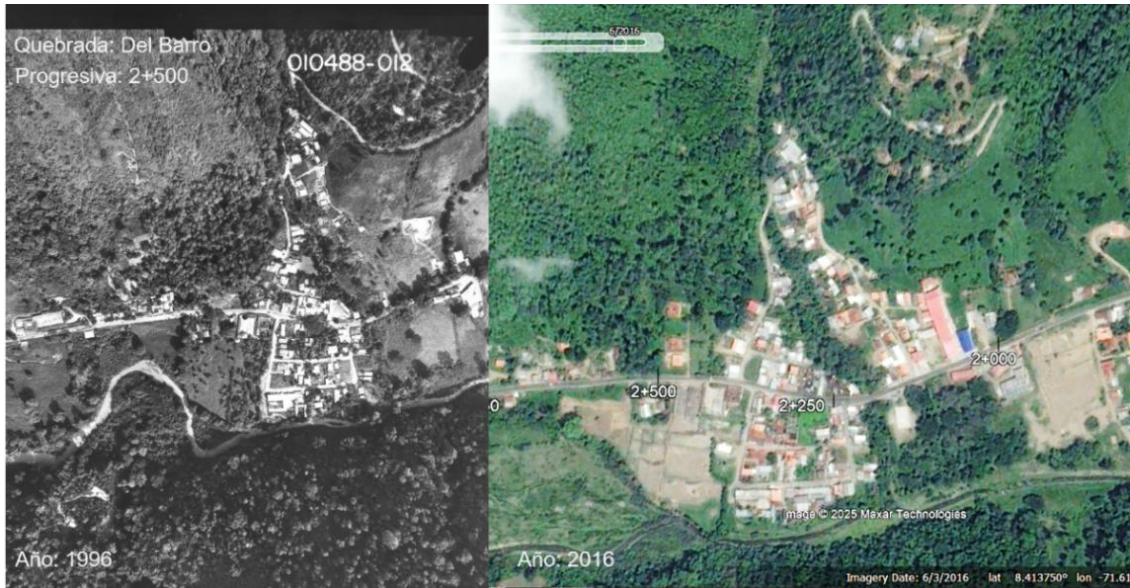
#### **4.4.3 Evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de las cuencas seleccionadas y su incidencia en la vulnerabilidad de la infraestructura vial, carretera T007, tramo La Victoria – Tovar**

La presente sección se fundamenta en un análisis multitemporal de las cuencas hidrográficas, empleando el procesamiento y la evaluación comparativa de imágenes satelitales y fotografías aéreas capturadas en diferentes años. Este enfoque metodológico permitirá describir y cuantificar la evolución de los patrones de drenaje, los cambios geomorfológicos y la dinámica de la cobertura vegetal, estableciendo las posibles implicaciones y la vulnerabilidad inducida sobre el tramo vial La Victoria – Tovar de la carretera Troncal 007. Cabe destacar que, debido a la similitud en los patrones de degradación observados, el análisis detallado de la quebrada El Cacique/El Silencio (Prg. 11+250) se presenta en el Anexo E, sirviendo como evidencia técnica complementaria de la inestabilidad geomorfológica y la dinámica de flujos de detritos que caracteriza a las unidades hidrológicas del sector.

##### **a) Quebrada El Barro. Progresiva 2+500**

La microcuenca de la quebrada El Barro (ver Figura 59) representa uno de los puntos de mayor complejidad en el diagnóstico de vulnerabilidad del tramo La Victoria – Tovar, debido a la convergencia de factores litológicos desfavorables y una presión antrópica sostenida. El emplazamiento de la infraestructura vial en la progresiva 2+500 se localiza sobre una zona de transición geomorfológica dominada por depósitos de pie de vertiente y el cono de deyección de la quebrada, lo que expone a la carretera a materiales cuaternarios de baja consolidación. A continuación, se presenta la evaluación multitemporal mediante el análisis de imágenes aéreas y satelitales (1996-2023), con el fin de documentar cómo la degradación de la cobertura vegetal y la expansión del asentamiento humano han transformado un riesgo geológico latente en una condición de vulnerabilidad crítica para la calzada.

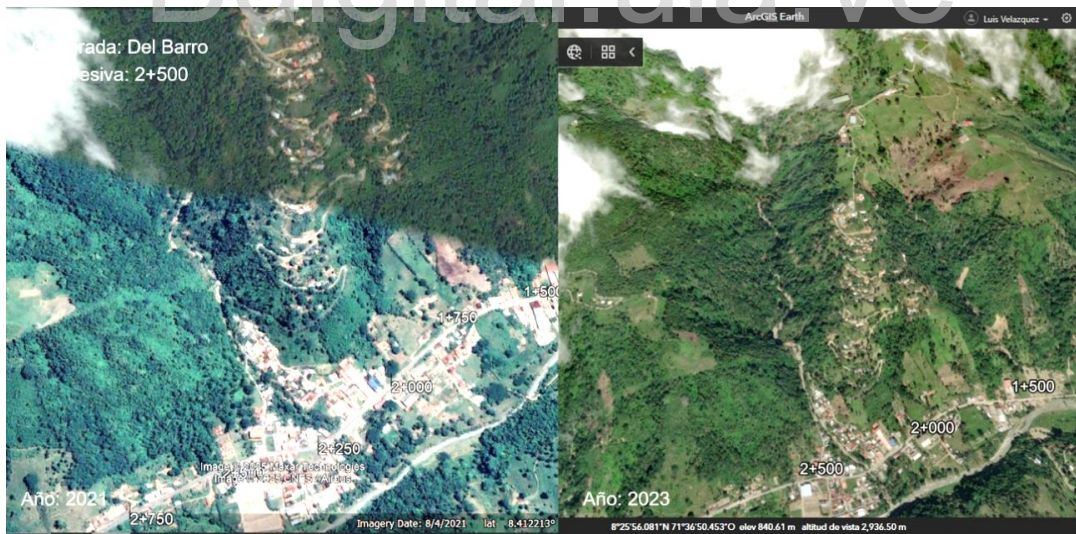
**Figura 59. Quebrada El Barro en 1996 y 2016**



Fuente: Protección Civil, estado Mérida.

**Nota.** Captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

**Figura 60. Quebrada El Barro en 2021 y 2023**



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

El análisis de imágenes multitemporales de 1996/2016, mostradas en la Figura 59, y de 2021/2023, mostradas en la Figura 60, documenta una progresión de riesgo sistémico en la cuenca, impulsada por la expansión urbana descontrolada sobre un entorno geológicamente

frágil. La litología de filitas y granitos meteorizados es el factor predisponente que amplifica los efectos de la intervención humana.

- **Análisis de la fotografía aérea de 1996:** En 1996, el asentamiento humano era menos denso que en las décadas posteriores. El área mostraba una mayor cobertura vegetal en las laderas, (compuesta por vegetación arbustiva con tendencia a vegetación dispersa) y márgenes de la quebrada, lo que confería una estabilidad superficial superior. El cauce de la quebrada parece más estrecho y con buena vegetación ribereña, sugiriendo un régimen fluvial menos agresivo en ese momento. Las laderas de la cuenca mostraban una cobertura forestal medianamente densa, indicando que la fuente de sedimentos y la escorrentía rápida aún estaban controladas. El riesgo en este período era principalmente latente, asociado al relieve y la litología.
- **Análisis de la imagen de junio de 2016:** Para 2016, el asentamiento ha crecido significativamente a lo largo de las márgenes de la quebrada, principalmente en la margen izquierda. La densidad de viviendas y su proximidad al cauce han aumentado notoriamente en comparación con 1996, reduciendo la zona de amortiguamiento fluvial. Las laderas de la cuenca se mantienen relativamente vegetadas, aunque se aprecian inicios de intervención o apertura de caminos, indicando una presión antrópica incipiente sobre la matriz forestal.
- **Análisis de la imagen de agosto de 2021:** El crecimiento del asentamiento continúa. Lo más crítico es la clara disminución de la cobertura vegetal en las laderas de la cuenca alta y media. La apertura de claros y caminos en zonas escarpadas evidencia una expansión acelerada de la actividad humana, posiblemente agrícola. El cauce de la quebrada, aunque aún está contenido en gran parte, comienza a mostrar ligeros signos de ensanchamiento en algunos tramos y una reducción de la vegetación ribereña, reflejando la mayor escorrentía y aporte de sedimento proveniente de las laderas ahora desprotegidas.
- **Análisis de la imagen de enero de 2023:** El periodo más reciente refleja una aceleración de la degradación. Las laderas muestran numerosas cicatrices de erosión concentrada y deslizamientos de tierra, evidentes por las grandes manchas de suelo expuesto de color marrón claro. Este fenómeno es una consecuencia directa de la pérdida de la cobertura forestal entre 2016 y 2021. El masivo aporte de sedimentos y detritos generado por estos movimientos en masa ha impactado al cauce,

aumentando su energía y su capacidad de arrastre. La densidad de viviendas en las márgenes y su cercanía al cauce convierten este asentamiento en una zona de vulnerabilidad extrema frente a flujos de detritos e inundaciones, con la probabilidad de socavación lateral a las fundaciones.

En resumen, el análisis multitemporal establece que el riesgo en esta área ha pasado de ser latente (1996) a crítico (2023). La expansión urbana descontrolada y la deforestación progresiva de las laderas son los agentes causales que han reactivado la geomorfología de la cuenca. La secuencia demuestra que el problema actual es el resultado de la negligencia en la planificación territorial que ha permitido la densificación de viviendas en una zona de fragilidad inherente y la simultánea desestabilización de la cuenca alta.

A pesar de que el puente principal de la quebrada El Barro no presenta vulnerabilidad crítica (ver Figura 61), la infraestructura vial en las proximidades del cruce (Prg. 2+500) se asienta parcialmente sobre depósitos de pie de vertiente y en la zona de influencia del cono de deyección. Este emplazamiento sobre material cuaternario no consolidado es susceptible a la saturación hídrica. Adicionalmente, el análisis estructural preliminar indica que en los cortes adyacentes la dirección del buzamiento de las filitas es desfavorable (dirección hacia la carretera). Esta combinación de fundación inestable (geomorfológica) y control estructural desfavorable implica que la vía es altamente vulnerable al deslizamiento rotacional o planar del terraplén y la socavación lateral por los procesos de crecidas/flujos de detritos provenientes de la cuenca.

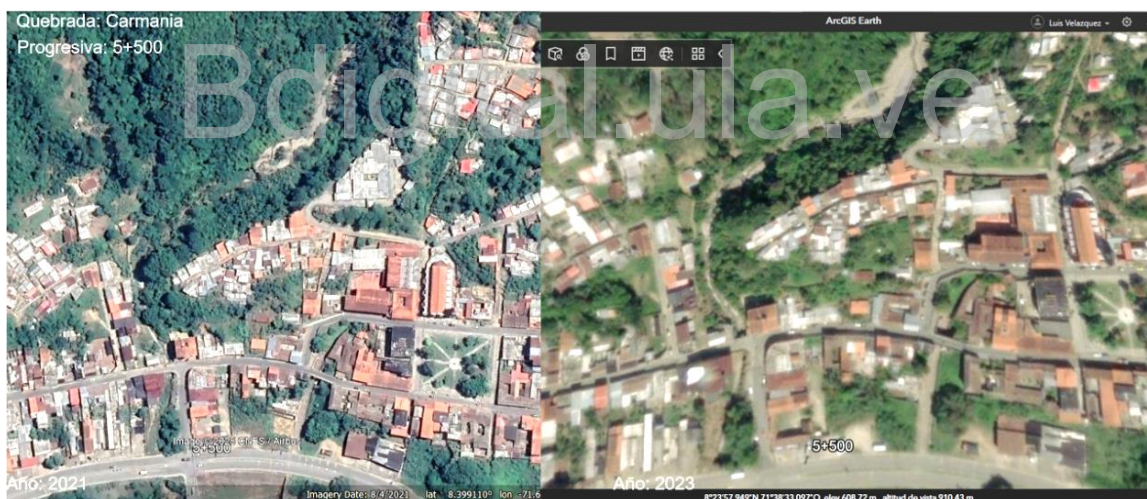
**Figura 61.** *Puente de concreto armado en quebrada El Barro*



### b) Quebrada Carmania/Los Cedros. Progresiva 5+500

La microcuenca de la Quebrada Carmania/Los Cedros constituye un punto crítico de vulnerabilidad operativa y estructural para la Troncal 007, debido a que la infraestructura vial se encuentra emplazada directamente sobre su cono de deyección en la progresiva 5+500. En este sector, la dinámica geomorfológica de la cuenca alta, dominada por una litología de filitas altamente erosionables, supera la estabilidad que teóricamente ofrece un buzamiento estructural favorable en los cortes adyacentes. El análisis multitemporal que se presenta a continuación (2021-2023) detalla la acelerada degradación de la sección fluvial, caracterizada por la pérdida drástica de vegetación ribereña y una ampliación del lecho activo. Esta secuencia evidencia cómo los eventos hidrológicos de alta energía han configurado un escenario de riesgo extremo, donde la socavación lateral y la saturación de los materiales no consolidados del cono de deyección amenazan tanto la estabilidad del asentamiento urbano de Santa Cruz de Mora como la integridad de la base del terraplén vial.

**Figura 62.** Quebrada Carmania/Los Cedros



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

Las imágenes satelitales comparativas mostradas en la Figura 62, con una diferencia de aproximadamente un año y medio, ilustran la creciente exposición y vulnerabilidad de un asentamiento urbano ante la dinámica de una quebrada activa. La litología de filitas en la cuenca, con su alta susceptibilidad a la erosión y al aporte de sedimentos, intensifica significativamente el riesgo asociado a la expansión urbana.

- **Análisis de la imagen de agosto de 2021 (izquierda):** En 2021, la sección del cauce de la quebrada visible en la parte inferior-derecha de la imagen mostraba un lecho activo, con depósitos aluviales de color claro. Sin embargo, aún conservaba una franja de vegetación ribereña relativamente densa y un cauce que, aunque dinámico, estaba más contenido por esta cobertura vegetal. La presencia de árboles y arbustos sugería una función de protección natural de las márgenes. Ya se observaba una alta densidad de viviendas en las márgenes y terrazas adyacentes a la quebrada. La urbanización se extendía de forma lineal siguiendo el curso del valle, lo que inherentemente ubicaba a una parte significativa del asentamiento en la zona de influencia de la quebrada. La infraestructura vial también se ubica en las inmediaciones.
- **Análisis de la imagen de enero de 2023 (derecha):** La comparación revela una significativa ampliación del lecho activo de la quebrada. La extensión de los depósitos aluviales y el ancho del cauce activo son visiblemente mayores que en 2021. De forma paralela, se ha producido una drástica pérdida de la vegetación ribereña que antes contribuía a la estabilidad de las márgenes. Esta deforestación natural (por erosión) o antrópica (por despeje) deja las laderas y las bases de las estructuras directamente expuestas a la acción erosiva y de socavación del agua. La proximidad de las viviendas a la quebrada se ha vuelto crítica. El avance del cauce y la desaparición de la vegetación protectora han dejado las estructuras residenciales directamente expuestas al riesgo de inundación, flujos de detritos y, especialmente, a la socavación de sus fundaciones por la erosión lateral. No solo las viviendas históricamente cercanas, sino también posibles nuevas construcciones o expansiones han aumentado la superficie expuesta.

El amplio lecho, el color claro de los sedimentos expuestos y la ausencia de vegetación ribereña son claros indicadores de que la quebrada ha experimentado eventos hidrológicos de muy alta energía, con un gran arrastre y deposición de sedimentos. Esto es consistente con la alta producción de detritos de las laderas de filitas en la cuenca alta.

Es notable que el periodo entre 2021 y 2023 ha acentuado drásticamente la vulnerabilidad de este asentamiento urbano en Santa Cruz de Mora. La expansión del lecho de la quebrada y la pérdida de su vegetación ribereña, junto con la densa y cercana ocupación de las márgenes, han configurado un escenario de riesgo extremo por fenómenos fluviales. Las viviendas se encuentran en una posición extremadamente precaria frente a posibles

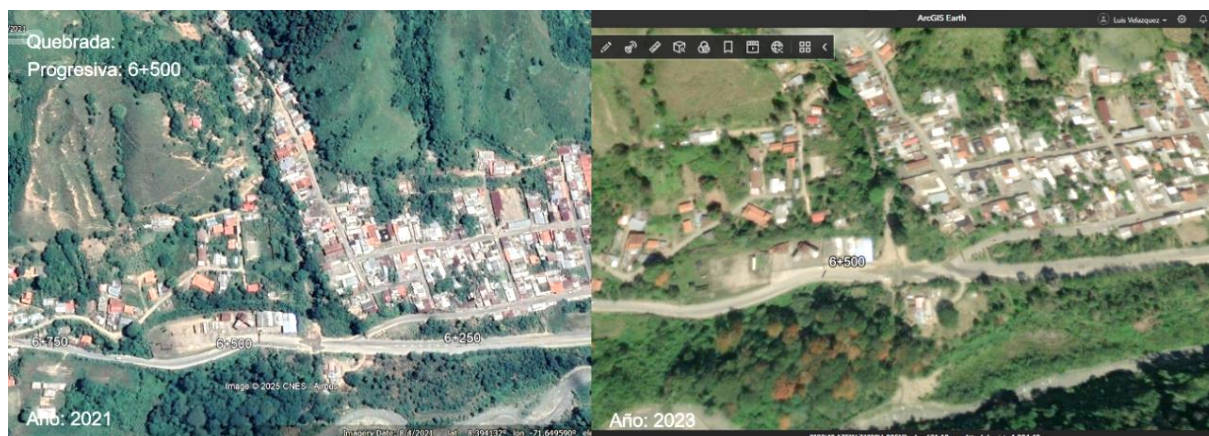
crecidas, flujos de detritos y la erosión lateral del cauce, situación que se ve exacerbada por la litología de filitas de la cuenca.

La infraestructura vial en la progresiva 5+500 se encuentra emplazada directamente sobre el cono de deyección de la quebrada Carmania/Los Cedros. A pesar de que la interpretación estructural indica que el buzamiento de las filitas es favorable (en contrapendiente) en los cortes adyacentes, esta condición estructural favorable es superada por la inestabilidad geomorfológica dominante. La fundación sobre material no consolidado del cono de deyección lo hace vulnerable a la socavación lateral por la migración del cauce y a la pérdida de capacidad portante por la saturación hídrica durante los flujos de detritos de alta energía. Por lo tanto, el riesgo principal para la vía en este punto es la erosión de la base del terraplén y el desbordamiento, que pueden causar daños funcionales y estructurales.

### **c) Quebrada No identificada. Progresiva 6+500**

La microcuenca de la quebrada No Identificada representa uno de los escenarios de riesgo más críticos y persistentes del tramo, debido a la interacción de un sistema de drenaje históricamente insuficiente con una ocupación urbana densa y vulnerable. La infraestructura vial en la progresiva 6+500 presenta una configuración geomorfológica compleja, al asentarse secuencialmente sobre una zona de contacto entre depósitos de pie de vertiente, terrazas aluviales y el cono de deyección de la quebrada. A continuación, se presenta un análisis comparativo que integra la perspectiva histórica de la fotografía aérea de 1996 con imágenes satelitales recientes (2021-2023). Esta secuencia documenta una problemática de anegamiento crónico en el pavimento y saturación de la subrasante, exacerbada por la litología de filitas y una alta movilidad del cauce que ha erosionado sistemáticamente la vegetación ribereña, comprometiendo la capacidad portante de las fundaciones tanto viales como residenciales.

**Figura 63.** Quebrada. Progresiva 6+500



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

Las imágenes satelitales mostradas en la Figura 63, con una diferencia de aproximadamente un año y medio (agosto de 2021 y enero de 2023), ilustran una situación de alto riesgo debido a la interacción directa entre una quebrada dinámica y una densa ocupación humana. La litología de filitas, altamente susceptible a la erosión y la generación de sedimentos, agrava la vulnerabilidad del entorno.

- **Análisis de la imagen de agosto de 2021 (izquierda):** El cauce de la quebrada es visible en la parte inferior de la imagen, mostrando ya cierta extensión de depósitos aluviales. Sin embargo, lo más destacable es la proximidad y la alta densidad de viviendas construidas directamente sobre las márgenes o muy cercanas a la zona de influencia de la quebrada. La vialidad interna de este asentamiento también discurre paralela a la quebrada.

Se observa claramente la presencia de agua sobre el pavimento de la carretera en varios puntos. Esto indica que, ya en 2021, existían problemas de drenaje superficial inadecuado en la infraestructura vial, o bien que la quebrada se desbordaba esporádicamente y el agua no era evacuada eficientemente, o incluso que había afloramientos de agua. Esta situación es una alerta temprana de riesgo de inundación y erosión vial.

- **Análisis de la imagen de enero de 2023 (derecha):** En 2023, la presencia de agua en el pavimento es incluso más notoria y extensa. La superficie brillante sobre la carretera y en áreas adyacentes sugiere un problema crónico y/o agravado de anegamiento e inundación. Esto puede deberse a la combinación de crecidas más frecuentes o intensas de la quebrada y un sistema de drenaje vial totalmente colapsado o inoperante.

La apariencia general en la parte inferior de la quebrada denota un cauce amplio y cargado de sedimentos, con una pérdida significativa de vegetación ribereña que antes podría haber ofrecido alguna protección. Esto implica que la quebrada ha tenido eventos de alta energía erosiva y deposicional, contribuyendo al riesgo de desborde. La gran cantidad de viviendas en las márgenes y en la zona de inundación potencial de la quebrada representa una vulnerabilidad extrema. La presencia de agua en el pavimento refuerza el escenario de que estas casas están en un área de alto riesgo por inundación directa, debido al agua de la quebrada o la escorrentía superficial no drenada, y por el arrastre de lodo, rocas y vegetación. Adicionalmente, la erosión lateral de la quebrada puede socavar directamente las bases de las estructuras de estas viviendas.

En resumen, el análisis comparativo revela una situación crítica de riesgo por inundación y movimientos en masa en esta área de Santa Cruz de Mora. La persistencia y agravamiento del anegamiento en el pavimento, combinada con la alta densidad de viviendas en las riberas expuestas y el comportamiento inestable de la quebrada, propio de la litología de filitas y gran aporte de sedimentos, configuran un escenario de vulnerabilidad extrema para la población y la infraestructura. La ausencia de un drenaje adecuado y medidas de protección ha permitido que la quebrada impacte directamente en el área urbanizada.

La infraestructura vial en la progresiva 6+500 presenta una vulnerabilidad geomorfológica compleja, ya que se asienta secuencialmente sobre la zona de contacto depósito de pie de vertiente-terracea aluvial, y el área de influencia del cono de deyección de la quebrada. La heterogeneidad de esta fundación de material cuaternario no consolidado, se combina con el problema crónico de anegamiento y drenaje superficial ineficiente. Esta condición genera una sobresaturación persistente de la subrasante, reduciendo drásticamente su capacidad portante y la resistencia al corte. El riesgo principal es la falla de la fundación del pavimento por fatiga hídrica y la socavación lateral del terraplén por el desborde de la quebrada.

- **Análisis de la fotografía aérea (1996) y problemática crónica**

La fotografía aérea de 1996 (ver Figura 64), que precede en décadas a las imágenes satelitales recientes, proporciona una perspectiva histórica sobre la vulnerabilidad del asentamiento y la dinámica de la quebrada. Al examinar el pavimento de la vía que atraviesa el asentamiento, se perciben áreas de tonalidad más oscura o irregular que, por su ubicación y extensión, son consistentes con la presencia de agua o un anegamiento superficial recurrente. Si esta observación es correcta, indica que el problema de drenaje superficial inadecuado o el afloramiento de agua es un fenómeno de larga data (más de 25 años), y no un evento asociado únicamente a las crecidas recientes. Esto sugiere que la capacidad de infiltración del suelo circundante es baja, causando una escorrentía rápida y/o que el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie, probablemente debido a la litología de filitas (que pueden formar barreras de drenaje internas) y la saturación de los suelos en la ladera.

**Figura 64.** *Fotografía aérea, quebrada No identificada, progresiva 6+500*



*Fuente: Protección Civil, estado Mérida.*

El diseño original del drenaje vial, consistente de cunetas y una alcantarilla, es históricamente insuficiente para manejar tanto la escorrentía superficial como el posible drenaje subsuperficial, convirtiendo el problema en un riesgo crónico para la seguridad vial y la estabilidad de las fundaciones.

La imagen de 1996 ya muestra una ocupación humana densa y establecida en las márgenes de la quebrada. Aunque la vegetación ribereña parece ser más abundante y robusta en comparación con las imágenes de 2021 y 2023, la proximidad de las viviendas al cauce activo confirma que el riesgo de inundación y socavación siempre ha sido intrínseco al desarrollo de este asentamiento. La invasión de la zona de servidumbre fluvial es evidente, lo que aumenta la vulnerabilidad ante cualquier variación en el régimen de la quebrada.

En la parte superior de la imagen se aprecian laderas escarpadas. Aunque la vegetación es densa, el relieve y la litología de filitas sugieren un riesgo latente de movimientos en masa, cuyo material tiene una vía directa de aporte hacia el cauce y, potencialmente, hacia el asentamiento y la carretera.

La evidencia histórica refuerza la necesidad de ver la inestabilidad de la quebrada como un problema de eventos recientes y como un riesgo geomorfológico y urbanístico crónico. Cualquier estrategia de mitigación debe abordar tanto el control de la dinámica fluvial y el aporte de sedimentos como la solución estructural y permanente del drenaje subsuperficial y superficial en el área urbana, cuyo fallo es una condición de larga data.

#### **d) Quebrada Los Aponcio. Progresiva 8+250**

La microcuenca de la Quebrada Los Aponcio destaca por una dinámica de riesgo integral, donde los procesos de inestabilidad en la cuenca alta impactan de forma directa y severa en la operatividad de la Troncal 007 a la altura de la progresiva 8+250. Geomorfológicamente, la infraestructura vial se asienta sobre depósitos de pie de vertiente. Estos materiales cuaternarios, al no estar consolidados, presentan una alta susceptibilidad a la saturación y a la socavación lateral por el ensanchamiento acelerado del cauce.

El análisis multitemporal (2021-2023) se presenta en dos fases críticas: la cuenca alta, donde la litología de filitas y granitos meteorizados, sumada a la presión antrópica, ha generado múltiples cicatrices de deslizamientos que actúan como fuentes masivas de sedimentos; y la cuenca baja, donde se evidencia un ensanchamiento extremo del lecho activo y la pérdida total de la vegetación ribereña. Esta secuencia documenta una situación de riesgo

inminente, donde la memoria hidráulica de la quebrada y su extraordinario aporte de detritos superan la estabilidad estructural de los cortes adyacentes, amenazando la integridad del terraplén y las estructuras hidráulicas de paso.

**Figura 65.** Quebrada Los Aponcio. Cuenca alta



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

### Cuenca alta

Las imágenes satelitales comparativas mostradas en la Figura 65, con una diferencia de aproximadamente un año y medio (agosto de 2021 y enero de 2023), evidencian una acentuada degradación de las laderas manifestada por la aparición y expansión de deslizamientos y una significativa pérdida de cobertura vegetal. La geología subyacente, con filitas, altamente meteorizables y susceptibles a movimientos en masa y granitos en la parte alta, que aportan suelos residuales erosionables, es un factor predisponente crítico para esta inestabilidad.

- **Análisis de la imagen de agosto de 2021 (izquierda):** En 2021, la cuenca presentaba una cobertura vegetal densa y relativamente continua, especialmente en las laderas más empinadas. Aunque las zonas altas mostraban algunas áreas de uso agrícola, la masa boscosa o de vegetación secundaria era predominante, lo que confería una estabilidad superficial importante. No se observan cicatrices de

deslizamientos de gran magnitud o zonas extensas de suelo expuesto que indiquen movimientos en masa recientes o activos. El relieve, aunque escarpado, parecía relativamente estable bajo la protección vegetal. El curso de la quebrada principal se mostraba bien integrado en el paisaje, con márgenes vegetadas y sin signos evidentes de una alta carga de sedimentos o erosión lateral masiva.

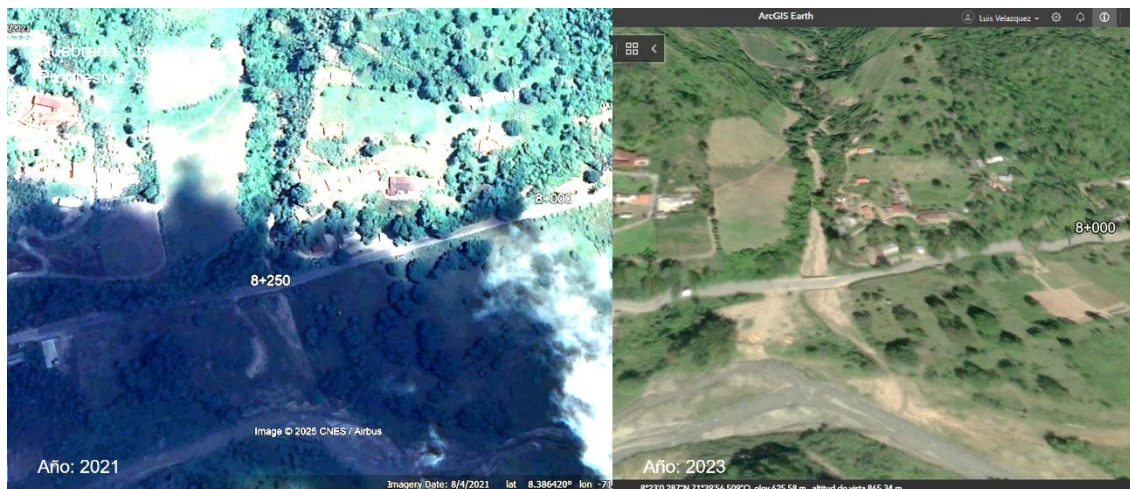
- **Análisis de la imagen de enero de 2023 (derecha):** La diferencia más notable es la clara aparición y expansión de múltiples cicatrices de deslizamientos de tierra en las laderas de la cuenca. Estas cicatrices, de color más claro debido al suelo expuesto y la ausencia de vegetación, son visibles en varios puntos, indicando que la estabilidad de la ladera se ha visto comprometida significativamente. Algunos de estos movimientos parecen ser deslizamientos superficiales o de detritos, que se originan en zonas de pendiente pronunciada. La degradación rápida es consistente con la litología de filitas, que se meteorizan fácilmente en suelos finos y plásticos, muy susceptibles a perder estabilidad al saturarse con agua.

Con los deslizamientos de origen antrópico, se ha producido una notable pérdida de vegetación. Las áreas afectadas por los movimientos en masa y las zonas adyacentes muestran una disminución de la cubierta arbórea y arbustiva, lo que agrava la susceptibilidad a futuros eventos erosivos. Cada uno de estos deslizamientos actúa como una fuente directa de aporte de sedimentos y detritos a la red de drenaje. Es altamente probable que el régimen de la quebrada se haya alterado, aumentando su carga sólida y su potencial de crecidas y flujos de detritos aguas abajo.

En síntesis, el periodo entre 2021 y 2023 ha sido testigo de una rápida desestabilización de las laderas de la cuenca, evidenciada por la proliferación de deslizamientos y la pérdida de vegetación. Este proceso convierte la cuenca en una zona de alta fragilidad geomorfológica, con una capacidad reducida para retener el suelo y el agua. El aumento del aporte de sedimentos de estos deslizamientos representa una amenaza crítica para el cauce de la quebrada, aumentando el riesgo de flujos de detritos y afectando las áreas vulnerables aguas abajo.

## Cuenca baja

**Figura 66.** Quebrada Los Aponcio. Cuenca baja



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

- **Análisis de la imagen de agosto de 2021 (izquierda):** En 2021, la quebrada presentaba un lecho con un ancho más limitado y relativamente bien definido. Aún se observaba una importante cobertura de vegetación ribereña a lo largo de sus márgenes, lo que sugiere una estabilidad relativa del cauce y una menor energía de arrastre en ese momento. Los depósitos aluviales eran visibles, pero estaban más confinados.
- **Análisis de la imagen de enero de 2023 (derecha):** La transformación más notable es el drástico y masivo ensanchamiento del lecho de la quebrada. La franja de material aluvial expuesto, compuesta por sedimentos de distinto tamaño, es ahora más extensa, cubriendo un área que antes estaba vegetada y más confinada. Esto es un claro indicio de la ocurrencia de eventos hidrológicos de alta magnitud y energía, capaces de generar una erosión lateral severa. Asociada al ensanchamiento, se observa una pérdida casi total de la vegetación ribereña que ofrecía protección en 2021. La acción erosiva del agua ha arrancado y arrastrado la vegetación, dejando las márgenes completamente expuestas y vulnerables a futuras socavaciones. El lecho de la quebrada está completamente saturado de sedimentos. El volumen de material visible es extraordinario, cubriendo vastas extensiones y formando barras aluviales extensas. Este gran aporte de sedimentos es el resultado de la intensa

erosión en las laderas y los deslizamientos y pérdida de vegetación de la cuenca alta, transportados por crecidas y flujos de detritos de gran escala.

La carretera y las edificaciones cercanas al cauce se encuentran en una situación de riesgo crítico. La ampliación del lecho y el gran volumen de sedimentos amenazan directamente la estabilidad del cajón de paso y las estructuras adyacentes, con un alto potencial de socavación, colmatación y destrucción por eventos futuros.

El breve lapso entre 2021 y 2023 ha provocado una alteración geomorfológica extrema en esta sección de la quebrada. La ampliación masiva de su lecho, la devastación de la vegetación ribereña y el importante aporte de sedimentos transforman esta área en una zona de riesgo inminente por inundaciones devastadoras y flujos de detritos de alta energía. La combinación de la litología susceptible a la erosión con eventos hidrológicos intensos y la ausencia de una cobertura vegetal protectora ha creado una situación de alta vulnerabilidad para la población y la infraestructura.

La infraestructura vial en la progresiva 8+250 está fundamentalmente asentada sobre depósitos de pie de vertiente, material cuaternario no consolidado que es altamente susceptible a la saturación. Aunque el buzamiento de las filitas subyacentes es favorable (en contrapendiente) en los cortes adyacentes, esta ventaja estructural no mitiga la inestabilidad geomorfológica dominante. La vulnerabilidad principal radica en la inestabilidad superficial del terraplén ante la sobresaturación y la socavación lateral masiva debido al ensanchamiento acelerado y la migración del cauce activo de la quebrada Los Aponcio. El riesgo se amplifica por el extraordinario aporte de sedimentos y detritos provenientes de las laderas desestabilizadas de la cuenca alta.

#### **e) Quebrada El Tabacal. Progresiva 9+000**

La microcuenca de la quebrada El Tabacal constituye un escenario de riesgo hidro-sedimentario crítico para la Troncal 007, debido a que la infraestructura vial en la progresiva 9+000 se localiza directamente sobre su cono de deyección. En este sector, la estabilidad estructural que ofrece un buzamiento favorable en los cortes de roca es neutralizada por una dinámica geomorfológica agresiva, caracterizada por la presencia de una geometría curva desfavorable en el cauce al aproximarse a los estribos del puente.

El análisis multitemporal (2021-2023) revela una transición alarmante en la cuenca alta, donde una inestabilidad inicialmente localizada en cárcavas activas evolucionó hacia una degradación generalizada tras la pérdida de cobertura forestal, multiplicando el aporte de sedimentos provenientes de granitos y filitas meteorizadas. Esta carga sólida se manifiesta en la cuenca baja a través de un ensanchamiento masivo del lecho y la devastación de la vegetación ribereña, configurando un escenario de vulnerabilidad extrema por colmatación y socavación lateral que amenaza la integridad funcional de la vía y los asentamientos adyacentes.

### Cuenca alta

Las imágenes satelitales comparativas mostradas en la Figura 67, con una diferencia de poco más de un año (2021 y enero de 2023), revelan una acelerada degradación ambiental y geomorfológica. La litología predominante de filitas, susceptible a la erosión y movimientos en masa, y la presencia de granitos en la parte alta, que se meteorizan en suelos gruesos erosionables, son factores predisponentes clave.

**Figura 67.** Quebrada El Tabacal. Cuenca alta



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

- **Análisis de la imagen del año 2021 (izquierda):** Contrario a una estabilidad completa, la imagen de 2021 muestra signos claros de inestabilidad concentrada. Específicamente, en las laderas se distingue la presencia de una cárcava activa. Este rasgo geomorfológico indica que el sistema de escorrentía superficial estaba

concentrado y actuando con alta energía erosiva en puntos específicos. Aunque el área general mantenía una mayor cobertura vegetal que en 2023, la cárcava visible confirmaba una vulnerabilidad preexistente de los suelos, que no podían resistir la energía de las precipitaciones concentradas. El resto del cauce de la quebrada principal se observaba más estrecho, pero ya estaba bajo amenaza por el material que esta cárcava inicial le aportaba.

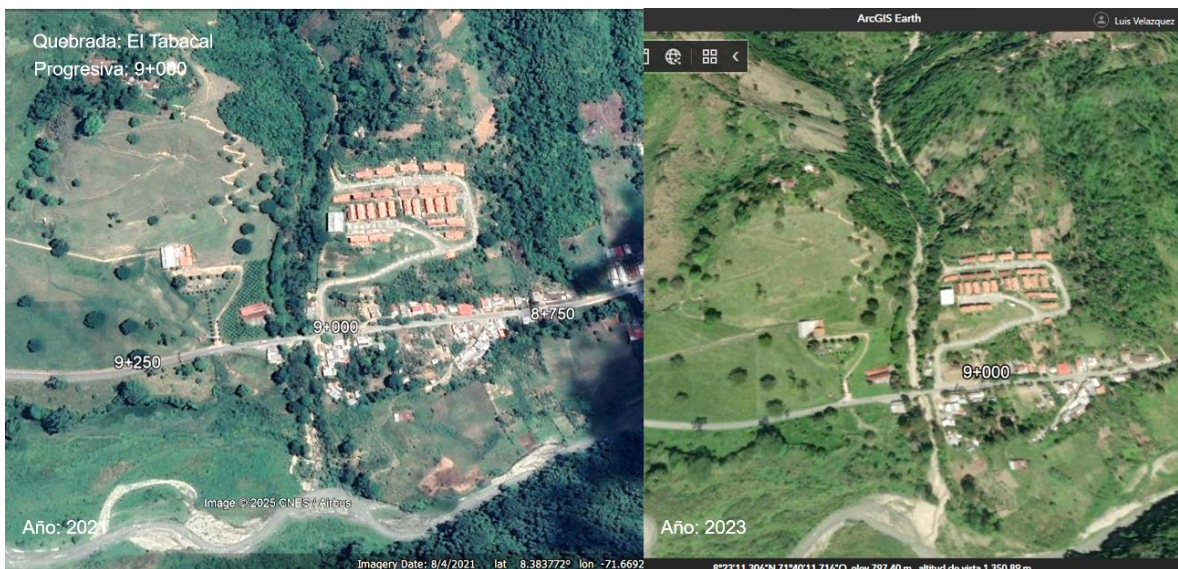
- **Análisis de la imagen de enero de 2023 (derecha):** La principal diferencia y catalizador de la degradación es la evidente deforestación en la parte alta y media de la cuenca. Esta remoción de la cubierta forestal reduce drásticamente la capacidad de interceptación del suelo. La deforestación actuó como un catalizador, provocando la expansión, profundización y multiplicación de las cárcavas. El fenómeno erosivo, que era localizado en 2021, se volvió generalizado en 2023. Las nuevas cárcavas canalizan el agua a gran velocidad, exponiendo y removiendo grandes volúmenes de suelo residual y filitas meteorizadas. El resultado directo de esta erosión acelerada es un incremento masivo y repentino en la carga de sedimentos que ingresan a la quebrada principal. Este aumento de material ensancha y obstruye el cauce, aumentando el riesgo de desborde y eleva el potencial de flujos de detritos, transformando las crecidas normales en eventos de alta peligrosidad.

