

EVALUACIÓN TÉCNICA CON ENFOQUE CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE LOS
DAÑOS GENERADOS POR UN SISMO DE MAGNITUD 6,5 EN LA INFRAESTRUCTURA
VIAL DEL CORREDOR VILLAVICENCIO-YOPAL



NICOLÁS ANDRADE OSTOS
LIZETH CAMILA RAMÍREZ RUBIANO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
VILLAVICENCIO

2026

EVALUACIÓN TÉCNICA CON ENFOQUE CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE LOS
DAÑOS GENERADOS POR UN SISMO DE MAGNITUD 6,5 EN LA INFRAESTRUCTURA
VIAL DEL CORREDOR VILLAVICENCIO-YOPAL

NICOLÁS ANDRADE OSTOS
LIZETH CAMILA RAMÍREZ RUBIANO

Tesis de maestría presentado como requisito para optar al título de Magíster en Infraestructura
Vial

Director de trabajo de grado
Ing. Mg. LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ
Magister en Infraestructura vial

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
VILLAVICENCIO

2026

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.

Vicerrector Académico General

P. Luis Antonio ALFONSO VARGAS, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Juan Francisco CORREA HIGUERA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Ing. Jhonatan Augusto FORERO PABÓN

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

A Dios, por guiarnos durante este camino, por darnos fortaleza en los momentos de dificultad y la sabiduría, disciplina y perseverancia necesarias para alcanzar esta meta.

A nuestras familias, por su amor, apoyo incondicional, paciencia y confianza a lo largo de este proceso. Su compañía fue fundamental para continuar avanzando y culminar esta etapa tan importante de nuestra formación profesional y personal.

Dedicamos también este logro a quienes han acompañado nuestro crecimiento como ingenieros y han contribuido, desde la experiencia y el conocimiento, a fortalecer nuestro compromiso con el ejercicio responsable de la ingeniería civil y con el desarrollo de la infraestructura vial del país.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Santo Tomás y a la Maestría en Infraestructura Vial por la formación recibida y por los espacios académicos que hicieron posible el desarrollo de este trabajo. De manera especial, expresamos nuestro agradecimiento al ingeniero Luis Fernando Díaz Cruz, director del trabajo de grado, por su orientación, acompañamiento y aportes técnicos y metodológicos durante la estructuración y consolidación del documento.

A la Concesionaria Vial del Oriente S.A.S. (Covioriente), y en especial a su gerente, Miguel Eduardo Vargas Hernández, por autorizar el uso académico de la información técnica relacionada con las afectaciones ocasionadas por el sismo del 8 de junio de 2025 en el corredor Villavicencio–Yopal. Su disposición y respaldo permitieron abordar, desde el ámbito académico, un caso real de alta relevancia para la infraestructura vial colombiana.

Asimismo, reconocemos el apoyo de la Gerencia Técnica de Covioriente, equipo del cual hace parte uno de los autores y desde el que se participó directamente en las mesas de trabajo interdisciplinarias desarrolladas con las diferentes especialidades. Estos espacios permitieron conocer de primera mano el proceso de revisión, análisis y consolidación de la información técnica asociada con la identificación de patologías, el diagnóstico de las afectaciones y la definición de las intervenciones de rehabilitación.

Esta experiencia profesional aportó una visión integral del problema y permitió trasladar al presente estudio de caso no solo los resultados técnicos disponibles, sino también la comprensión del proceso de análisis interdisciplinario que se requiere para evaluar daños sísmicos en infraestructura vial.

Tabla de contenido

Resumen	10
Abstract.....	11
Glosario	12
Introducción.....	13
Contexto y problema técnico.....	13
Justificación	14
Objetivos.....	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
Alcance	16
1. Caso de estudio y metodología	17
1.1 Corredor vial	17
1.2 Evento sísmico	18
2. Componentes evaluados.....	20
3. Metodología de evaluación técnica.....	21
4. Procesos de consolidación e integración.....	23
5. Criterios técnicos y normativos aplicables	26
6. Evaluación técnica multidisciplinaria	28
7. Evaluación estructural.....	29
7.1 Box culverts	30
8. Evaluación geotécnica	31
8.1 Talud Alto de la Guala.....	31
8.2 Muro con Caisson	33
8.3 Talud izquierdo K49+680-K49+870	34
8.4 Terraplenes y aproches	35
8.5 RCD Bellanía	36
8.6 RCD Coleo.....	36
9 Evaluación hidráulica	37

10	Evaluación de pavimentos	39
10.1	Unidad Funcional 2.....	39
10.2	Unidad Funcional 3.....	39
11	Consideración general de las patologías y las intervenciones	41
12	Matriz consolidada de patologías y rehabilitación.....	42
13	Análisis integrado	44
14	Patrones y mecanismos de afectación.....	45
15	Interacción entre especialidades	47
16	Relación entre diagnóstico y rehabilitación.....	49
17	Limitaciones, incertidumbres y aporte técnico	51
18	Conclusiones y recomendaciones	53
18.1	Conclusiones	53
18.2	Recomendaciones	54
	Referencias	56

Lista de tablas

Tabla 1. Unidad funcional 2 y 3 - Corredor vial Villavicencio – Yopal.....	17
Tabla 2. Componentes de la infraestructura vial incluidos en el estudio de caso.....	20
Tabla 3. Fases de la metodología de evaluación técnica aplicada al estudio de caso.....	23
Tabla 4. Matriz consolidada de patologías, mecanismos de afectación e intervenciones de rehabilitación.....	42

Lista de Figuras

Figura 1. Localización del corredor Villavicencio - Yopal: Unidades funcionales 2 y 3.....	18
Figura 2. Contexto geológico-estructural, plancha 5-09 del Atlas geológico de Colombia.....	19
Figura 3. Afectaciones post sísmicas en el sistema de sostenimiento de la margen derecha del Talud Alto de La Guala.....	33
Figura 4. Levantamiento de cuneta.....	35

Resumen

El presente trabajo evalúa técnica, cualitativa y cuantitativamente los daños generados por el sismo del 8 de junio de 2025 en componentes de las Unidades Funcionales 2 y 3 del corredor vial Villavicencio–Yopal. El estudio tuvo como propósito identificar las principales patologías, analizar los mecanismos asociados con su ocurrencia y examinar la correspondencia entre el diagnóstico y las soluciones de rehabilitación propuestas. Metodológicamente, se desarrolló como un estudio de caso aplicado, descriptivo-analítico, retrospectivo y no experimental, a partir de la revisión e integración de inspecciones de campo, registros previos al evento, ensayos, mediciones de IRI y deflectometría, información de georradar y modelaciones estructurales y geotécnicas elaboradas por las diferentes especialidades. Los resultados evidenciaron afectaciones diferenciadas en puentes y box culverts, taludes, terraplenes y aproches, obras hidráulicas, pavimentos y depósitos de RCD. Se identificaron como mecanismos recurrentes los desplazamientos diferenciales, la interacción suelo-estructura, la pérdida de confinamiento, la alteración del drenaje y la disminución de la capacidad estructural o funcional de determinados componentes. El análisis integrado mostró que varios daños no podían explicarse de manera aislada por especialidad y que las intervenciones propuestas guardan correspondencia con la naturaleza y profundidad de las afectaciones. Se concluye que la evaluación postsísmica de corredores viales requiere una lectura interdisciplinaria que relacione condición previa, patología, mecanismo, evidencia e intervención, con el fin de orientar técnicamente la restitución de las condiciones de seguridad, estabilidad y servicio.

Palabras clave: Evaluación postsísmica, infraestructura vial, rehabilitación vial, interacción suelo-estructura, estabilidad geotécnica, pavimentos.