La evidencia satelital documenta la acelerada evolución geomorfológica de la cuenca, marcada por la transición de una inestabilidad localizada, visible a través de una cárcava activa en 2021, a una degradación generalizada caracterizada por la deforestación y la proliferación de cárcavas en 2023. Esta secuencia demuestra la extrema fragilidad de la cuenca, y el consecuente incremento en el aporte de sedimentos a la quebrada requiere una intervención inmediata tanto en las laderas como en el cauce.

### **Cuenca baja**

Las imágenes satelitales comparativas mostradas en la Figura 68, con una diferencia de aproximadamente un año y medio (agosto de 2021 y enero de 2023), documentan una acelerada degradación del cauce caracterizada por su ampliación, desestabilización de márgenes y pérdida de vegetación ribereña. La litología predominante de filitas y la presencia de granitos en la parte alta de la cuenca son factores fundamentales que facilitan la erosión y el aporte masivo de sedimentos.

**Figura 68.** Quebrada El Tabacal. Cuenca baja



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

- **Análisis de la imagen de agosto de 2021 (izquierda):** En 2021, la quebrada presentaba un lecho con un ancho más limitado y una mayor proporción de vegetación ribereña visible a lo largo de sus márgenes. Aunque ya se apreciaban zonas de depósitos aluviales, de color claro, estas no ocupaban la totalidad del fondo del valle y la vegetación arbórea o arbustiva contribuía a la estabilidad superficial de las riberas. Ya existía una urbanización en la margen derecha, relativamente cercana al cauce, y la carretera Troncal 007, lo que ya indicaba una vulnerabilidad potencial.
- **Análisis de la imagen de enero de 2023 (derecha):** La transformación más evidente es el drástico ensanchamiento del lecho de la quebrada. La franja de material aluvial expuesto como arenas, gravas o detritos, es considerablemente mayor que en 2021. Esto sugiere la ocurrencia de eventos hidrológicos de alta energía, como crecidas o flujos de detritos, que han erosionado lateralmente las márgenes y han depositado una vasta cantidad de sedimentos. Con el ensanchamiento del lecho, se observa una pérdida casi total de la vegetación ribereña a lo largo de los tramos afectados. Esta vegetación es crucial para la estabilidad de las márgenes, ya que sus raíces actúan como un refuerzo natural contra la erosión fluvial. Su ausencia deja los suelos más expuestos a la acción erosiva del agua.

La proximidad de la urbanización y la carretera al nuevo ancho del cauce se ha convertido en una situación de alto riesgo para ambos. El avance de la erosión lateral amenaza directamente las fundaciones de las estructuras y la integridad de la vía, pudiendo llevar a la socavación del puente o la desestabilización de terraplenes.

El volumen de material visible en el cauce activo y en sus márgenes denota un significativo aumento en la carga de sedimentos transportada por la quebrada, lo que es coherente con la erosión activa en las laderas y la degradación en la parte alta de la cuenca.

Se observa que, un breve lapso entre 2021 y 2023 ha sido suficiente para que la quebrada experimente una acelerada inestabilidad morfológica, manifestada en la ampliación masiva de su lecho y la devastación de la vegetación ribereña. Este comportamiento, alimentado por la litología de filitas y granitos que aportan gran cantidad de sedimentos erosionables, convierte esta sección en una zona de riesgo extremo por inundaciones, flujos de detritos y socavación de infraestructura.

La infraestructura vial en la progresiva 9+000 se encuentra emplazada directamente sobre el cono de deyección de la quebrada El Tabacal. Aunque la dirección del buzamiento en los cortes es favorable (en contrapendiente) esta ventaja no es relevante frente a la inestabilidad geomorfológica que domina el área. La fundación sobre material no consolidado y su posición en la desembocadura de la quebrada la hace extremadamente vulnerable a la socavación localizada en los estribos debido a la geometría curva desfavorable del cauce, y a la colmatación masiva por el extraordinario volumen de sedimentos y detritos provenientes de las laderas erosionadas y la proliferación de cárcavas en la cuenca alta.

#### **f) Quebrada Cacagüito. Progresiva 14+250**

La microcuenca de la quebrada Cacagüito representa un punto de vulnerabilidad crítica por impacto de detritos y energía cinética fluvial en la progresiva 14+250. A diferencia de los tramos anteriores dominados por filitas, esta cuenca se asienta sobre una litología granítica que aporta suelos residuales erosionables y grandes bloques de roca, los cuales son movilizados por la fuerte pendiente longitudinal del cauce hacia el cono de deyección donde se emplaza la carretera.

El análisis multitemporal (2010-2023) documenta la evolución de un deslizamiento de ladera masivo de aproximadamente 2.20 Ha, que pasó de ser una inestabilidad incipiente a un evento geomorfológico de gran escala. Esta dinámica ha transformado el régimen hidrológico

de la cuenca, incrementando drásticamente la carga sólida y la energía específica del flujo. Como consecuencia, la infraestructura vial enfrenta un riesgo severo de colapso por el impacto de detritos contra el cajón de paso, que ya presenta daños estructurales visibles, y la inestabilidad del terraplén ante la saturación de los materiales coluviales-aluviales no consolidados.

**Figura 69.** Quebrada Cacagüito. Cuenca alta



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

Las imágenes satelitales (ver Figura 69), con una diferencia de 13 años (octubre de 2010 y agosto de 2023), revelan un proceso de deslizamiento de ladera que ha experimentado una notable activación y expansión a lo largo del tiempo. Dada la litología de granito en la cuenca, es probable que este deslizamiento sea de tipo flujo de detritos o un deslizamiento traslacional profundo que ha evolucionado hacia la superficie. La extensión del deslizamiento es aproximadamente 2.20 Ha.

- **Análisis de la imagen del 13 de octubre de 2010 (izquierda):** En 2010, el área presenta signos incipientes de inestabilidad. Se observa una cicatriz de deslizamiento relativamente pequeña, poco definida y de color claro, posiblemente suelos expuestos o vegetación escasa, localizada en la parte superior-media de la ladera, hacia el centro-izquierda de la imagen. Gran parte de la ladera está cubierta por vegetación arbórea,

indicando una relativa estabilidad generalizada en ese momento. El curso de la quebrada en el fondo del valle aparece con un lecho más estrecho y una menor evidencia de depósitos masivos de sedimento. No se observan grandes cicatrices de arranque o zonas de acumulación extensas, lo que sugiere que el proceso de remoción en masa era de menor magnitud o estaba en sus primeras etapas.

- **Análisis de la imagen del año 2023 (derecha):** La ladera muestra una transformación drástica. La cicatriz de deslizamiento inicial se ha expandido significativamente, tanto en anchura como en longitud, abarcando una gran extensión de la ladera. Se observa una clara zona de arranque en la parte superior-media, donde la vegetación ha sido completamente removida, exponiendo el material rocoso y/o suelos. Desde esta zona, se extiende un cuerpo de deslizamiento muy bien definido, de color claro que desciende por la pendiente. La ausencia de vegetación en la trayectoria del deslizamiento expone la superficie erosionada. El curso de la quebrada en el fondo del valle parece haberse ensanchado y presenta signos evidentes de haber recibido grandes volúmenes de sedimento y detritos provenientes del deslizamiento. Se observan depósitos de material aluvial y coluvial a lo largo de su cauce, lo que sugiere episodios de crecidas y arrastre de material. La cobertura boscosa de 2010 ha sido sustituida en gran parte de la ladera por áreas de suelo expuesto.

En resumen, las imágenes documentan la evolución progresiva del deslizamiento de ladera masivo en un entorno dominado por granitos, que pasó de ser una incipiente inestabilidad en 2010 a un evento geomorfológico de gran escala en 2023. La erosión, la remoción de la capa vegetal y la movilización de detritos han alterado drásticamente la topografía local y el régimen hidrológico de la cuenca. Este tipo de procesos en zonas graníticas son a menudo exacerbados por las fuertes precipitaciones, la alta fracturación de la roca y la pendiente, representando un riesgo significativo para cualquier infraestructura o asentamiento en las zonas bajas de la cuenca.

La infraestructura vial en la progresiva 14+250 se asienta sobre el cono de deyección de la quebrada Cacagüito, compuesto por material coluvial-aluvial derivado de la litología granítica de la cuenca. Este material, es a menudo grueso y altamente erosionable. La alineación rectilínea y la fuerte pendiente longitudinal del cauce en la proximidad de la carretera confieren una elevada energía específica al flujo, lo que resulta en un riesgo crítico de impacto de grandes bloques de roca y detritos contra el cajón de paso, el cual ya exhibe daños estructurales por impacto, como se muestra en la Figura 70. La

vulnerabilidad se centra en el colapso del cajón por impacto y la saturación hídrica del terraplén de acceso.

**Figura 70.** *Daños por impacto al pilar central*



**g) Quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva 15+000**

El sector correspondiente a la quebrada El Peñón/San Rafael representa un caso de estudio excepcional sobre la evolución de la infraestructura vial ante eventos hidrológicos extremos en la progresiva 15+000. La carretera se encuentra emplazada sobre el cono de deyección de la microcuenca, constituido por materiales coluviales-aluviales de origen granítico, cuya naturaleza no consolidada los hace altamente susceptibles a la erosión lateral y la inestabilidad superficial.

El análisis multitemporal integra registros desde 1952 hasta 2024, documentando una transformación crítica en la geometría del cauce. Mientras que la fotografía aérea de mediados del siglo XX muestra un trazado vial con un cauce rectilíneo y estable, los registros de 2010 evidencian una ampliación degradacional masiva aguas arriba, donde el terraplén de acceso funcionó involuntariamente como una presa de retención de sedimentos. A pesar de la recuperación vegetal observada en 2023 y la sustitución de la obra de drenaje original por una de mayor capacidad con aletas de entrada, persiste una vulnerabilidad estructural intrínseca por fatiga de materiales y riesgo de socavación lateral ante crecidas extraordinarias que podrían comprometer nuevamente la funcionalidad del acceso vial.

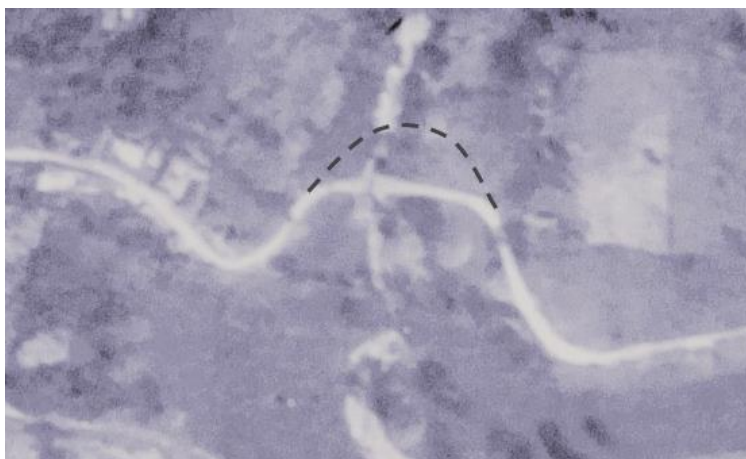
**Figura 71.** Quebrada El Peñón/San Rafael



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

El análisis multitemporal de la quebrada El Peñón/San Rafael, basado en registros históricos y satelitales, documenta la evolución geométrica del cauce y las intervenciones en la obra de drenaje transversal a lo largo de siete décadas. La fotografía aérea de 1952 (ver Figura 72) revela un diseño geométrico vial distinto al actual en los accesos, donde el cauce mostraba una tendencia rectilínea con una aparente alcantarilla instalada y sin evidencias de desbordes hídricos laterales aguas arriba. La imagen satelital de 2010, sin embargo, documenta una ampliación degradacional del cauce aguas arriba, resultado de un evento pluviométrico extraordinario. En este período se constata que el terraplén de acceso a la vía actuó como una presa de sedimentos, reteniendo el material de arrastre. Se verifica que la obra de drenaje original fue sustituida por una de mayor capacidad hidráulica, notándose la instalación de aletas en la boca de entrada. Posteriormente, la imagen de 2024 muestra un proceso de recuperación vegetal en el área afectada en 2010, sugiriendo una estabilización superficial posterior al evento crítico (ver Figura 71). A pesar de estas mejoras y la recuperación natural, el antecedente de retención de sedimentos y la tendencia a la erosión lateral persisten.

**Figura 72.** Fotografía aérea de 1952. Trazado vial para el momento y en la actualidad



**Nota.** Imagen obtenida de la colección privada de J. Carrero (2025). La línea punteada representa la propuesta de variante vial para el sector analizado.

La infraestructura vial en la progresiva 15+000 se encuentra emplazada sobre el cono de deyección de la quebrada El Peñón/San Rafael, cuyo material coluvial-aluvial deriva principalmente de la litología granítica de la cuenca. La vulnerabilidad principal radica en la inestabilidad histórica del cauce, evidenciada por la ampliación degradacional y la erosión lateral en eventos pasados, y la tendencia a la retención de sedimentos en el terraplén de acceso. En este punto, persiste el riesgo ante crecidas extraordinarias, donde el terraplén es susceptible a la socavación lateral y el desborde, comprometiendo la estabilidad y funcionalidad del acceso a la vía.

#### **4.4.4 Análisis multitemporal del comportamiento del río Mocotíes y su interferencia con la infraestructura vial**

El presente estudio se centra en el análisis multitemporal del comportamiento morfodinámico del río Mocotíes en el tramo comprendido entre las progresivas Prg. 0+000 y Prg. 20+350, con el objetivo primordial de evaluar el riesgo de erosión y socavación que la dinámica fluvial ejerce sobre la estabilidad de la plataforma vial. Utilizando las plataformas de geoinformación *ArcGIS Earth* y *Google Earth Pro*, se realizó una comparación de imágenes satelitales obtenidas en diversas fechas, detalladas en la Tabla 14, para identificar los procesos de migración lateral, la reactivación de paleocauces, el ensanchamiento del cauce y los puntos de interferencia estructural (puentes y terraplenes). La evaluación tramo por tramo ha permitido identificar las zonas de vulnerabilidad crítica y formular propuestas específicas de ingeniería hidráulica para la mitigación del riesgo.

Dada la extensión del área de estudio, el análisis morfodinámico se estructuró en sectores de control, subdividiendo los tramos extensos para identificar puntos críticos de intervención. De este inventario, se seleccionaron 14 casos representativos (distribuidos entre la Prg. 0+000 y la 20+350) que ilustran las diversas tipologías de amenaza: socavación basal, ataque a estribos y bifurcaciones por desborde. Por su parte, los sectores que presentan condiciones de estabilidad lateral o distancias de seguridad superiores a los 100 metros, correspondientes a los tramos Prg. 2+500, 3+500 - 4+250, 6+750 - 8+250, 9+000 - 10+750, 10+750 - 11+750 y 13+000 - 13+500, se detallan en el Anexo F, proporcionando una base de datos completa de la evolución del cauce del río Mocotíes y sirviendo como sustento técnico de la estabilidad relativa observada en dichas zonas.

**Tabla 14.** Base de datos georreferenciada utilizada

Plataforma	Progresiva	Fecha de la Imagen
ArcGIS Earth	Prg. 0+000 – 12+750	25-01-2023
	Prg. 12+750 – 15+190	22-08-2021
	Prg. 15+190 – 16+190	18-07-2012
	Prg. 16+190 – 20+350	22-08-2021
Google Earth Pro	Prg. 0+000 – 1+250	06-03-2016
	Prg. 1+250 – 6+850	08-04-2021
	Prg. 6+850 – 8+750	06-03-2016
	Prg. 8+750 – 12+880	08-04-2021
	Prg. 12+880 – 16+500	06-03-2016
	Prg. 16+500 – 17+500	09-04-2020
	Prg. 17+500 – 18+250	01-09-2022
	Prg. 18+250 – 20+350	01-04-2022

### a) Variación geométrica del cauce (Prg. 0+000 – 1+500)

Este tramo inicial del río Mocotíes presenta una inestabilidad morfodinámica crítica definida por la transición de un cauce confinado (2016) a uno de sección ampliada y erosión lateral acentuada (2023). El proceso dominante es la migración neta del eje fluvial hacia la Troncal 007, lo que ha provocado una reducción drástica de los márgenes de seguridad, especialmente en las progresivas 1+000 y 1+250. Esta proximidad extrema del cauce activo al pie de la plataforma vial compromete la estabilidad de la plataforma y sitúa a las áreas residenciales en una zona de riesgo hídrico inminente por socavación y pérdida de soporte lateral.

**Figura 73.** Variación geométrica del cauce

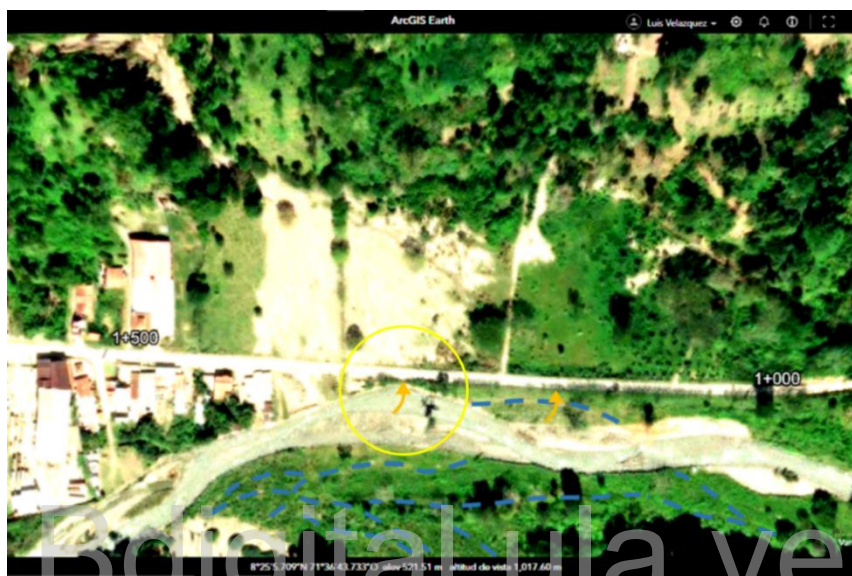


**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

Se evidencia una significativa modificación morfodinámica del río Mocotíes entre las fechas de las imágenes satelitales (06/03/2016 y 25/01/2023), manifestada principalmente como un proceso de erosión lateral y ampliación de la sección transversal (ver Figura 73). La imagen de 2016 exhibe una sección transversal de río más confinada, característica de un régimen de flujo posiblemente más estable o de menor energía erosiva. En contraste, la

imagen de 2023 muestra una sección considerablemente más ancha (aumento del área hidráulica), indicando una intensificación de los procesos erosivos laterales o un incremento en el caudal y energía de los eventos hidrológicos recientes. El paleocauce del río es visible en la imagen de 2023 (ver Figura 74), delimitando el curso anterior y la extensión de la migración del cauce.

**Figura 74.** *Paleocauces, erosión lateral e inestabilidad en ladera*



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- **Migración del cauce y reducción del borde de seguridad**

Prg. 0+750: El cauce ha experimentado una migración lateral neta hacia el eje de la carretera. La distancia horizontal mínima entre el talud del terraplén vial y el borde del cauce se redujo de aproximadamente 160 m (2016) a 115 m (2023).

Prg. 1+000: El riesgo de socavación y falla del talud es notablemente mayor en esta progresiva. La distancia de separación se redujo drásticamente de aproximadamente 105 m (2016) a tan solo 30 m (2023). Este punto representa un sector de vulnerabilidad crítica.

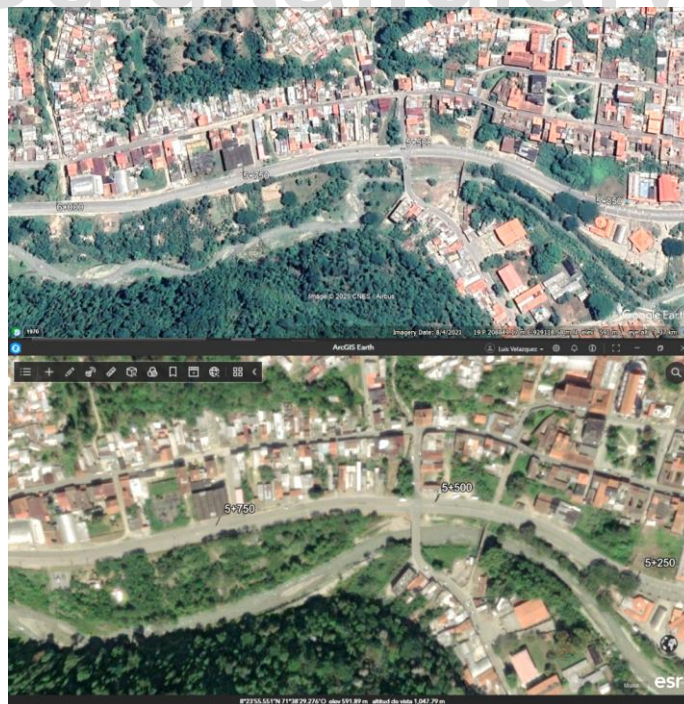
Prg. 1+250: Se registra la mayor reducción de la distancia de seguridad, pasando de aproximadamente 110 m en 2016 a un escaso margen de 5 m en 2023 (ver Figura 74). Esta proximidad extrema implica que el pie del talud del terraplén de la carretera está bajo ataque directo o inminente socavación lateral por parte del flujo fluvial, lo que compromete la estabilidad global de la plataforma vial.

La tendencia de acercamiento fluvial es sostenida hasta el Prg. 1+500 (evidenciado por la comparación de imágenes de 08/04/2021 y 25/01/2023). La invasión de la llanura de inundación por el cauce activo ha puesto a la infraestructura residencial adyacente a la vía en una zona de riesgo hídrico y geomorfológico inminente.

#### b) Riesgo hidráulico y estructural: tramo Prg. 5+250 – 5+500

El análisis morfodinámico entre las progresivas 5+250 y 5+500 revela una condición de peligro inminente por la pérdida de la alineación hidráulica del río Mocotíes respecto a las obras de paso (ver Figura 75). La transición entre 2021 y 2023 evidencia una reducción del 56% en el margen de seguridad del eje vial y la remoción total de la vegetación riparia protectora, dejando el material no consolidado bajo ataque erosivo directo. En la progresiva 5+500, la modificación del eje de flujo ha sustituido la aproximación rectilínea original por una trayectoria que concentra la energía cinética directamente contra el estribo izquierdo del puente y la pasarela peatonal. Esta reconfiguración del cauce activo genera un escenario de socavación local crítica que compromete la integridad de las fundaciones y la estabilidad global de la infraestructura de conectividad en este sector.

**Figura 75.** Riesgo hidráulico y estructural



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

El análisis del segmento de río Mocotíes entre las progresivas Prg. 5+250 y 5+500 muestra una intensificación del ataque lateral y una modificación en la alineación del flujo que compromete directamente la estabilidad de la plataforma vial, el estribo del puente en Prg. 5+500, y la pasarela peatonal adyacente (ver Figura 75).

- **Impacto en la plataforma vial (Prg. 5+250 – 5+500)**

A pesar de que el cauce se mantiene cercano en ambas fechas, se registra una disminución significativa de la distancia de seguridad. La separación entre el borde del río y el pie del terraplén de la carretera se ha reducido de aproximadamente 23 m (2021) a un crítico 10 m (2023). Esta proximidad sitúa el talud vial dentro de la zona de influencia erosiva directa del río.

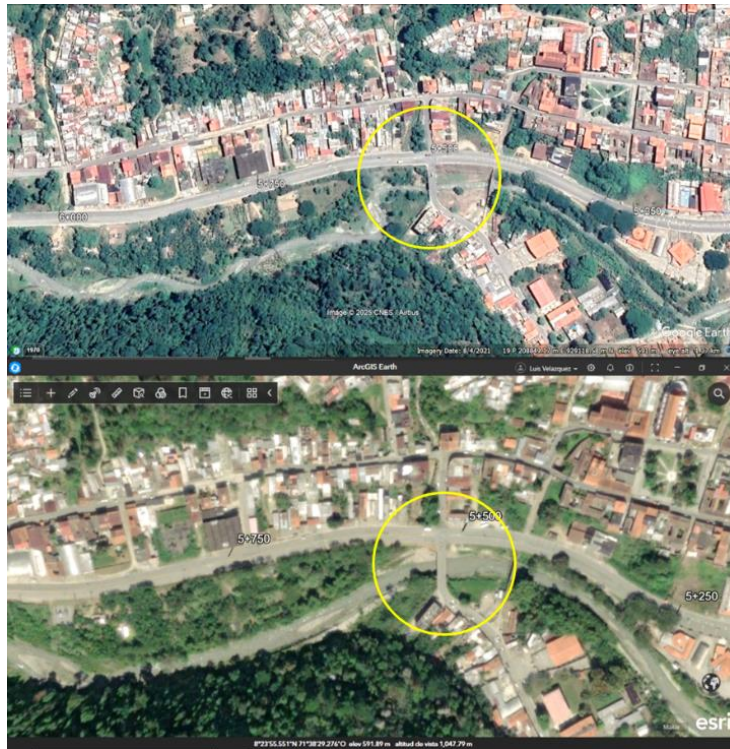
La evidencia satelital de 2023 muestra la eliminación de la abundante vegetación riparia que servía de protección natural en 2021. La remoción de esta cubierta es el resultado de la erosión lateral acelerada y expone el material no consolidado del terraplén a la socavación fluvial, acelerando el riesgo de falla.

- **Amenaza a la infraestructura del puente (Prg. 5+500)**

En la progresiva 5+500, la modificación morfodinámica representa un riesgo estructural para el puente que conecta con el sector Puerto Rico.

En 2021, el flujo del río Mocotíes presentaba una alineación recta y centrada respecto a la luz del puente, minimizando el impacto sobre los estribos. La imagen de 2023, sin embargo, documenta un cambio de dirección del flujo hacia el margen cercano a la carretera. Este cambio en la aproximación del flujo concentra la energía cinética del agua directamente contra el estribo izquierdo (el más cercano a la carretera), como se observa en la Figura 76. Este fenómeno genera un alto riesgo de socavación local en la base del estribo, que, de no mitigarse, puede comprometer la capacidad portante y la estabilidad estructural de la fundación del puente. La huella de aproximación del río también pone en riesgo la pasarela peatonal adyacente, la cual puede sufrir daños por erosión o ser desestabilizada por la fuerza de arrastre durante caudales máximos.

**Figura 76.** Amenaza a la infraestructura del puente



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

**Figura 77.** Paleocauces y riesgo de erosión lateral



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

### c) Dinámica fluvial reciente y medida preventiva: Tramo Prg. 6+000 – 6+250

El análisis morfodinámico en el sector de las progresivas 6+000 a 6+250 revela un comportamiento fluvial oscilante, caracterizado por procesos alternos de acreción y migración lateral que condicionan la estabilidad del terraplén vial. Aunque los registros muestran períodos de alejamiento del cauce por acumulación de sedimentos, la evidencia más reciente en la progresiva 6+000 confirma un retorno del eje de máxima energía hacia el pie de la carretera.

Esta aproximación activa, identificada mediante la huella de paleocauces y la erosión de márgenes, sitúa la plataforma vial bajo una amenaza de socavación focalizada. La inestabilidad direccional del flujo en este tramo justifica la implementación inmediata de medidas preventivas de canalización y protección marginal, con el fin de estabilizar la trayectoria fluvial y mitigar el riesgo de falla estructural por la pérdida de soporte lateral en el terraplén.

**Figura 78.** *Aproximación activa del río Mocotíes*



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

El análisis del tramo comprendido entre las progresivas Prg. 6+000 y 6+250, muestra una dinámica de cauce que oscila entre el alejamiento y el retorno, culminando en una aproximación activa que justifica una intervención de mantenimiento preventivo.

Inicialmente, se observó un alejamiento del cauce de la carretera entre las Prg. 6+000 y 6+250 en la comparación de imágenes de 2021 y 2023 (evidencia en la imagen inferior). Esta tendencia pudo deberse a procesos de acreción (acumulación de sedimentos) en la margen cercana a la vía o un cambio momentáneo en la trayectoria del flujo.

A pesar del alejamiento inicial, la situación más reciente documentada muestra un retorno y acercamiento focalizado del río hacia la carretera específicamente en la progresiva 6+000. Esta huella fluvial activa se acerca de manera riesgosa a la plataforma vial, indicando que el eje de máxima energía del flujo está migrando nuevamente hacia el pie del terraplén (ver Figura 78).

**Figura 79. Paleocauces**



*Nota. Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)*

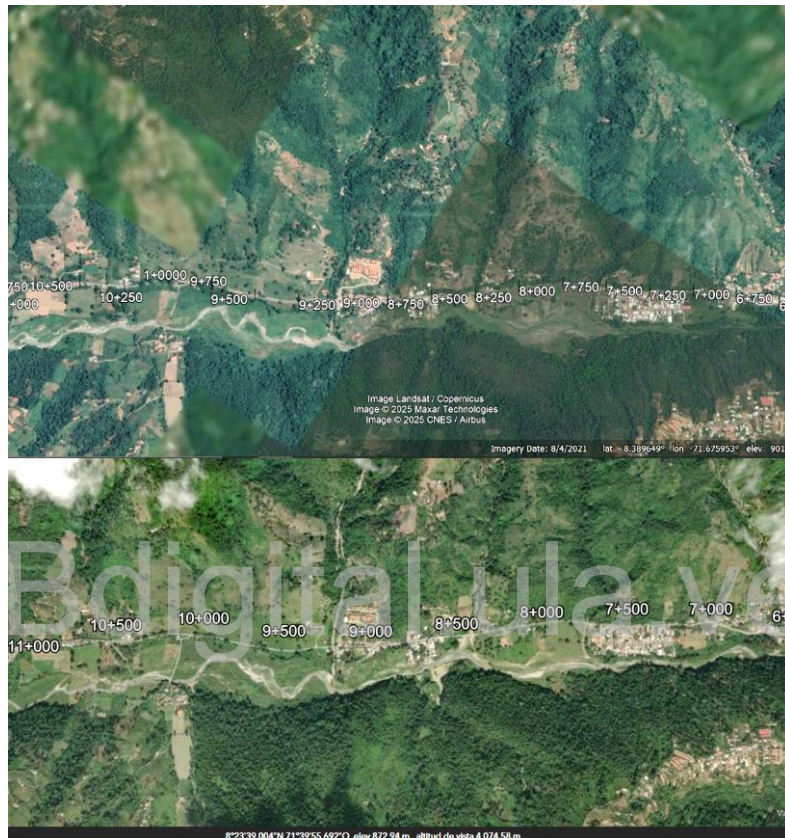
#### **d) Punto de aproximación focal. Prg. 8+250 – 9+000**

Este segmento del río Mocotíes se caracteriza por una ampliación sostenida de su sección transversal, evidenciando un incremento significativo en la energía del flujo y la capacidad de arrastre entre 2016 y 2023. La morfodinámica del sector está marcada por una alta movilidad histórica, manifestada en la persistencia de paleocauces y la activación de procesos erosivos en afluentes secundarios que alimentan el curso principal.

La condición de riesgo más crítica se localiza entre las progresivas 8+250 y 8+500, donde el cauce activo ha iniciado un proceso de acercamiento focalizado hacia la plataforma

vial. Esta tendencia de migración lateral, sumada a la inestabilidad de los materiales aluviales del entorno, compromete los márgenes de seguridad de la Troncal 007, exigiendo un monitoreo continuo de la socavación de pie de talud en este punto de aproximación activa.

**Figura 80. Dinámica del río Mocotíes**



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

Este extenso tramo se caracteriza por una ampliación sostenida de la sección transversal del cauce en la comparación multitemporal (2021/2023 vs. 2016), y por la presencia de una alta energía fluvial manifestada en la erosión de afluentes secundarios y la persistencia de numerosos paleocauces (ver Figura 80).

Al igual que en los tramos anteriores, se observa una sección más ancha en 2023 (respecto a 2016) y alta movilidad histórica (paleocauces). Se identifica una excepción crítica entre las Prg. 8+250 y 8+500, donde se registra un acercamiento activo del río en dirección a la vía.

### e) Evaluación de riesgo y morfodinámica: tramo Prg. 10+750 – 12+750

Este tramo del río Mocotíes presenta un comportamiento dual condicionado por el control geotécnico natural y la reactivación de la migración lateral en sectores específicos. Mientras que el segmento inicial (Prg. 10+750 – 11+750) exhibe una estabilidad notable gracias al confinamiento ejercido por depósitos de pie de vertiente que actúan como barreras rígidas ante la erosión fluvial, el sector subsiguiente muestra una transición hacia un escenario de mayor dinamismo geomorfológico.

A partir de la progresiva 11+750, la morfología del cauce experimenta cambios de dirección que derivan en una migración activa hacia el eje de la carretera. Aunque los márgenes de seguridad actuales no representan una amenaza inminente de colapso, la acelerada tasa de acercamiento y la recurrente inestabilidad de los afluentes secundarios definen a este sector como una zona de alerta preventiva, donde la evolución de la erosión lateral exige un monitoreo constante para garantizar la integridad a largo plazo de la plataforma vial.

**Figura 81.** Dualidad en el comportamiento del río



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

El tramo de estudio revela una dualidad en el comportamiento del río Mocotíes, un segmento de relativa estabilidad seguido de un sector con una migración lateral notable hacia la infraestructura vial y la recurrencia de la inestabilidad en los afluentes secundarios.

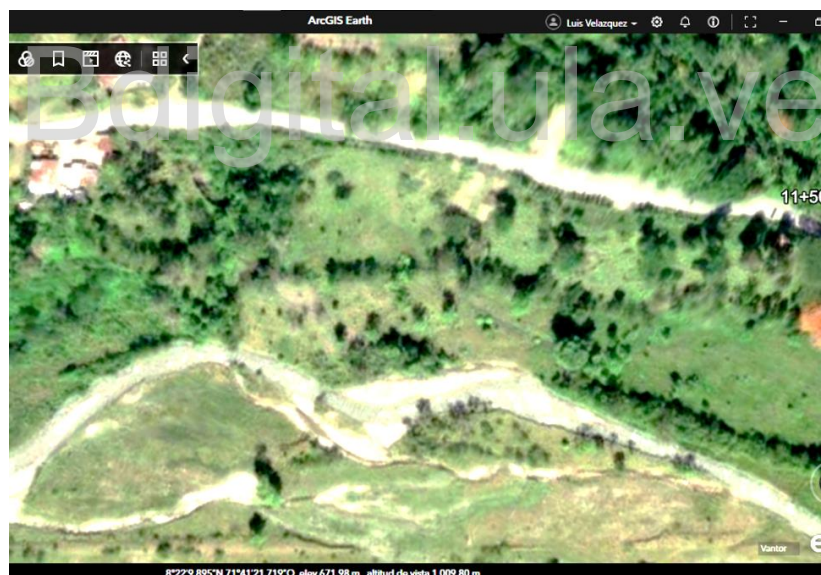
- **Prg. 10+750 – 11+750: Estabilidad fluvial**

En este segmento, el río Mocotíes ha demostrado una estabilidad longitudinal y lateral entre las fechas de las imágenes (2021 vs. 2023), sin registrar cambios significativos en su curso principal. La distancia horizontal mínima entre el cauce y el terraplén de la carretera se mantiene en un margen amplio de aproximadamente 100 m, lo que clasifica esta sección como de bajo riesgo de socavación y erosión lateral (ver Figura 81).

- **Progresiva 11+500. Control geotécnico y estabilidad**

El análisis en la Progresiva 11+500 destaca la importancia del control geotécnico natural en la mitigación del riesgo fluvial en esta sección del tramo, como se observa en la Figura 82.

**Figura 82.** *Control geotécnico natural*

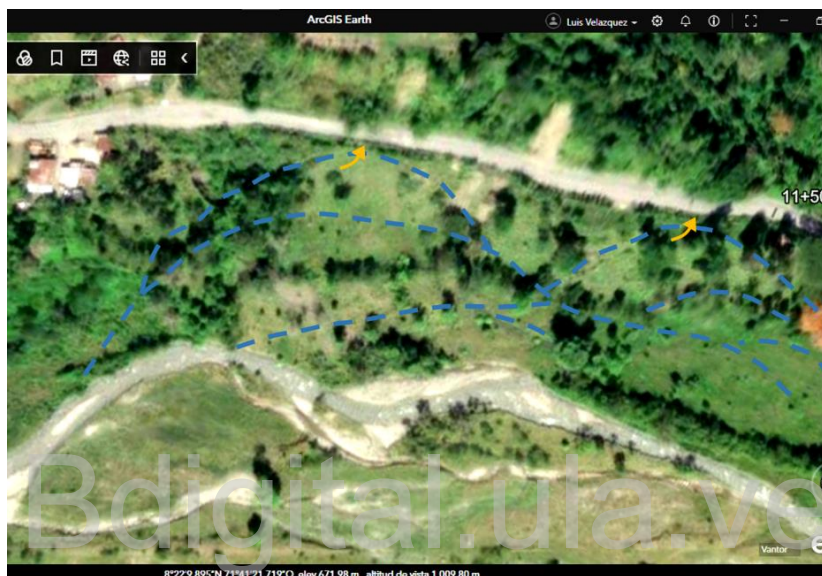


**Nota.** *Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)*

En este punto, la carretera se encuentra fundada sobre un depósito de pie de vertiente. La inclinación de los materiales depositados actúa como un obstáculo natural rígido que impide que el río se acerque a la plataforma vial. Este fenómeno geotécnico genera un confinamiento natural del cauce.

La presencia de este obstáculo natural disminuye significativamente el riesgo de socavación lateral del terraplén en este sector. Aunque se observan huellas del río en las cercanías de la carretera (paleocauces) como se muestra en la Figura 83, se infiere que estas corresponden a cursos antiguos. Dada la estabilidad conferida por el depósito de pie de vertiente y la ausencia de una migración activa reciente, no se espera que el río afecte la estabilidad de la carretera a corto o mediano plazo.

**Figura 83.** *Paleocauces observados*



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- **Prg. 11+750 – 12+750: Acercamiento significativo y erosión en afluente**

Este tramo se caracteriza por cambios de dirección en el cauce que resultan en una migración activa del río en dirección al eje de la carretera (ver Figura 84). La zona más crítica se localiza entre las progresivas 11+750 y 12+000.

La distancia de separación se ha reducido de manera significativa. En 2021, la distancia era de aproximadamente 160 m, mientras que en 2023 se redujo a 103 m. Aunque la distancia final aún no representa una amenaza inminente como en los primeros tramos (como en Prg. 1+250), la tasa de acercamiento (57 m en dos años) es una señal de tendencia erosiva acelerada que requiere monitoreo continuo.

**Figura 84.** *Acercamiento significativo y riesgo de erosión*



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

**f) Evaluación de riesgo y condicionantes de nubosidad: tramo Prg. 13+750 – 16+000**

Este tramo presenta un escenario de riesgo moderado y estabilidad relativa. A pesar de las limitaciones visuales por nubosidad, se identifica una ampliación recurrente de la sección transversal y una reducción gradual del margen de seguridad, que se mantiene en un promedio de 55 m a 60 m. La configuración de paleocauces paralelos al eje vial es un factor favorable, ya que dirige la energía erosiva longitudinalmente, minimizando el ataque directo al terraplén en condiciones de flujo normal.

**Figura 85.** *Distancia de seguridad moderada*



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

En el análisis de este tramo la evaluación se ve parcialmente afectada por la nubosidad, como se observa en la Figura 85, pero aun así se identifican tendencias y distancias de seguridad clave.

- **Prg. 13+750 – 14+750: Tendencia de acercamiento acelerado**

La presencia de nubosidad en las imágenes más recientes de ArcGIS Earth (2021/2023) dificulta una evaluación precisa del curso actual. El análisis comparativo entre 2016 y 2021 revela una tendencia de aproximación del río hacia el eje de la carretera. La distancia de amortiguamiento se redujo de aproximadamente 275 m (2016) a 233 m (2021). A pesar de que la distancia remanente es considerable, esta reducción de 42 m en cinco años sugiere una tasa de migración que debe ser monitoreada en futuros estudios, aunque no exige una intervención inmediata.

- **Prg. 14+750 – 15+190: Distancia de seguridad moderada**

A pesar de la nubosidad parcial, se observa que el trazado principal del río Mocotíes es similar entre las fechas, aunque se confirma la ampliación de la sección transversal recurrente a lo largo de todo el estudio. La presencia de paleocauces valida la alta movilidad histórica.

En este tramo, se registra la distancia mínima de separación más corta del segmento, con aproximadamente 55m. Aunque esta distancia es menor que la del tramo anterior, es superior a los puntos críticos del estudio, como el de la progresiva 1+250, por lo que se considera un riesgo moderado que no requiere intervención estructural urgente.

- **Prg. 15+750 – 16+000: Bajo riesgo y estabilidad del trazado**

En esta sección, la morfología del río muestra numerosos paleocauces cuya orientación es predominantemente paralela al alineamiento de la carretera, como se observa en la Figura 86. Esto confiere estabilidad al terraplén al dirigir la energía erosiva del flujo en sentido longitudinal.

Las huellas más cercanas a la vía corresponden a eventos pasados de desborde y socavación. No obstante, la tendencia actual del cauce no apunta a la activación de estos antiguos cursos, lo que resta importancia al riesgo. Con una distancia mínima de aproximadamente 60 m, no se recomiendan obras de defensa fluvial.

**Figura 86.** *Paleocauces y bajo riesgo observado*

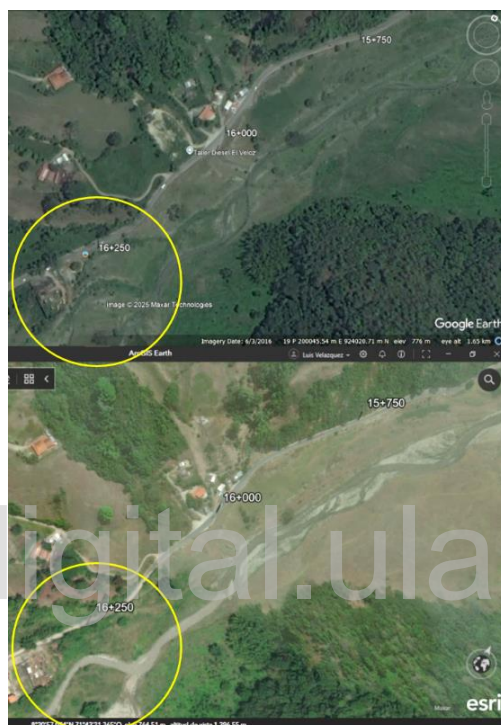


**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

**g) Amenaza de desborde y bifurcación: Tramo Prg. 16+250 – 16+500**

El análisis multitemporal de este segmento revela un evento de reactivación de cauce que evidencia la alta memoria hidráulica y morfodinámica del río Mocotíes, traduciéndose en una reducción del margen de seguridad, como se observa en la Figura 87.

**Figura 87.** *Reactivación de paleocauce*



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

En las imágenes de 2021, se observa claramente que el río ha retomado un curso fluvial previo (paleocauce), cuya huella era visible en la imagen de 2016, aunque en ese entonces la sección estaba cubierta por vegetación riparia. La reactivación de este trazado implica que el río utiliza un abanico de inundación o cauces múltiples bajo condiciones de alto caudal, siendo capaz de desbordar y recuperar senderos históricos.

Al retomar este curso anterior, la distancia horizontal mínima entre el río y la plataforma vial se redujo a aproximadamente 46 m en 2021. Este valor, si bien no es el más crítico del estudio, sitúa el terraplén en un rango de riesgo moderado que debe ser monitoreado sistemáticamente, ya que una migración adicional podría comprometer la estabilidad.

La pérdida de la vegetación que cubría este paleocauce en 2016 y su posterior reactivación en 2021 subraya la fuerza erosiva del río y la incapacidad de la cubierta vegetal para resistir los pulsos de caudal más recientes.

La morfodinámica fluvial del río Mocotíes evoluciona hacia un sistema de bifurcación que altera el vector de incidencia hidráulica sobre la infraestructura vial. Este fenómeno de desborde activo se manifiesta a través de un cauce secundario que diverge del principal con una dirección de flujo perpendicular hacia el eje de la carretera (ver Figura 88), condición característica de tramos con alta energía de inundación y escasa capacidad de confinamiento.

Esta redistribución del caudal establece una vulnerabilidad específica, generando una amenaza de erosión focalizada con potencial de ataque directo al pie del talud. La reactivación y profundización de este brazo podría capturar el flujo de manera permanente, provocando la socavación y eventual desestabilización de la plataforma vial en el punto de contacto.

**Figura 88.** *Bifurcación del cauce*

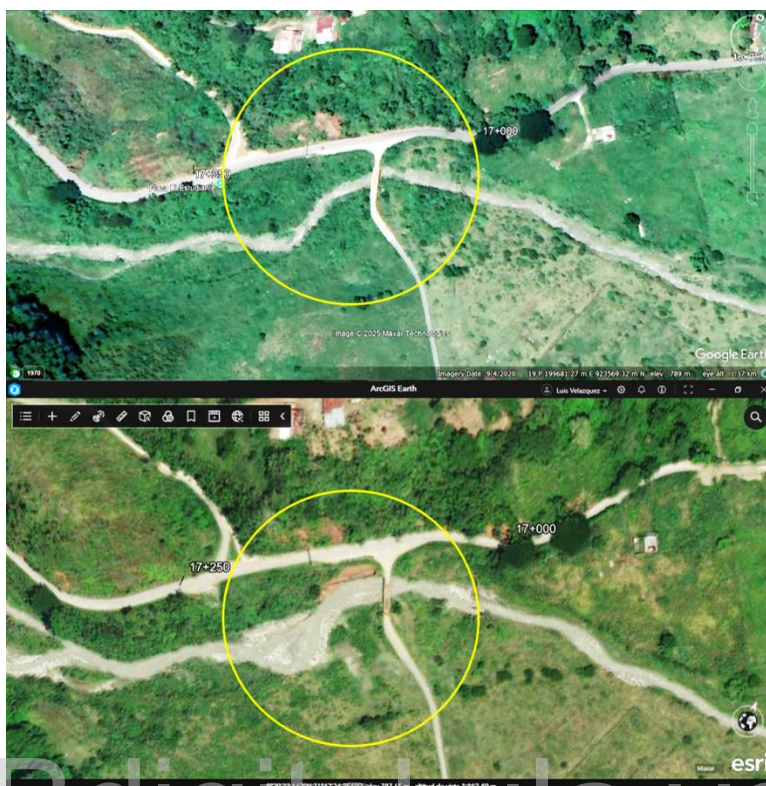


**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

#### **h) Amenaza estructural y morfológica: Progresiva 17+000**

Este punto representa una de las intersecciones más críticas del estudio, donde la morfodinámica fluvial del río Mocotíes impacta directamente sobre la infraestructura de soporte vial. La configuración actual del cauce en la progresiva 17+000 genera una condición de vulnerabilidad dual: por un lado, una amenaza de socavación local sobre los elementos de fundación del puente y, por otro, un ataque erosivo lateral contra el terraplén de acceso.

**Figura 89.** Dinámica fluvial y amenaza estructural



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

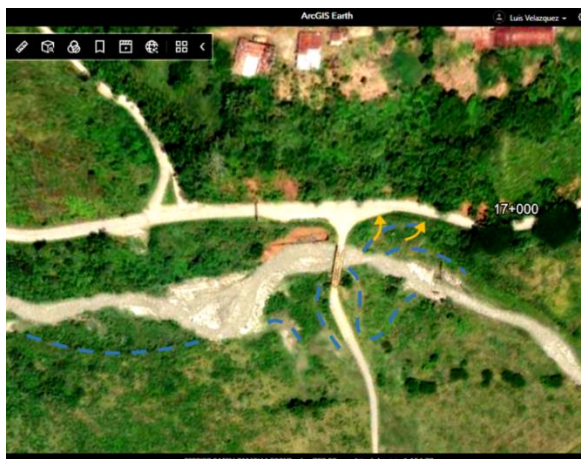
El análisis en la progresiva 17+000 identifica una interferencia crítica entre la dinámica fluvial y la infraestructura de drenaje y vial, como se muestra en la Figura 89.

La comparación multitemporal (2020 vs. 2021) evidencia un ensanchamiento significativo de la sección transversal del río en el área inmediata al puente, al tiempo que se registra una aproximación riesgosa del cauce activo hacia el eje de la carretera.

El ensanchamiento del cauce y el consecuente cambio en la distribución del flujo generan posibles efectos adversos sobre el estribo izquierdo del puente (margen cercano a la vía). Este fenómeno incrementa la probabilidad de socavación local alrededor de la fundación del estribo, comprometiendo la estabilidad y la capacidad estructural del apoyo.

En el punto de mayor aproximación a la vía, el río forma una curva activa que dirige la energía erosiva lateral directamente contra el pie del terraplén de la carretera. Esta condición hidráulica tiene el potencial de erosionar la plataforma vial a corto plazo, especialmente durante eventos de alto caudal (ver Figura 90).

**Figura 90.** *Paleocauces observados y amenaza estructural*

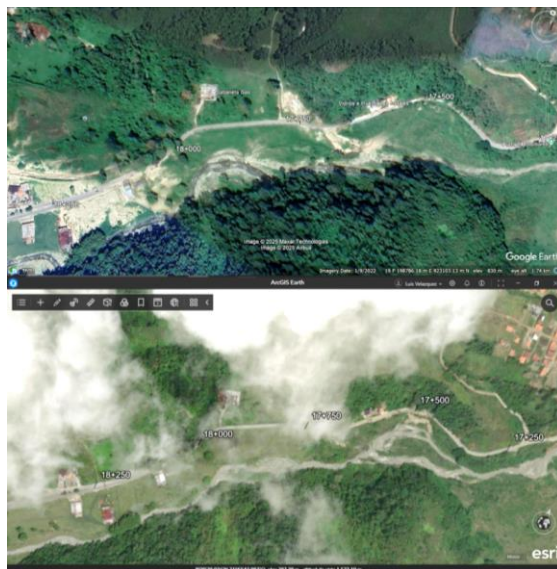


**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

**i) Evaluación condicionada y riesgo de desborde: Tramo Prg. 17+250 – 18+250**

Este apartado aborda la vulnerabilidad fluvial en un sector donde la caracterización geomorfológica se encuentra sujeta a limitaciones de visibilidad por nubosidad en los registros recientes. El análisis se fundamenta en la interpretación de la memoria hidráulica del terreno, identificando la persistencia de paleocauces y la activación de brazos secundarios que alteran el confinamiento del cauce principal.

**Figura 91.** *Riesgo de desborde*



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

El análisis en este segmento se ve parcialmente limitado por la nubosidad en las imágenes de *ArcGIS Earth* (ver Figura 91). No obstante, la evidencia morfológica en la Progresiva 17+500 revela la existencia de un brazo de desborde activo con una trayectoria de riesgo.

La presencia de nubosidad en las imágenes más recientes entre las Prg. 17+250 y 18+250 obliga a basar la evaluación en la interpretación de formas del terreno y huellas históricas.

Se observa la existencia de un brazo de desborde activo cuyo trazado se dirige directamente hacia el terraplén de la carretera (ver Figura 92). Los paleocauces y huellas visibles en la llanura de inundación adyacente permiten inferir una alta probabilidad de que el flujo del río, bajo condiciones de caudal máximo, se active y erosionare el pie del terraplén.

Dada la configuración topográfica y el posible alineamiento rectilíneo que podría adoptar el flujo en esta zona de desborde, existe el riesgo de que el caudal desarrolle una velocidad significativa, aumentando su fuerza tractiva y su capacidad erosiva sobre el material no protegido.

**Figura 92.** *Brazo de desborde*



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software *ArcGIS Earth* (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

### j) Daño posible y riesgo estructural: Tramo Prg. 18+250 – 19+000

Este segmento del diagnóstico fluvial destaca por la intensa dinámica de transporte de carga sólida y su interacción con obras de infraestructura vial clave. El análisis se centra en la respuesta del cauce ante regímenes de sedimentación masiva, los cuales incrementan el potencial de abrasión y alteran la capacidad hidráulica del sector.

**Figura 93. Acercamiento del río**



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

El análisis de este segmento identifica una alta actividad de transporte de sedimentos y daños posibles a la infraestructura vial, como se muestra en la Figura 93.

Se observa una gran cantidad de material de color blanco arrastrado por el río en las imágenes de 2022 (imagen superior). Este material puede corresponder a sedimentos finos o arenas producto de erosión intensa en cuencas superiores, indicando un alto régimen de transporte de sólidos que incrementa el potencial de abrasión y colmatación aguas abajo.

En la Progresiva 19+000, el acercamiento del cauce representa un riesgo directo para la estabilidad del terraplén de la carretera y, crucialmente, para el estribo del puente de acceso al sector El Matadero (ver Figura 94). El ataque lateral continuado amenaza con la socavación de la fundación del estribo, comprometiendo la funcionalidad de la estructura de cruce.

**Figura 94.** Acercamiento del río y riesgo de erosión lateral



**Nota.** Captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

#### k) Riesgo urbano y proximidad fluvial: Tramo Prg. 19+000 – 19+750

El análisis en este tramo se enfoca en el acercamiento progresivo del cauce en la zona poblada y el alto riesgo de desborde hacia la infraestructura vial y las viviendas adyacentes.

**Figura 95.** Proximidad del río y riesgo urbano



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

Se confirma una tendencia de migración lateral continua hacia la carretera (Figura 95). Aunque el cauce ya estaba próximo en 2021, las imágenes de 2022 muestran una aproximación aún mayor al pie del talud de la carretera. Se reitera la presencia de gran cantidad de material de color blanquecino arrastrado por el río en 2022. Este fenómeno confirma la alta energía y capacidad de transporte de sedimentos del río, aumentando el potencial de abrasión y de depositación aguas abajo.

En la progresiva 19+750, la distancia mínima entre el río y la carretera es de aproximadamente 45 m. Aunque existen numerosas huellas fluviales en la terraza aluvial, como se observa en la Figura 96, esta distancia se considera un riesgo potencial que no es inminente a corto o mediano plazo. A pesar de esto, el área se caracteriza por ser una planicie de inundación donde convergen varios brazos del río, lo que genera un riesgo significativo de desborde lateral durante eventos de crecida, lo que pondría en peligro tanto la carretera como las viviendas cercanas.

**Figura 96.** *Paleocauces observados*



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

#### **I) Control geológico y punto crítico final: Tramo Prg. 19+750 – 20+350**

Este segmento final del estudio, que culmina en la Prg. 20+350, se caracteriza por la influencia geológica en la determinación del trazado fluvial y la identificación de un último punto de alta vulnerabilidad, mostrado en la Figura 97.

**Figura 97.** Control geológico del trazado del río

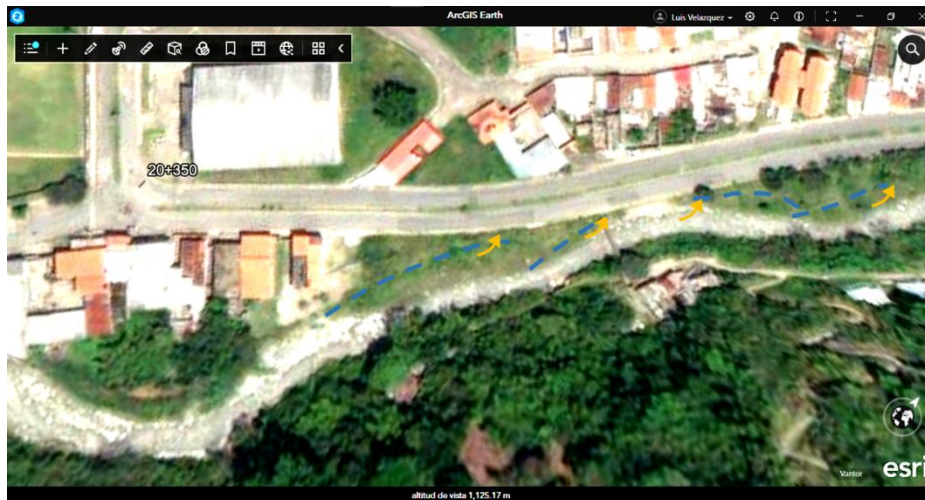


**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

Aunque el recorrido general del cauce es similar entre las fechas analizadas, se observa un acercamiento focalizado del río hacia la carretera en la Progresiva 20+000, en la imagen de 2022.

El trazado del río se encuentra ceñido en dirección a las montañas de filita ubicadas en el lado sur. La resistencia de las filitas a ser erosionadas actúa como un control estructural, impidiendo que el río migre significativamente hacia el sur y forzando su aproximación hacia el margen norte, donde se encuentra la carretera. Se observa una gran presencia de material de color blanco en la imagen de 2022, lo que reitera la alta capacidad de arrastre del río, ya observada en tramos anteriores.

**Figura 98.** Acercamiento crítico del río



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

El punto más cercano y, por ende, el punto crítico final del tramo, coincide con la cercanía de la carretera a las montañas de filita, donde el río es forzado a aproximarse a la plataforma vial, como se observa en la Figura 98.

#### m) Observaciones generales en relación al comportamiento del río

El análisis morfodinámico del río Mocotíes a lo largo del tramo (Prg. 0+000 a 20+350) confirma un comportamiento altamente dinámico e inestable, caracterizado por una ampliación sostenida del cauce, la reactivación de paleocauces y la migración lateral agresiva que compromete la estabilidad de la infraestructura en múltiples puntos.

#### Conclusiones críticas del tramo

- Vulnerabilidad extrema: El tramo Prg. 0+750 a Prg. 1+250 representa la zona de máxima vulnerabilidad. La distancia mínima se redujo a un crítico 5 m en Prg. 1+250, implicando una socavación basal inevitable y la pérdida potencial de la infraestructura vial.
- Amenazas estructurales a puentes:  
Prg. 5+500: La migración del flujo genera un ataque directo y concentrado contra el estribo izquierdo del puente y la pasarela peatonal, creando un alto riesgo de socavación local.

Prg. 17+000: El ensanchamiento y la curva activa amenazan directamente el estribo izquierdo del puente y el terraplén adyacente.

Prg. 19+000: El río amenaza directamente la vía hacia el sector El Matadero, poniendo en riesgo el estribo del puente de acceso.

- Inestabilidad de flujos secundarios: Se identificaron brazos de desborde en las Prg. 16+250 y 17+500 que tienen una trayectoria directa y riesgosa hacia la carretera, requiriendo soluciones de obturación y encauzamiento.
- Vulnerabilidad de drenajes transversales: Se observa la erosión o ensanchamiento total de múltiples quebradas afluentes (por ejemplo, Prg. 7+500, Prg. 9+750, Prg. 12+500), indicando una vulnerabilidad sistémica que incrementa el riesgo de colmatación de las obras de drenaje.
- Riesgo geológicamente forzado: El riesgo en la Prg. 20+000 es forzado por la resistencia de las filitas en la margen opuesta, lo que obliga al cauce a ceñirse y atacar el eje de la carretera.

#### **4.5 Validación técnica de campo y correlación geológica (Fase 5)**

Esta fase se centró en la verificación directa de los hallazgos preliminares, ejecutada mediante dos jornadas de inspección técnica especializada. El objetivo central fue contrastar la información obtenida por teledetección con la realidad física del tramo La Victoria-Tovar para otorgar validez científica a la cartografía final.

##### **4.5.1 Visita técnica de comprobación (Ficha N° 02): Validación vial y toponímica**

Durante la jornada del 1 de octubre de 2025, se realizó un proceso de validación y georreferenciación sistemática de los problemas viales identificados remotamente. El equipo técnico procedió al diagnóstico del estado funcional de las obras de drenaje transversal en puntos críticos, documentando de forma exhaustiva casos de deterioro u obstrucción que comprometen la estructura de la vía.

Un componente fundamental de esta visita fue la recopilación de datos toponímicos mediante entrevistas con pobladores locales. Esta interacción permitió identificar con precisión los nombres de quebradas, (como el caso de la quebrada Cacagüito, mostrado en la Figura 99) y sectores, información que resultó crucial para la segmentación metodológica del tramo y la elaboración de un mapa cartográfico con rigor geográfico. Los datos recabados mediante geoposicionamiento (GPS) y registro fotográfico sientan las bases para el diseño de acciones preventivas y correctivas basadas en la ubicación precisa de las patologías.

**Figura 99. Obra de paso en quebrada Cacagüito**

La información necesaria para completar la ficha técnica Ficha N° 02 se muestra en la Tabla 15.

- **Ficha técnica de visita de campo N° 02**

**Tabla 15. Ficha técnica de visita de campo N° 02**

<b>Datos Generales de la Ficha</b>	
<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Identificación de la ficha	VC-LV-TV-02
Proyecto/Tesis	Aplicación de sensores remotos en mantenimiento vial. Carretera T007, tramo La Victoria - Tovar, Mérida – Venezuela
Fecha de visita	Miércoles, primero de octubre de 2025
Hora de Inicio/Fin	9:00 AM – 5:00 PM
Investigador(es) Responsable(s)	Ing. Luis Velázquez, Msc. Jorge Carrero
Metodología empleada	Inspección <i>in situ</i> , Georreferenciación (GPS) y Registro Fotográfico.
Condiciones climáticas	Nublado, jornada favorable para inspección.
<b>Localización y Objetivos de la Inspección</b>	
<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Zona de Estudio/Tramo Vial	La Victoria - Tovar (Segunda inspección)
Ubicación política	Estado Mérida, Venezuela
Objetivo 1 (Validación y georreferenciación)	Validar y georreferenciar los problemas viales (actuales y potenciales) detectados previamente por imágenes satelitales.
Objetivo 2 (Diagnóstico de obras)	Diagnosticar el estado funcional de las obras de drenaje transversal en los puntos críticos, documentando su deterioro u obstrucción.
Objetivo 3 (Datos toponímicos)	Recopilar datos toponímicos (nombres de quebradas y sectores) mediante consultas a pobladores locales.

<b>Recopilación de Datos y Aplicación en la Tesis</b>	
<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Puntos de interés (PI) recopilados	Problemas viales, Obras de drenaje críticas, Nombres de quebradas/sectores.
Datos de campo registrados	Coordenadas geográficas (GPS) y Registro Fotográfico.
Georreferenciación	Sentar las bases para el diseño de acciones correctivas y preventivas a partir de la ubicación precisa de los problemas.
Relevancia del dato toponímico	Información crucial para la elaboración del mapa cartográfico detallado y la segmentación metodológica del tramo de estudio.
<b>Hallazgos Observados</b>	
<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Drenaje	Deterioro u obstrucción en obras de drenaje transversal
Problemas viales	Problemas actuales y potenciales validados de los hallazgos de teledetección
Observaciones adicionales	La metodología se centró en la validación <i>in situ</i> de hallazgos preliminares.
Códigos de fotos clave	Listado de códigos de fotos por cada PI visitado

#### **4.5.2 Visita técnica de comprobación (Ficha N° 03): Caracterización geológica y geomorfológica**

El 15 de octubre de 2025, se llevó a cabo una inspección orientada a la validación de las unidades geológicas y geoformas interpretadas preliminarmente. El trabajo se enfocó en confirmar *in situ* la presencia de conos de deyección, terrazas aluviales y depósitos de pie de vertiente, así como elementos estructurales críticos como zonas de contacto y fallas geológicas.

Mediante la inspección en Puntos de Interés Geológico (PIG) prioritarios, se ratificó la litología predominante (filitas y granitos) y se evaluaron los tipos de inestabilidad activa o potencial. Este proceso permitió establecer una correlación causal entre los factores externos del terreno y las fallas detectadas en la infraestructura vial. La información obtenida sirve como sustento documental indispensable para la construcción de la cartografía de síntesis, permitiendo ajustar límites de terrazas y ubicaciones de fallas menores, lo cual es determinante para identificar las zonas de mayor amenaza para el mantenimiento vial.

- **Ficha técnica de visita de campo N° 03**

La información necesaria para completar la ficha técnica Ficha N° 03 se muestra en las Tablas 16, 17, 18, 19, 20 y 21.

**Datos generales de la ficha**

**Tabla 16.** *Datos generales de la ficha N° 03*

<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Identificación de la ficha	VC-LV-TVR-03
Proyecto/Tesis	Aplicación de sensores remotos en mantenimiento vial. Carretera T007, tramo La Victoria - Tovar, Mérida – Venezuela
Fecha de visita	15-10-2025
Investigador(es) Responsable(s)	Ing. Luis Velázquez, Msc. Jorge Carrero
Hora de Inicio/Fin	9:00 AM – 5:00 PM
Propósito de la visita	Validación y caracterización de las unidades geológicas y geomorfológicas previamente cartografiadas mediante teledetección
Condiciones climáticas	Soleado, jornada favorable para inspección

**Localización del punto de validación**

**Tabla 17.** *Localización del punto de validación*

<b>Campo</b>	<b>Detalle a Registrar</b>
Punto de Interés Geológico (PIG)	PIG-VC3-XXXX
Coordenadas GPS (WGS84)	Latitud ( $\phi$ ):/Longitud ( $\lambda$ ):
Progresiva	K+M (K08+300)
Elemento cartografiado a validar	Geológico/Geomorfológico/Hidrológico

### Validación geológica y litológica (confirmación de la roca)

**Tabla 18.** Validación geológica y litológica

Campo	Detalle a Registrar
Unidad litológica cartografiada	Roca identificada en el mapa: Filita, Granito, Depósito Cuaternario, etc
Tipo de roca confirmada <i>in situ</i>	Confirmada/No Confirmada (Describir la roca observada: color, textura, mineralogía).
Presencia de contacto geológico	Confirmada/No visible. (Describir el tipo de contacto: Zonas de cizalla, discordancia).
Presencia de fallas o fracturas	Confirmada/No visible. (Tipo y orientación de fracturas que afectan la estabilidad).
Uso de vegetación indicadora	Confirmada (Especie vegetal asociada a la litología que valida el mapeo).

### Validación geomorfología y relieve (confirmación de las formas)

**Tabla 19.** Validación geomorfología y relieve

Campo	Detalle a Registrar
Forma geomorf. cartografiada	(Forma identificada en el mapa: Cono de deyección, Terraza Aluvial, Depósito de Pie de Vertiente, etc.)
Confirmación de la forma <i>in situ</i>	Confirmada/No Confirmada. (Describir las características que definen la forma: pendiente, depósito, límites).
Proceso activo observado	Flujo de detritos/Deslizamiento/Erosión hídrica/Erosión eólica.
Relación con el mantenimiento vial	(Describir la afectación: El cono aporta material a la vía; la terraza es estable.

### Validación hidrología y drenaje (confirmación de la red)

**Tabla 20.** Validación hidrología y drenaje

Campo	Detalle a Registrar
Nombre de curso de agua	Nombre que aparece en el mapa o validado con pobladores locales.
Clasificación en el mapa	Río, Quebrada, Curso intermitente.
Condición actual del flujo	Activo (Permanente)/Intermitente/Seco.
Interacción con la vía	Cruce (Puente/Alcantarilla) /Flujo paralelo (Riesgo de socavamiento) /Desvío del flujo.

## Conclusiones y aplicación cartográfica

**Tabla 21.** Conclusiones y aplicación cartográfica

Campo	Detalle a Registrar
Validación general del mapa	Totalmente Validado/Se requiere ajuste en: (Especificar el elemento, por ejemplo, límite de la terraza, ubicación de una falla menor).
Uso de los datos recabados	Justificación metodológica de la cartografía geológica y geomorfológica final de la tesis.
Implicación para el mantenimiento	Crucial para determinar las zonas de mayor amenaza, por ejemplo, taludes en filita fracturada o límites de conos de deyección activos).
Código de fotografía	Listado de códigos de fotos que validan el punto y se usarán como evidencia, por ejemplo, PIG-001-Granito.jpg

### 4.5.3 Caso representativo de validación: Cuenca de la quebrada San José

Debido a la extensión del tramo de estudio y la complejidad hidrogeomorfológica del sector, la investigación identificó y caracterizó un total de 12 unidades hidrológicas críticas que interceptan la Troncal 007. No obstante, en consideración a la sistematicidad de la metodología, se presenta a continuación el análisis de la cuenca de la quebrada San José como caso representativo de la Fase 5. Esta unidad se seleccionó por su alto valor diagnóstico, al concentrar de forma simultánea los principales factores de amenaza geológica, geomorfológica e hidráulica evaluados *in situ*. La validación de este punto de interés permitió ratificar la precisión de la interpretación remota y establecer la correlación causal entre la dinámica de vertientes y la inestabilidad de la infraestructura vial, sirviendo como modelo para el procesamiento de las demás cuencas.

- **Datos generales de la ficha**

Campo	Detalle a Registrar
Identificación de la Ficha	VC-LV-TVR-03
Proyecto/Tesis	Aplicación de sensores remotos en mantenimiento vial. Carretera T007, tramo La Victoria - Tovar, Mérida – Venezuela
Fecha de Visita	15-10-2025
Investigador(es) Responsable(s)	Ing. Luis Velázquez, Msc. Jorge Carrero
Hora de Inicio/Fin	9:00 AM – 5:00 PM

Propósito de la Visita	Validación y caracterización de las unidades geológicas y geomorfológicas previamente cartografiadas mediante teledetección
Condiciones Climáticas	Soleado, jornada favorable para inspección

- **Localización del punto de validación**

Campo	Detalle a Registrar
Punto de Interés Geológico (PIG)	PIG-VC3-QSJ
Coordenadas GPS (WGS84)	Latitud ( $\phi$ ): 8.395190°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.647466°
Progresiva	6+000
Elemento Cartografiado a Validar	Geológico/Geomorfológico/Hidroológico

- **Validación geológica y litológica**

Campo	Detalle a Registrar
Unidad Litológica Cartografiada	Roca identificada en el mapa: filita, granito (ver Figura 100)
Tipo de Roca Confirmada <i>in situ</i>	Confirmada. Descripción de las rocas observadas:  Filita: La roca tiene un color gris claro a beige/marrón claro que es consistente con la filita meteorizada. Aunque no es perfectamente visible, la roca en la imagen parece tener una textura laminar o foliada  Granito: La roca tiene una textura masiva y granular. Se pueden observar claramente los cristales interconectados (cuarzo, feldspato, mica). La roca carece de planos de foliación, que definen a rocas metamórficas como la filita. Aunque la roca está algo meteorizada, lo que le da un tono blanquecino/beige claro, conserva la dureza y el aspecto rugoso típico de los afloramientos de granito.
Presencia de Contacto Geológico	No visible
Presencia de Fallas o Fracturas	No visible.

Uso de Vegetación Indicadora	<p>Confirmada (ver Figura 102).</p> <p>Se observa la presencia de vegetación boscosa y de altura media a alta, la cual se desarrolla sobre suelos más finos y de mayor espesor residual generados por la meteorización de la Filita. Contrastando, se identifican áreas con vegetación de menor altura y densidad, predominantemente herbácea y arbustiva. Este patrón es indicativo de suelos granulares, poco cohesivos y altamente permeables, característicos de las zonas con presencia de Granito o sus derivados sedimentarios.</p> <p>Esta diferenciación en la cobertura vegetal constituye un indicador geomorfológico secundario que valida la delimitación de las unidades filita y granito previamente establecida por teledetección.</p>
------------------------------	--

- **Validación geomorfología y relieve**

Campo	Detalle a Registrar
Forma Geomorfológica cartografiada	Depósito de pie de vertiente (ver Figura 101)
Confirmación de la Forma <i>in situ</i>	<p>Confirmada.</p> <p>Se observa una capa de material no consolidado donde predomina la matriz fina sobre el clasto. Se trata de un conglomerado de clastos de varios tipos de roca, incluyendo cantos rodados, indicando transporte previo, embebido en una matriz abundante de arena y limo de color beige/gris claro. Los clastos varían principalmente entre el tamaño de grava gruesa y canto rodado, con un alto grado de redondez.</p>
Proceso Activo Observado	No observado
Relación con el Mantenimiento Vial	La naturaleza no consolidada y la presencia de matriz fina lo hacen altamente susceptible a la erosión hídrica y a la inestabilidad por saturación, representando un riesgo significativo para la vía.

- **Validación hidrología y drenaje**

Campo	Detalle a Registrar
Nombre de Curso de Agua	San José
Clasificación en el Mapa	Quebrada
Condición Actual del Flujo	Seco
Interacción con la Vía	Alcantarilla de arco metálico corrugado revestida en concreto en cabezales y laterales (ver Figura 103).

- **Conclusiones y aplicación cartográfica**

Campo	Detalle a Registrar
Validación General del Mapa	Parcialmente validado. Se requiere ajuste en presencia de fallas y/o fracturas.
Uso de los Datos Recabados	Los datos georreferenciados confirman la delimitación de las unidades litológicas, filita y granito, y el depósito de pie de vertiente, como geoforma de inestabilidad potencial. Estos datos son la base para la sectorización de la carretera y la propuesta de soluciones de mantenimiento estructural y preventivo que aborden las causas raíz de los daños.
Implicación para el Mantenimiento	La naturaleza no consolidada y la presencia de matriz fina lo hacen altamente susceptible a la erosión hídrica y a la inestabilidad por saturación, representando un riesgo significativo para la vía, como posibles deslizamientos superficiales o flujos de detritos.
Código de Fotografía	Figuras 100, 101, 102 y 103.

**Figura 100.** *Presencia de granito y filita en la microcuenca*



**Figura 101.** *Depósito de pie de vertiente*



**Figura 102.** *Vegetación como indicador geomorfológico secundario*



**Figura 103.** *Alcantarilla de arco metálico corrugado revestida en concreto en cabezales y laterales*



#### 4.5.4 Análisis de correlación y ajuste del modelo de detección

Tras la ejecución de las fases de reconocimiento remoto y comprobación *in situ*, se determinó una correspondencia técnica estimada del 85% entre la cartografía preliminar y la realidad física del terreno. Esta alta correlación se sustenta en la validación positiva de rasgos geológicos y geomorfológicos críticos, tales como la identificación precisa de afloramientos de filita y granito, depósitos de pie de vertiente, conos de deyección, terrazas aluviales y la naturaleza de los sedimentos en cauces, destacando el caso de la Quebrada San José, donde la presencia de bloques de granito, filita y sedimentos finos coincidió plenamente con los indicadores de reflectividad y textura analizados en las imágenes de sensores remotos.

Por otro lado, el margen de discrepancia del 15% responde a las limitaciones de resolución de los sensores para detectar elementos de micro detalle de la infraestructura vial. Factores como el estado de la carpeta de rodamiento, hundimientos puntuales, fallas de borde y la tipología específica de las obras de drenaje, requirieron de la inspección directa en campo para su caracterización definitiva. Esta convergencia entre el análisis multiespectral y la validación táctica garantiza la fiabilidad de la cartografía final para la planificación del mantenimiento vial en el tramo de vía estudiado. Los niveles de coincidencia detallados por categorías se presentan a continuación en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Matriz de correlación técnica (Teledetección vs. Fase de Campo)

<b>Categoría de Análisis</b>	<b>Atributo Identificado (Sensores Remotos)</b>	<b>Observación / Comprobación <i>In Situ</i></b>	<b>Nivel de Correspondencia</b>
Litología	Afloramientos de filita y granito	Confirmado: presencia de filita y bloques graníticos.	Alta
Geomorfología	Conos de deyección, depósitos de pie de vertiente, terrazas aluviales	Confirmado: presencia de acumulaciones coluviales activas, geoformas en abanico y niveles de terrazas con sedimentos fluviales estratificados.	Alta
Sedimentología	Textura de sedimentos (Finos/Gruesos)	Confirmado: bloques y sedimentos finos).	Alta
Hidrografía	Red de drenaje y cursos de agua	Trayectorias confirmadas	Alta
Estructura Vial	Eje de calzada y trazado principal	Alineación confirmada mediante GPS de campo.	Alta
Detalle Técnico	No detectable (Límite de resolución)	Fallas de borde, hundimientos y tipo de obra de drenaje.	Baja/Nula

#### **4.6 Construcción de la Cartografía Geológica-Geomorfológica (Fase 6)**

La cartografía de síntesis constituye la base documental de los resultados presentados en el Capítulo IV y se fundamenta en la teledetección como herramienta primaria para identificar, clasificar y cartografiar los problemas actuales y potenciales del tramo. Este mapa, representado en la Figura 104, Escenario geológico-geomorfológico, establece el marco espacial para la totalidad del diagnóstico, trascendiendo la base topográfica convencional al incorporar capas de información crítica para el análisis de vulnerabilidad vial. El proceso se centró en la creación y superposición de las siguientes capas especializadas dentro del entorno SIG (QGIS):

##### **4.6.1 Integración geológica y geomorfológica**

- Geología y litología: La capa litológica, generada mediante interpretación satelital y validada en la Ficha Técnica N° 03, delimita las unidades de Filita (Fi), caracterizada por ser altamente meteorizable, y Granito (Gr). Se integraron elementos estructurales como fallas geológicas, fracturas y datos de rumbo y buzamiento de la foliación, confirmados en los puntos de interés geológico (PIG).
- Geomorfología y relieve: Se delinearon geofomas críticas como terrazas aluviales, conos de deyección y depósitos de pie de vertiente. Estas unidades fueron identificadas por fotointerpretación y corroboradas con las descripciones de relieve de la Ficha N° 03, utilizando además el DEM ALOS PALSAR para establecer el contexto topográfico mediante curvas de nivel y análisis de pendientes.