Abstract

This study provides a technical, qualitative, and quantitative assessment of the damage caused by the June 8, 2025 earthquake to components of Functional Units 2 and 3 of the Villavicencio–Yopal road corridor. Its purpose was to identify the main distress and damage manifestations, analyze the mechanisms associated with their occurrence, and examine the consistency between the diagnosis and the proposed rehabilitation solutions. Methodologically, the research was developed as an applied, descriptive-analytical, retrospective, and non-experimental case study based on the review and integration of field inspections, pre-event records, tests, International Roughness Index (IRI) measurements, deflectometry, ground-penetrating radar information, and structural and geotechnical modeling prepared by the different technical disciplines. The results showed differentiated effects on bridges and box culverts, slopes, embankments and bridge approaches, hydraulic works, pavements, and construction and demolition waste deposits. Recurrent mechanisms included differential displacements, soil–structure interaction, loss of confinement, drainage disruption, and reduction in the structural or functional capacity of specific components. The integrated analysis showed that several types of damage could not be adequately explained from a single discipline and that the proposed interventions are consistent with the nature and depth of the identified effects. It is concluded that post-earthquake assessment of road corridors requires an interdisciplinary approach linking pre-event condition, observed damage, mechanism, technical evidence, and intervention in order to support the restoration of safety, stability, and service conditions.

Keywords: Post-earthquake assessment, road infrastructure, road rehabilitation, soil–structure interaction, geotechnical stability, pavements.

Glosario

- **Aproche:** Zona de transición entre un terraplén vial y una estructura rígida, como un puente o pontón, donde pueden concentrarse asentamientos y deformaciones diferenciales.
- **Box culvert:** Alcantarilla de sección cerrada, generalmente rectangular y construida en concreto reforzado, destinada al cruce transversal de caudales bajo la vía.
- **Caisson:** Elemento de cimentación profunda de gran diámetro ejecutado en concreto reforzado, utilizado para transmitir cargas a estratos competentes y, en este estudio, como parte de un sistema de contención.
- **FWD (Falling Weight Deflectometer):** Equipo de auscultación no destructiva que aplica una carga dinámica sobre el pavimento y mide la cuenca de deflexiones para evaluar su respuesta estructural.
- **IRI (International Roughness Index):** Índice de Regularidad Internacional utilizado para cuantificar la regularidad longitudinal de la superficie del pavimento, expresado normalmente en m/km.
- **PGA (Peak Ground Acceleration):** Aceleración máxima del terreno registrada o estimada durante un evento sísmico y utilizada como parámetro de referencia en análisis estructurales y geotécnicos.
- **RCD:** Residuos de Construcción y Demolición. En el caso de estudio, corresponde a depósitos controlados como Bellanía y Coleo, evaluados desde el punto de vista de su estabilidad geotécnica y drenaje.
- **SRF (Strength Reduction Factor):** Factor de reducción de resistencia empleado en análisis numéricos de estabilidad de taludes; permite estimar la condición límite del macizo mediante la reducción progresiva de sus parámetros resistentes.
- **Concreto lanzado (shotcrete):** Concreto o mortero proyectado neumáticamente sobre una superficie, empleado como revestimiento y protección superficial en taludes estabilizados.

Introducción

Contexto y problema técnico

El corredor vial Villavicencio-Yopal constituye un eje estratégico para la conectividad de los departamentos del Meta y Casanare. Su infraestructura comprende pavimentos, terraplenes, aproches, puentes, obras de drenaje, estructuras de contención, taludes estabilizados y zonas de disposición de residuos de construcción y demolición, cuyos comportamientos ante una sollicitación sísmica dependen de sus características estructurales, geotécnicas, hidráulicas y funcionales.

El sismo ocurrido el 8 de junio de 2025 afectó diferentes componentes de las unidades funcionales 2 y 3 del corredor. Las inspecciones, mediciones y estudios posteriores identificaron daños en estructuras, taludes, terraplenes, pavimentos, sistemas de drenaje y depósitos de materiales, lo que requirió la participación de especialistas en estructuras, geotecnia, hidráulica y pavimentos.

La diversidad de las afectaciones hizo necesario analizar cada componente de acuerdo con sus condiciones particulares y con la evidencia técnica disponible. En consecuencia, el problema central del estudio consiste en identificar y caracterizar las patologías, sustentar los mecanismos asociados con su aparición y establecer la correspondencia técnica de las alternativas de rehabilitación propuestas.

Para abordar este problema, el estudio integra la condición previa de la infraestructura, los registros de inspección, los resultados de ensayos y mediciones, las modelaciones y los análisis desarrollados por las diferentes especialidades. De esta manera, se busca presentar una evaluación técnica organizada y comprensible de los daños ocasionados por el evento sísmico y de las intervenciones definidas para recuperar las condiciones de estabilidad, integridad y funcionalidad de los componentes afectados.

Justificación

La evaluación postsísmica de un corredor vial requiere analizar componentes con características y respuestas diferentes, cuya afectación puede comprometer la estabilidad, integridad y funcionalidad de la infraestructura. El caso del corredor Villavicencio-Yopal ofrece la oportunidad de estudiar, bajo un enfoque interdisciplinario, patologías identificadas en estructuras, taludes, terraplenes, pavimentos, obras de drenaje y depósitos de residuos de construcción y demolición.

La relevancia técnica del estudio radica en integrar información procedente de inspecciones, mediciones, ensayos y modelaciones especializadas para establecer la relación entre las patologías observadas, sus mecanismos de afectación y las alternativas de rehabilitación propuestas. Esta integración permite superar una lectura aislada de los daños y comprender las relaciones existentes entre el comportamiento estructural, geotécnico, hidráulico y funcional de los componentes evaluados.

Desde el ámbito académico, el estudio permite documentar y organizar las lecciones derivadas de un caso real de afectación sísmica en infraestructura vial colombiana. Sus resultados podrán servir como referencia técnica para el análisis de eventos similares, especialmente en corredores que atraviesen zonas de amenaza sísmica y presenten condiciones comparables de interacción entre el terreno, las estructuras, el drenaje y el pavimento.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar técnica, cualitativa y cuantitativamente los daños generados por el sismo del 8 de junio de 2025 en los componentes estructurales, geotécnicos, hidráulicos y funcionales de la infraestructura vial del corredor Villavicencio-Yopal, mediante el análisis de la información disponible y la aplicación de criterios técnicos y normativos, con el fin de caracterizar las patologías identificadas, sustentar sus mecanismos de afectación y analizar las alternativas de rehabilitación propuestas.

Objetivos específicos

- Identificar y caracterizar las patologías registradas en los componentes estructurales, geotécnicos, hidráulicos y funcionales de la infraestructura vial objeto de estudio.
- Sustentar técnicamente las patologías identificadas y sus mecanismos de afectación mediante la integración de inspecciones, mediciones, ensayos, modelaciones y demás evidencias disponibles para cada especialidad.
- Examinar las alternativas de rehabilitación propuestas para los componentes afectados, considerando su correspondencia con las patologías diagnosticadas y con los criterios técnicos y normativos aplicables.
- Integrar los resultados de las diferentes especialidades para establecer las relaciones entre las patologías, los mecanismos de afectación y las intervenciones planteadas.

Alcance

El presente estudio de caso tiene un alcance exclusivamente técnico y comprende la evaluación cualitativa y cuantitativa de las afectaciones ocasionadas por el sismo del 8 de junio de 2025 en los componentes estructurales, geotécnicos, hidráulicos y funcionales de la infraestructura vial del corredor Villavicencio-Yopal.

El análisis se concentra en la caracterización de las patologías identificadas, la evaluación de los argumentos técnicos que sustentan su diagnóstico y la interpretación de los mecanismos que explican el comportamiento de cada componente ante el evento sísmico. Su desarrollo considera las condiciones particulares de las diferentes especialidades y las relaciones existentes entre los elementos que conforman la infraestructura vial.