##### **4.6.2 Infraestructura e hidrología de riesgo**

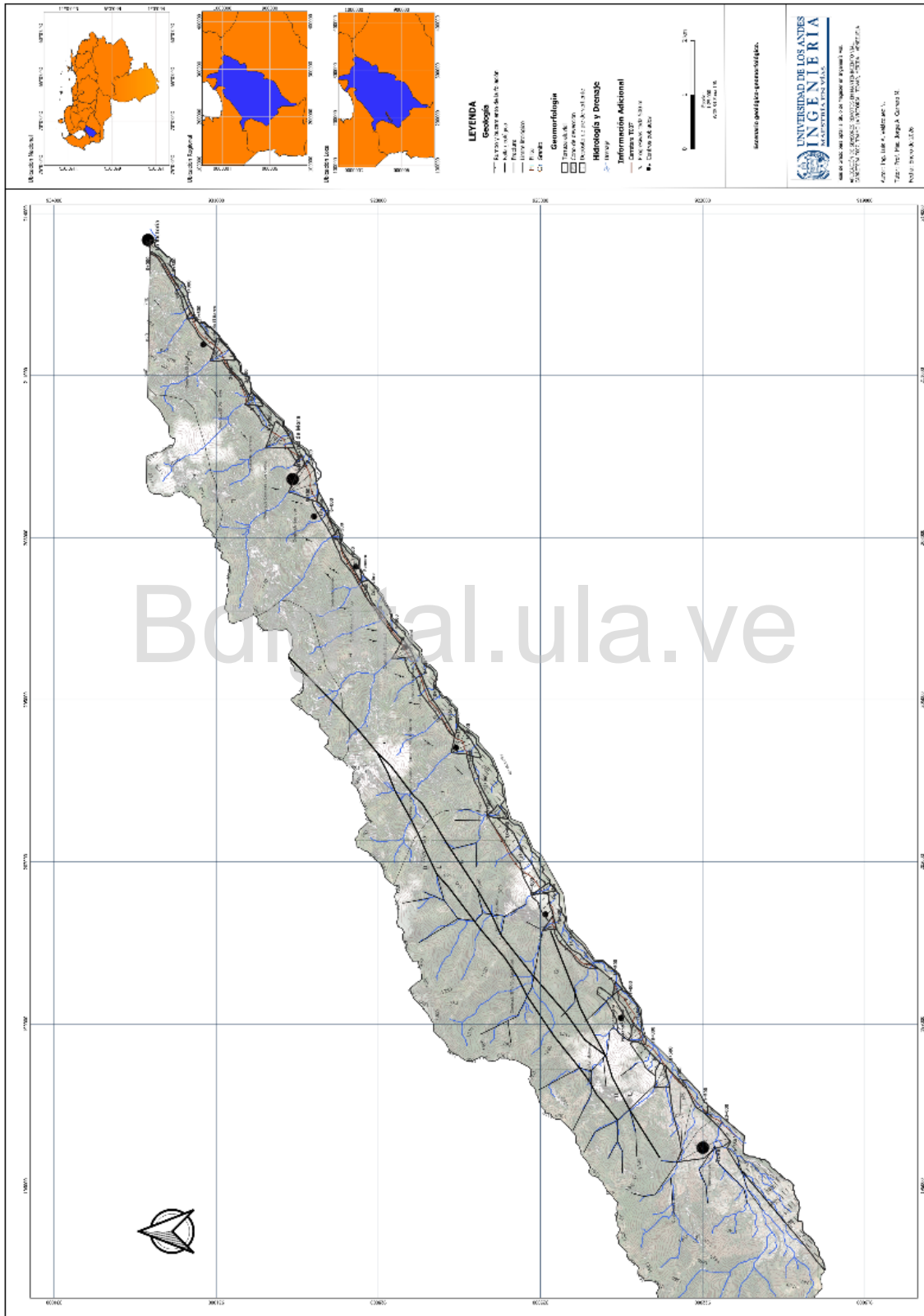
- Hidrología y dinámica de microcuencas: El análisis descriptivo de las microcuencas que interactúan con la Troncal 007 se basó en la digitalización de la red de drenajes a partir del modelo de elevación digital. Se definieron los límites de las cuencas para identificar zonas de aporte de caudal y sedimentos, incorporando datos toponímicos validados en la Ficha Técnica N° 02. Esta caracterización es indispensable para la posterior evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica.
- Infraestructura y centros poblados: Se consolidó la capa de la vía asignando progresivas cada 500 metros como eje referencial. La ubicación precisa de las obras de drenaje evaluadas y los centros poblados se georreferenciaron con GPS (Datum WGS84).

Esta aproximación metodológica integrada permitió que el Escenario geológico-geomorfológico generado sirviera de soporte analítico para la correlación causal de los problemas viales, estableciendo a su vez el marco espacial definitivo para la totalidad del diagnóstico. Al delimitar con precisión el área de estudio y la ubicación exacta de las obras de drenaje evaluadas, la cartografía resultante permite diferenciar entre las fallas inducidas por factores geodinámicos, como contactos litológicos o conos activos, y aquellas derivadas de deficiencias operacionales en el sistema de drenaje. Esta distinción técnica es fundamental para facilitar la transición hacia la fase de propuestas de mantenimiento, asegurando que las intervenciones propuestas respondan a la naturaleza específica de cada patología identificada.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

Figura 104. Escenario geológico-geomorfológico. Escala 1:25.000



Borja.ula.ve



#### 4.7 Formulación de propuestas de intervención (Fase 7)

Esta fase representa la culminación del proceso investigativo, donde los hallazgos derivados del diagnóstico multicausal se transforman en soluciones técnicas de ingeniería vial de carácter propositivo. La metodología adoptada permite una transición lógica desde los datos obtenidos en las fases previas hacia la formulación de estrategias de intervención que responden a la naturaleza específica de cada problema identificado.

El desarrollo de esta fase se estructura en tres ejes de acción técnica:

**Gestión y control unificado de microcuencas:** Constituye el núcleo propositivo de la investigación, donde se presenta una intervención unificada derivada de la triangulación de tres métodos: el análisis por teledetección, la evaluación multitemporal de la dinámica de las microcuencas y la validación de campo. Esta integración permite jerarquizar las acciones en las microcuencas que interceptan la Troncal 007 basándose en la convergencia de resultados de los tres enfoques.

**Protección hidráulica ante la dinámica fluvial:** Basada en el estudio del comportamiento del río, se formula una propuesta técnica orientada a mitigar los efectos de socavamiento y erosión lateral en los puntos críticos detectados.

**Adecuación por condición operacional:** Derivada de la evaluación directa de la infraestructura, se propone un plan de mantenimiento operativo enfocado en restituir la funcionalidad de los elementos viales y sistemas de drenaje transversal que presentaron deficiencias en campo.

##### 4.7.1 Gestión y control unificado de microcuencas

La formulación de propuestas para el manejo de las microcuencas se fundamenta en la triangulación de resultados obtenidos mediante la teledetección, el análisis multitemporal y la validación físico-natural en campo. Este enfoque permite consolidar una serie de medidas de ingeniería orientadas a mitigar el aporte crítico de sedimentos y la inestabilidad hidrológica que afecta la calzada de la Troncal 007. A continuación, se detallan las propuestas técnicas derivadas de esta integración metodológica, las cuales han sido jerarquizadas para responder de manera eficiente a la dinámica de cada unidad hídrica evaluada. En consecuencia, las medidas de intervención se estructuran a partir de los hallazgos derivados de cada uno de los tres métodos aplicados, permitiendo una visión integral y contrastada de las necesidades de mantenimiento para cada unidad hídrica.

### a) Propuestas de intervención basadas en el análisis de microcuencas por teledetección

Las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial derivadas de esta sección del estudio se fundamentan rigurosamente en el análisis descriptivo de microcuencas por teledetección, específicamente, la identificación de áreas críticas con inestabilidad potencial, problemas de drenaje y susceptibilidad geomorfológica, obtenida mediante la interpretación de sensores remotos. Esta es la base técnica para la priorización y tipología de las acciones de mantenimiento (preventivo, correctivo o predictivo).

- **Cuenca: Quebrada El Barro. Progresiva 2+250**

A continuación, se muestran las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada El Barro.

**Tabla 23.** Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada El Barro

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Protección estructural y gestión del riesgo (prioridad crítica)	Protección de personas e infraestructura vial crítica.	Obra de Paso: La obra de paso vial debe ser diseñada o reforzada con criterios para flujos torrenciales y de detritos.	Estructural (Refuerzo)
	Protección de personas e infraestructura vial crítica.	Regulación: Implementar medidas de ordenamiento territorial para desalentar y/o reubicar viviendas en el cono de deyección.	No Estructural (Regulatoria)
2. Control de detritos y carga sólida (control del cauce)	Controlar la carga de sedimentos y disipar la energía del flujo.	Estructuras: Construcción de diques de retención de sedimentos.	Estructural (Contención)
3. Estabilización de laderas (control de la fuente)	Estabilización del suelo y prevención de la reactivación de deslizamientos.	Drenaje: Construcción de cunetas de coronación y sistemas de drenaje en la parte alta.	Control (Hidrológica)
	Restaurar la resistencia al corte del suelo y reducir la erosión superficial.	Bioingeniería: Reforestación intensiva y estabilización superficial en las zonas de pérdida de vegetación.	Control (Bioingeniería)

- **Cuenca: Quebrada El Diamante. Progresiva 3+250 - 4+000**

A continuación, se muestran las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada El Diamante.

**Tabla 24.** Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada El Diamante

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Control de la fuente (estabilización geotécnica)	Estabilizar las áreas de inestabilidad histórica (coluviones) y reciente (cicatriz).	Drenaje: Construcción de cunetas de coronación y sistemas de drenaje superficial y subsuperficial (drenes franceses) para evitar la saturación.	Control (Hidrológica/Geotécnica)
	Estabilizar las áreas de inestabilidad histórica (coluviones) y reciente (cicatriz).	Bioingeniería: Reforestación y estabilización superficial de la cicatriz con especies de rápido crecimiento y sistemas radiculares profundos.	Control (Bioingeniería)
2. Control del cauce (carga sólida)	Proteger la obra de paso de la vía de la carga de detritos.	Estructuras: Construcción de diques de retención de sedimentos a lo largo del curso principal para capturar el material.	Estructural (Contención)
	Reducir la erosión laminar y el aporte de finos desde la fuente.	Manejo de Laderas: Implementación de prácticas de conservación de suelos y reforestación en las áreas agrícolas.	No Estructural (Manejo Territorial)
3. Monitoreo y prevención estructural	Detectar indicios de socavación y desestabilización estructural.	Monitoreo: Seguimiento continuo del cauce principal y el talud derecho para identificar debilidad estructural o socavación.	Monitoreo/Prevención

- **Cuenca: Quebrada No identificada. Progresiva 6+500**

A continuación, se muestran las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada No identificada.

**Tabla 25.** Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada No identificada

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Prioridad crítica (seguridad humana)	Priorizar la seguridad de los asentamientos humanos.	Zonificación: Realizar un estudio detallado de microzonificación de amenazas (deslizamientos, flujos,	No Estructural (Planificación)

		avenidas torrenciales) para delimitar zonas de riesgo no mitigable.	
	Priorizar la seguridad de los asentamientos humanos.	Gestión de Vivienda: Implementar un plan de ordenamiento que contemple la reubicación de viviendas en zonas de riesgo alto y/o la aplicación de medidas de protección estructural.	No Estructural (Regulatoria/Social)
2. Protección de infraestructura (control del cauce)	Controlar la carga de sedimentos que amenaza la vía.	Estructuras de Retención: Construcción de diques de retención de sedimentos a lo largo del cauce principal para interceptar y estabilizar el material.	Estructural (Contención)
	Controlar la fuente de detritos y la erosión concentrada.	Control de Cárcavas: Implementación de obras de control de cárcavas (reforestación o micro terraceo) en la vertiente SO-NE para estabilizar el punto de inicio de la erosión.	Híbrida (Control/Bioingeniería)
3. Estabilización de la fuente (erosión superficial)	Estabilizar el suelo arcilloso y mitigar la erosión superficial.	Reforestación: Reforestación intensiva en la zona media de la cuenca con especies adecuadas para estabilizar el suelo y restaurar la cubierta vegetal.	Control (Bioingeniería)

- **Cuenca: Quebrada El Tabacal. Progresiva 9+000 - 9+250**

A continuación, se muestran las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada El Tabacal.

**Tabla 26.** Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada El Tabacal

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Prioridad crítica (control del cauce)	Prevenir la obstrucción de la obra de paso y estabilizar el cauce.	Estructuras de Retención: Construcción de diques de retención de sedimentos a lo largo del cauce principal y tributarios de las cárcavas.	Estructural (Contención)
	Reducir la velocidad del flujo y prevenir la erosión regresiva.	Los diques deben diseñarse para disipar la energía, capturar la carga sólida y estabilizar el perfil longitudinal del cauce.	Estructural (Control)
2. Control de la fuente (erosión superficial)	Restaurar la protección edáfica y reducir la erosión laminar y escorrentía.	Bioingeniería: Intervención inmediata en zonas deforestadas y agrícolas utilizando reforestación, zanjas de infiltración, y plantación de gramíneas con raíces profundas.	No Estructural (Bioingeniería/Control)
	Reducir la escorrentía superficial que alimenta la formación de cárcavas.	Implementar técnicas de conservación de suelos para estabilizar el suelo arcilloso.	Control (Edafología)

- **Cuenca: Quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva 11+250**

A continuación, se muestran las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada El Cacique/El Silencio.

**Tabla 27.** Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada El Cacique/El Silencio

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Prioridad crítica (control del cauce)	Interceptar el material grueso (bloques y gravas) del depósito coluvial (SO-NE) antes de la vía.	Construcción de diques de retención de sedimentos (presas de contención) diseñados para capturar material de gran volumen.	Estructural (Contención de Detritos)
	Estabilizar el perfil longitudinal del cauce y reducir la energía cinética del flujo.	Instalar una serie escalonada de diques en el cauce principal y tributarios para disipar la energía y minimizar la erosión regresiva.	Estructural (Control Hidráulico)
	Estabilizar la pendiente y el cauce en puntos de alto riesgo.	Uso de los diques para el confinamiento del material y soporte del cauce.	Estructural (Estabilización Geotécnica)
2. Control de la fuente (erosión laminar)	Controlar la erosión laminar y en surcos y reducir el aporte de sedimentos finos (arcillas y limos).	Implementación de técnicas de bioingeniería (reforestación, zanjas de infiltración, terrazas) y ordenamiento territorial en el sector NO-SE.	Híbrida (Bioingeniería/No Estructural)
	Reducir la turbidez y colmatación por sedimentos finos.	(Medida Complementaria de Diques): Los diques también contribuyen a la decantación de sedimentos finos, actuando como trampas de sedimento.	Estructural (Decantación/Filtro)

- **Cuenca: Quebrada Cacagüito. Progresiva 14+250**

A continuación, se muestran las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada Cacagüito.

**Tabla 28.** Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada Cacagüito.

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Control estructural (riesgo geohidrológico)	Mitigar el aporte de materiales gruesos y finos y reducir el poder erosivo del flujo protegiendo drenajes viales.	Diques de Retención: Construcción de diques de retención de sedimentos a lo largo del curso principal.	Estructural (Contención y Control)

2. Estabilización de laderas (riesgo geotécnico)	Estabilizar la masa de suelo/detritos en la zona de deslizamiento (SO-NE).	Terrazas y Reforestación: Construcción de terrazas para reducir la longitud de la ladera y controlar la escorrentía, seguido de reforestación con vegetación gramínea.	Híbrida (Geotécnica/Bioingeniería)
	Restaurar la protección superficial en las laderas críticas y agrícolas (NO-SE).	Aplicación de la misma medida de reforestación con gramíneas en las laderas agrícolas para restaurar la capa edáfica y lograr una rápida estabilización superficial.	Control (Bioingeniería)

### b) Propuestas de intervención basadas en la evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de las cuencas seleccionadas

En función de los riesgos identificados, se proponen un conjunto de obras de ingeniería destinadas a la mitigación. Estas soluciones se clasifican según su función y simbología técnica, incluyendo la proposición de diques de retención de sedimentos (estructura principal transversal) y muros de encauzamiento/lateral (estructura de contención/encauzamiento), además de obras de drenaje superficial como cunetas de coronación (drenaje superficial de ladera) y cunetas de pie de terraplén (drenaje longitudinal de plataforma vial). Adicionalmente, se plantearán medidas de gestión ambiental y ordenamiento territorial dirigidas a las autoridades competentes, orientadas al manejo integral y sostenible de las cuencas según las variaciones observadas.

La simbología técnica empleada para la representación gráfica de las obras de ingeniería propuestas se detalla en la Tabla 29.

**Tabla 29.** Simbología empleada para la representación gráfica de las obras de ingeniería

Obra de Ingeniería	Color	Estilo de Línea	Tipo de Obra
Dique de retención de sedimentos	Rojo	Doble línea continua	Estructura principal transversal
Muro de encauzamiento/Lateral	Azul oscuro	Doble línea continua	Estructura de contención/Encauzamiento
Extensión de aletas	Negro	Línea continua	Obra de arte vial complementaria
Cuneta de coronación	Amarillo	Segmentada larga	Drenaje superficial de ladera
Cuneta de pie de terraplén	Naranja oscuro	Segmentada corta	Drenaje longitudinal de plataforma vial
Variante en el trazado vial	Naranja claro	Segmentada con puntos	Infraestructura vial

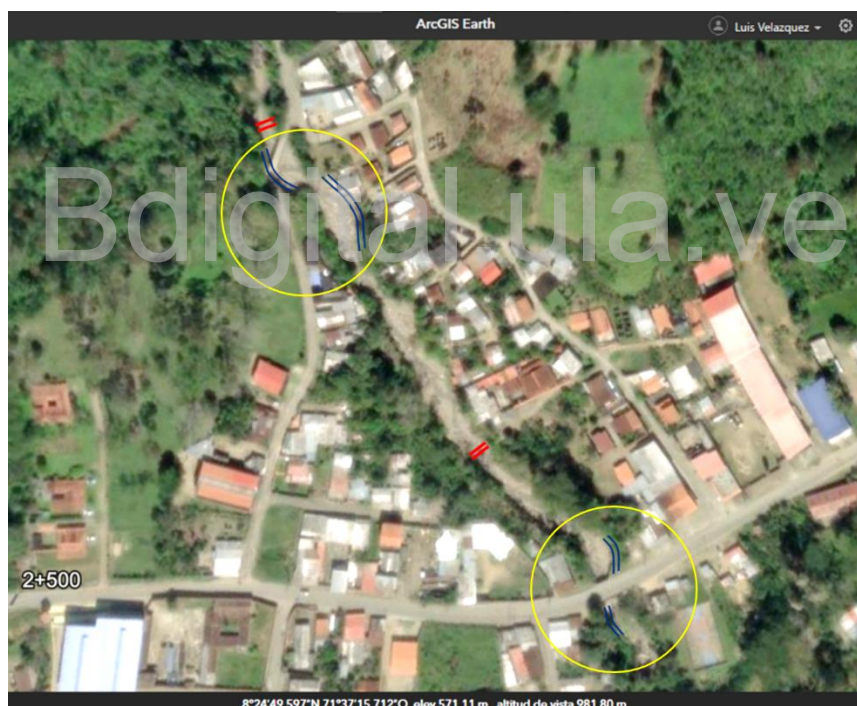
- **Quebrada El Barro. Progresiva 2+500**

Recomendación de ingeniería para mitigar los riesgos detectados

La mitigación debe abordar tanto la estabilidad de las laderas, la fuente del sedimento, como la defensa de la zona urbana (zona de impacto).

- Medidas estructurales de mitigación en el cauce para proteger las viviendas y la vialidad
  - Defensa fluvial en la zona urbana (protección de asentamiento): Se recomienda la construcción de muros de contención de concreto ciclópeo o gaviones, a lo largo de las márgenes para confinar el flujo y proteger las viviendas de la erosión lateral y los desbordes (ver Figura 106).

**Figura 106.** Ubicación de dos de los diques de retención de sedimentos y muros de encauzamiento



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Diques de retención de sedimentos: Adicionalmente, se plantea la construcción de cinco diques de retención aguas arriba del asentamiento (ver Figuras 106 y 107) para capturar el material grueso (rocas, troncos)

proveniente de los deslizamientos y reducir la energía del flujo antes de que ingrese a la zona de alta vulnerabilidad.

**Figura 107.** *Ubicación de los diques de retención de sedimentos*



**Nota.** *Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)*

- Estabilización estructural y del talud: Dado el riesgo de deslizamiento impulsado por el buzamiento desfavorable de las filitas y la fundación inestable, se requieren medidas de contención y refuerzo.
- Refuerzo basal del terraplén: Para contrarrestar la debilidad de la fundación sobre el depósito de pie de vertiente y el cono de deyección, se debe utilizar geomallas de alta resistencia instaladas en la base de la vía para mejorar la capacidad portante, aumentar la resistencia a la tracción y confinar el material fino y no consolidado. También se puede recomendar la remoción y reemplazo del material más susceptible a la saturación, por un material granular compactado de mayor calidad geotécnica.

- Obras de drenaje profundo y superficial: La reducción de la presión de poros es el factor más importante para incrementar la estabilidad del suelo, especialmente en depósitos susceptibles a la saturación hídrica:
  - Drenes horizontales (drenes de penetración): Se plantea la perforación de drenes tubulares que penetren el plano de falla potencial, controlado por el buzamiento desfavorable, y las capas saturadas del depósito disipar rápidamente la presión de poros y reducir el nivel freático dentro del cuerpo del talud y la fundación del terraplén, incrementando la resistencia al corte del suelo.
  - Subdrenes longitudinales (cunetas de pie de vertiente): Se recomienda la instalación de cunetas drenantes a lo largo del pie del talud, en el lado de la quebrada, para interceptar el flujo de agua superficial y subsuperficial antes de que alcance la fundación de la carretera.
  - Control de escorrentía superficial: Se debe asegurar que las cunetas de coronación y los canales de recolección de agua superficial estén en óptimas condiciones para evitar la infiltración de agua en el talud y reducir la saturación.
- Evaluación de la obra de drenaje transversal: En la sección de quebrada El Barro, la obra de drenaje transversal ha sido resuelta mediante la construcción de un puente de concreto armado de gran sección, como se observa en la Figura 108. La ejecución de esta infraestructura es posterior al evento hidrometeorológico de 2005, según se ha constatado a través información de campo. El análisis de campo revela que la estructura incorpora criterios de diseño actualizados post-evento. Consecuentemente, el dimensionamiento de la luz y la capacidad hidráulica de la estructura se consideran óptimos para la gestión de caudales extraordinarios. Esto permite descartar la obra de paso como un factor de vulnerabilidad crítica para la estabilidad y funcionalidad de la infraestructura vial en este punto.

**Figura 108.** *Puente de concreto armado en quebrada El Barro*



- Medidas ambientales dirigidas a las autoridades competentes
  - Manejo integral de laderas y control de la erosión (parte alta y media)
    - Se recomienda implementar drenajes superficiales, como cunetas de coronación, y drenes profundos en las áreas de deslizamiento para reducir la presión de poros.
    - Se plantea la construcción de diques de gaviones escalonados y aplicar técnicas de bioingeniería de suelos, como fajinas o estacado vivo, en las cicatrices de erosión para retener el suelo y facilitar la reforestación intensiva.
- Medidas de riesgo correctivas y de preparación de respuesta dirigidas a las autoridades competentes
  - Gestión de riesgos y ordenamiento territorial: Es necesario prohibir estrictamente nuevas construcciones en las márgenes de la quebrada y en las laderas inestables.
  - A su vez, se recomienda realizar una evaluación exhaustiva de riesgo individual de las viviendas y planificar la reubicación de aquellas ubicadas en áreas de riesgo inaceptable, incluso después de la construcción de las obras estructurales.

- Plan de alerta temprana y educación ambiental/comunitaria: Se plantea establecer un sistema de alerta temprana para crecidas y flujos de detritos en la cuenca, con mecanismos de comunicación eficientes hacia la comunidad. Paralelamente, desarrollar programas de concienciación y educación sobre el riesgo fluvial y la importancia de no construir en las márgenes de la quebrada.

- **Quebrada Carmania/Los Cedros. Progresiva 5+500**

Recomendación de ingeniería para mitigar los riesgos detectados

La mitigación en esta sección urbana es un desafío significativo, requiriendo una combinación de medidas estructurales, gestión de cuencas, medidas bióticas y, potencialmente, decisiones sobre el uso del suelo.

- Medidas estructurales de mitigación en el cauce para proteger las viviendas y la vialidad
  - Muros de encauzamiento y protección de márgenes: Se recomienda la construcción de muros de contención longitudinales a lo largo de ambas márgenes de la quebrada en los tramos urbanizados como se muestra en la Figura 109. Los materiales más adecuados serían gaviones, por su flexibilidad y permeabilidad, o muros de concreto ciclópeo para las secciones más críticas. La disponibilidad de la materia prima para la construcción de estos muros se encuentra en las inmediaciones de los cauces de las quebradas El Peñón o Cacagüito, donde pueden ser aprovechados grandes bloques de roca granítica. Estos muros deben diseñarse considerando los niveles máximos de crecida y el impacto de flujos de detritos, con fundaciones profundas para resistir la socavación. Un estudio geotécnico detallado es indispensable para el diseño de las fundaciones de estos muros.

**Figura 109.** Ubicación de uno de los diques de retención de sedimentos y muros de encauzamiento



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

- Diques de retención de sedimentos (aguas arriba): Se recomienda construir dos diques de retención (gaviones o concreto) en las partes medias y altas de la cuenca, como se muestra en las Figuras 109 y 110. Estos diques son esenciales para capturar material grueso y disipar la energía de los flujos de detritos antes de que impacten la zona urbanizada.

**Figura 110.** Ubicación de los diques de retención de sedimentos



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Remoción de sedimentos y restitución del lecho: Para aumentar la capacidad hidráulica del cauce en la zona urbana, se propone realizar trabajos de dragado selectivo y remoción de los excesos de sedimentos acumulados en el lecho dentro del tramo urbanizado, siempre en conjunto con la construcción de los muros de encauzamiento para definir una sección de flujo estable y eficiente.
- Refuerzo geotécnico de la fundación: El objetivo es mejorar la capacidad portante de la fundación de la carretera sobre el material no consolidado del cono de deyección, reduciendo la vulnerabilidad a la saturación. Se recomienda la instalación de capas de geomallas en la base del terraplén vial para confinar el material del cono de deyección, mejorar la capacidad portante y aumentar la resistencia a la deformación.

- Drenaje subsuperficial
  - Se plantea la implementación de subdrenes longitudinales o tipo "espina de pescado" en la subrasante, para capturar rápidamente el agua infiltrada, disminuyendo la saturación y la presión de poros para prevenir la pérdida de capacidad portante del material del cono durante eventos hidrológicos.
- Medidas de riesgo correctivas y de preparación de respuesta dirigidas a las autoridades competentes
  - Recuperación de la zona de servidumbre y reubicación de viviendas: Es recomendable realizar un estudio exhaustivo de riesgo y vulnerabilidad de cada vivienda cercana a la quebrada. Donde el riesgo sea inaceptable, incluso con las obras de mitigación, se debe considerar seriamente la reubicación de las viviendas y la recuperación de la zona de servidumbre de la quebrada. Esta franja debe mantenerse libre de construcciones para permitir el paso seguro de los flujos extremos. Es necesario implementar y hacer cumplir regulaciones de uso del suelo que prohíban nuevas construcciones en áreas de riesgo fluvial.
  - Plan de alerta temprana y educación ambiental/comunitaria: Se plantea establecer un sistema de alerta temprana para crecidas y flujos de detritos en la cuenca, con mecanismos de comunicación eficientes hacia la comunidad. Paralelamente, desarrollar programas de concienciación y educación sobre el riesgo fluvial y la importancia de no construir en las márgenes de la quebrada.

- **Quebrada No identificada. Progresiva 6+500**

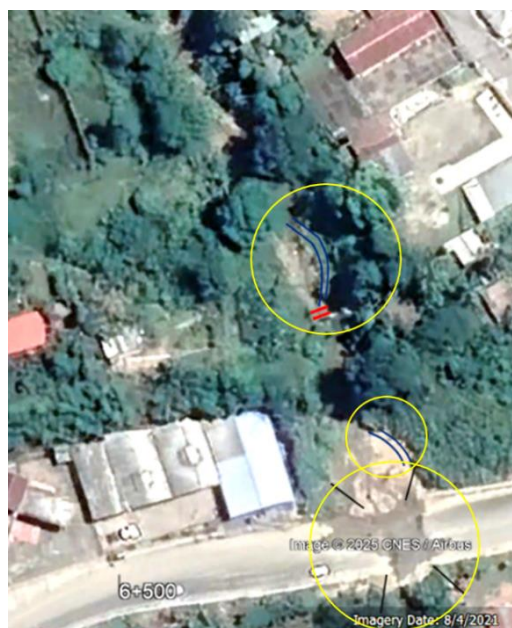
Recomendación de ingeniería para mitigar los riesgos detectados

La mitigación debe ser un enfoque multifacético que priorice la protección de la vida humana y la infraestructura existente, abordando el drenaje, el control del cauce y la gestión de riesgos.

- Medidas estructurales de mitigación para proteger la vialidad
  - Drenaje urbano y vial (prioridad inmediata): Para eliminar el problema crónico de agua en el pavimento y la superficie urbana, se recomienda implementar un sistema de cunetas revestidas y canales adecuados a lo largo de la carretera y en las calles del asentamiento para capturar y evacuar eficientemente el agua de escorrentía superficial.

- Se recomienda sustituir la alcantarilla existente por una obra de paso de mayor capacidad hidráulica, suficiente para evitar obstrucciones. Es necesario evaluar la necesidad de un sistema de colectores subterráneos en las zonas más críticas para captar el agua de infiltración o de pequeñas fuentes de agua que puedan contribuir al anegamiento.
- Muros de encauzamiento y protección de márgenes: Se propone la construcción de muros de contención a lo largo de la margen izquierda de la quebrada, especialmente en los tramos más cercanos a las edificaciones y la vía, como se muestra en la Figura 111. Estos muros de contención podrían ser diques de pedraplén, construidos con materiales extraídos en las cercanías de El Peñón o Cacagüito. El diseño debe considerar el impacto de posibles flujos de detritos. Se requiere una evaluación geotécnica detallada para el diseño de las fundaciones de estos muros, dada la litología y la inestabilidad.
- Diques de retención de sedimentos (aguas arriba): La construcción de un dique de gaviones o concreto aguas arriba de esta sección es fundamental para capturar el material grueso y disipar la energía de los flujos de detritos que se forman en la cuenca alta (ver Figura 111).

**Figura 111.** Ubicación del dique de retención de sedimentos, muro de encauzamiento y aletas de la alcantarilla propuesta.



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

- Sistema de drenaje subsuperficial: Se recomienda implementar un sistema de drenes profundos, como los subdrenes longitudinales o tipo espina de pescado, en la subrasante de la carretera, para capturar el agua de infiltración y afloramiento que contribuye a la saturación crónica de los depósitos de pie de vertiente y de la terraza aluvial, incrementando la capacidad portante de la fundación y reduciendo el riesgo de falla del pavimento.
- Medidas de riesgo correctivas y de preparación de respuesta dirigidas a las autoridades competentes
  - Reubicación de viviendas (evaluación de riesgo extremo): Se propone realizar un estudio detallado de riesgo y vulnerabilidad de cada vivienda en la zona de influencia de la quebrada. Para aquellas edificaciones que se encuentren en zonas de riesgo inaceptable, incluso con la implementación de obras de mitigación, se debe considerar y planificar la reubicación de las familias a áreas seguras.
  - Plan de alerta temprana y educación comunitaria: Es necesario implementar un sistema de alerta temprana para crecidas y flujos de detritos, con sensores en la cuenca alta y comunicación efectiva, desarrollar programas de educación comunitaria sobre los riesgos y las acciones a tomar durante una emergencia para preparar a la comunidad ante eventos extremos y reducir la pérdida de vidas.

- **Quebrada Los Aponcio. Progresiva 8+250**

- **Cuenca alta**

Recomendación de ingeniería para mitigar los riesgos detectados

La estrategia debe ser integral y enfocarse en la estabilización de laderas para controlar los deslizamientos, lo que a su vez reducirá el aporte de sedimentos a la quebrada.

- Medidas ambientales y geotécnicas en la cuenca, dirigidas a las autoridades competentes para el control del origen de los deslizamientos
  - Se propone la instalación de drenaje superficial y subsuperficial mediante la instalación de cunetas de coronación en la parte superior de los deslizamientos para interceptar y desviar el agua de escorrentía y la construcción de drenes horizontales para reducir las presiones de poros internas en las masas deslizadas, disminuyendo la fuerza impulsora. El

propósito es detener o ralentizar el movimiento de las masas deslizadas y restaurar la estabilidad superficial de las laderas.

- Se deben aplicar técnicas de bioingeniería de suelos en las cicatrices de deslizamientos, una vez estabilizados los movimientos principales. Esto incluye la hidrosiembra, la plantación de especies pioneras con sistemas radiculares profundos como vetiver, bambú y/o arbustos nativos, para promover la revegetación.
- En la zona del pie o en secciones activas de los deslizamientos más superficiales, se pueden construir pequeños muros de gaviones escalonados para confinar el material y crear plataformas para la revegetación.
- Manejo forestal y control de la erosión en la cuenca alta: Se plantea implementar un plan de reforestación en las áreas degradadas o deforestadas de la cuenca alta, utilizando especies nativas adaptadas que mejoren la infiltración y estabilicen el suelo para prevenir la aparición de nuevos deslizamientos y reducir el aporte de escorrentía. En las áreas agrícolas, promover prácticas de agricultura de conservación y siembra en curvas de nivel para minimizar la erosión del suelo y la generación de escorrentía.

### **Cuenca baja**

- Medidas estructurales de mitigación para proteger la vialidad: Dada la magnitud de la degradación, la alta carga de sedimentos y la amenaza directa a la infraestructura, las medidas deben ser estructurales integrales, complementadas con rehabilitación ambiental.
- Muro de contención rígido (concreto ciclópeo o gaviones): Se recomienda construir un muro de contención longitudinal en el margen derecho de la quebrada, especialmente en el tramo adyacente a la carretera, como se muestra en la Figura 112. La localización del muro longitudinal en esta sección responde a la dinámica geomorfológica del cauce, específicamente a la tendencia migratoria de la quebrada y su consecuente socavación lateral en el margen adyacente, lo cual requiere una obra de defensa. El concreto ciclópeo o gaviones reforzados serían opciones viables, diseñados para soportar el empuje hidrostático y el impacto de los flujos de detritos, con el propósito de encauzar y confinar el flujo en la sección más crítica, protegiendo

la carretera. Estos muros deben tener fundaciones profundas para resistir la socavación y anclajes adecuados si la ladera circundante también es inestable. La disponibilidad de la materia prima para la construcción de estos muros se verifica en las inmediaciones de los cauces de las quebradas El Peñón o Cacagüito, donde se localizan y pueden ser aprovechados grandes bloques de roca granítica.

**Figura 112.** Ubicación del dique de retención de sedimentos y muro de encauzamiento



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- 
- Dique de retención de sedimentos: Se recomienda la construcción de un dique de retención de sedimentos ubicado como se muestra en la Figura 112. Este debe estar diseñado para capturar volúmenes significativos de detritos y rocas, disipando la energía de los flujos antes de que adquieran su máximo potencial destructivo. Esta es una medida crucial, ya que el muro de encauzamiento por sí solo no detendrá la afluencia masiva de sedimentos.

**Figura 113.** Sedimentos y colmatación aguas arriba y aguas abajo del cajón de paso



- Remoción de sedimentos y restitución del lecho (dragado selectivo): Para reestablecer la capacidad hidráulica del cauce, se recomienda realizar trabajos de dragado y remoción de los volúmenes excesivos de sedimentos acumulados en el lecho (ver Figura 113). Esto debe ir acompañado de la construcción de los muros de encauzamiento para definir una sección de diseño adecuada.
- o Medidas ambientales y geotécnicas en la cuenca, dirigidas a las autoridades competentes para el control del origen de los deslizamientos
  - Programa de revegetación ribereña (post-obras): Se recomienda implementar un plan intensivo de revegetación de las márgenes recién protegidas con especies nativas adaptadas, que puedan desarrollarse rápidamente y proveer estabilidad superficial a largo plazo para estabilizar la superficie una vez que las obras estructurales han confinado el cauce.

- **Quebrada El Tabacal. Progresiva 9+000**

- **Cuenca alta**

Recomendación de ingeniería para mitigar los riesgos detectados.

La estrategia de mitigación debe ser un plan de manejo integral de cuenca que priorice detener la erosión en las laderas para reducir la fuente del sedimento, seguido de la estabilización del cauce.

- Medidas estructurales de mitigación para proteger la vialidad:
  - Dique de retención de sedimentos: Se recomienda la construcción de diques de retención de sedimentos en el cauce principal para interceptar la gran cantidad de detritos provenientes de las cárcavas y estabilizar el perfil longitudinal del río, disipando la energía antes de que llegue a las zonas vulnerables. También se recomienda estabilizar los márgenes más vulnerables con la construcción de muros de gaviones para prevenir la erosión lateral y el desborde en las cercanías de la infraestructura.
- Medidas ambientales en la cuenca, dirigidas a las autoridades competentes:
  - Se recomienda la implementación de pequeños diques de gaviones, piedra seca o ramas (bioingeniería) dentro de las cárcavas para reducir la velocidad del flujo, crear pequeños escalones (disipación de energía) y promover la sedimentación. También es necesario construir cunetas de desviación en la cabecera de las cárcavas para interceptar el agua de escorrentía antes de que entre al área erosionada y redirigirla a zonas estables o con menor pendiente. Se debe rellenar y plantar los fondos y taludes de las cárcavas estabilizadas con especies de raíces densas y resistentes a la erosión, como vetiver, pastos y arbustos nativos.
  - Manejo forestal y control de escorrentía en laderas: Es necesario reforestar intensamente las zonas deforestadas (laderas altas y medias) con especies nativas adaptadas a los suelos residuales de filitas/granito, e implementar cunetas de coronación o terrazas escalonadas en curvas de nivel para capturar y controlar la escorrentía superficial en las áreas desnudas, facilitando la infiltración y evitando que el agua forme nuevas cárcavas.

### **Cuenca baja**

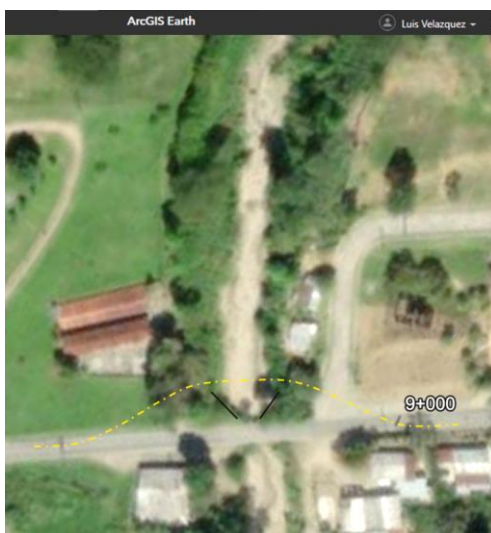
- Medidas estructurales de mitigación en el cauce para proteger la vialidad: La prioridad es proteger la infraestructura y restablecer la estabilidad del cauce, con un fuerte énfasis en la combinación de obras duras y blandas.
  - Diques de retención de sedimentos (aguas arriba): Se recomienda instalar diques de gaviones aguas arriba de la urbanización. Estos diques actúan como filtros de sedimentos, atrapando material grueso y reduciendo la capacidad erosiva del flujo antes de que alcance las zonas críticas. El

propósito es reducir la carga de sedimentos que llega a esta sección de la quebrada, disipar energía y estabilizar el perfil longitudinal.

- Reubicación del puente: El análisis de la geometría del cauce en la ubicación actual del puente revela que la estructura se sitúa precisamente en un tramo curvo de la quebrada. Esta configuración es hidráulicamente desfavorable, ya que la trayectoria de flujo dominante impacta directamente contra el estribo ubicado en la margen cóncava. Esta incidencia incrementa significativamente el riesgo de erosión y socavación localizada en la fundación del estribo, comprometiendo su estabilidad estructural.

Se propone la reubicación del puente algunos metros aguas arriba de su posición actual, trasladándolo a un tramo más rectilíneo del cauce, como se indica en la Figura 114. Esta realineación optimizaría las condiciones de acceso del flujo, minimizando los fenómenos erosivos. En caso de que la reubicación no sea viable desde una perspectiva económica, se deben considerar medidas de mitigación para el puente existente. Estas incluyen, de forma prioritaria, una evaluación geotécnica exhaustiva de las fundaciones del estribo afectado, el diseño de protecciones contra socavación en la base del estribo y la construcción de las aletas, con el propósito de encauzar adecuadamente el flujo a la salida y proteger la integridad del terraplén de acceso.

**Figura 114.** *Propuesta de reubicación del puente y extensión de aletas en el puente actual*



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Medidas ambientales en la cuenca, dirigidas a las autoridades competentes:
  - Encauzamiento del lecho fluvial y revegetación ribereña: Se recomienda realizar trabajos de dragado selectivo y remoción de excesos de sedimentos para restaurar la sección hidráulica de diseño. También se plantea restaurar la estabilidad biológica de las márgenes y reducir la erosión superficial, mediante la plantación intensiva de especies nativas como árboles y arbustos riparios y/o bambú, que tengan sistemas radiculares densos y resistentes. Esta vegetación, además de estabilizar el suelo, mejora el hábitat.