Asimismo, el estudio incluye el análisis de las alternativas de rehabilitación definidas para los componentes afectados, considerando su fundamento técnico y su relación con las patologías y los mecanismos de afectación identificados. Este análisis permitirá establecer la forma en que las intervenciones planteadas responden a las condiciones de estabilidad, integridad y funcionalidad comprometidas.

En concordancia con su propósito académico, el estudio no aborda presupuestos, análisis de precios unitarios, costos de intervención, programación de obra, reclamaciones ni asuntos relacionados con seguros. Tampoco comprende análisis jurídicos, financieros o contractuales.

1. Caso de estudio y metodología

1.1 Corredor vial

El corredor vial Villavicencio-Yopal cuenta con una longitud aproximada de 266 km, atraviesa los departamentos de Meta, Cundinamarca y Casanare, conecta 11 municipios y se encuentra dividido en 7 unidades funcionales. Su infraestructura comprende calzadas en pavimento flexible, terraplenes, cortes y taludes estabilizados, puentes vehiculares y peatonales, pontones, estructuras de contención y obras de drenaje transversal y longitudinal.

El corredor se desarrolla entre el piedemonte de la Cordillera Oriental y la llanura de los Llanos Orientales, por lo que presenta variaciones topográficas, geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas a lo largo de su trazado. Estas condiciones, junto con la diversidad de los componentes que conforman la vía, determinan respuestas particulares ante las solicitaciones sísmicas.

El presente análisis se centra en la Unidad Funcional 2 (UF2), que se extiende desde el K25+012 hasta el K64+450, en el tramo Cumaral–Paratebueno (Ruta Nacional 6510), y en la Unidad Funcional 3 (UF3), comprendida entre el K64+450 y el K106+060 (Ruta Nacional 6510) y entre el K0+000 y el K7+794 (Ruta Nacional 6511). A continuación, se presenta la ubicación y detalles de estas unidades funcionales.

Tabla 1. *Unidad funcional 2 y 3 - Corredor vial Villavicencio – Yopal*

UF	Sector	Inicio (PR)		Fin (PR)		Longitud
2	Cumaral - Paratebueno	Cumaral PR25+600 (Ruta 6510)	K25+012	Paratebueno PR66+000 (Ruta 6510)	K64+450	40.40km
3	Paratebueno - Villanueva	Paratebueno PR66+000 (Ruta 6510)	K64+450	Barranca de Upía PR107+606,45 (Ruta 6510)	K106+060	41.61 km
		Barranca de Upía PR0+000 (Ruta 6511)	K0+000	Villanueva PR8+035+82 (Ruta 6511)	K7+794,446	7.79 km

Es importante precisar que la inclusión de las UF2 y UF3 no implica que la totalidad de sus 89,80 km haya presentado afectaciones homogéneas. Los daños se localizaron en sectores y componentes específicos, cuyo inventario, diagnóstico y tratamiento se desarrollan posteriormente dentro de cada especialidad.