- **Quebrada Cacagüito. Progresiva 14+250**

Dada la magnitud y la litología, la solución recomendada es una estrategia combinada que ataque el agua, como la causa principal, y refuerce la masa deslizada. Se plantean recomendaciones enfocadas al mantenimiento de la carretera y recomendaciones dirigidas a las autoridades ambientales con el fin de minimizar los daños en la cuenca alta.

- Medidas estructurales de mitigación en el cauce para proteger la vialidad
  - Diques de retención de sedimentos: Se propone el encauzamiento y la estabilización del perfil longitudinal de la quebrada a través de la construcción de diques de retención de sedimentos, espaciados a lo largo del cauce, como se muestra en las Figuras 115 y 116. El objetivo primario de estas estructuras es disipar la energía cinética del flujo, reducir la velocidad media y facilitar la retención de sedimento grueso y material de arrastre.

La necesidad de estructuras de retención se acentúa en las proximidades de la obra de paso, debido a que el tramo final de la quebrada presenta una alineación rectilínea con una orientación prácticamente perpendicular al eje de la carretera. Esta configuración, combinada con las fuertes pendientes longitudinales aguas arriba, confiere una elevada energía específica al flujo. La construcción de diques en esta zona es crucial para mitigar el riesgo de impacto de grandes bloques de roca y detritos contra la estructura de la alcantarilla/cajón, la cual ya exhibe daños estructurales por impacto en sus pilas centrales, como se evidencia en la Figura 117.

**Figura 115.** Ubicación de los diques de retención de sedimentos



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

**Figura 116.** Ubicación de los diques de retención y cunetas de pie de terraplén



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

**Figura 117.** Daños por impacto al pilar central



La tendencia rectilínea del cauce en la zona adyacente al cruce permite inferir una baja probabilidad de socavación lateral significativa. Consecuentemente, no se considera indispensable la expansión o el refuerzo de las aletas existentes en el cajón de paso. No obstante, dado que los terraplenes de acceso a la obra de cruce son susceptibles a filtraciones y daños por humedad, se recomienda la implementación de cunetas de pie de terraplén. Estas estructuras de drenaje longitudinal deben ser construidas en la base de los taludes de acceso, específicamente en el tramo aguas arriba, para interceptar y conducir el escurrimiento superficial, previniendo la saturación del material del terraplén y el potencial deterioro de la subrasante de la vía.

- Medidas ambientales y geotécnicas en la cuenca alta, dirigidas a las autoridades competentes para el control del origen del deslizamiento
  - Control hidrológico y drenaje: La presencia de agua (lluvias e infiltración) es el principal factor desestabilizador, ya que aumenta el peso de la masa de suelo y reduce su resistencia al corte (presiones de poro).
  - Drenaje superficial (cresta y lados): Diseño e implementación de cunetas interceptoras y canales revestidos (con concreto o mampostería) en la cresta y a lo largo de los límites del deslizamiento para capturar y desviar el agua de escorrentía superficial lejos de la cicatriz de arranque y del cuerpo deslizado. El agua desviada debe ser evacuada hacia un cauce estable, que podría ser la misma quebrada.
  - Drenaje subsuperficial (profundo): Instalación de drenes horizontales, que son tuberías perforadas insertadas en la ladera para interceptar las aguas de infiltración, reduciendo las presiones de poro dentro de la masa inestable. Estos deben proyectarse a lo largo del cuerpo principal del deslizamiento. También se recomienda la construcción de zanjas drenantes filtrantes perpendiculares a la pendiente para interceptar el flujo de agua subsuperficial y dirigirlo hacia los canales de evacuación.
- Estabilización estructural y refuerzo (zona de arranque y pie): Una vez controlada la fuente de agua, se debe reforzar la ladera, especialmente en las zonas críticas.
  - Muros de contención (pie del deslizamiento): Dado que los materiales deslizados podrían ser transportados por la quebrada hasta la obra de paso, se recomienda la construcción de un muro de contención, posiblemente de gaviones o mampostería, por ser más flexibles y permeables, en el pie del

deslizamiento, para actuar como tacón de contención y estabilizar el material acumulado.

- Soluciones biotécnicas y restauración: A mediano y largo plazo, la cobertura vegetal es crucial para la estabilidad superficial y el control de la erosión. Se deben emplear técnicas de estabilización biotécnica como la hidrosiembra en las áreas superficiales expuestas de la cicatriz. Plantar especies vegetales con raíces profundas y resistentes a la sequía que ayuden a consolidar el suelo y consumir humedad, aumentando la estabilidad superficial de la ladera.
- **Quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva 15+000**
  - Medidas estructurales para proteger la vialidad:
    - Se recomienda la prolongación de las aletas de entrada de la actual obra de drenaje, tal como se esquematiza en la Figura 118. Esta medida estructural busca controlar la erosión lateral, impidiendo que la quebrada ensanche su cauce y socave el terraplén, y a su vez, garantizar el encauzamiento eficiente del caudal y el paso adecuado de los sedimentos durante crecidas extraordinarias.
    - Se plantea la implementación de cunetas de pie de terraplén en la base de los taludes de acceso, específicamente en el tramo aguas arriba, para interceptar y conducir el escurrimiento superficial, previniendo la saturación del material del terraplén y el potencial deterioro de la subrasante de la vía.

**Figura 118.** Prolongación de las aletas de entrada y cunetas de pie de terraplén



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

**c) Propuestas de intervención basado en el diagnóstico en campo y evaluación de obras de drenaje**

A partir de la validación técnica realizada *in situ*, se presentan las propuestas de intervención diseñadas para mitigar la vulnerabilidad en los puntos críticos del tramo vial. Estas soluciones integran medidas de ingeniería estructural y de control de torrentes, priorizando la recuperación de la capacidad hidráulica y la estabilización de la dinámica fluvial. Es importante señalar que las propuestas de sustitución de obras de paso por estructuras de luz libre serán sometidas a un análisis comparativo frente a los demás métodos evaluados. La solución definitiva se presentará en la sección de Propuestas de Intervención Estructural Unificada, fundamentada en la integración sistémica de la teledetección, la evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica y el diagnóstico funcional de campo.

- **Quebrada Carmania/Los Cedros (Progresiva: 5+500)**

Como estrategia de mitigación ante la vulnerabilidad intrínseca del sector asentado sobre el cono de deyección, se presentan las siguientes propuestas de intervención técnica.

En primer lugar, para el control de la carga sedimentológica, se plantea la construcción de diques de retención de sedimentos en los sectores medio y superior de la cuenca. Dada la composición litológica heterogénea detectada, estas estructuras son fundamentales para interceptar tanto la matriz de finos proveniente de las filitas como los clastos graníticos de mayor resistencia, evitando que alcancen la zona urbana y la infraestructura vial bajo regímenes de flujo extraordinarios.

En segundo lugar, se prescribe un programa de mantenimiento operacional urgente centrado en la remoción mecánica del material orgánico y antrópico que colmata actualmente el cauce. Esta acción es crítica para restituir la sección transversal útil de la alcantarilla tubular y recuperar su capacidad de diseño original. Complementariamente, se recomienda la estabilización de los márgenes mediante el reforzamiento de las técnicas de bioingeniería existentes (bambú), con el fin de mitigar la erosión lateral y prevenir el aporte de detritos vegetales que actúan como agentes de obstrucción en la entrada de la obra de paso.

- **Quebrada No identificada. Progresiva: 6+500**

Como estrategia de mitigación y estabilización para este sector, se presentan las siguientes propuestas de intervención y mantenimiento vial. Tras la evaluación integral de las condiciones de la cuenca y la capacidad de la infraestructura actual, se plantea la implementación de diques de retención de sedimentos orientados al control del transporte de

finos, complementada con la sustitución de la estructura existente por una obra de paso de mayor sección hidráulica. Dado que la calzada presenta un ancho aproximado de 20 m, la solución mediante un puente representaría una inversión de alta cuantía, en su lugar, se considera técnicamente favorable la construcción de una alcantarilla de sección amplia o cajón de paso. Esta recomendación se sustenta en el análisis litológico de la cuenca, compuesta predominantemente por filitas meteorizadas, lo que minimiza el riesgo de fallas por impacto de bloques de gran tamaño contra los elementos estructurales del cajón.

- **Quebrada El Tabacal. Progresiva: 9+000**

Como estrategia integral para la estabilización fluvial del sector, se presentan las siguientes propuestas de intervención técnica. Para la gestión de la sedimentación fina, se plantea la implementación estratégica de diques de retención de sedimentos en la cuenca alta y media. El objetivo fundamental es regular el transporte de finos, reduciendo de manera efectiva la carga de depósitos que altera la morfología del lecho y contribuye a la migración lateral del cauce.

Simultáneamente, para la protección y estabilización de las riberas, se recomienda la ejecución de obras de defensa fluvial, tales como enrocados de protección, muros de gaviones o diques longitudinales de encauzamiento, que proporcionen resistencia mecánica contra la erosión en ambas márgenes de la quebrada. Estas intervenciones son imperativas para lograr el confinamiento del cauce y la reorientación del eje hidráulico hacia la sección central de la luz del puente, garantizando así que el flujo mantenga el comportamiento hidráulico previsto en el diseño original de la estructura.

- **Quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva: 11+250**

Para mitigar el riesgo de colapso y garantizar la operatividad de la vía, se proponen dos medidas prioritarias de alto impacto técnico. En primer lugar, se plantea el reemplazo estructural del cajón multicelda existente por un puente de luz libre. Esta solución técnica elimina los pilares intermedios, identificados como elementos críticos de obstrucción, lo que facilita el tránsito sin restricciones de detritos y optimiza el comportamiento hidráulico-sedimentológico durante eventos de crecidas extraordinarias.

Complementariamente, para el control de detritos en el origen, se propone la construcción de diques de retención de sedimentos en las zonas altas de la cuenca. El objetivo fundamental de estas estructuras es la interceptación de la carga de arrastre de mayor granulometría (bloques graníticos), permitiendo la disipación de la energía del flujo torrencial.

Esta medida actúa como una barrera de protección para la nueva infraestructura de paso, salvaguardándola de potenciales fallos por impacto y asegurando su capacidad a largo plazo.

- **Quebrada Cacagüito. Progresiva: 14+250**

En este sector, la criticidad del riesgo se ve validada por los antecedentes hidrometeorológicos de la cuenca. Registros y testimonios locales confirman que, durante el evento extremo del año 2005, la infraestructura existente sufrió una colmatación total, provocando el rebase del flujo sobre la plataforma vial y comprometiendo la transitabilidad del tramo.

Por consiguiente, la solución técnica prioritaria radica en el reemplazo estructural por un puente de sección libre, medida que elimina los obstáculos internos y optimiza la eficiencia hidráulica-sedimentológica de la descarga. Complementariamente, se prescribe la construcción de diques de retención de sedimentos en las cotas superiores de la cuenca; estas estructuras permitirán la interceptación de la carga de arrastre masiva (detritos y bloques) antes de su arribo a la vía, disipando la energía cinética del flujo y garantizando la integridad física de la nueva infraestructura de paso propuesta.

- d) Propuestas de intervención estructural unificada basadas en el análisis de microcuencas por teledetección, evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de las cuencas y diagnóstico en campo**

En esta sección se consolidan las propuestas de intervención estructural y de control para cada microcuenca, derivadas de la aplicación y el análisis cruzado de los diferentes enfoques metodológicos. Esta integración se fundamenta en el principio de convergencia diagnóstica, donde el análisis descriptivo por teledetección, el diagnóstico en campo y evaluación de obras de drenaje, y la evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica identificaron la misma problemática morfohidrológica y geotécnica subyacente que afecta la vulnerabilidad de la infraestructura en el tramo La Victoria-Tovar, de la carretera T007. Cada método contribuyó con un nivel distinto de resolución espacial, temporal o de detalle de ingeniería, ofreciendo una perspectiva que abarcó desde la identificación de susceptibilidad a escala regional (teledetección) hasta la validación de fallas puntuales y la cuantificación de la dinámica erosiva (diagnóstico en campo y evaluación multitemporal). La fusión de las recomendaciones consecuentemente valida las soluciones planteadas, demostrando que la propuesta de ingeniería resultante está ampliamente respaldada por múltiples líneas de evidencia independientes y complementarias, incrementando la validez técnica de las acciones de

mitigación propuestas. La síntesis de las propuestas de intervención resultantes, organizadas por cuenca, puede consultarse en la secuencia de las Tablas 30 a 42.

- **Quebrada El Barro. Progresiva 2+500**

**Tabla 30.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Barro*

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Diques de Retención de Sedimentos	Teledetección y Multitemporal (Combinada)	5	Estructural (Contención)
Muros de Contención / Gaviones (Defensa Fluvial)	Evaluación Multitemporal	4	Estructural (Defensa)
Cunetas de Coronación	Teledetección y Multitemporal (Combinada)	En la parte alta y áreas de deslizamiento (Lineal)	Control (Hidrológica)
Drenes Horizontales (Drenes de Penetración)	Evaluación Multitemporal	Perforación (Número indeterminado)	Estructural (Drenaje Profundo)
Subdrenes Longitudinales (Cunetas de Pie de Vertiente)	Evaluación Multitemporal	A lo largo del pie del talud (Lineal)	Estructural (Drenaje Superficial)
Geomallas de Alta Resistencia	Evaluación Multitemporal	En la base de la vía (Superficial)	Estructural (Refuerzo)
Bioingeniería de Suelos / Reforestación	Teledetección y Multitemporal (Combinada)	En cicatrices de erosión y zonas de pérdida de vegetación (Superficial)	Control (Bioingeniería)

- **Quebrada El Diamante. Progresiva 3+250 - 4+000**

**Tabla 31.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Diamante*

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Drenaje Subsuperficial (Drenes Franceses)	Teledetección	En zonas de inestabilidad (Lineal)	Control (Geotécnica/Hidrológica)
Drenaje Superficial (Cunetas de Coronación)	Teledetección	En la cresta y laderas (Lineal)	Control (Hidrológica)
Diques de Retención de Sedimentos	Teledetección	1	Estructural (Contención)
Reforestación y Bioingeniería de Laderas	Teledetección	En cicatrices y laderas (Superficial)	Control (Bioingeniería)
Prácticas de Conservación de Suelos	Teledetección	En áreas agrícolas (Superficial)	No Estructural (Manejo Territorial)
Monitoreo Continuo	Teledetección	Continuo (Operacional)	Monitoreo/Prevención

- **Quebrada La Parada. Progresiva 4+250 – 4+500**

**Tabla 32.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada La Parada*

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Drenaje Superficial (Cunetas de Coronación)	Teledetección	En parte alta de la cuenca (Lineal)	Control (Hidrológica)
Diques de Corrección Torrencial / Diques de Pie	Teledetección	En la cárcava activa (Puntual/Lineal)	Estructural/Híbrida
Diques de Retención de Sedimentos Escalonados	Teledetección	2	Estructural (Contención)
Revegetación y Bioingeniería (Cárcavas y Laderas)	Teledetección	En cárcava y áreas agrícolas (Superficial)	Híbrida/No Estructural
Prácticas de Conservación de Suelos (Áreas Agrícolas)	Teledetección	En áreas agrícolas (Superficial)	No Estructural (Manejo Territorial)

- **Quebrada Carmania/Los Cedros. Progresiva 5+500**

**Tabla 33.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada Carmania/Los Cedros*

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Diques de Retención de Sedimentos	Teledetección y Multitemporal (Combinada)	2	Estructural (Contención)
Muros de Encauzamiento y Contención Longitudinal (Gaviones/Concreto)	Evaluación Multitemporal	3	Estructural (Defensa)
Drenaje Subsuperficial (Subdrenes Longitudinales)	Evaluación Multitemporal	En la subrasante (Lineal)	Estructural (Drenaje)
Refuerzo de Fundación con Geomallas	Evaluación Multitemporal	En la base del terraplén (Superficial)	Estructural (Refuerzo Geotécnico)
Obras de Control de Cárcavas (Torreteras/Gaviones de Retención)	Teledetección	En áreas de erosión concentrada (Puntual/Lineal)	Híbrida (Estructural/Control)
Prácticas de Conservación de Suelos (Terrazas/Zanjas de Infiltración)	Teledetección	En zonas agrícolas/laderas (Superficial)	No Estructural (Manejo Territorial)
Revegetación Asistida y Reforestación	Teledetección y Multitemporal (Combinada)	En laderas y zonas de erosión (Superficial)	Control (Bioingeniería)
Dragado Selectivo y Remoción de Sedimentos	Evaluación Multitemporal	En el tramo urbanizado del cauce (Volumétrico)	Correctiva (Mantenimiento)

- **Quebrada No identificada. Progresiva 6+500**

**Tabla 34.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada No identificada*

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Diques de Retención de Sedimentos	Combinada (Teledetección, Campo, Multitemporal)	1	Estructural (Contención)
Obra de Paso de Mayor Capacidad Hidráulica	Campo y Multitemporal (Combinada)	1	Estructural (Sustitución/Refuerzo)
Muros de Encauzamiento y Protección de Márgenes (Pedraplén/Contención)	Evaluación Multitemporal	2	Estructural (Defensa)
Sistema de Drenaje Subsuperficial	Evaluación Multitemporal	En subrasante (Lineal)	Estructural (Drenaje Profundo)
Cunetas Revestidas y Canales Urbanos	Evaluación Multitemporal	A lo largo de la carretera/asentamiento (Lineal)	Estructural (Drenaje Superficial)
Obras de Control de Cárcavas (Reforestación/Micro Terraceo)	Teledetección	En la vertiente SO-NE (Superficial/Puntual)	Híbrida (Control/Bioingeniería)
Reforestación Intensiva	Teledetección	En zona media de la cuenca (Superficial)	Control (Bioingeniería)

- **Quebrada Los Aponcio. Progresiva 8+250**

**Tabla 35.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada Los Aponcio*

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Diques de Retención de Sedimentos	Combinada (Teledetección, Campo, Multitemporal)	1	Estructural (Contención)
Muro de Contención Rígido (Concreto/Gaviones) / Estructuras de Defensa Fluvial (Enrocados/Gaviones)	Combinada (Evaluación Multitemporal, Diagnóstico en Campo)	1	Estructural (Defensa)
Drenes Horizontales (Penetración)	Evaluación Multitemporal	En masas deslizadas (Número indeterminado)	Estructural (Drenaje Profundo)
Cunetas de Coronación	Combinada (Teledetección y Multitemporal)	En parte alta y alrededor de deslizamientos (Lineal)	Control (Hidrológica)

Reforestación Intensiva y Bioingeniería	Combinada (Teledetección y Multitemporal)	En áreas sin vegetación y cicatrices (Superficial)	Control (Bioingeniería)
Muros de Gaviones Escalonados	Evaluación Multitemporal	En pie de deslizamientos activos (Puntual/Lineal)	Estructural (Contención/Control)
Remoción de Sedimentos (Dragado Selectivo)	Combinada (Diagnóstico en Campo y Multitemporal)	En la sección del cajón/cauce (Volumétrico)	Correctiva (Operacional)

- **Quebrada El Tabacal. Progresiva 9+000**

**Tabla 36.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Tabacal*

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Diques de Retención de Sedimentos	Combinada (Teledetección, Campo, Multitemporal)	1	Estructural (Contención)
Defensa Fluvial Longitudinal (Muros/Gaviones/Enrocados)	Campo y Multitemporal (Combinada)	En ambos márgenes vulnerables (Lineal)	Estructural (Defensa)
Obras de Control de Cárcavas (Diques de Gaviones/Ramas)	Multitemporal	Múltiples, dentro de cárcavas (Puntual/Lineal)	Híbrida (Control)
Drenaje Superficial (Cunetas de Desviación)	Teledetección y Multitemporal (Combinada)	En cabeceras de cárcavas y laderas (Lineal)	Control (Hidrológica)
Reforestación Intensiva y Bioingeniería	Combinada (Teledetección y Multitemporal)	En laderas y taludes de cárcavas (Superficial)	No Estructural (Bioingeniería)
Remoción de Sedimentos (Dragado Selectivo)	Evaluación Multitemporal	En el cauce principal (Volumétrico)	Correctiva (Operacional)
Aletas y Protección contra Socavación en Obra de Paso	Evaluación Multitemporal (Alternativa)	1 (unidad o conjunto de elementos)	Estructural (Mitigación)
Reubicación del Puente	Evaluación Multitemporal (Ideal)	1	Estructural (Reingeniería)

- **Quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva 11+250**

**Tabla 37. Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Cacique/El Silencio**

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Dique de Retención de Sedimentos (Presa de Contención) / Diques Escalonados (Serie)	Combinada (Teledetección, Campo, Multitemporal)	1	Estructural (Contención)
Sustitución de Obra de Drenaje (Puente de Luz Libre)	Diagnóstico en Campo	1 (Nota: Se optó la permanencia de la estructura bajo un régimen de mantenimiento permanente)	Estructural (Reemplazo/Adaptación)
Refuerzo de Elementos de Soporte y Encauzamiento	Diagnóstico en Campo	1	Estructural (Mitigación/Refuerzo)
Muro de Encauzamiento (Gaviones o Concreto)	Evaluación Multitemporal	1, Longitudinal, margen derecha (Lineal)	Estructural (Defensa)
Reforestación y Bioingeniería de Laderas	Combinada (Teledetección y Multitemporal)	En laderas y márgenes (Superficial)	Híbrida (Control/Bioingeniería)
Zanjas de Infiltración / Terrazas	Teledetección	En sector NO-SE (Lineal/Superficial)	No Estructural (Manejo Territorial)

- **Quebrada Cacagüito. Progresiva 14+250**

**Tabla 38. Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada Cacagüito**

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Diques de Retención de Sedimentos	Combinada (Teledetección, Campo, Multitemporal)	4	Estructural (Contención)
Sustitución de Obra de Drenaje (Puente de Sección Libre)	Diagnóstico en Campo	1 (Nota: Se optó la permanencia de la estructura bajo un régimen de mantenimiento permanente)	Estructural (Reemplazo/Adaptación)
Refuerzo de Elementos de Soporte y Encauzamiento	Diagnóstico en Campo	1	Estructural (Mitigación/Refuerzo)

Drenaje Superficial (Cunetas Interceptoras/Canales Revestidos)	Evaluación Multitemporal	En cresta y límites del deslizamiento (Lineal)	Control (Hidrológica)
Drenaje Subsuperficial (Drenes Horizontales y zanjas Drenantes)	Evaluación Multitemporal	A lo largo del cuerpo del deslizamiento (Lineal/Puntual)	Estructural (Drenaje Profundo)
Muro de Contención (Gaviones)	Evaluación Multitemporal	En el pie del deslizamiento (Lineal)	Estructural (Contención Geotécnica)
Terrazas y Zanjas de Infiltración	Teledetección	En laderas de deslizamiento (Superficial/Lineal)	Híbrida (Geotécnica/Control)
Reforestación y Soluciones Biotécnicas (Hidrosiembra)	Combinada (Teledetección y Multitemporal)	En áreas expuestas y agrícolas (Superficial)	Control (Bioingeniería)
Cunetas de Pie de Terraplén	Evaluación Multitemporal	En base de taludes (Lineal)	Estructural (Drenaje Vial)

- **Quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva 15+000**

**Tabla 39.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada El Peñón/San Rafael*

Obra de Ingeniería Estructural/Control	Método de Justificación	Cantidad (Unidad)	Tipo de Medida
Diques de Retención de Sedimentos	Evaluación Multitemporal Diagnóstico en Campo (Teledetección)	2	Estructural (Contención de Detritos)
Refuerzo de Elementos de Soporte y Encauzamiento	Diagnóstico en Campo	1	Estructural (Mitigación/Refuerzo)
Prolongación de Aletas de Entrada	Diagnóstico en Campo Evaluación Multitemporal	1 (obra de drenaje existente)	Estructural (Mitigación/Refuerzo)
Cunetas de Pie de Terraplén	Diagnóstico en Campo Evaluación Multitemporal	En base de taludes (Lineal)	Estructural (Drenaje Vial)
Bioingeniería (Reforestación, Terrazas)	Teledetección	En laderas NO-SE (Superficial/Lineal)	Control (Bioingeniería)
Zonificación de Amenazas	Teledetección	1 (Plan de Gestión)	No Estructural (Planificación)

- **Quebrada La Jabonera. Progresiva 17+750**

**Tabla 40.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada La Jabonera*

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Aumento de la Sección Transversal de la Obra de Paso	Diagnóstico en Campo	1	Estructural (Ampliación/Sustitución)
Diseño de una Cámara de Sedimentación (Desarenador)	Diagnóstico en Campo	1	Estructural (Contención de Sedimentos)

- **Quebrada Los Higueros. Progresiva 18+000**

**Tabla 41.** *Propuestas de intervención estructural unificada. Quebrada Los Higueros*

<b>Obra de Ingeniería Estructural/Control</b>	<b>Método de Justificación</b>	<b>Cantidad (Unidad)</b>	<b>Tipo de Medida</b>
Aumento de la Capacidad Hidráulica (Cajón de Paso/Batería de Tubos)	Diagnóstico en Campo	1	Estructural (Ampliación/Sustitución)
Cámara de Captación/Sedimentación Compacta (Desarenador)	Diagnóstico en Campo	1	Estructural (Control de Sedimentos)
Programa de Mantenimiento Preventivo	Diagnóstico en Campo	Continuo (Operacional)	Operacional (Gestión)

- **Resumen general de obras de ingeniería**

**Tabla 42. Resumen general de obras de ingeniería**

<b>Categoría de Obra</b>	<b>Obra Específica</b>	<b>Quebradas Aplicables (N=12)</b>	<b>Naturaleza de la Intervención</b>	<b>Prioridad Estimada</b>
Control del Cauce (Contención/Flujo)	Diques de Retención de Sedimentos	Todas (12/12)	Estructural / Captura de Detritos	Alta
	Muros de Encauzamiento/Contención Longitudinal	Carmania, No Identificada, Los Aponcio, Cacique/Silencio	Estructural / Defensa Fluvial	Alta
	Sustitución/Ampliación de Obra de Paso	La Jabonera, Los Higueros	Estructural / Adaptación Hidráulica	Alta
	Diques de Corrección Torrencial (Cárcavas)	El Tabacal, La Parada	Estructural / Control de Erosión	Alta
	Cámara de Sedimentación/Desarenador	La Jabonera, Los Higueros	Estructural / Pre-Filtro de Sedimentos	Alta
	Refuerzo de Elementos de Soporte y Encauzamiento	El Cacique/El Silencio, Cacagüito El Peñón/San Rafael	Estructural (Mitigación/Refuerzo)	Alta
Drenaje y Estabilidad Geotécnica	Drenes Horizontales/Subdrenes (Drenaje Profundo)	Carmania, No Identificada, Cacagüito, El Diamante, Los Aponcio	Estructural / Reducción Presión de Poros	Alta
	Cunetas de Coronación (Drenaje Superficial)	El Barro, Los Aponcio, Cacagüito, El Diamante, La Parada	Control / Intercepción de Escorrentía	Alta
	Cunetas de Pie de Terraplén/Drenaje Vial	Cacagüito, El Peñón, No Identificada	Estructural / Protección de Fundación Vial	Media
Control de la Fuente (Laderas)	Reforestación y Bioingeniería (General)	Todas (12/12)	Híbrida / Estabilización Superficial	Alta
	Terrazas / Prácticas de Conservación de Suelos	El Barro, El Peñón, Cacagüito, La Parada, El Diamante	No Estructural / Manejo Territorial	Media
	Muros de Contención Geotécnica (Pie de Deslizamiento)	Los Aponcio, Cacagüito	Estructural / Contención Geotécnica	Alta

### **Análisis de patrones y observaciones**

Diques de retención como solución generalizada. La necesidad de construir diques de retención de sedimentos se identificó en todas las 10 microcuencas principales. Esto subraya que la carga sólida es la problemática morfohidrológica dominante y más extendida que amenaza la continuidad del tramo vial La Victoria-Tovar, de la carretera T007.

Drenaje como prioridad geotécnica. Los problemas de inestabilidad de laderas y deslizamientos se abordan de manera crítica mediante la combinación de drenaje superficial (cunetas de coronación) y, sobre todo, drenaje profundo (subdrenes/drenes horizontales), reflejando que la saturación es el principal factor desestabilizador.

Vulnerabilidad de las obras de paso. Una porción significativa de las cuencas (al menos 4) requiere el reemplazo o ampliación de las alcantarillas y cajones existentes, indicando una insuficiencia de diseño hidráulico que no considera adecuadamente los flujos de detritos y las avenidas torrenciales extremas.

#### **4.7.2 Propuestas de intervención basadas en el análisis multitemporal del comportamiento del río Mocotíes**

La caracterización morfodinámica realizada en los apartados anteriores permite fundamentar técnicamente una serie de intervenciones de ingeniería civil diseñadas para mitigar las amenazas identificadas. Esta fase de la investigación traduce los hallazgos de migración lateral, socavación y reactivación de paleocauces en soluciones de defensa ribereña, control geotécnico y reencauzamiento fluvial.

Las propuestas se basan en un criterio de priorización del riesgo, atendiendo con mayor urgencia aquellos puntos donde la estabilidad de la plataforma vial de la Troncal 007 o la integridad de infraestructuras críticas, como puentes y pasarelas, se encuentran comprometidas. Para asegurar la claridad en la interpretación de los esquemas de diseño y su ubicación espacial en el tramo de vía, se ha definido un código visual estandarizado. La simbología técnica empleada para la representación gráfica de las obras de ingeniería propuestas se detalla en la Tabla 43.

**Tabla 43.** Simbología empleada para la representación gráfica de las obras de ingeniería

Obra de Ingeniería	Color	Estilo de Línea	Tipo de Obra
Pedraplén	Negro	Línea continua	Relleno de protección
Reencauzamiento	Azul claro	Línea continua	Corrección/Modificación de cauce
Dique lateral de encauzamiento	Azul oscuro	Línea doble	Estructura de contención/Control fluvial

**a) Variación geométrica del cauce (Prg. 0+000 – 1+500)**

En consideración de la criticidad observada, particularmente en la zona del Prg. 1+250, se proponen dos intervenciones de ingeniería civil y fluvial para asegurar la estabilidad de la carretera y mitigar los riesgos asociados.

- **Protección de talud contra erosión fluvial (Prg. 1+250)**

La aproximación crítica del río Mocotíes al terraplén de la carretera en el Prg. 1+250 requiere la implementación de una estructura de defensa ribereña para contrarrestar la erosión lateral. La obra propuesta consiste en la construcción de un pedraplén de protección. Su diseño funcional establece que la estructura deberá ser concebida como una escollera (relleno de roca graduada) con una capa superficial de enrocado resistente tanto al arrastre como a la abrasión. Este pedraplén debe ser alineado siguiendo la curvatura natural del trazado actual del río, e incorporar un espigón diseñado específicamente para deflectar la energía del flujo fuera del pie del terraplén, como se muestra en la Figura 119. La función primordial de esta obra es proteger el pie del talud contra la socavación fluvial durante los eventos de alto caudal.

- **Control de inestabilidad geotécnica por aporte de material (Prg. 1+275)**

En el lado del borde interno (talud de corte) de la carretera, en las inmediaciones del Prg. 1+275, se ha identificado una microcuenca activa con potencial de inestabilidad de laderas y aporte de sedimentos hacia la plataforma vial.

La obra propuesta es la construcción de un dique de retención de sedimentos. El diseño funcional de este dique, comúnmente denominado dique de contención o dique de retención, se ubicará estratégicamente en el cauce de la microcuenca, como se muestra en la Figura 119. Su propósito es reducir la velocidad de escorrentía, retener material granular y sedimentos producto de posibles deslizamientos o flujos de detritos desde la ladera superior, y evitar la obstrucción y colmatación de los elementos de drenaje longitudinal y transversal de la carretera, asegurando así la operatividad y la seguridad vial.

**Figura 119.** Ubicación del dique de retención de sedimentos y pedraplén



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

#### **b) Riesgo hidráulico y estructural: tramo Prg. 5+250 – 5+500**

Dada la convergencia de riesgos hacia la carretera, el estribo del puente y la pasarela peatonal en Prg. 5+500, se requiere una solución de defensa longitudinal de dimensiones importantes.

Se propone la construcción de un pedraplén de protección estructural diseñado para abarcar completamente la curvatura de flexión que dirige el flujo hacia el estribo izquierdo en la progresiva 5+500, cuya función primaria es proteger de manera continua el terraplén de la carretera, el estribo del puente y la estructura de la pasarela peatonal contra la erosión y la socavación, actuando adicionalmente como un muro guía o espigón longitudinal para reencauzar el flujo con una alineación lo más ortogonal posible respecto al eje del puente y así reducir la concentración de esfuerzo cortante en el estribo, requiriendo en su dimensionamiento asegurar que la cota de su base se extienda por debajo de la profundidad de socavación potencial del río para garantizar su estabilidad a largo plazo. La ubicación del pedraplén se muestra en la Figura 120.

**Figura 120.** Ubicación del pedraplén



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

### c) Dinámica fluvial reciente y medida preventiva: Tramo Prg. 6+000 – 6+250

#### Recomendación de intervención preventiva

La inminencia de la erosión lateral, evidenciada por la huella de aproximación reciente en la Prg. 6+000, exige una acción de ingeniería basada en el principio de gestión preventiva del riesgo.

Como medida de mantenimiento preventivo en la progresiva 6+000, se recomienda la construcción de un pedraplén, como se muestra en la Figura 121, con el objetivo primordial de prevenir la socavación y el ataque directo al pie del terraplén de la carretera antes de que la migración del cauce alcance un estado crítico. El diseño funcional de esta estructura debe seguir la dirección y curvatura de la huella fluvial activa, de manera que, al construirse en el margen externo de la curva que se dirige hacia la vía, el pedraplén actúe para estabilizar la ribera, disipar la energía de impacto y reforzar la línea de ribera existente, conteniendo efectivamente la tendencia erosiva y asegurando el mantenimiento del cauce a una distancia segura de la infraestructura vial.

**Figura 121.** Ubicación del pedraplén



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

**d) Punto de aproximación focal. Prg. 8+250 – 9+000**

Para el segmento comprendido entre las progresivas 8+250 y 9+000, los resultados de la caracterización multitemporal determinan que no se requiere la ejecución de obras de defensa fluvial o intervenciones estructurales. A pesar de la movilidad histórica y la ampliación del cauce documentadas, la distancia de separación actual respecto a la carretera se mantiene dentro de márgenes de seguridad técnica que no representan una amenaza inminente para la estabilidad de la vía (ver Figura 122).

En consecuencia, la propuesta para este tramo se limita exclusivamente a un plan de monitoreo periódico. Esta medida preventiva permitirá vigilar la evolución de la tasa de acercamiento detectada entre las Prg. 8+250 y 8+500, asegurando una gestión eficiente de los recursos al priorizar las inversiones de capital solo en los puntos críticos de alta vulnerabilidad identificados en el mapa de síntesis.

**Figura 122.** Punto de aproximación focal. Monitoreo periódico requerido



**Nota.** Captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

**e) Evaluación de riesgo y morfodinámica: tramo Prg. 10+750 – 12+750**

En el tramo comprendido entre las progresivas 10+750 y 11+750, el análisis comparativo (2021 vs. 2023) confirma una notable estabilidad longitudinal y lateral del río Mocotíes, sin variaciones significativas en su curso principal (ver Figura 123). Al mantener una distancia horizontal mínima de seguridad de aproximadamente 100 m respecto al eje de la carretera, este sector se clasifica como de bajo riesgo ante fenómenos de socavación o erosión lateral. Dada la amplitud del margen de amortiguamiento y la ausencia de tendencias migratorias hacia la infraestructura, se determina que no se requiere la ejecución de obras de defensa fluvial en este segmento, garantizándose la integridad de la vía mediante las condiciones naturales del cauce.

**Figura 123.** Estabilidad longitudinal y lateral del río



**Nota.** Captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

**f) Acercamiento significativo y erosión en afluente. Prg. 11+750 – 12+750.**

En el sector comprendido entre las progresivas 11+750 y 12+750, el análisis multitemporal detectó una migración activa del cauce con cambios de dirección que apuntan hacia el eje de la carretera. A pesar de que la distancia de separación se redujo de manera significativa en un periodo corto, pasando de 160 m en 2021 a 103 m en 2023, el margen remanente aún no constituye una amenaza inminente para la estabilidad global del terraplén.

No obstante, la tasa de acercamiento registrada de 57 m en apenas dos años revela una tendencia erosiva acelerada que califica este tramo como una zona de atención especial. Bajo un criterio de optimización de recursos, se determina que no se requiere una intervención estructural inmediata en esta fase; sin embargo, es imperativo establecer un protocolo de monitoreo continuo para evaluar la evolución de la margen fluvial y prevenir posibles compromisos a la infraestructura en el mediano plazo.

**g) Evaluación de riesgo y condicionantes de nubosidad: tramo Prg. 13+750 – 16+000**

Tras el análisis multitemporal del comportamiento del río Mocotíes en este sector (progresivas 13+750 a 16+000), se determinó que, a pesar de la movilidad histórica del cauce, las condiciones actuales no exigen la ejecución de intervenciones estructurales inmediatas (ver Figura 124). En el segmento comprendido entre la Prg. 13+750 y 14+750, aunque se detectó una reducción de la distancia de amortiguamiento de 275 m a 233 m en un periodo de cinco años, el margen remanente se considera suficiente para la estabilidad de la vía, recomendándose únicamente un monitoreo periódico de la tasa de migración fluvial.

Asimismo, en el sector de la Prg. 14+750 a 15+190, donde se registra la separación mínima más corta de este segmento (55 m), el riesgo se califica como moderado al ser superior a las distancias críticas identificadas en otros puntos del estudio, por lo tanto, no se requiere una intervención estructural urgente en esta etapa. Finalmente, para el tramo Prg. 15+750 a 16+000, la morfología fluvial caracterizada por paleocauces orientados longitudinalmente al terraplén confiere una estabilidad natural al flujo, alejando la energía erosiva del alineamiento de la carretera. Con una distancia mínima de 60 m y una tendencia actual que no sugiere la reactivación de antiguos cursos de socavación, se concluye que este segmento mantiene un bajo riesgo hídrico, prescindiendo de la necesidad de obras de defensa fluvial.

**Figura 124. Segmento de bajo riesgo hídrico**



**Nota.** Captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

#### **h) Amenaza de desborde y bifurcación: Tramo Prg. 16+250 – 16+500**

Para mitigar este riesgo específico, la intervención requiere una solución dual, anulación del desborde y dirección controlada del flujo principal.

La solución propuesta es la construcción de un pedraplén de obturación con posterior canalización no revestida, diseñado para abordar la bifurcación del flujo, como se muestra en la Figura 125. La fase inicial, denominada obturación, consiste en construir un pedraplén (tapón) en el punto de inicio del brazo de desborde, utilizando una escollera compactada dimensionada para resistir el empuje hidráulico y el efecto de sifonamiento, logrando la anulación de la bifurcación y forzando la totalidad del caudal de retorno al cauce principal. La fase de reencauzamiento propone, inmediatamente aguas abajo de la obturación, la ejecución de una canalización no revestida del cauce principal, diseñada para rectificar la alineación del flujo, promoviendo un trazado rectilíneo que desplace el eje de máxima velocidad lejos de la ribera adyacente a la carretera, reduciendo la probabilidad de futuros desbordes y mitigando la erosión lateral.

**Figura 125. Ubicación del pedraplén y canalización**



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

### i) Amenaza estructural y morfológica: Progresiva 17+000

Dada la doble amenaza (carretera y puente), se requiere una única solución de defensa longitudinal que atienda ambas estructuras.