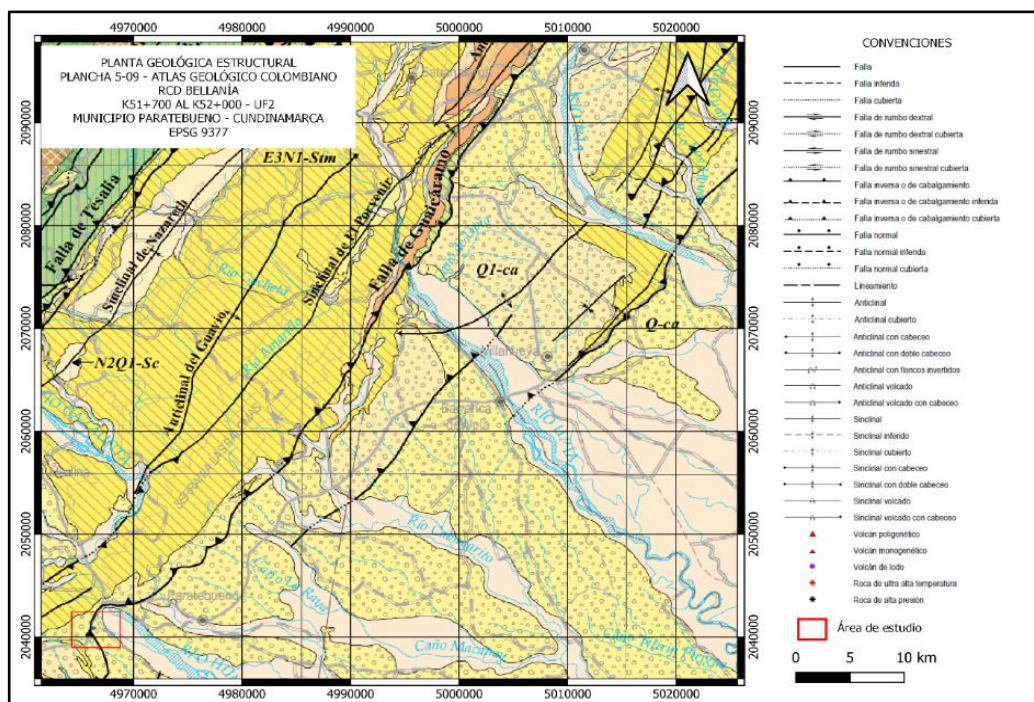
Figura 1. Localización del corredor Villaviciencio - Yopal: Unidades funcionales 2 y 3.



1.2 Evento sísmico

El 8 de junio de 2025, a las 08:08 hora local, se registró un sismo de magnitud Mw 6,5, con foco superficial y profundidad inferior a 30 km. El epicentro se localizó en el municipio de Medina, Cundinamarca, en las coordenadas 4,45° N y 73,28° O, aproximadamente a 10 km de Medina, 11 km de Paratebuena y 37 km de Restrepo. La duración reportada del movimiento fue de aproximadamente 40 segundos.

El evento estuvo asociado con el sistema estructural activo del Borde Llanero, localizado en el frente de deformación oriental de la Cordillera Oriental. Este contexto tectónico se caracteriza por la presencia de fallas corticales capaces de generar eventos superficiales, cuya proximidad a la superficie puede producir demandas significativas sobre la infraestructura. Entre los sistemas regionales relacionados con la sismicidad del piedemonte se encuentran las fallas de Servitá-Santa María, Guaicáramo y Yopal.

Figura 2. Contexto geológico-estructural, plancha 5-09 del Atlas geológico de Colombia.

Nota. Fuente: Adaptado del Servicio Geológico Colombiano, Atlas Geológico de Colombia, Plancha 5-09.

La cercanía del epicentro a las unidades funcionales 2 y 3 produjo una demanda sísmica variable a lo largo del corredor. Los estudios especializados utilizaron aceleraciones máximas del terreno de 0,148 g, 0,150 g y hasta 0,151 g, determinadas de acuerdo con la localización y la distancia epicentral de los componentes analizados. En consecuencia, para el análisis de cada infraestructura se considera el valor de aceleración empleado en la evaluación técnica de la especialidad correspondiente.

La interacción entre la demanda sísmica, las condiciones del terreno y el comportamiento de cada componente produjo respuestas diferenciadas a lo largo del corredor, las cuales se analizan posteriormente en la evaluación de las patologías y de sus alternativas de rehabilitación.

2. Componentes evaluados

La evaluación posterior al evento sísmico comprendió diferentes componentes de la infraestructura vial localizados en las unidades funcionales 2 y 3. Debido a sus características constructivas, materiales, condiciones de apoyo y funciones dentro del corredor, estos componentes fueron analizados desde las especialidades de estructuras, geotecnia, hidráulica y pavimentos.

Tabla 2. Componentes de la infraestructura vial incluidos en el estudio de caso.