Se propone la construcción de un pedraplén de protección integral, como se muestra en la Figura 126, diseñado como una estructura de escollera con un doble objetivo funcional: en cuanto al alineamiento curvo, el pedraplén debe coincidir rigurosamente con el trazado de la curva del río para actuar como un muro de contención flexible capaz de absorber y disipar la energía de impacto; respecto a la protección conjunta, la estructura deberá extenderse lo suficiente para garantizar la protección continua tanto del terraplén de la carretera, previniendo la erosión lateral, como del estribo del puente, mitigando la socavación local, logrando así la estabilización de la ribera y obligando al flujo a seguir la trayectoria curva protegida sin atacar directamente las bases estructurales.

**Figura 126.** Ubicación del pedraplén



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

### j) Evaluación condicionada y riesgo de desborde: Tramo Prg. 17+250 – 18+250

Propuesta de ingeniería para encauzamiento del brazo de desborde

Considerando la potencial velocidad del flujo en este brazo secundario, se requiere una estructura diseñada para resistir y reencauzar la energía cinética.

Se propone la construcción de un dique lateral de encauzamiento, como se muestra en la Figura 127, cuya función principal no es la obturación total del flujo, sino encauzar y redirigir el caudal del brazo de desborde, obligándolo a seguir una trayectoria paralela a la carretera

para que se reincorpore al cauce principal, mitigando así el ataque erosivo al terraplén. Esta diferencia conceptual respecto a un pedraplén de protección de curva radica en que el dique lateral es la solución más adecuada para controlar un flujo secundario de trayectoria rectilínea y alta velocidad, permitiendo la disipación gradual de la energía a lo largo de su longitud y evitando una contracción abrupta del flujo principal, la cual podría generar inestabilidad hidráulica.

**Figura 127.** *Ubicación del dique lateral*



**Nota.** *Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)*

#### **k) Daño posible y riesgo estructural: Tramo Prg. 18+250 – 19+000**

Propuesta de ingeniería para protección de cruce vial

Considerando el riesgo de falla del puente y la afectación a la vía, se requiere una defensa perimetral del cruce.

Se propone la construcción de pedraplenes de protección integral y estructural, que consisten en la instalación de escolleras diseñadas para proteger de manera continua dos elementos clave. La ubicación se muestra en la Figura 128. El objetivo es doble, asegurar la protección de la vía mediante la estabilización del terraplén de la carretera en la zona de aproximación (cerca de Prg. 19+000) para prevenir futuras pérdidas del terraplén, y garantizar la defensa del estribo extendiendo el pedraplén para envolver y proteger el estribo del puente de acceso, mitigando el ataque lateral y la socavación local que se ha convertido en una amenaza activa.

**Figura 128. Ubicación del pedraplén**



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

### **I) Riesgo urbano y proximidad fluvial: Tramo Prg. 19+000 – 19+750**

Se propone una solución integral que combina protección estructural focalizada con refuerzo biológico en la planicie aluvial.

La obra estructural propuesta consiste en la construcción de un pedraplén para protección contra desborde, cuyo diseño especifica su construcción en el punto de máxima flexión de la curva donde convergen los brazos del río, como se muestra en la Figura 129. La función de esta estructura es proteger las viviendas cercanas y la carretera, mitigando el riesgo de erosión y desborde lateral durante un evento de crecida, enfatizándose el uso de materiales de la zona para su ejecución.

Esta medida estructural se complementa con una medida biológica. Se recomienda la siembra de bambú para estabilización de la ribera, la cual debe implementarse en toda la planicie donde se observan las huellas (desde el río hasta la carretera). La función del bambú es actuar como una barrera vegetal flexible que aporta resistencia a la tracción al suelo mediante sus raíces, aumentando así la estabilidad de la ribera, reduciendo la velocidad del flujo en la llanura de inundación, y conteniendo futuras activaciones de paleocauces.

**Figura 129. Ubicación del pedraplén**



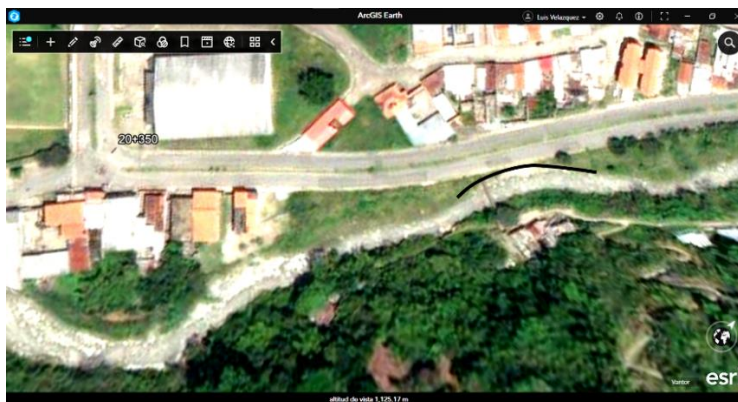
**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

**m) Control geológico y punto crítico final: Tramo Prg. 19+750 – 20+350**

El punto más cercano y, por ende, el punto crítico final del tramo, coincide con la cercanía de la carretera a las montañas de filita, donde el río es forzado a aproximarse a la vía, como se observa en la Figura 130.

El riesgo en la Prg. 20+000 es que la proximidad del cauce, combinada con la tendencia forzada del río por la presencia de las filitas, representa una amenaza directa de erosión lateral y socavación del terraplén. Por ello, se propone la construcción de un muro de protección del terraplén, como se muestra en la Figura 130. El diseño funcional requiere una estructura de contención para proteger directamente la base y el talud del terraplén de la carretera en esta zona de confinamiento fluvial forzado. Este muro de protección, que puede ser un pedraplén, muro de gravedad o gaviones, dependiendo del diseño geotécnico, es indispensable para estabilizar la ribera y prevenir la pérdida del terraplén causada por el ataque erosivo del río en este punto ceñido.

**Figura 130. Ubicación del pedraplén**



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

### n) Recomendaciones de intervención estructural

Las obras deben priorizarse en función del riesgo inminente (seguridad vial) y el riesgo estructural (protección de puentes). Las recomendaciones de intervención estructural se muestran en la Tabla 44.

**Tabla 44.** *Recomendaciones de intervención estructural*

Prioridad	Progresivas Críticas	Obra de Ingeniería Propuesta	Objetivo Principal
I (Máx. riesgo/inmediata)	Prg. 1+250	Pedraplén de protección y estabilización	Proteger pie de talud contra socavación inminente y pérdida del terraplén.
II (Estructural/Puente)	Prg. 5+500	Pedraplén de protección y encauzamiento estructural	Proteger estribo de puente, pasarela y reorientar el flujo.
II (Estructural/Puente)	Prg. 17+000	Pedraplén de protección integral	Protección conjunta del estribo del puente y el terraplén de la carretera.
III (Encauzamiento)	Prg. 3+000 – 3+250	Pedraplén deflector y de encauzamiento	Alejar el flujo de la plataforma vial.
III (Obtención de brazo)	Prg. 16+250 – 16+500	Pedraplén de obturación + canalización no revestida	Anular el brazo de desborde y rectificar la alineación del flujo principal.
IV (Riesgo urbano)	Prg. 19+750	Pedraplén focalizado + siembra de bambú	Protección contra desborde a viviendas y estabilización biológica de la ribera.
V (Punto final forzado)	Prg. 20+000	Muro de protección del terraplén	Estabilizar la ribera en el punto de confinamiento geológicamente forzado.

### o) Recomendaciones adicionales y preventivas

- **Monitoreo continuo:** Se requiere un monitoreo periódico (semestral) de las progresivas con tendencias de acercamiento rápido, pero aún no críticas (Prg. 11+750 – 12+000 y Prg. 13+750 – 14+750).
- **Gestión de afluentes:** Se debe realizar una evaluación hidrológica y geotécnica detallada de los afluentes secundarios y aplicar soluciones de control de erosión (por ejemplo, gaviones o diques de retención de sedimentos) para proteger las obras de drenaje transversal y reducir el aporte de sedimentos.
- **Control biológico:** La implementación de la siembra de bambú o especies nativas debe considerarse como un complemento de bajo costo para la estabilización de riberas en

tramos con riesgo moderado, por ejemplo, Prg. 19+750, aprovechando sus beneficios para la resistencia a la tracción del suelo.

La integración de los datos obtenidos mediante el análisis multitemporal y la evaluación en campo ha permitido establecer un orden de prioridad para la ejecución de las obras de defensa fluvial. Este sistema de jerarquización, que vincula las progresivas críticas con las soluciones de ingeniería específicas y el tipo de riesgo mitigado, se presenta de forma detallada en la Tabla 45.

**Tabla 45. Resumen de obras de defensa fluvial**

<b>Prioridad</b>	<b>Progresivas Críticas</b>	<b>Obra de Ingeniería Propuesta</b>	<b>Tipo de Riesgo Mitigado</b>
I (Máx. riesgo / Inmediata)	Prg. 1+250	Pedraplén de protección y estabilización	Socavación inminente
II (Estructural / Puentes)	Prg. 5+500 / Prg. 17+000 / Prg. 19+000	Pedraplenes de protección integral y estructural	Falla estructural de puentes
III (Encauzamiento)	Prg. 3+000 – 3+250	Pedraplén deflector y de encauzamiento	Migración lateral
III (Obturación)	Prg. 16+250 – 16+500	Pedraplén de obturación + canalización no revestida	Bifurcación y ataque perpendicular
IV (Riesgo urbano)	Prg. 19+750	Pedraplén focalizado + siembra de bambú	Desborde / Inundación
V (Punto final forzado)	Prg. 20+000	Muro de protección del terraplén (pedraplén, gaviones)	Erosión geológicamente forzada

### 4.7.3 Propuestas de intervención para mejorar la condición operacional (mantenimiento vial)

El deterioro actual de la vía, causado por la falta de mantenimiento rutinario, genera riesgos operacionales y acelera el colapso estructural. Las intervenciones deben enfocarse en el drenaje y la seguridad vial para maximizar la vida útil del pavimento existente. Las intervenciones propuestas se muestran en las Tablas 46 y 47.

- **Riesgo por deterioro del pavimento y drenajes**

**Tabla 46.** Riesgo por deterioro del pavimento y drenajes

Tipo de falla/Riesgo	Consecuencia Operacional	Propuesta de Intervención	Prioridad
Obstrucción de drenajes (cunetas, alcantarillas, sumideros)	Aceleración del daño estructural: La acumulación de agua satura la subrasante y las capas inferiores del pavimento, provocando la aparición de fallas tipo "piel de cocodrilo" y baches.	Mantenimiento rutinario y urgente de drenajes: Limpieza total y despeje de cunetas, alcantarillas y zanjas para restaurar la capacidad hidráulica y proteger la estructura de la vía.	I (Alta)
Fallas en el pavimento ("piel de cocodrilo", fisuras, baches)	Riesgo operacional: Incomodidad en la circulación, daño a vehículos y potencial pérdida de control.	Mantenimiento periódico de pavimento: Sellado de fisuras, bacheo profundo y superficial en áreas críticas. En zonas de alta fatiga (piel de cocodrilo), ejecutar tratamientos superficiales (sello asfáltico) o repavimentación localizada.	II (Media)
Fallas en accesos a puentes	Riesgo estructural localizado: Movimiento de la losa de transición o terraplén de acceso, generando saltos y un punto débil propenso a socavación.	Rehabilitación focalizada: Reparación de las losas de transición o reconstrucción del pavimento rígido/flexible en las inmediaciones de los estribos para asegurar una transición suave.	II (Media)
Invasión de vegetación (faja de dominio)	Reducción del ancho efectivo: Disminuye la visibilidad en curvas y obstaculiza el flujo en cunetas, dificultando las operaciones de mantenimiento.	Desmalezamiento y despeje de la sección vial: Corte y eliminación de la vegetación que invade el hombrillo y las cunetas para mejorar la visibilidad y el drenaje.	III (Baja)

- **Riesgo por deficiencia en la seguridad vial**

**Tabla 47. Riesgo por deficiencia en la seguridad vial**

<b>Tipo de Falla/Riesgo</b>	<b>Consecuencia Operacional</b>	<b>Propuesta de Intervención</b>	<b>Prioridad</b>
Demarcación horizontal borrosa	Alto riesgo nocturno: Pérdida de la guía visual, especialmente en curvas o condiciones climáticas adversas, aumentando la probabilidad de invasión de canal.	Repintado general de la demarcación horizontal: Utilizar pintura de alto rendimiento y microesferas de vidrio para garantizar la retrorreflectividad.	I (Alta)
Falta de reflectantes (ojos de gato)	Riesgo de visibilidad: Ausencia de dispositivos reflectantes que delimiten los canales y las líneas de borde durante la noche o en condiciones de baja luminosidad.	Instalación de delineadores y reflectantes en la línea central y de borde.	I (Alta)
Deterioro de señalización vertical	Pérdida de información: Señales ilegibles o dañadas que no cumplen su función de advertir, reglamentar o informar al conductor.	Sustitución o restauración de señales verticales deterioradas, asegurando la reflectividad del material.	II (Media)
Alumbrado urbano sin confirmación	Riesgo de accidentes peatonales/vehiculares: La falta de iluminación nocturna en tramos urbanos o periurbanos pone en riesgo a peatones y dificulta la percepción de obstáculos.	Inspección, reparación y puesta en servicio del alumbrado público en los tramos donde existe la infraestructura instalada.	II (Media)

La intervención más crítica y de mayor impacto inmediato es el mantenimiento urgente del sistema de drenaje y la renovación completa de los elementos de seguridad vial (demarcación y reflectantes). Estas acciones deben ejecutarse de manera prioritaria a las obras de rehabilitación de pavimento para evitar que el agua dañe rápidamente las reparaciones.

#### **4.8 Metodología y criterios para la aplicación de sensores remotos (Fase 8)**

La efectividad de la metodología propuesta para este tramo de la Troncal 007 se fundamenta en la integración sistémica de las siete fases precedentes. Se trata de un modelo de gestión de anticipación que vincula la dinámica hidrogeomorfológica de la cuenca y la dinámica del río, con la integridad estructural de la calzada. A continuación, se estandarizan los criterios derivados de la investigación.

#### **4.8.1 Criterios de idoneidad y captura de datos**

Para asegurar que el análisis remoto sea una base confiable para la planificación estratégica, se definen los siguientes estándares de entrada.

**Suficiencia de identificación visual:** Se establece como requisito que la imagen permita distinguir claramente las unidades geomorfológicas mayores y la plataforma vial como un todo. Es necesario que la relación espacial entre el eje de la vía y el cauce activo sea plenamente observable a escala del tramo, permitiendo cuantificar con precisión las tendencias de acercamiento o alejamiento del río.

**Oportunidad de observación post-evento:** Se prioriza la adquisición de registros obtenidos inmediatamente después de periodos de lluvias intensas. Este criterio garantiza la detección de la huella hidráulica y los cambios morfológicos críticos antes de que la regeneración de la vegetación oculte los paleocauces reactivados o las nuevas cicatrices de deslizamiento.

#### **4.8.2 Estándares de identificación visual y espectral**

Para garantizar la replicabilidad del monitoreo, se establecen criterios de interpretación basados en la respuesta de los sensores utilizados:

**Fidelidad de la superficie (Banda L):** Se establece como criterio base el uso de sensores de radar para el modelado del terreno “desnudo” (sin vegetación). Esto permite identificar fallas geológicas y paleocauces incluso bajo cobertura boscosa densa, eliminando el sesgo de la vegetación.

**Contraste de reflectancia para sedimentos:** Se estandariza el uso de firmas espectrales de alta reflectancia, como tonos claros en imágenes ópticas, para localizar depósitos en conos de deyección. Este criterio permite predecir la colmatación de alcantarillas antes de que ocurra el evento obstructivo.

#### **4.8.3 Metodología operativa para el cálculo de incidencia fluvial**

Basado en la Cartografía Geológica-Geomorfológica, se define el flujo de trabajo para la toma de decisiones:

**Cálculo del margen de amortiguamiento:** Se establece como regla técnica medir la distancia mínima entre el eje del cauce activo y el pie del terraplén. Un margen inferior a 15 metros en zonas de material aluvial activa una alerta de Prioridad I.

**Vectorización de la energía fluvial:** Se categoriza la amenaza según el ángulo de incidencia. Si el flujo longitudinal, requiere monitoreo de socavación lateral. Si el flujo es

perpendicular/bifurcado, requiere intervención para la anulación de brazos de desborde y protección de estribos.

#### 4.8.4 Criterios de gestión de incertidumbre y autogestión

La metodología incorpora protocolos para garantizar la continuidad operativa.

Protocolo de persistencia temporal: Ante la presencia de nubosidad persistente que afecte la Fase 2 o 4, se debe aplicar un criterio de factor de seguridad preventivo, manteniendo el nivel de riesgo del registro histórico más crítico, hasta que la validación de campo confirme la estabilidad.

Localización remota de áreas de préstamo: Como criterio de eficiencia económica para las propuestas de la Fase 7, se utilizarán los sensores remotos para ubicar depósitos de sedimentos masivos. Esto permite la autogestión de materiales granulares para la construcción de los pedraplenes y diques propuestos, reduciendo costos logísticos.

#### 4.8.5 Síntesis de la hoja de ruta estratégica

La integración de estos criterios permite transformar un diagnóstico estático en una gestión de activos viales. La Tabla 48 sistematiza cómo cada fase alimenta este protocolo final, asegurando que el tramo La Victoria – Tovar de la Troncal 007 cuente con un sistema de soporte para decisiones basado en evidencia técnica y replicable en entornos de características geodinámicas similares.

**Tabla 48.** *Síntesis de criterios y metodología para la gestión vial mediante sensores remotos*

<b>Categoría</b>	<b>Elementos clave</b>	<b>Criterios y estándares técnicos</b>
Criterios de Interpretación	Identificación visual	Capacidad de distinguir unidades geomorfológicas, la plataforma vial y su relación con el cauce activo.
	Oportunidad de observación post-evento	Prioridad a imágenes tras lluvias intensas para observar la huella hidráulica sin interferencia de vegetación.
	Reflectancia	Uso de tonos claros/blancos para localizar sedimentación masiva y prevenir colmatación de alcantarillas.
Metodología Operativa	Monitoreo geométrico	Cálculo periódico del margen de amortiguamiento (distancia río-vía) y franjas de seguridad.
	Categorización fluvial	Diferenciación entre flujo longitudinal (estable) y flujo subperpendicular/bifurcado (amenaza alta).
	Jerarquización	Prioridad de inversión en protección de puentes y pasarelas sobre tramos de carretera abierta.

Vulnerabilidad y Entorno	Afluentes y conos	Monitoreo de microcuencas que interceptan la vía para predecir aportes masivos de sedimentos.
	Confinamiento geológico	Identificación de sectores donde la montaña fuerza al río contra la vía (ej. Prg. 20+000).
Gestión y Adaptabilidad	Incertidumbre	En caso de nubosidad, se mantiene el nivel de alerta histórico más reciente hasta validación visual.
	Áreas de préstamo	Localización remota de depósitos de sedimentos para usarlos como material granular en obras.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones Generales

Una vez completado el proceso de investigación, se concluye que la aplicación de una estrategia metodológica mixta y la validación de campo permitieron alcanzar la totalidad de los objetivos de la tesis. El estudio valida la utilidad de los sensores remotos para la gestión preventiva de la carretera T007, permitiendo dar respuesta a las interrogantes planteadas sobre la interacción entre la geodinámica y la infraestructura vial.

En relación con el primer objetivo específico, orientado a la identificación de patologías mediante sensores remotos, y su interrogante asociada sobre el alcance de la teledetección, se concluye que los sensores remotos constituyen una herramienta diagnóstica de alta resolución, capaz de identificar patologías geoestructurales imperceptibles mediante inspecciones terrestres convencionales. El procesamiento de modelos digitales de elevación (DEM) y datos ALOS PALSAR, integrados en plataformas como *ArcGIS Earth* y *Google Earth Pro*, permitió cartografiar amenazas críticas como la migración lateral del cauce del río Mocotíes y los procesos de sedimentación activa en las cabeceras de las 12 microcuencas tributarias. Finalmente, se determinó que la degradación del tramo La Victoria – Tovar de la Troncal 007 trasciende las fallas superficiales del pavimento, siendo producto de una interacción geodinámica donde las filitas meteorizadas y los granitos fracturados funcionan como fuentes persistentes de carga sólida que comprometen la estabilidad del tramo vial.

En cuanto al tramo en estudio, este presenta una vulnerabilidad sistémica de grado elevado ante amenazas hidrogeomorfológicas, lo que posiciona la seguridad vial, la conectividad y la seguridad alimentaria regional en una condición de riesgo permanente. Esta criticidad se deriva de una interacción desfavorable entre el entorno geomorfológico y la infraestructura existente, manifestada a través de la convergencia de tres factores determinantes que se exponen a continuación.

El primer factor corresponde a la producción masiva de carga sólida proveniente de vertientes. La presencia de filitas y granitos de Tovar en avanzado estado de meteorización y fracturamiento, junto con depósitos cuaternarios vinculados al sistema de la Falla de Boconó, constituyen fuentes persistentes de detritos. Este material (bloques, gravas y finos) es movilizado a través de las 12 microcuencas analizadas, convirtiendo la colmatación de cauces y obras de paso en la patología recurrente más crítica para la operatividad del sector.

En cuanto al segundo factor, la inestabilidad geotécnica del tramo vial está intrínsecamente supeditada al régimen de alta pluviosidad de la zona. Se concluye que la saturación de los suelos residuales actúa como el principal factor detonante de movimientos en masa, tales como deslizamientos y flujos de lodo (deslaves), los cuales representan una amenaza directa a la estabilidad del terraplén y a la integridad funcional de los sistemas de drenaje longitudinal y transversal.

El tercer factor determinante es el dinamismo fluvial y la socavación progresiva del río Mocotíes. El análisis morfodinámico ratifica que el cauce principal posee una elevada inestabilidad con tendencias de migración lateral agresiva que comprometen la infraestructura en sectores críticos. Este fenómeno genera una amenaza estructural directa por socavación en el pie de los terraplenes y, de forma alarmante, en los estribos de puentes estratégicos (ej. Prg. 5+500, 17+000 y 19+000), registrándose una proximidad crítica de apenas 5 m entre el cauce y la calzada en la Prg. 1+250.

Finalmente, se detectó una marcada insuficiencia hidráulica y geométrica que contraviene los parámetros establecidos en la normativa MTC 1997, evidenciada en pendientes que alcanzan el 15% y radios de curvatura mínimos de 33 m. Esta condición se agrava por la obsolescencia y falta de capacidad de las obras de paso existentes, las cuales no fueron diseñadas para el transporte de flujos de detritos, lo que eleva significativamente el riesgo de colapso estructural ante eventos hidrometeorológicos extremos.

En lo referente al segundo objetivo específico, la fase de inspección técnica *in situ* permitió validar la vulnerabilidad física real del tramo La Victoria-Tovar, trascendiendo la caracterización visual para identificar el origen de las fallas y confirmar con precisión los hallazgos detectados remotamente. Se concluye que la visita de campo constituye el mecanismo de verificación indispensable para el diseño de medidas preventivas y correctivas, al determinar que la interacción entre la fracturación profunda del Granito de Tovar y la saturación de los depósitos cuaternarios son los factores que transforman las amenazas potenciales en fallas estructurales activas. Este proceso de validación técnica permitió constatar la distribución diferenciada de sedimentos según la litología dominante. Se confirmó la presencia de macrobloques rocosos en las microcuencas con predominio de granito, mientras que en aquellas con dominio de filitas se verificó la acumulación de granos finos que colmatan los sistemas de drenaje.

Asimismo, se ratificó la avanzada degradación de la roca madre en las cuencas adyacentes al sector Santa Cruz de Mora y la dinámica morfohidrológica del río Mocotíes, cuyo comportamiento en sitio valida el comportamiento detectado de forma remota. Finalmente, la

inspección permitió autenticar incumplimientos normativos críticos en la geometría vial, específicamente en radios mínimos de curvatura y pendientes longitudinales, factores que, sumados a la condición mecánica de los materiales en el corredor de la Falla de Boconó, fundamentan una propuesta de mantenimiento basada en la realidad física y no solo en la apariencia geométrica remota de la infraestructura.

Respecto al tercer objetivo específico, centrado en la contrastación y triangulación de hallazgos, la investigación demuestra la alta fidelidad del modelo basado en teledetección. Al comparar los datos obtenidos mediante *ArcGIS Earth* y *Google Earth Pro* con la evidencia física, se determinó una elevada correspondencia técnica en la identificación de amenazas hidrogeomorfológicas.

Esta comparación permite dar respuesta a la interrogante de investigación, concluyendo que existe una correspondencia técnica estimada del 85% entre los diagnósticos remotos y las condiciones reales detectadas *in situ*. Esta elevada coincidencia se manifestó principalmente en la identificación de unidades litológicas (filita y granito), geoformas (conos de deyección, depósitos de pie de vertiente y terrazas aluviales) y la dinámica de sedimentación en microcuencas. Asimismo, se determinó que el margen de no correspondencia (15%) no representa una falla del modelo, sino que responde a las limitaciones intrínsecas de la resolución espacial de los sensores remotos para detectar patologías de micro detalle vial, tales como fallas de borde, hundimientos puntuales y el estado del pavimento y la demarcación horizontal. En términos de eficiencia, se validó que esta metodología permitió una optimización sustancial de los tiempos de diagnóstico regional, autenticando puntos críticos de socavación y amenazas geológicas con un elevado nivel de confiabilidad técnica y precisión geoespacial.

En lo que respecta al cuarto objetivo específico, orientado a la definición de labores de mantenimiento para una gestión eficiente, la integración de la data geoespacial y la validación física permitieron resolver la interrogante sobre la capacidad de la teledetección para jerarquizar intervenciones bajo un enfoque preventivo. Se concluye que la sostenibilidad del tramo depende de una transición definitiva del modelo correctivo hacia una hoja de ruta técnica de anticipación, fundamentada en los resultados de la matriz de propuestas de ingeniería y la matriz de riesgo operacional.

Bajo este enfoque, la estrategia estructural prioritaria radica en el control de torrentes mediante la implementación masiva de diques de retención de sedimentos, medida transversal requerida en el 100% de las microcuencas, para interceptar la carga sólida antes de su impacto en la vía. Complementariamente, se establece la necesidad de proteger el cauce principal del río Mocotíes mediante pedraplenes y diques laterales de encauzamiento, garantizando la

operatividad de la infraestructura y salvaguardando las fundaciones de puentes en progresivas críticas, específicamente en la 5+500 y 17+000, ante eventos hidromorfológicos recurrentes.

Respecto al control geotécnico, la mitigación de la inestabilidad de laderas está supeditada a la ejecución de sistemas de drenaje profundo (subdrenes y drenes horizontales). Se concluye que esta es la acción de ingeniería más eficaz para reducir las presiones de poros en los suelos residuales saturados, permitiendo estabilizar la geomorfología desde su origen y prevenir el colapso de los terraplenes por movimientos en masa.

Finalmente, el tramo demanda una intervención de mantenimiento operacional con carácter de urgencia. La limpieza exhaustiva del sistema de drenaje longitudinal y transversal, junto con la renovación de la demarcación horizontal y elementos reflectantes, se categorizan como acciones de Prioridad I (alta). Estas labores garantizan un impacto inmediato en la seguridad vial y protegen la durabilidad estructural de la carpeta asfáltica al evitar la infiltración de agua hacia la subrasante.

En atención al quinto objetivo específico, centrado en el establecimiento de la metodologías y criterios y para el uso de sensores remotos en la planificación vial, se definieron los lineamientos técnicos para la integración de la teledetección como un estándar operativo en la ingeniería vial nacional. La investigación consolida un protocolo estandarizado de ocho fases que faculta la transición desde un modelo de mantenimiento correctivo hacia una gestión de anticipación preventiva con optimización de recursos económicos y temporales. Se concluye que el marco metodológico desarrollado es técnicamente viable y escalable a otros tramos de la red vial nacional bajo condiciones de riesgo geodinámico similares, constituyéndose en una propuesta consistente de transferencia tecnológica para la modernización de la gestión de activos en la ingeniería vial venezolana.

La metodología desarrollada, fundamentada en la integración sistémica de sensores remotos, análisis SIG y validación técnica *in situ*, demuestra ser una estrategia altamente viable y técnicamente solvente para la gestión de infraestructura en entornos de alta complejidad geodinámica. El modelo operativo implementado permitió obtener una caracterización multitemporal y geométrica de precisión, optimizando los recursos al prescindir de costosos levantamientos topográficos tradicionales en las etapas preliminares del diagnóstico.

Este enfoque representa el aporte original y de transferencia tecnológica de la presente investigación, al ofrecer un protocolo estandarizado de ocho fases que faculta a los entes rectores de la ingeniería vial para migrar de un modelo de mantenimiento correctivo hacia un modelo de anticipación preventiva. La investigación concluye que la eficiencia de la gestión futura en el tramo estudiado depende de una estrategia de intervención integral, centrada en el control

masivo de torrentes mediante diques de retención de sedimentos y la estabilización de laderas a través de sistemas de drenaje profundo.

Finalmente, los resultados confirman que la teledetección es una alternativa técnica y una herramienta fundamental y necesaria para garantizar la sostenibilidad operativa de la red vial nacional frente a las amenazas hidrogeomorfológicas recurrentes.

## **5.2 Recomendaciones Generales**

Las recomendaciones se formulan en tres niveles para asegurar la aplicación integral del modelo de gestión propuesto:

### **5.2.1 Recomendaciones de ingeniería estructural**

Se establece la necesidad de ejecutar de forma inmediata las obras de defensa fluvial categorizadas como Prioridad I y II. Esta intervención debe contemplar la construcción de pedraplenes de protección integral en sectores de riesgo inminente (Prg. 1+250) y en la infraestructura de soporte de puentes (Prg. 17+000). Asimismo, es imperativa la obturación y el encauzamiento estratégico de los brazos de desborde identificados entre las progresivas 16+250 y 16+500, con el fin de confinar el flujo y prevenir erosiones regresivas que amenacen la plataforma vial.

En cuanto a la infraestructura de drenaje transversal, se recomienda el reemplazo o la ampliación inmediata de las obras de paso que presentan insuficiencia hidráulica crítica. Estas deben ser sustituidas por estructuras de luz libre o alcantarillas de cajón de sección mayorada, cuyo diseño estructural y geométrica garanticen el tránsito del caudal de diseño y la capacidad de transporte de flujos de detritos (carga sólida y material vegetal), minimizando el riesgo de colapso por represamiento.

Respecto al diseño detallado de estabilización, se debe priorizar el desarrollo de proyectos de drenaje subsuperficial mediante drenes horizontales de penetración para mitigar la inestabilidad activa en las laderas adyacentes. Esta medida de control de presiones de poros debe ser complementada con la implementación de muros de encauzamiento y protección en los tramos identificados con alta socavación lateral, asegurando la estabilidad del pie de talud y la integridad del terraplén de acceso.

Por último, ante la inviabilidad técnica y económica de un replanteamiento integral del trazado, se propone la adecuación geométrica focalizada en sectores con radios de curvatura críticos, específicamente el tramo de 33 m. Esta intervención debe reforzarse con la implementación de sistemas de contención vehicular, tales como barreras de concreto, en

aquellas curvas de alto riesgo donde el perfil longitudinal y el radio de giro contravienen la normativa de seguridad vial vigente, mitigando la severidad de potenciales accidentes.

### **5.2.2 Recomendaciones de gestión y operación**

Se recomienda la implementación del modelo de gestión propuesto, formalizando la transición de una cultura de mantenimiento correctivo hacia un paradigma de anticipación preventiva. Para ello, es imperativo establecer un protocolo de monitoreo satelital y aéreo (fotografías con drones) con frecuencia bianual, sincronizado con los ciclos estacionales (pre-lluvias y post-lluvias). Esta estrategia permitirá el seguimiento multitemporal de la evolución de cicatrices de deslizamientos, la dinámica de socavación en cauces y la progresión de patologías en el pavimento, facilitando la optimización en la asignación de recursos financieros y operativos.

Es fundamental la ejecución de un programa de mantenimiento operacional estricto, categorizado bajo un nivel de Prioridad I. Este plan debe garantizar la limpieza sistemática y el despeje continuo del sistema de drenaje longitudinal y transversal (cunetas, sumideros y alcantarillas), asegurando su capacidad de evacuación hidráulica. El objetivo central es mitigar la infiltración de aguas superficiales hacia la subrasante, protegiendo así la capacidad portante del terraplén y extendiendo la vida útil estructural de la carpeta asfáltica.

Como medida de mitigación no estructural, se recomienda el desarrollo de una zonificación de amenazas hidrogeomorfológicas en las microcuencas tributarias, en estrecha coordinación con los entes gubernamentales y autoridades ambientales. Esta herramienta cartográfica es esencial para la regulación estricta o prohibición de actividades antrópicas, como construcción informal o agricultura de ladera, que degradan la cobertura vegetal y aceleran los procesos erosivos en las cabeceras. La gestión del uso del suelo se establece como el mecanismo preventivo de menor costo y mayor impacto para reducir el aporte de carga sólida hacia el tramo vial de la Troncal 007.

### **5.2.3 Recomendaciones para futuras investigaciones**

Se plantea la necesidad de profundizar en el análisis del subsuelo mediante programas de exploración geotécnica directa, que incluyan sondeos mecánicos y ensayos de laboratorio especializados. Esta fase es indispensable para determinar con precisión los parámetros de resistencia cortante y capacidad portante en las progresivas críticas. Dichos datos permitirán trascender el diagnóstico por sensores remotos y fundamentar el diseño ejecutivo final de las fundaciones para obras de alto impacto, tales como diques de retención, muros de contención y

estribos de puentes, garantizando la estabilidad estructural ante los empujes laterales y las cargas de diseño estimadas.

Se recomienda el desarrollo de modelación hidráulica numérica en 2D y 3D mediante el uso de software especializado como HEC-RAS, Iber o RAMMS, para simular de forma dinámica el comportamiento de los flujos de detritos en el río Mocotíes y sus microcuencas tributarias. La implementación de software especializado permitirá optimizar la ubicación estratégica, la luz libre de las estructuras y la resistencia de los diques de retención ante la energía cinética de eventos aluvionales. Esta modelación avanzada es fundamental para garantizar que las obras propuestas posean la capacidad necesaria para resistir eventos hidrometeorológicos catastróficos recurrentes, minimizando el riesgo de socavación y colapso.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

## REFERENCIAS

Alvarado, M., Cantos, G., Pérez, E., y Audemard, F. (2015). Cartografía neotectónica de la Falla de Boconó entre Tabay y La Toma, Mérida- Venezuela. *Boletín de Geología*, 37(2), 47–55.

Aranguren, A., Andressen, R., y Henao, Á. (2012). El clima estacional del cinturón montano en el estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53(2), 187–212. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730393002.pdf>

Aranguren, R., y Reina, M. (2013). Interpretación estructural de la zona de falla de Boconó en el tramo comprendido entre La Palmita y La Mucuy, estado Mérida [Tesis de grado, Universidad de Los Andes]. [http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde\\_arquivos/10/TDE-2013-03-14T08:21:26Z-1909/Publico/arangurenreina\\_parte2.pdf](http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_arquivos/10/TDE-2013-03-14T08:21:26Z-1909/Publico/arangurenreina_parte2.pdf)

Berrio, L., y Ussa, A. (2012). Auscultación de pavimentos mediante interpretación de imágenes [Tesis de grado de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional UMNG. <https://repository.umng.edu.co/items/5f8eb46b-1215-47fb-8860-c9bd7b74a413>

Blanco, H. [LA TRAGEDIA Que Tiene DE LUTO a MÉRIDA VENEZUELA - Desde el Sitio de Los Acontecimientos]. (26 de agosto de 2021). [Archivo de video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=AM6z5dLAW0syt=986s>

Chacón, G., y Uzcátegui, N. (2013). Sierra de La Culata. [Tesis de grado no publicada, Universidad de Los Andes]. [http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde\\_arquivos/10/TDE-2013-03-14T08:37:35Z-1910/Publico/chacongustavo\\_uzcateguianicisi\\_parte4.pdf](http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_arquivos/10/TDE-2013-03-14T08:37:35Z-1910/Publico/chacongustavo_uzcateguianicisi_parte4.pdf)

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana.

Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial* (3ra ed. rev.). Ediciones Rialp. [https://www.u-cursos.cl/forestal/2011/1/EF016/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=487457](https://www.u-cursos.cl/forestal/2011/1/EF016/1/material_docente/bajar?id_material=487457)

Cilento, A., y Martín, J. (2018). El plan preliminar de vialidad de 1947 y las comunicaciones desde el centro con la región andina 1. [Artículo]. [https://www.researchgate.net/publication/340551605\\_EL\\_PLAN\\_PRELIMINAR\\_DE\\_VIALIDAD\\_DE\\_1947\\_Y\\_LAS\\_COMUNICACIONES\\_DESDE\\_EL\\_CENTRO\\_CON\\_LA\\_REGION\\_ANDINA\\_1](https://www.researchgate.net/publication/340551605_EL_PLAN_PRELIMINAR_DE_VIALIDAD_DE_1947_Y_LAS_COMUNICACIONES_DESDE_EL_CENTRO_CON_LA_REGION_ANDINA_1)

Clavijo, S. (2019). Los costos ocultos de la falta de mantenimiento vial. *La República*. <https://www.larepublica.co/analisis/sergio-clavijo-500041/los-costos-ocultos-de-la-falta-de-mantenimiento-vial-2819475>

Contreras, E., y Gutiérrez, W. (2008). Consideraciones iniciales sobre los impactos socioeconómicos a raíz de la puesta en funcionamiento de la Gran Carretera Trasandina en la población de Mucuchíes entre 1915 y 1941 [Tesis de pregrado, Universidad de Los Andes].

Corporación de Los Andes. (1990). Programa de Desarrollo para los Pueblos del Sur del Estado Mérida. Ministerio de la Secretaría de la Presidencia de la República.

Delgadillo, A. (s.f.). Isoyetas de la Cuenca del Río Guaraque: Periodo 1965-1996 [Mapa de precipitación]. Escuela de Geografía, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad de Los Andes (U.L.A.), Mérida, Venezuela.

Dugarte, M., Ferrer, C., y Delgadillo, A. (2015). Respuesta hidrogeomórfica de una cuenca altamente asimétrica. La tormenta del 11 de febrero del 2005 y su impacto en el río Mocotíes. Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, 56(1), 11-40.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (s.f.). ArcGIS Earth: Explore su entorno en 3D. ESRI. <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-earth/overview>

Euroinnova International Online Education. (s.f.). La importancia del mantenimiento de carreteras: ¡el camino hacia la seguridad y eficiencia vial! Euroinnova. <https://www.euroinnova.com/ingenieria/articulos/mantenimiento-de-carreteras>

Fiorentini, N., y Losa, M. (2025). Road Detection, Monitoring, and Maintenance Using Remotely Sensed Data. Remote Sensing, 17, (5). <https://doi.org/10.3390/rs17050917>

FlyPix AI. (2025a). Detección de daños en la carretera mediante inteligencia artificial y aprendizaje profundo. FlyPix AI. <https://flypix.ai/es/blog/road-damage-detection/>

FlyPix AI. (2025b). Las mejores herramientas de detección de daños en la carretera para un mantenimiento eficiente. FlyPix AI. <https://flypix.ai/es/blog/road-damage-detection-tools/>

González, O. (2025). Cómo la tecnología satelital está transformando el futuro de la seguridad vial. Foro Económico Mundial. <https://es.weforum.org/stories/2025/03/como-la-tecnologia-satelital-esta-transformando-el-futuro-de-la-seguridad-vial-0d5536619b/>

González, J., Backhoff, M., Morales, E., y Vázquez, J. (2014). Captura de información de infraestructura para el transporte, a través de técnicas de teledetección. Caso de estudio: Cálculo de invasión al derecho de vía (Publicación Técnica No. 428). Instituto Mexicano del Transporte. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt428.pdf>

Google Maps Platform. (s.f.). Google Earth: Funciones. Pon el mundo a trabajar. Google. [https://mapsplatform.google.com/intl/es-419\\_mx/maps-products/earth/capabilities/](https://mapsplatform.google.com/intl/es-419_mx/maps-products/earth/capabilities/)

Google. (s.f.). Google Earth. <https://www.google.com/earth/about/versions/>

Hernández, O. (2008). Proyecto Cartografía Geológica y Modelamiento Estructural de las Cuencas de Urabá y Sinú-San Jacinto a partir de la Interpretación de Imágenes de Sensores

Remotos y Monitoreo Sísmico: Componente de Sensores Remotos, Informe de Avance No 1. Universidad Nacional de Colombia y Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). [https://www.anh.gov.co/documents/2729/1\\_Sensores\\_Remotos.pdf](https://www.anh.gov.co/documents/2729/1_Sensores_Remotos.pdf)

Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGraw-Hill Education.

Hoek, E., y Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering* (3rd ed.). Chapman and Hall.

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. Ministerio de Transporte de Colombia. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3855-manual-de-drenaje-para-carreteras-2009>

Laffaille, J., Ferrer, C., y Rincón, J. (2005). Antecedentes históricos de eventos meteorológicos ocurridos en el valle del río Mocotíes y sus impactos geomorfológicos. *Revista Geográfica Venezolana*. <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/regeoven/article/view/11214>

Medina, D., Morilla, N., Laura, P., y Pimstein, L. (2015). Mapa de unidades de suelo y litología superficial como contribución al proyecto gestión integral de riesgos en espacios urbanos - fase Mérida, Venezuela. *Boletín de Geología*, 37(1), 83–97.

Mejía, S. (2023). Evaluación de las características geométricas de la vía Bella Andina - Granadillas según el Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG - 2018, Jaén – 2023 [Tesis de título profesional inédita]. Universidad Nacional de Jaén.

Meteored. (s.f.). El tiempo en Tovar por horas. <https://www.tiempo.com/venezuela/tovar/por-horas>

Microsoft. (s.f.). Mapas de Bing. Bing. <https://www.microsoft.com/es-es/bing/features/maps>

Ministerio de Fomento. (s.f.). Anejo N.º 11. Drenaje (Proyecto de Trazado: Autovía del Mediterráneo, A-7. Tramo: La Mora - La Pobra de Montornés). [https://www.transportes.gob.es/recursos\\_mfom/paginabasica/recursos/12t3750\\_11-drenaje.pdf](https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/12t3750_11-drenaje.pdf)

Ministerio de Fomento. (2011). *Guía de obras de paso y drenaje en carreteras*. Secretaría de Estado de Infraestructuras, España. [https://www.transportes.gob.es/recursos\\_mfom/pdf/66D3B620-33AF-4416-805F-6500E521D713/102919/0810200.pdf](https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/pdf/66D3B620-33AF-4416-805F-6500E521D713/102919/0810200.pdf)

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (1997). *Normas para el proyecto de carreteras*. Venezuela.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2011). *Manual de Carreteras: Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje* (R.D. N° 20-2011-MTC/14). Lima, Perú.

[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20de%20Hidrolog%C3%ADa,%20Hidr%C3%A1ulica%20y%20Drenaje.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20de%20Hidrolog%C3%ADa,%20Hidr%C3%A1ulica%20y%20Drenaje.pdf)

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2014). Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, Perú. [https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/manuales.html](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/manuales.html)

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (s.f.). La corrección de cauces torrenciales: obras transversales y longitudinales. [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-restauracion/restauracion-hidrologico-forestal/rhf\\_caracteristicas\\_correccion\\_cauces.html](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-restauracion/restauracion-hidrologico-forestal/rhf_caracteristicas_correccion_cauces.html)

Molina H., Martínez O., Marquina V., y Amaya H. (2013). Áreas de expansión urbana en Tovar, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 54(2), 241–257.

Morales, A. (2015). ArcGIS Earth – Descarga gratis. MappingGIS. <https://mappinggis.com/2015/11/primeros-pasos-arcgis-earth/>

NASA Applied Sciences. (s.f.). Repaso de la Teledetección Óptica e Introducción a SNAP. [https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2021-10/Aq\\_Part2\\_Spanish.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2021-10/Aq_Part2_Spanish.pdf)

National Aeronautics and Space Administration. (2023). Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota). NASA Applied Sciences. [https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-02/Fundamentals\\_of\\_RS\\_Span.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-02/Fundamentals_of_RS_Span.pdf)

National Land Imaging Program. (s.f.). Landsat Benefits, State By State. U.S. Geological Survey (USGS). <https://www.usgs.gov/programs/national-land-imaging-program/landsat-benefits-state-state>

Pabón, R. (2007). Evaluación Geológica y Análisis de la Vulnerabilidad Geotécnica en el Torrente La Jabonera del Valle del Mocotíes, Municipio Tovar del Estado Mérida [Tesis de pregrado, Universidad de Los Andes]. [http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde\\_archivos/10/TDE-2008-11-10T11:53:09Z-438/Publico/pabonrafael%20I%20Parte.pdf](http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_archivos/10/TDE-2008-11-10T11:53:09Z-438/Publico/pabonrafael%20I%20Parte.pdf)

Pan, Y., Zhang, X., Jin, X., y Yu, H. (2016). Road pavement condition mapping and assessment using remote sensing data based on MESMA. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 34, (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/34/1/012023>

Pazzanese, C. (2017). Our crumbling infrastructure. *The Harvard Gazette*. <https://news.harvard.edu/gazette/story/2017/01/our-crumbling-infrastructure/>

Pizarro, R., Flores, J., Sangüesa, C., Martínez, E., y León, L. (2003). Manual de Diseño: Estructuras de Control de Sedimentos. Ministerio de Agricultura de Chile; Corporación Nacional Forestal (CONAF).

PNUD - Climate Promise. (2025, 28 de febrero). ¿Qué son los sistemas de alerta temprana y por qué son importantes para la acción climática? <https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/que-son-los-sistemas-de-alerta-temprana-y-por-que-son-importantes-para-la-accion>

Ponce, V. M. (2008). Manual de drenaje de carreteras. San Diego State University. Recuperado de [https://ponce.sdsu.edu/drenaje\\_de\\_carreteras.html](https://ponce.sdsu.edu/drenaje_de_carreteras.html)

Rasillad, D, y Orla, F. (2023). LA FOTOGRAFÍA AÉREA. [https://personales.unican.es/rasillad/docencia/G174/2\\_fotografia\\_aerea/fotografia\\_aerea.html](https://personales.unican.es/rasillad/docencia/G174/2_fotografia_aerea/fotografia_aerea.html)

Ratmiroff, G. de, Ramírez, C., y Vargas, J. (1969). Mapa Geológico de Tovar, Estado Mérida [Mapa]. Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Dirección de Geología.

Roa, Z. (2022, 23 de junio). Troncal 007 de Mérida está en riesgo por deslizamientos de tierra y piedras. Radio Fe y Alegría Noticias. <https://www.radiofeyalegrianoticias.com/troncal-007-de-merida-esta-en-riesgo-por-deslizamientos-de-tierra-y-piedras/>

Romero, E. (2023, 23 de julio). Mantenimiento de carreteras: claves para una infraestructura segura y duradera. Structuralia. <https://blog.structuralia.com/mantenimiento-de-carreteras>

Sancho R., Galán, D., González, B., Marchamalo M., y Martínez Marín, R. (2021). Aplicación de la fotogrametría con drones al control de deformación de estructuras y terreno. Informes de la Construcción, 73, (561). <https://doi.org/10.3989/ic.77867>

Schnebele, E., Tanyu, B., Cervone, G., y Waters, N. (2015). Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. European Transport Research Review, 7, (2). <https://doi.org/10.1007/s12544-015-0156-6>

Schubert, C. (1980). Geología de la cuenca del río Mocotíes, Andes venezolanos. Acta Científica Venezolana, 31, 381-394.

Tori, M. (2018). El Gobierno italiano comienza el proceso para revocar la concesión de la gestión de carreteras a Autostrade. El Mundo. <https://www.elmundo.es/internacional/2018/08/17/5b770b5ae5fdea412e8b45b2.html>

U.S. Geological Survey (USGS). (s.f.). Landsat Satellite Missions. USGS. <https://www.usgs.gov/landsat/landsat-satellite-missions>

Universidad Andina “Néstor Cáceres Velásquez”. (2018). Modelo Digital de Terreno de Google Earth vs. GPS Diferencial para el diseño geométrico de la carretera Alto Perú – Patapujo [Tesis de título profesional inédita]. Universidad Andina.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (s.f.). Filita. Rocas metamórficas. Colección de Minerales de la Facultad de Ingeniería, UNAM. <https://www.ingenieria.unam.mx/geologia3d/fichas/Metamorfica/FILITA.pdf>

VISE. (2017, 5 de diciembre). ¿Qué incide en el deterioro de una carpeta asfáltica? <https://www.vise.com.mx/que-incide-en-el-deterioro-de-una-carpeta-asfaltica/>

Wingtra. (s.f.). Topografía con un dron. Wingtra. <https://wingtra.com/es/topografia-sig/>

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

## ANEXOS

## Anexo A. Resumen de los estudios analizados

Tabla A 1. Resumen de los estudios analizados

Caso de Estudio	Título del Estudio y Fuente	Objetivo Principal	Tecnología y Plataforma	Metodología Clave	Hallazgos Clave	Aplicación en Mantenimiento Vial
Caso 1	"Road pavement condition mapping and assessment using remote sensing data based on MESMA" (Pan et al., 2016)	Demostrar la capacidad de los datos multiespectrales para mapear las etapas de envejecimiento del asfalto.	Imágenes satelitales (WorldView-2)	Análisis Espectral (MESMA)	Se logró mapear y cuantificar las áreas de pavimento en diferentes etapas de envejecimiento (preliminar, moderado, avanzado).	Permite un modelo de mantenimiento predictivo al identificar el deterioro antes de que sea visible.
Caso 2	"Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment" (Schnebele et al., 2015)	Servir de puente entre los métodos de evaluación tradicionales y la teledetección.	Diversas (LiDAR, SAR, ArcGIS)	Revisión de la literatura y síntesis técnica	La teledetección reduce significativamente la necesidad de inspecciones manuales y permite la evaluación a gran escala.	Optimización de los recursos al enfocar las inspecciones manuales solo en las áreas críticas.
Caso 3	"Road Detection, Monitoring, and Maintenance Using Remotely Sensed Data" (Fiorentini y Losa, 2025)	Proponer un modelo de aprendizaje automático para predecir condiciones en carreteras sin pavimentar.	Imágenes satelitales	Aprendizaje Automático (Machine Learning)	Demostró el valor de la teledetección como solución escalable y de bajo costo para áreas rurales.	Gestión eficiente de grandes redes de carreteras rurales y no pavimentadas en países en desarrollo.
Caso 4	"Auscultación de pavimentos mediante interpretación de imágenes" (Berrio y Ussa, 2020)	Optimizar la identificación de patologías viales superando la subjetividad de la inspección visual.	Sensores remotos y procesamiento de imágenes	Algoritmos de detección y clasificación de fallas	Desarrollo de un algoritmo capaz de detectar y clasificar cuatro tipos de fallas con alta precisión.	Transición de un modelo correctivo a uno de planificación estratégica mediante inventarios de daños automatizados.

Caso 5	"Cálculo de invasión al derecho de vía mediante teledetección" (González et al., 2014)	Evaluar el potencial de la teledetección para identificar invasiones en zonas de reserva vial.	Imágenes satelitales de alta resolución y Ortofotos	Procesamiento en SIG y protocolos de clasificación digital	Identificación precisa de asentamientos no autorizados y cuantificación de áreas de riesgo asociadas.	Vigilancia continua y objetiva para la recuperación de espacios y planificación de futuras ampliaciones viales.
Caso 6	"Aplicación de la fotogrametría con drones al control de deformación de estructuras" (Sancho et al., 2021)	Desarrollar una metodología para el control de movimientos y deformaciones en estructuras.	Drones (fotogrametría, RTK)	Fotogrametría (Structure From Motion - SfM)	Logró una precisión de deformación milimétrica ( $\pm 2$ mm) en el monitoreo de una presa.	Monitoreo de alta precisión en puentes, taludes y detección de fallas de borde en la calzada.
Caso 7	"Planificación vial regional y gestión geométrica limitada" (Carrero / Corp. de los Andes, 1990)	Evaluar la red vial de los Pueblos del Sur (Mérida) para optimizar el diseño y la comercialización.	Tradicional (Trabajo de campo manual)	Reconocimiento expedito y evaluación cualitativa/cuantitativa	Identificó limitaciones geográficas extremas (pendientes de hasta 35%) y propuso 9 variantes estratégicas.	Corrección geométrica radical de trazados para convertir caminos precarios en una red funcional y segura.

### Anexo B. Resumen de daños por la vaguada de 2021

**Tabla B 1.** *Resumen de daños por la vaguada de 2021*

Indicador	Descripción y Detalles
Fallecidos y desaparecidos	Al menos 15 muertos y 6 desaparecidos reportados inicialmente. Cifras oficiales se actualizaron a 20 muertes confirmadas (16 en Tovar, 4 en El Corozo) y 3 desaparecidos.
Familias afectadas	Más de 35,000 personas afectadas y al menos 657 viviendas dañadas o destruidas en Tovar. Se reportó un total de 10,000 familias afectadas en el Valle del Mocotíes.
Daño a la infraestructura vial	La Troncal 007 quedó intransitable debido a deslaves y flujos de detritos. El paso quedó restringido, permitiendo solo el tránsito de personas a pie o en motocicletas.
Puentes	11 puentes colapsados o severamente dañados.
Comunicaciones y servicios	Zonas quedaron sin servicio eléctrico y de comunicaciones. La falta de acceso vial impidió el transporte de gas doméstico y otros insumos esenciales.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

## Anexo C. Análisis descriptivo de microcuencas por teledetección

### C.1 Cuenca: Quebrada La Parada. Progresiva 4+250 - 4+500

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.402588°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.634781°
- Descripción técnica de la microcuenca hidrográfica: La unidad de análisis corresponde a una microcuenca de montaña ubicada entre las progresivas 4+250 y 4+500 de la vía, drenando en el sector cercano a Santa Cruz de Mora. Este análisis se centra en la fragilidad geológica estructural, la inestabilidad histórica (coluviones) y la amenaza activa de erosión concentrada (ver Figura C.1 1).

**Figura C.1 1.** Cuenca: quebrada La Parada. Progresiva 4+250 - 4+500



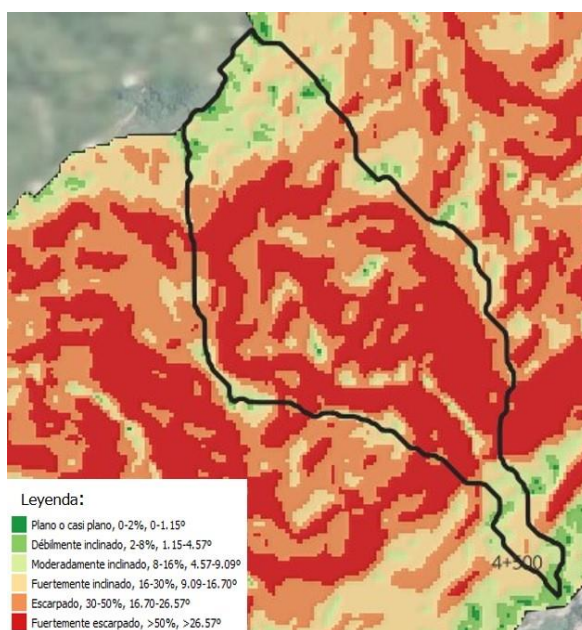
**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

- Características geológicas y estructurales: El sistema de la cuenca está dominado por factores litológicos que favorecen la inestabilidad superficial.
  - Litoestructura: La litología dominante es filita, aunque también existe granito en la parte superior de la cuenca.
  - Geología estructural (discontinuidades): Se identifica una única orientación predominante de fracturas que es paralela a la longitud de la cuenca. Esta alineación estructural es crítica, ya que crea una zona de debilidad longitudinal que el cauce principal y los procesos de ladera pueden explotar, favoreciendo la

incisión y los movimientos de masa de tipo traslacional a lo largo de los ejes de drenaje. No hay una orientación que presente más densidad, y la densidad general es relativamente baja. Esto, combinado con la litología de filita, puede implicar que los deslizamientos sean menos frecuentes, pero potencialmente involucren masas de suelo o roca más grandes al fallar.

- Meteorización y suelos: El relieve es redondeado y muy irregular, lo que indica una meteorización química intensa y avanzada de la filita. El resultado es un suelo residual arcilloso, el cual es propenso a la saturación, a la reducción de la resistencia al corte y a la erosión laminar al perder la cubierta vegetal.
- Geomorfología, pendientes y riesgo de inestabilidad: La morfología, dominada por pendientes fuertes y una forma alargada, se combina con evidencia de inestabilidad activa e histórica:
  - Morfometría y pendientes: La cuenca es alargada. Aunque esto típicamente implica un tiempo de concentración más largo, las fuertes pendientes que dominan la cuenca contrarrestan este efecto, garantizando una alta energía de escurrimiento y capacidad de transporte de sedimentos. La cuenca presenta fuertes pendientes en general, que son el motor principal de los procesos de inestabilidad (ver Figura C.1 2).

**Figura C.1 2. Mapa de pendientes**



- Patrón de drenaje. La orientación de los drenajes tiende a ser paralela y sigue la dirección del cauce principal. Esto sugiere un fuerte control estructural por la orientación de las fracturas y/o la foliación de la filita.
- Procesos de ladera (inestabilidad activa e histórica)
  - Inestabilidad activa (cárcava). Se observa la presencia de una cárcava activa en la parte media de la cuenca. Este es el principal foco actual de erosión concentrada y la mayor fuente de aporte de material fino y grueso al cauce.
  - Inestabilidad histórica (coluviones). Se identifican varios puntos de vegetación espesa que se localizan sobre lo que parecen ser zonas de depósitos de material deslizado anteriormente (coluviones). La presencia de estos depósitos inactivos (por la vegetación) implica una vulnerabilidad histórica a los movimientos en masa y un riesgo latente de reactivación por saturación.
- Riesgo a la vía. El material (detritos) desprendido de la cárcava y de posibles reactivaciones de los coluviones podría ser transportado por el cauce, con el potencial de afectar o colmatar la obra de paso de la vía.
- Vulnerabilidad antrópica y procesos erosivos críticos: A pesar de la vegetación generalizada, existen focos de intervención que aceleran el riesgo erosivo.
  - Cobertura vegetal. La cuenca presenta vegetación muy espesa en gran parte de su extensión, lo que actúa como un factor mitigante importante, anclando el suelo superficial y reduciendo la erosión.
  - Actividad agrícola (focos de riesgo). Se observa actividad agrícola en varios puntos. La remoción de la cubierta vegetal en estas zonas expone el suelo arcilloso subyacente a la acción de la precipitación, haciéndolo extremadamente propenso a la erosión laminar y en surcos, lo que incrementa la carga de sedimentos finos hacia el cauce principal.

## **C.2 Cuenca: Quebrada Carmania/Los Cedros. Progresiva 5+500 - 5+750**

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.397400°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.644107°
- Descripción técnica de la microcuenca hidrográfica: La unidad de análisis corresponde a la microcuenca ubicada entre las progresivas 5+500 y 5+750 de la vía, drenando desde la zona de La Parada y descargando cerca del núcleo poblacional de Santa Cruz de Mora. Este análisis se centra en la fragilidad geológica, la

inestabilidad por erosión y la vulnerabilidad en la cabecera de la cuenca (ver Figura C.2 1).

**Figura C.2 1.** Cuenca: quebrada Carmania/Los Cedros. Progresiva 5+500 – 5+750

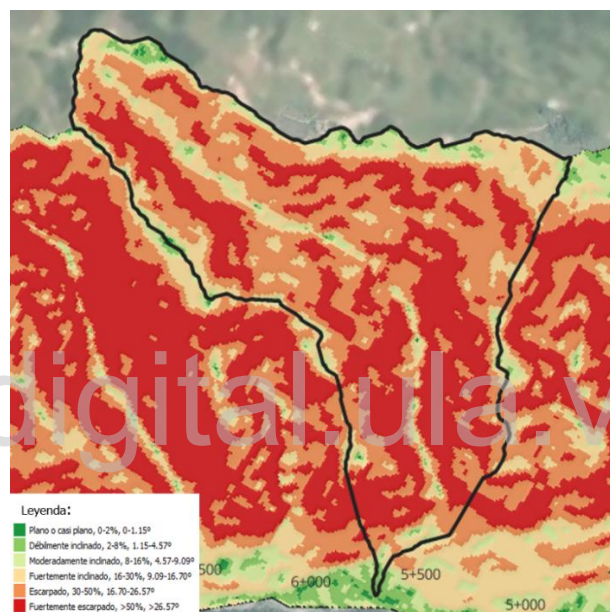


**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Características geológicas y estructurales: La cuenca opera bajo un régimen de fragilidad estructural y meteorización avanzada.
  - Litoestructura: La litología dominante es filita.
  - Geología estructural (discontinuidades). Se observan dos orientaciones predominantes de fracturas. La forma de la cuenca es irregular, siendo relativamente alargada y asimétrica. La mayor concentración de fracturas se localiza en la ladera derecha de la quebrada. La mayor densidad de fracturas (zona de máximo riesgo estructural) se concentra en la parte baja de la cuenca, justo en la zona de transición hacia el punto de salida y la carretera. Esta alta fragmentación en la zona de descarga aumenta el riesgo de falla del macizo rocoso y la susceptibilidad a la erosión y la socavación.
- Meteorización y suelos: La presencia de bordes redondeados en ambas orientaciones es un indicador clave de meteorización química avanzada. El resultado es la formación de suelo residual arcilloso, el cual es altamente propenso a la erosión laminar y tiene un bajo factor de seguridad ante la saturación.

- Geomorfología, pendientes y riesgo de inestabilidad: La morfología favorece la inestabilidad antigua y actual, segmentando el riesgo por zonas.
  - Pendientes. La cuenca presenta una diferenciación morfológica crítica: En la zona alta (cabecera), se presentan pendientes con valores más bajos, lo que reduce la energía potencial y favorece la actividad agrícola. En las zonas media y baja, las pendientes son más fuertes, lo que garantiza una alta energía de escurrimiento y la capacidad de transporte de detritos en el cauce principal (ver Figura C.2 2).

**Figura C.2 2. Mapa de pendientes**



- Patrón de drenaje. La orientación de los drenajes tiende a ser paralela a angular, lo que indica un fuerte control estructural de los planos de foliación y fractura de la filita sobre la red hídrica.
- Procesos de ladera (inestabilidad activa e histórica)
  - Inestabilidad activa (SO-NE). Se observa la presencia de una cárcava activa y otras cárcavas en inicio en la orientación Suroeste-Noreste. Estas son el principal foco de erosión concentrada y aporte de material al cauce.
  - Inestabilidad histórica. Se observan varios puntos de vegetación espesa que se localizan en lo que parecen ser zonas de depósito de material deslizado anteriormente (coluviones). Esto confirma una historia de movimientos en masa

en la cuenca, y estos depósitos antiguos representan un riesgo de reactivación por saturación.

- Riesgo a la vía. El material desprendido de las cárcavas activas es la fuente de la carga sólida que será transportada y puede afectar la obra de paso de la vía, que al ser material fino podría ser por obstrucción o colmatación.
- Vulnerabilidad antrópica y procesos erosivos críticos: La actividad humana se concentra en la zona más vulnerable al control de sedimentos:
  - Actividad agrícola (foco de riesgo). La actividad agrícola es significativa y se concentra en la parte alta de la cuenca, aprovechando las pendientes más suaves.
  - Riesgo de erosión laminar. La deforestación por agricultura en la cabecera expone el suelo arcilloso a la intemperie, lo que incrementa la erosión laminar y en surcos, generando un aporte constante de sedimentos finos que aumentan la carga sólida y la turbidez del escurrimiento.
  - Cobertura vegetal mitigante. La vegetación muy espesa en la zona media y baja ofrece una mitigación natural esencial contra la inestabilidad superficial en estas áreas.

### **C.3 Cuenca: Quebrada Los Aponcio. Progresiva 8+250**

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.385415°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.665130°
- Descripción técnica de la microcuenca hidrográfica: La unidad de análisis corresponde a la microcuenca que drena hacia la progresiva 8+250, caracterizada por una litoestructura donde predomina la filita y afloramientos de granito en las cotas superiores. Este análisis se centra en la fragilidad geológica y el control estructural del macizo, el cual presenta una baja densidad de fracturas. (ver Figura C.3 1).

**Figura C.3 1.** Cuenca: quebrada Los Aponcio. Progresiva 8+250

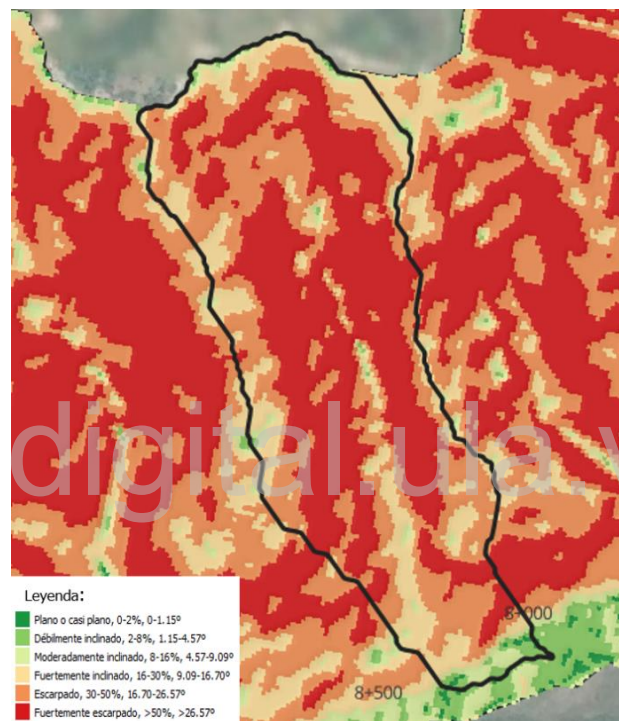


**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Características geológicas y estructurales
  - Litoestructura: La litología dominante en la cuenca es filita, aunque también se observa granito en la parte superior de la cuenca.
  - Geología estructural (discontinuidades): Se observan dos orientaciones predominantes de fracturas. La característica crítica es la baja densidad de fracturas en ambos sistemas. Una baja densidad implica que el macizo rocoso tiene mayor continuidad, pero cuando ocurre la inestabilidad, los bloques o masas de suelo movilizados pueden ser de mayor tamaño.
- Meteorización y suelos: El relieve redondeado en ambas orientaciones, combinado con la vegetación espesa, indica una meteorización química avanzada de la filita. El producto de esta meteorización es un suelo residual arcilloso, el cual tiene baja permeabilidad, pero alta plasticidad y baja resistencia al corte cuando se satura. Estos suelos son extremadamente propensos a la erosión laminar y a los deslizamientos superficiales.

- Geomorfología, pendientes y riesgo de inestabilidad: La morfología es el factor detonante principal, con evidencias de inestabilidad activa.
  - Pendientes. La cuenca presenta fuertes a muy fuertes pendientes, con valores que oscilan entre 30% y 50%, superando el 50% en numerosas áreas (ver Figura C.3 2). Estas pendientes son la principal fuerza impulsora de la inestabilidad y el transporte de detritos.

**Figura C.3 2. Mapa de pendientes**



- Patrón de drenaje. La orientación de los drenajes tiende a ser paralela a angular. Este patrón es típico en zonas con control estructural fuerte, como la foliación y fracturas de la filita, y altas pendientes, lo que resulta en una rápida concentración del flujo y un alto poder erosivo.
- Procesos de remoción y transporte: Se identifican zonas desprovistas de vegetación en ambos lados de la cuenca y en la parte baja de la zona media. Estas cicatrices sin vegetación son un fuerte indicio de deslizamientos superficiales o movimientos en masa recientes (posiblemente de tipo flujo de detritos), donde el material, compuesto por suelo arcilloso, se ha desprendido y expuesto la superficie del terreno. El material desprendido de estos movimientos es la fuente de la carga sólida que será

- transportada por el cauce principal, con un alto potencial para afectar la obra de paso de la vía, ya sea por obstrucción, colmatación y/o impacto.
- Factor antrópico y vulnerabilidad: El uso del suelo, aunque limitado, presenta focos de riesgo de erosión.
    - Actividad agrícola. La actividad agrícola es baja, probablemente restringida por las pendientes extremas. Sin embargo, la poca actividad se concentra en la vertiente Noroeste-Sureste (NO-SE). En estos puntos, la remoción de la cubierta vegetal sobre el suelo arcilloso aumenta la vulnerabilidad a la erosión laminar y en surcos, aportando sedimentos finos al sistema de drenaje.
    - Cobertura vegetal natural. Ambos lados de la cuenca mantienen una vegetación espesa, lo que constituye un factor mitigante natural importante, anclando el suelo superficial y reduciendo la energía de la precipitación.

#### **C.4 Cuenca: Quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva 15+000**

- Coordenadas GPS (WGS84): Latitud ( $\phi$ ): 8.356818°/Longitud ( $\lambda$ ): -71.716044°
- Descripción técnica de la cuenca hidrográfica: La unidad de análisis corresponde a una cuenca de montaña de alta energía que drena hacia la progresiva 15+000, descargando sus flujos en las cercanías del núcleo poblacional de El Peñón. Este análisis se centra en la fragilidad geológica estructural, la dinámica de transporte de carga gruesa (bloques graníticos) y la vulnerabilidad de la infraestructura ante eventos de flujo detrítico. La red de drenaje principal presenta un patrón dendrítico a subdendrítico con un marcado control estructural, lo que facilita la concentración rápida de caudales y una elevada capacidad de arrastre de material de fondo (ver Figura C.4 1).

**Figura C.4 1.** Cuenca: quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva 15+000

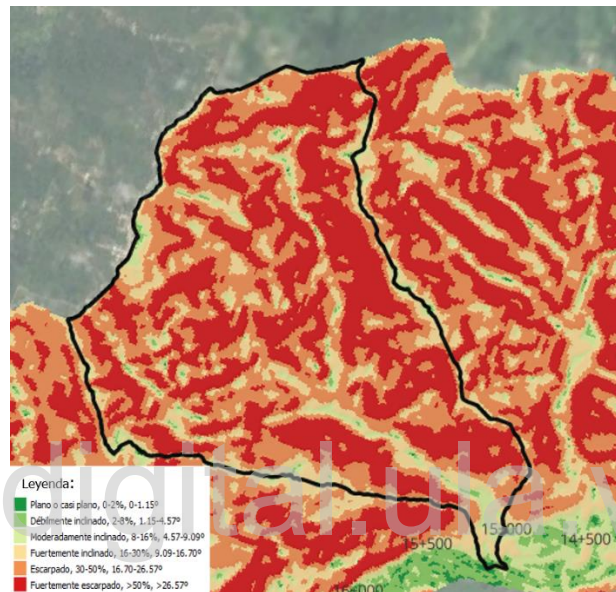


**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- Características geológicas y estructurales
  - Litoestructura: La litología dominante en la cuenca es granito.
  - Geología estructural y red de drenaje: Se identifican dos sistemas de diaclasas o juegos de fracturas predominantes:
    - Orientación Suroeste-Noreste (SO-NE): Corresponde al sistema de fracturas más numeroso (mayor densidad de fracturamiento) y actúa como una zona de debilidad estructural que facilita la captación, infiltración, arranque y transporte de sedimentos, es decir, mayor propensión a la erosión. La baja meteorización del macizo rocoso en este sector se evidencia por la presencia de clastos angulares (rocas menos redondeadas), indicando un aporte de material grueso (gravas y bloques) directamente al cauce principal, lo que sugiere procesos de remoción en masa de tipo caída o deslizamiento de bloques.
    - Orientación Noroeste-Sureste (NO-SE): Corresponde al sistema de fracturas más extenso (mayor continuidad lateral). Esta orientación es crítica para la estabilidad de la infraestructura vial, ya que las fuertes pendientes, mostradas en la Figura C.4 2 (30%–50% o 17° a 27°) y la orientación de las fracturas dirigen el escurrimiento y los procesos gravitacionales directamente hacia la

zona de interés, generando una alta vulnerabilidad geotécnica. La meteorización superficial más avanzada, indicada por la presencia de clastos redondeados, resulta en un aporte de material fino (arena y limos), probablemente asociado a escorrentía superficial de partículas más pequeñas.

**Figura C.4 2. Mapa de pendientes**



- Procesos de remoción y transporte: Se observa una acumulación significativa de depósitos de detritos en la parte baja, generados por la actividad de cárcavas (canales de erosión profunda) en las laderas. Esto evidencia una tasa de erosión alta en la cuenca.

Existe una diferencia en la granulometría de aporte entre los sectores. El sector SO-NE tiene un aporte predominante de material de granulometría gruesa (bloques y gravas), asociado a mayor fragilidad estructural, mientras que el sector NO-SE tiene un aporte predominante de material de granulometría fina (arena y limos), asociado a mayor meteorización superficial y acción antrópica.

- Impacto antrópico: La presencia de actividades agrícolas en el sector NO-SE contribuye a la degradación de la cobertura vegetal (reducción del espesor del bosque). Esta remoción de la protección del suelo intensifica los procesos de erosión laminar y en surcos, aumentando la escorrentía superficial y el aporte de sedimentos finos, exacerbando la inestabilidad de las laderas.

## **Anexo D. Diagnóstico en campo y evaluación de obras de drenaje**

### **D.1 Quebrada Los Aponcio. Progresiva: 8+250. Diagnóstico geotécnico e hidráulico**

La quebrada Los Aponcio, ubicada en la progresiva 8+250 se caracteriza por una composición litológica mixta, aunque con un predominio de material de granulometría fina que evidencia la presencia de filitas en la cuenca. La inspección sugiere un alto grado de meteorización de estas rocas, posiblemente influenciado por las condiciones climáticas más cálidas de proximidad a Santa Cruz de Mora. Se confirma también la existencia de bloques de granito de menor tamaño y cantidad, lo que ratifica la presencia de ambas litologías.

La obra de drenaje transversal consiste en un cajón multicelda de seis secciones (ver Figura D.1 1). La predominancia de material fino ha resultado en una colmatación mediana de la sección del cajón por depósito de sedimentos, lo que reduce su capacidad hidráulica útil (ver Figura D.1 2). No obstante, debido a la baja energía cinética del material transportado (granulometría menor), no se observan daños estructurales ni evidencias de impacto en los pilares del cajón. Se constata, además, la recurrente presencia de desechos sólidos antrópicos.

La dinámica fluvial exhibe una tendencia a la migración lateral del cauce, con un desplazamiento progresivo del eje de flujo hacia el margen izquierdo, visto en la dirección de flujo. Este desplazamiento direccional está provocando un aporte concentrado de material y un incremento de la presión hidráulica sobre dicho margen. Pese a la ausencia de erosión lateral evidente en el momento de la inspección, la tendencia de migración representa un riesgo potencial de socavación futura del margen izquierdo.

**Figura D.1 1.** Colmatación mediana de la sección del cajón por depósito de sedimentos y desechos sólidos



**Figura D.1 2.** Sedimentos de grano fino



## **D.2 Quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva: 15+000. Diagnóstico geomorfológico e hidráulico**

La quebrada El Peñón/San Rafael, ubicada en la progresiva 15+000, es una unidad hidrológica caracterizada por un régimen de transporte de carga gruesa. La obra de drenaje transversal existente es un cajón de doble celda con dimensiones aproximadas de 3.5 m x 3.0 m por celda, flanqueado por muros ala o aletas de aproximadamente 4.0 m de longitud (ver Figura D.2 2).

La litología circundante, compuesta por la presencia de bloques de granito de gran magnitud visibles aguas arriba y aguas abajo del cajón, confirma un elevado potencial de arrastre de material detrítico (carga de fondo). La formación de un cono de deyección o abanico aluvial de composición granítica inmediatamente aguas arriba de la obra de paso, junto con la evidencia de una estructura de paso anterior colapsada (ver Figura D.2 1), subraya la dinámica de alta

energía de la cuenca. Adicionalmente, se observa material depositado y un aporte significativo de desechos sólidos antrópicos en la sección del cajón, lo que incrementa el riesgo de obstrucción hidráulica.

Desde una perspectiva del riesgo, la configuración de doble celda es inadecuada. El muro central o pilar intermedio de soporte representa un obstáculo estructural crítico. Este elemento es altamente susceptible a impactos y daños estructurales generados por la movilización de los grandes bloques de roca transportados durante los eventos de crecida.

**Figura D.2 1.** *Aguas arriba del cajón de paso. Evidencia de una estructura de paso anterior colapsada*



**Figura D.2 2.** *Cajón de dos celdas. Presencia de rocas de gran tamaño*



### **D.3 Quebrada La Jabonera (Prg. 17+750). Análisis geológico e hidrológico de la cuenca**

La cuenca de la quebrada La Jabonera, ubicada en la progresiva 17+750, presenta una complejidad litológica y estructural.

En relación a la geología y composición litológica, se ha determinado un contacto entre dos unidades geológicas principales: el granito, identificado mediante teledetección satelital y fotografía aérea, en el sector superior de la cuenca, y afloramientos de filita (ver Figura D.3 1), confirmados por inspección de campo, en cotas inferiores. La coexistencia de ambas litologías en contacto directo es un indicador estructural de potencial actividad tectónica y la presencia de fallas geológicas en el área de drenaje.

Con respecto a la morfología del cauce, el curso inferior de la quebrada exhibe una curva de radio reducido que opera como un dispositivo natural de retención hidráulica. Esta configuración morfológica promueve la disminución de la velocidad de flujo y la subsiguiente sedimentación, caracterizando la sección como una zona de depósito aluvial. Se constató la presencia de restos de terraza aluvial, validando la dinámica histórica de deposición de la cuenca.

**Figura D.3 1. Afloramiento de filita**



El análisis geomorfológico del curso inferior de la quebrada indica que, si bien la curva de radio reducido promueve una activa sedimentación y el depósito de material aluvial, la dinámica actual no representa un riesgo significativo de socavación ni de afectación directa a la estabilidad del terraplén de la vía en la progresiva. No obstante, el principal riesgo operativo se concentra en el drenaje transversal. Los registros testimoniales de los efectivos de Protección Civil locales confirman que la alcantarilla ha experimentado episodios recurrentes de colmatación total por el arrastre de sedimentos. Para la mitigación y el diseño correctivo de esta vulnerabilidad hidráulica, resulta crucial la verificación de que la sede de Protección Civil dispone de una Estación Meteorológica Automática (EMA) y emplea el sistema AURORA para el registro continuo de

variables pluviométricas y eólicas (ver Figura D.3 2). Estos datos son considerados esenciales para la calibración hidrológica de la cuenca y el análisis de frecuencia de eventos de precipitación extrema, permitiendo el dimensionamiento preciso de las soluciones propuestas.

**Figura D.3 2.** Estación meteorológica automática (EMA)



#### **D.4 Quebrada Los Higuerones. Progresiva: 18+000**

La cuenca de la quebrada Los Higuerones, localizada en la progresiva 18+000, exhibe una insuficiencia hidráulica recurrente en su obra de drenaje transversal. De acuerdo con el registro testimonial proporcionado por los efectivos de Protección Civil, la alcantarilla en este punto experimenta una falla por colmatación que ocurre sistemáticamente durante las temporadas de precipitación. Dicha obstrucción provoca el desborde superficial del flujo hídrico sobre la plataforma de la vía, lo que constituye un riesgo vial directo y compromete la continuidad operacional del tramo durante eventos pluviométricos de alta intensidad.

#### **D.5 Quebrada Blanca. Progresiva: 19+125. Análisis hidrológico**

La unidad hidrológica analizada corresponde a la cuenca quebrada Blanca, ubicada en la progresiva 19+125 del tramo de estudio.

Esta quebrada presenta un sistema de drenaje entubado (embaulamiento) que se extiende desde el sector Monseñor Moreno hasta su descarga final en el río adyacente (ver Figura D.5 1). La sección de salida del drenaje se localiza aguas abajo del puente que facilita la conexión vial hacia el matadero municipal de Tovar. La sección de salida del drenaje se

caracteriza por una densa cobertura de vegetación riparia, predominantemente de estrato arbustivo-herbáceo, como se observa en la Figura D.5 2. La presencia de esta masa vegetal estabilizadora en el margen fluvial constituye un indicador geomorfológico de baja energía erosiva reciente en la desembocadura. No obstante, en el contexto de la vulnerabilidad hidráulica de la cuenca, esta densidad de vegetación podría actuar como un filtro estructural que, sumado al aporte de residuos antrópicos, facilita la retención de material flotante e incrementa el riesgo de obstrucción del embaulamiento durante eventos de alto caudal.

El régimen hidrológico de la quebrada Blanca se ha caracterizado por su estabilidad durante los últimos años, según se infiere de la inspección de campo y se confirma por testimonios de los pobladores y el personal de Protección Civil. Dicha estabilidad se mantuvo incluso durante los eventos de precipitación extrema registrados en agosto de 2021.

No obstante, las fuentes consultadas señalan que la principal vulnerabilidad hidráulica radica en la gestión de desechos sólidos. El aporte de residuos antrópicos provoca obstrucciones en el sistema de embaulamiento, lo que ha generado desbordamientos localizados en los sectores urbanos de Barrio Escondido y El Corozo. Es crucial destacar que, hasta la fecha de la inspección, estos eventos de desborde no han comprometido la integridad estructural ni la funcionalidad del tramo de la vía objeto de la presente investigación.

**Figura D.5 1.** Vista del trazado del sistema de drenaje entubado



**Figura D.5 2.** Punto de salida. Vista de la densa cobertura de vegetación



## Anexo E. Evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de la quebrada El Cacique/El Silencio

### E.1 Quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva 11+250

Las imágenes satelitales mostradas en la Figura E.1 1, con una diferencia de 13 años (octubre de 2010 y 2023), revelan un comportamiento altamente dinámico y una clara evolución hacia una mayor inestabilidad y erosión del cauce. La litología de filitas en la cuenca es un factor crítico, ya que estas rocas metamórficas son altamente susceptibles a la meteorización y a la fragmentación, lo que genera una gran cantidad de sedimento fino y es propensa a movimientos en masa, impactando directamente en el régimen de la quebrada.

**Figura E.1 1.** Quebrada El Cacique/El Silencio



**Nota.** La imagen de la izquierda corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen de la derecha corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

- **Análisis de la imagen del 13 de octubre de 2010 (izquierda)**

En 2010, la quebrada muestra un comportamiento irregular. En la parte central de la imagen, el cauce principal parece haberse desbordado o haber migrado significativamente de su lecho habitual. Se observa una amplia zona de depósitos aluviales y material arrastrado (de color claro) que se extiende más allá de lo que sería un cauce confinado. Esto sugiere que, previo a la fecha de la imagen, la quebrada experimentó uno o varios eventos de crecida extraordinarios que superaron su capacidad, generando una fuerte erosión lateral y la deposición de material en las vegas

adyacentes. El cauce principal aparece más ancho y menos definido en algunos tramos. La carretera se encuentra muy cercana a estas áreas de desborde y acumulación de sedimentos, indicando una alta vulnerabilidad a futuras crecidas. Algunas edificaciones también están muy próximas a la zona de influencia de la quebrada. A pesar del desborde identificado, aún se aprecia cierta cobertura vegetal ribereña, aunque interrumpida por los depósitos aluviales.

- **Análisis de la imagen del año 2023 (derecha)**

En 2023, la quebrada parece haber redefinido su cauce principal, que es más visible y confinado en algunos tramos, con márgenes más definidos. Esto podría indicar una profundización del lecho debido a la continua erosión fluvial. A pesar del aparente confinamiento, el cauce en su conjunto es notablemente más ancho y lleno de sedimentos (grava, arena, detritos). La banda de color claro que representa el lecho de la quebrada es mucho más extensa que en 2010, sugiriendo una alta carga de sedimentos transportada aguas abajo. Esto es consistente con la litología de filitas, que se meteorizan fácilmente y aportan gran cantidad de material, especialmente en climas calientes como el de la zona. La amplia extensión del cauce activo y la aparente ausencia de vegetación en sus márgenes inmediatos, junto con el material visible, sugiere que la quebrada ha experimentado flujos de detritos, donde el agua arrastra una gran cantidad de sólidos (rocas, lodo, vegetación).

La vegetación ribereña parece haberse reducido en comparación con 2010, dejando márgenes más expuestas a la erosión. Hay signos de erosión lateral en varios puntos, donde el cauce ha socavado las laderas adyacentes. La infraestructura vial y las construcciones siguen estando muy cerca de la quebrada, lo que indica que el riesgo por crecidas y flujos de detritos persiste y posiblemente se ha incrementado debido a la mayor inestabilidad general de la cuenca.

En síntesis, la quebrada El Cacique/El Silencio ha pasado de un evento de desborde y deposición en 2010 a un régimen de mayor energía, erosión y alta carga de sedimentos en 2023, con claras evidencias de procesos de flujo de detritos. La litología de filitas, que aporta abundante material fino y grueso por meteorización y movimientos en masa en las laderas, es un factor clave en esta dinámica. La interacción directa con la infraestructura vial y los asentamientos humanos subraya la urgencia de medidas de mitigación.

La infraestructura vial en la progresiva 11+250 se encuentra emplazada sobre el cono de deyección de la quebrada El Cacique/El Silencio, lo que implica una fundación sobre

material no consolidado y geomorfológicamente inestable. A pesar de que el buzamiento de las filitas es favorable (en contrapendiente) en los cortes adyacentes, esta ventaja estructural es superada por la alta energía del cauce. La vulnerabilidad principal deriva del régimen de flujos de detritos documentado y la amplia extensión del cauce activo en 2023, exponiendo la carretera a la socavación lateral por la migración del cauce y a la colmatación masiva con sedimentos y detritos. En este caso, el riesgo se enfoca en el compromiso funcional y la inestabilidad de la base del terraplén ante la ocurrencia de crecidas extraordinarias.

### Necesidad de obras de ingeniería

La imagen satelital del 23 de enero de 2018, mostrada en la Figura E 2, en comparación con las de 2010 y 2023, revela un período intermedio en el que la quebrada mostraba signos de recuperación parcial y relativa estabilidad. Para esta fecha, se observa una significativa revegetación en las márgenes y las laderas adyacentes al cauce, indicando que el área había comenzado a recuperarse de eventos previos de desborde y erosión. El cauce de la quebrada aparece visualmente más estrecho y confinado en varios tramos, con una menor extensión de depósitos aluviales expuestos en comparación con la imagen de 2010, sugiriendo una reducción en la frecuencia o magnitud de los eventos de crecida.

**Figura E.1 2.** Quebrada El Cacique/El Silencio, año 2018



**Nota.** Captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)

No obstante, esta aparente estabilidad es engañosa y transitoria. La ausencia de medidas estructurales permanentes, como los diques de retención o muros de encauzamiento, para controlar el transporte de sedimentos y la energía del flujo, deja la quebrada altamente susceptible a la reactivación. El contexto geomorfológico de la cuenca, con laderas inestables y la presencia de filitas meteorizadas, garantiza un aporte continuo de material y una respuesta rápida y enérgica del sistema fluvial ante eventos de lluvia intensa.

El análisis posterior del año 2023, que muestra una erosión y ensanchamiento del cauce aún más pronunciados, confirma que, a pesar de los períodos de recuperación natural, la quebrada no logró alcanzar una estabilidad a largo tiempo sin intervención de obras de ingeniería. Esta secuencia temporal subraya de manera crítica la necesidad de implementar soluciones de mitigación duraderas que aborden tanto la hidrodinámica del cauce como la estabilidad de las laderas, para evitar la recurrencia de daños y la degradación progresiva del entorno.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

## Anexo F. Análisis multitemporal del comportamiento del río Mocotíes y su interferencia con la infraestructura vial

### F.1 Evaluación morfológica del río Mocotíes: Tramo Prg. 1+500 – 2+500

El análisis comparativo de la morfología del cauce del río Mocotíes en el segmento comprendido entre las progresivas Prg. 1+500 y 2+500 revela una condición de mayor estabilidad lateral en comparación con el tramo inicial, aunque se aprecian cambios en la sección hidráulica y la dinámica hídrica de afluentes secundarios, como se observa en la Figura F.1 1.

En este segmento, la dirección principal del cauce ha mostrado una migración lateral mínima entre las fechas de las imágenes satelitales (08/04/2021 y la más reciente). Esto sugiere que la geometría del valle o la naturaleza del material ribereño en este tramo puede ser más competente, lo que limita la erosión y la inestabilidad de los bancos del río, manteniendo el eje del cauce relativamente constante.

**Figura F.1 1.** Evaluación morfológica del río



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

A pesar de la estabilidad en la posición del eje, las imágenes más recientes confirman la tendencia observada en el tramo anterior (Prg. 0+000 – 1+500), mostrando una sección transversal más amplia. Este fenómeno implica una intensificación del proceso de transporte y arrastre de sedimentos, posiblemente debido a pulsos de caudal más altos y periodos de recurrencia más cortos en eventos hidrológicos, resultando en una mayor extensión de la llanura activa y una potencial disminución de la rugosidad en el lecho.

## F.2 Morfodinámica y riesgo en el tramo Prg. 2+500 – 3+250

El segmento de estudio revela un comportamiento altamente dinámico y errático del cauce del río Mocotíes, caracterizado por procesos simultáneos de acreción/alejamiento y erosión/aproximación en lapsos cortos, lo que exige una intervención de ingeniería para estabilizar el tramo vial (ver Figura F.2 1).

**Figura F.2 1.** Morfodinámica del río Mocotíes



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

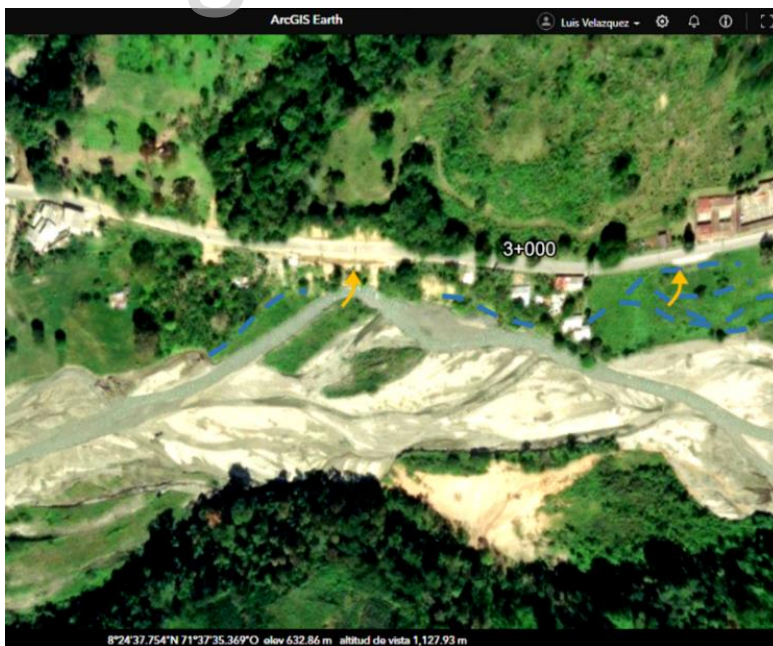
En esta sección, el análisis comparativo (2021 vs. 2023) indica un proceso de acreción de barra o migración lateral de deposición. El cauce principal se ha alejado del terraplén de la carretera, dejando visible el paleocauce fluvial que ocupaba en el año 2021. Este fenómeno sugiere que el río ha optado por un nuevo trazado o ha depositado material en el margen más cercano a la vía.

Contrariamente, en este tramo se presenta un punto de inflexión de riesgo. El río ha experimentado una migración lateral erosiva significativa hacia la carretera.

La distancia horizontal mínima entre el cauce y el terraplén se redujo de aproximadamente 23 m (2021) a solo 13 m (2023). Esta aproximación ha resultado en el arrastre y eliminación de la vegetación riparia existente en el lateral de la vía. La pérdida de esta cubierta protectora expone directamente el material de la infraestructura vial a la fuerza tractiva del flujo fluvial, incrementando exponencialmente el riesgo de socavación basal y falla del talud.

Las huellas fluviales que apuntan hacia la plataforma vial en el sector Prg. 3+000 – 3+250 (ver Figura F.2 2) confirman una tendencia de avance erosivo que, de continuar, puede generar una pérdida de material o el colapso de la carretera.

**Figura F.2 2.** *Paleocauces observados*



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

### F.3 Evaluación geomorfológica y estabilidad relativa: tramo Prg. 3+500 – 4+250

El tramo comprendido entre las progresivas Prg. 3+500 y 4+250, exhibe un comportamiento del río Mocotíes que, si bien es dinámico, no representa un riesgo geotécnico o hidráulico inminente para la plataforma vial (ver Figura F.3 1).

**Figura F.3 1.** Alejamiento y acercamiento limitado del río



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

Prg. 3+500 – 3+750 (alejamiento, resaltado en los círculos amarillos): En este segmento, se observa un comportamiento favorable para la estabilidad de la infraestructura vial. La comparación de imágenes (2021 vs. 2023) indica que el cauce principal se ha alejado del eje de la carretera, probablemente debido a procesos de deposición o migración controlada hacia la margen opuesta. Este fenómeno incrementa el ancho del amortiguamiento natural (llanura de inundación/terracea) entre el río y la vía.

Prg. 4+000 – 4+250 (acercamiento limitado, resaltado en los círculos rojos): Se registra una aproximación del cauce en este sector; sin embargo, las distancias mínimas de separación

permanecen en un rango considerado seguro desde la perspectiva de la erosión lateral de taludes. La distancia mínima reportada es de aproximadamente 140 m.

**Figura F.3 2. Paleocauces observados**



**Nota.** Captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

**Figura F.3 3. Paleocauces observados**



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

El amplio margen de separación entre el cauce activo y el terraplén vial, mantenido a distancias superiores a los 130 m, confiere una estabilidad relativa al tramo de la carretera en este segmento.

La observación de numerosas huellas fluviales (paleocauces o cauces abandonados), mostrados en las Figuras F.3 2 y F.3 3, indica un historial de alta movilidad lateral del río Mocotíes. No obstante, la gran distancia de separación existente permite inferir que estas huellas no representan un problema potencial a corto o mediano plazo para la estabilidad de la plataforma vial.

#### **F.4 Análisis Morfodinámico del Río Mocotíes: Tramo PR 6+750 – 10+750**

Esta sección destaca por una tendencia hacia la ampliación de la sección transversal y una marcada inestabilidad en la red de drenaje transversal. La evaluación se centra en identificar las variaciones en la sinuosidad del río y el estado de los afluentes secundarios que interceptan la vía, los cuales presentan una degradación acelerada que condiciona la operatividad de las obras de drenaje (ver Figura F.4 1). A continuación, se detallan los hallazgos segmentados por progresivas.

**Figura F.4 1. Dinámica del río Mocotíes**



**Nota.** La imagen superior corresponde a Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025); la imagen inferior corresponde a ArcGIS Earth (Versión 2.5), propiedad de Esri (2025). Capturas de pantalla realizadas por el autor

- Estabilidad lateral con ampliación. Prg. 6+750 – 7+500

El río Mocotíes mantiene su eje central sin registrar una migración lateral significativa hacia la infraestructura vial. Se confirma una ampliación de la sección transversal en las imágenes de 2023. Esta variación sugiere un incremento en el volumen y la energía de los eventos hidrológicos recientes, lo cual erosiona los márgenes, pero, en este segmento, no se traduce en una amenaza inminente para la plataforma de la carretera debido a la distancia de seguridad.

- Dinámica de cauce y erosión focalizada. Prg. 7+500 – 8+250

El río presenta una sección más ancha en 2023 (respecto a 2016) y exhibe cambios de dirección de bajo impacto. El tramo mantiene una distancia de seguridad adecuada, minimizando el riesgo para la vía. Se observan numerosos paleocauces, indicativas de la movilidad histórica del río.

La quebrada que intercepta la vía en este tramo muestra signos de erosión total en su cauce, lo que sugiere un incremento considerable en la fuerza de arrastre de sus flujos o la remoción completa de su vegetación riparia. Esto genera un riesgo potencial de colmatación de las obras de drenaje en la carretera.

- Trazado sinuoso y erosión en afluente. Prg. 9+000 – 9+750

Este segmento se caracteriza por un trazado altamente sinuoso con múltiples curvas que experimentaron cambios entre 2021 y 2023. La tendencia de 2023 muestra un acercamiento relativo a la vía. No obstante, la reducción de la distancia no es considerada crítica en comparación con la situación de 2021.

Al igual que en el Prg. 7+500, la quebrada que intercepta la vía en este sector ha sido totalmente erosionada en la imagen de 2023, ratificando un problema generalizado de inestabilidad en los afluentes secundarios y un alto riesgo de aporte de sedimentos y obstrucción vial.

- Estabilidad general con amenaza en afluente. Prg. 9+750 – 10+750

El río mantiene numerosas curvas en ambas fechas (2021 y 2023). A pesar de los cambios de dirección, el cauce principal no representa una amenaza significativa para la carretera en este segmento. Las huellas históricas confirman la alta movilidad. Se destaca la erosión total de la quebrada que intercepta la vía entre las Prg. 10+250 y 10+500. Esta recurrencia en la falla de afluentes secundarios subraya una vulnerabilidad sistémica en las obras de drenaje transversal y la necesidad de una estrategia de control de sedimentos.

#### **F.5 Evaluación de bajo riesgo: tramo Prg. 13+000 – 13+500**

El análisis del segmento comprendido entre las progresivas Prg. 13+000 y 13+500, confirma una situación de bajo riesgo para la infraestructura vial, manteniendo una amplia distancia de seguridad.

Se observan numerosos paleocauces y huellas de antiguos cursos del río Mocotíes (marcadas con líneas discontinuas). No obstante, la orientación predominante de estas huellas es paralela al alineamiento de la carretera (ver Figura F.5 1). Esta disposición longitudinal asegura que las fuerzas erosivas no se dirijan perpendicularmente contra la plataforma vial.

**Figura F.5 1.** *Paleocauces y bajo riesgo observado*



**Nota.** *Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software Google Earth Pro (Versión 7.3), propiedad de Google (2025)*

La distancia horizontal mínima entre el cauce activo y la plataforma vial es superior a 200 m. Esta separación clasifica el segmento como estable y libre de la amenaza de socavación lateral en el corto y mediano plazo.

Bdigital.ula.ve

## Anexo G. Formulación de propuestas de intervención basadas en el análisis descriptivo de microcuencas por teledetección, diagnóstico en campo y evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de las cuencas

### G.1 Propuestas de intervención basadas en el análisis descriptivo de microcuencas por teledetección

Las intervenciones presentadas en este apartado se fundamentan en la detección y caracterización de procesos morfodinámicos mediante el procesamiento de imágenes satelitales. Este análisis descriptivo ha permitido la identificación espacial de zonas críticas, tales como focos de erosión activa, cicatrices de deslizamientos y áreas con alta densidad de fracturas que actúan como fuentes potenciales de sedimentos. Las propuestas se orientan primordialmente al control en la fuente y la estabilización de laderas, empleando criterios de ingeniería hidráulica y bioingeniería para interceptar la carga sólida y regular la escorrentía superficial. El objetivo es proporcionar una respuesta técnica dirigida a los puntos de mayor fragilidad geomorfológica detectados, salvaguardando la integridad operativa de la infraestructura vial y sus elementos de drenaje.

- **Cuenca: Quebrada La Parada. Progresiva 4+250 - 4+500**

A continuación, se presentan las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada La Parada.

**Tabla G.a 1. Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada La Parada**

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Control de la fuente (hidrológico)	Prevenir la saturación de depósitos coluviales y suelos arcillosos.	Drenaje: Construcción de cunetas de coronación y sistemas de drenaje superficial en la parte alta para interceptar la escorrentía.	Control (Hidrológica)
1. Control de la fuente (erosión concentrada)	Detener la incisión y el aporte de detritos de la cárcava activa.	Estructuras/Bioingeniería: Construcción de obras de corrección torrencial o diques de pie y estructuras de transición, combinadas con revegetación para estabilizar la cárcava.	Estructural/Híbrida
2. Control de la fuente (erosión laminar)	Mitigar la erosión laminar y reducir el aporte de sedimentos finos.	Manejo de laderas: Implementar prácticas de conservación de suelos y reforestación con especies adecuadas en las áreas agrícolas.	No Estructural (Manejo Territorial)

3. control del cauce y protección vial	Interceptar la carga sólida final movilizada y proteger la obra de paso de la vía.	Estructuras: Construcción de diques de retención de sedimentos escalonados a lo largo del cauce principal.	Estructural (Contención)
--	--	--	--------------------------

- **Cuenca: Quebrada Carmania/Los Cedros. Progresiva 5+500 - 5+750**

Las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada Carmania/Los Cedros se muestran en la Tabla G.a 2.

**Tabla G.a 2.** Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada Carmania/Los Cedros

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Control de la fuente (cabecera y finos)	Reducir la fuente de sedimentos finos y la escorrentía superficial.	Manejo de Laderas: Implementar prácticas de conservación de suelos y aguas (terrazas o zanjas de infiltración). Reforestación de zonas agrícolas marginales.	No Estructural (Manejo Territorial/Bioingeniería)
2. Control localizado (erosión concentrada)	Estabilizar las áreas de erosión concentrada y detener la incisión regresiva.	Estructuras/Bioingeniería: Construcción de obras de control de cárcavas (torreteras, gaviones de retención) y revegetación asistida en la orientación SO-NE.	Híbrida (Estructural/Control)
3. Control del cauce (protección estructural)	Interceptar la carga sólida (finos y gruesos) movilizada por la quebrada antes de la vía.	Estructuras: Construcción de diques de retención de sedimentos escalonados a lo largo del cauce principal.	Estructural (Contención)
4. Monitoreo y prevención	Detectar la reactivación de deslizamientos históricos y fallas estructurales causadas por la saturación.	Monitoreo: Monitoreo estricto de las zonas de depósitos coluviales antiguos y de la parte baja con alta densidad de fracturas.	Monitoreo (Geotécnico)

- **Cuenca: Quebrada Los Aponcio. Progresiva 8+250**

A continuación, en la Tabla G.a 3, se presentan las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada Los Aponcio.

**Tabla G.a 3.** Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca: quebrada Los Aponcio

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Prioridad clave (control de la fuente/bioingeniería)	Restablecer la protección edáfica y aumentar la resistencia al corte del suelo superficial.	Reforestación Intensiva: Plantación de especies con sistemas radiculares fibrosos y profundos en zonas sin vegetación (cicatrices de deslizamiento) y áreas agrícolas.	Control (Bioingeniería)
2. Control de la fuente (hidrológico)	Interceptar y desviar el agua de escorrentía para prevenir la saturación del suelo arcilloso.	Drenaje: Implementar cunetas de coronación y sistemas de drenaje superficial en la parte alta y alrededor de las cicatrices de deslizamiento.	Control (Hidrológica)
3. Medida Complementaria (Control del Cauce)	Capturar el material transportado y proteger la obra de paso de la vía.	Estructuras: Construcción de diques de retención de sedimentos en el cauce principal para interceptar los detritos.	Estructural (Contención)

- **Cuenca: Quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva 15+000**

Las recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial para la cuenca de la quebrada El Peñón/San Rafael se muestran en la Tabla G.a 4.

**Tabla G.a 4.** Recomendaciones y propuestas de mantenimiento vial. Cuenca quebrada El Peñón/San Rafael

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
1. Prioridad estructural (control del cauce)	Mitigar el riesgo de impacto y obstrucción de la carretera por detritos gruesos y reducir la velocidad del flujo.	Construcción de Diques de Retención de Sedimentos cerca de la desembocadura y en afluentes clave.	Estructural (Contención de Detritos)
	Interceptar el material grueso (bloques y gravas) proveniente del sector SO-NE de mayor fragilidad estructural.	Diseño y ubicación estratégica de diques de contención para material de gran volumen.	Estructural (Control de Bloques)
2. Control de la fuente (Estabilización NO-SE)	Estabilizar geotécnicamente las laderas del sector NO-SE y controlar la erosión	Implementación de obras de bioingeniería (reforestación, terrazas) para restaurar la cobertura vegetal y controlar	Control (Bioingeniería/Conservación de Suelos)

Prioridad de Gestión	Objetivo Principal	Recomendación Específica (Implicación)	Tipo de Medida
	superficial intensificada por la agricultura.	la erosión laminar y en surcos.	
	Estabilizar el perfil del cauce y reducir la erosión regresiva.	Instalación de diques escalonados de menor altura en los afluentes de alta pendiente para disipar la energía y reducir la pendiente hidráulica efectiva.	Estructural (Control de Erosión)
3. Manejo integral y prevención	Regular las actividades en laderas críticas y gestionar el riesgo geotécnico.	Implementar Zonificación de Amenazas para el Manejo Integrado de la Cuenca, regulando el uso del suelo (agricultura) en zonas críticas.	No Estructural (Regulación/Planificación)
	Prevenir la colmatación de los drenajes viales.	Los diques, al capturar tanto detritos gruesos como finos, protegen alcantarillas y puentes de la obstrucción, asegurando la continuidad operativa de la vía.	Estructural (Protección de Infraestructura)

## G.2 Propuestas de intervención basadas en el diagnóstico en campo y evaluación de obras de drenaje

Las propuestas detalladas a continuación se fundamentan en la evaluación técnica directa de la infraestructura de drenaje y el análisis de la dinámica fluvial en el entorno inmediato de la vía. Este diagnóstico *in situ* ha permitido identificar patologías estructurales, insuficiencias hidráulicas y procesos de sedimentación que comprometen la funcionalidad del tramo vial. En consecuencia, las intervenciones se centran en la optimización de la capacidad de transporte, el reforzamiento de elementos críticos y la implementación de medidas operacionales de mantenimiento preventivo. El enfoque prioriza soluciones de ingeniería aplicada que responden a la realidad física de cada obra de paso, garantizando la recuperación de su sección útil y protegiendo la estabilidad de la plataforma vial frente a eventos hidrológicos extremos.

- **Quebrada Los Aponcio. Progresiva: 8+250**

Como estrategia de mitigación orientada a corregir la insuficiencia hidráulica y prevenir la inestabilidad del cauce, se proponen dos medidas fundamentales de ingeniería:

En primer lugar, como medida estructural para el control de la carga sedimentaria, se recomienda la construcción de diques de retención de sedimentos en las cotas

superiores de la cuenca. Estas estructuras están diseñadas para la interceptación y gestión de la elevada tasa de transporte de finos, garantizando la integridad del flujo que alcanza el tramo vial.

En segundo lugar, para la estabilización fluvial bajo un enfoque operacional y estructural, se requiere la limpieza inmediata de la sección del cajón con el fin de restaurar su capacidad hidráulica de diseño. Complementariamente, se plantea la ejecución de estructuras de defensa fluvial, tales como enrocados de protección o muros de gaviones, para el confinamiento del margen izquierdo. Esta intervención es esencial para estabilizar el lecho y mitigar el proceso de migración lateral del cauce, protegiendo la plataforma vial de erosiones regresivas.

- **Quebrada El Peñón/San Rafael. Progresiva: 15+000**

Debido a la dinámica de alta energía y al historial de colapso de estructuras precedentes en este sector, se proponen las siguientes medidas de mitigación y estabilización funcional.

En primer lugar, se plantea el reforzamiento estructural del pilar central y las aletas del cajón de doble celda. Dado que el muro intermedio constituye un obstáculo crítico ante el arrastre de bloques graníticos de gran magnitud, es imperativo dotar a la estructura de un revestimiento de sacrificio o blindaje con concreto de alta resistencia o láminas de acero. Esta intervención busca absorber la energía de los impactos directos y prevenir fallos estructurales severos que comprometan la estabilidad de la plataforma vial durante eventos de crecidas extraordinarias.

En segundo lugar, para el control de la carga de fondo en la cuenca, se recomienda la construcción de diques de retención de sedimentos en los tramos superiores. El objetivo de estas obras es interceptar el material detrítico y los bloques de gran tamaño antes de su arribo a la obra de paso, reduciendo la potencia del flujo torrencial y minimizando la presión hidrodinámica sobre el cajón existente.

Finalmente, se requiere un programa de mantenimiento operacional intensivo para la limpieza y despeje del abanico aluvial y la sección interna de las celdas. Esta medida es esencial para evitar la reducción de la sección hidráulica útil por la acumulación de sedimentos y desechos antrópicos, garantizando que la estructura mantenga su capacidad de evacuación y se reduzca el riesgo de represamiento aguas arriba.

- **Quebrada La Jabonera. Progresiva:17+750**

Para mitigar el riesgo de colmatación y los subsecuentes fallos hidráulicos en la infraestructura de drenaje, se proponen las siguientes estrategias técnicas de optimización.

En primer lugar, se recomienda el incremento de la sección transversal de la obra de paso, ya sea mediante la sustitución integral o la ampliación de su geometría actual. El objetivo primordial es aumentar la capacidad hidráulica y regular la velocidad de flujo en el conducto, permitiendo el tránsito eficiente de la carga sedimentaria sin generar obstrucciones por confinamiento. Esta medida reducirá significativamente la frecuencia y severidad de los eventos de colmatación reportados en este sector.

Asimismo, se propone la construcción de un desarenador o cámara de sedimentación aguas arriba de la alcantarilla, aprovechando la zona de depósito natural de la cuenca. Esta estructura tiene como propósito fundamental la decantación y retención de partículas sólidas de mayor granulometría antes de su ingreso al sistema de drenaje, disminuyendo la carga sedimentaria neta y garantizando la operatividad de la sección útil de la obra de paso.

- **Quebrada Los Higueros. Progresiva: 18+000**

Como medida estructural prioritaria, es imperativo el incremento de la capacidad hidráulica de la infraestructura de drenaje. Dada la escala de la microcuenca, la solución de mayor efectividad radica en garantizar que la estructura posea la sección necesaria para gestionar el caudal de diseño sin riesgo de obstrucción; por lo tanto, se recomienda la sustitución o ampliación de la alcantarilla existente (o la implementación de una batería de conductos) por una sección transversal de mayor área, preferiblemente una alcantarilla de cajón. El aumento del área de flujo optimiza la descarga del caudal máximo y reduce la velocidad de entrada, disminuyendo la susceptibilidad a la colmatación por elementos granulares de tamaño medio.

A diferencia de otros sectores con procesos de sedimentación natural, en cuencas de menor escala la obstrucción suele ser más acelerada y crítica. Como estrategia de mitigación, se propone la instalación de una cámara de sedimentación compacta inmediatamente aguas arriba de la nueva estructura, diseñada como punto de control para partículas medianas y gravas. El diseño ejecutivo debe priorizar la accesibilidad para labores de limpieza y vaciado mecánico, minimizando el riesgo de colmatación rápida reportado.

Estas acciones estructurales deben complementarse con un programa de mantenimiento preventivo riguroso para asegurar la funcionalidad de la obra a largo plazo. Se debe establecer una frecuencia de limpieza obligatoria y proactiva para la alcantarilla y el desarenador, ejecutándose antes y después de la temporada de precipitaciones. Estas labores deben coordinarse con el monitoreo pluviométrico (EMA/AURORA) para eliminar depósitos acumulados y restituir sistemáticamente la capacidad hidráulica de la obra.

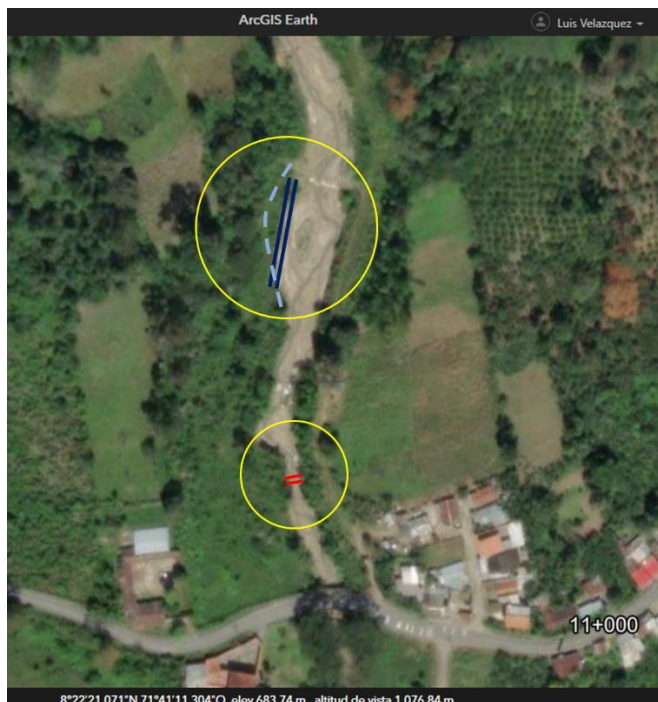
### **G.3 Propuestas de intervención basadas en la evaluación multitemporal de la dinámica morfohidrológica de las cuencas**

- **Quebrada El Cacique/El Silencio. Progresiva: 11+250**

Debido a la alta energía de la quebrada, la litología de filitas y la presencia de infraestructura vulnerable, las obras de ingeniería deben enfocarse en el control de la erosión del lecho y márgenes, la disipación de energía y la captura de sedimentos.

Se recomienda la construcción de un dique transversal a la quebrada como se muestra en la Figura G.c 1. El dique puede ser de gaviones, y su finalidad es reducir la velocidad del agua, disminuir su capacidad erosiva y de transporte de grandes bloques. Dada la geomorfología del cauce en el tramo de análisis, el alineamiento de la quebrada presenta un patrón con varias curvaturas de origen estructural antes de alcanzar la zona de la carretera. Este trazado sinuoso contribuye naturalmente a la disipación de la energía cinética del flujo, reduciendo significativamente la velocidad y la capacidad de transporte de sedimento. Por consiguiente, se considera suficiente plantear la construcción de un único dique de retención de sedimentos. Esta estructura será estratégicamente ubicada (Figura G.c 1) para focalizar la reducción de la pendiente local, minimizar el arrastre de material grueso hacia la obra de cruce, y actuar como una defensa puntual contra eventuales crecidas extraordinarias.

**Figura G.c 1.** Ubicación del dique de retención de sedimentos y muro de encauzamiento



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

Se plantea la construcción de un muro longitudinal a lo largo de la margen derecha de la quebrada (ver Figura G.c 1), para ayudar a evitar futuros desbordes laterales (ver huella de la quebrada en la línea azul claro) y proteger las laderas adyacentes de la erosión, creando una barrera física entre el cauce activo y los elementos vulnerables. Este muro puede ser de gaviones, debido a que son flexibles, permeables y se adaptan mejor a los asentamientos diferenciales del terreno. La disponibilidad de la materia prima para la construcción de estos muros se verifica en las inmediaciones de los cauces de las quebradas El Peñón o Cacagüito, donde se localizan y pueden ser aprovechados grandes bloques de roca granítica.

Es necesario complementar las obras estructurales con medidas biológicas para estabilizar el suelo superficial. Se recomienda plantar especies vegetales nativas con sistemas radiculares fuertes en las laderas y márgenes de la quebrada para mejorar la cohesión del suelo, reducir la erosión superficial y controlar la escorrentía.

#### G.4 Propuestas de intervención basadas en el análisis multitemporal del comportamiento del río Mocotíes

- **Evaluación morfológica del río Mocotíes: Tramo Prg. 1+500 – 2+500**

Debido a la naturaleza competente de las riberas en este segmento y la estabilidad del eje del cauce detectada mediante el análisis descriptivo, no se requiere una sustitución estructural inmediata. Sin embargo, para gestionar la intensificación del transporte de sedimentos y la ampliación de la sección transversal, se recomienda la implementación de un programa de monitoreo preventivo de la dinámica de depósitos. Dado que las imágenes satelitales confirman una extensión de la llanura activa, es imperativo realizar levantamientos topobatimétricos periódicos para detectar variaciones en la cota del lecho que puedan inducir procesos de socavación en los estribos de obras menores o desbordamientos hacia la plataforma vial durante eventos hidrológicos extremos.

**Figura G.d 1.** Estabilidad del eje del cauce detectada



**Nota.** Captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- **Morfodinámica y riesgo en el tramo Prg. 2+500 – 3+250**

Propuesta de ingeniería para encauzamiento y protección

Dada la tendencia erosiva crítica observada entre el Prg. 3+000 y 3+250, la estrategia de mitigación debe enfocarse en la protección pasiva y también en el control direccional del flujo.

La obra propuesta es la construcción de un pedraplén deflector y de encauzamiento. Respecto a la protección de talud, el pedraplén, diseñado como una escollera de protección, deberá salvaguardar el pie y el cuerpo del terraplén de la carretera contra la acción erosiva y abrasiva del río, absorbiendo su energía cinética, como se muestra en la Figura G.d 2. En cuanto al encauzamiento activo, la longitud y geometría de la estructura deben exceder la zona inmediata de protección, siendo diseñada como una estructura de control fluvial (similar a un espigón longitudinal o muro guía) que sigue la curvatura interna de la curva. Esto permitirá deflectar activamente el flujo hacia el centro del cauce, alejándolo de la plataforma vial y reorientando la dirección principal de las corrientes para mitigar futuras aproximaciones. Finalmente, el dimensionamiento del diseño final deberá considerar las curvas de gasto y los periodos de retorno para asegurar que la coronación y la granulometría del enrocado resistan el flujo de diseño y garanticen la estabilidad hidráulica y geotécnica a largo plazo.

**Figura G.d 2.** *Ubicación del pedraplén*



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- **Evaluación geomorfológica y estabilidad relativa: tramo Prg. 3+500 – 4+250**

Para este tramo, basándose en los criterios de proximidad y riesgo inminente, no se recomienda la implementación de obras de defensa fluvial (como pedraplenes o espigones) en el tramo Prg. 3+500 a Prg. 4+250. La inversión en obras de mitigación debe priorizarse en los sectores críticos, donde el factor de seguridad es menor.

**Figura G.d 3. Estabilidad relativa**



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- **Análisis morfodinámico del río Mocotíes: Tramo PR 6+750 – 10+750**

En este tramo, se recomienda un monitoreo preventivo mediante análisis multitemporal de imágenes. Es necesario realizar una vigilancia semestral de la morfología del cauce para identificar de forma proactiva puntos de erosión. Finalmente, se recomienda el mantenimiento constante de la vegetación de ribera en las zonas de llanura activa como medida de bioingeniería para aumentar la rugosidad hidráulica y disipar la energía de los desbordes.

**Figura G.d 4. Estabilidad relativa del río**



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)

- **Evaluación de bajo riesgo: tramo Prg. 13+000 – 13+500**

Basado en la distancia de amortiguamiento y la favorable dirección de las huellas históricas, no se justifica la implementación de obras de defensa fluvial en este tramo. Los recursos de mitigación deben ser focalizados en los puntos de riesgo crítico.

**Figura G.d 5. Distancia de amortiguamiento segura**



**Nota.** Adaptado de una captura de pantalla realizada por el autor mediante el software ArcGIS Earth (versión 2.5), propiedad de Esri (2025)