Especialidad	Componentes evaluados	Aspectos generales de evaluación
Estructuras	• 7 puentes vehiculares • 1 puente peatonal • 7 box culverts	• Sistemas de apoyo y aisladores • Topes sísmicos • Elementos de concreto • Juntas y muros espaldares • Losas de aproximación • Integridad estructural
Geotecnia	• Talud Alto de La Guala • Talud izquierdo entre el K49+680 y el K49+870 • Muro con caissons • Terraplenes y aproches • RCD Bellanía • RCD Coleo	• Estabilidad de taludes y rellenos • Deformaciones y movimientos de masa • Condición de anclajes y pernos • Pérdida de soporte o confinamiento • Comportamiento de terraplenes y aproches • Factores de seguridad
Hidráulica	• 14 alcantarillas circulares • Cunetas • Zanjias de coronación e intermedias • Canales y estructuras de caída	• Continuidad hidráulica • Fracturas y desacoples • Desalineamientos y cambios de nivel • Condición de encoles y descoles • Capacidad de conducción • Interacción con terraplenes y taludes
Pavimentos	• Pavimentos de la UF2 • Pavimentos de la UF3	• Patologías superficiales • Regularidad longitudinal mediante IRI • Respuesta estructural mediante FWD • Información de georradar • Relación con terraplenes y aproches • Condición funcional y estructural

3. Metodología de evaluación técnica

El presente trabajo de grado se estructuró de manera progresiva y en paralelo con el desarrollo de las consultorías técnicas adelantadas para evaluar las afectaciones ocasionadas por el sismo del 8 de junio de 2025. La base del análisis se fue conformando a medida que cada especialidad generaba información mediante inspecciones de campo, ensayos, mediciones, modelaciones, análisis y discusiones técnicas orientadas al diagnóstico de las afectaciones y a la definición de las obras de rehabilitación. Esta dinámica permitió que el documento evolucionara junto con el proceso técnico, incorporando los resultados parciales y definitivos conforme eran obtenidos y validados por los equipos especialistas.

Después del evento sísmico, la evaluación se abordó por especialidades debido a que los componentes afectados presentaban comportamientos y mecanismos de respuesta diferentes. En estructuras se inspeccionaron puentes, pontones y box culverts, con énfasis en apoyos, aisladores, topes sísmicos, juntas, elementos de concreto y zonas de aproximación. En geotecnia se adelantaron reconocimientos de campo, revisión de condiciones de diseño, ensayos y análisis de estabilidad para taludes, terraplenes, aproches, el muro con caissons y los RCD. La especialidad hidráulica verificó la condición física y funcional de alcantarillas, cunetas, zanjas y canales, mientras que en pavimentos se combinaron inspecciones visuales con mediciones de IRI, deflectometría mediante FWD e información de georradar.

El desarrollo metodológico mantuvo una secuencia técnica común, aunque los procedimientos y herramientas variaron entre especialidades. En primer lugar, se estableció, hasta donde la información disponible lo permitía, la condición que presentaba cada componente antes del sismo mediante diseños, inspecciones históricas, registros de mantenimiento, factores de seguridad y mediciones previas. Posteriormente se documentaron las afectaciones observadas después del evento y se ejecutaron las investigaciones específicas requeridas para cada caso. Los resultados de estas actividades permitieron pasar de la simple descripción de una fisura, un asentamiento o un desplazamiento a la identificación del mecanismo físico que explicaba su aparición.

Una vez caracterizadas las patologías y sustentados los mecanismos de afectación, cada consultoría evaluó las medidas necesarias para recuperar el comportamiento del componente comprometido. El criterio transversal fue la restitución de las condiciones existentes antes del

sismo, por lo que las soluciones planteadas no se orientaron a repotenciar la infraestructura ni a elevar sus condiciones originales de diseño. De esta manera, la alternativa de rehabilitación se vinculó con la evidencia obtenida durante el diagnóstico: reposición o reemplazo de elementos cuando existía pérdida de capacidad, recuperación geométrica y de factores de seguridad en geotecnia, restablecimiento de la continuidad hidráulica y reconstrucción de las capas de pavimento o del terraplén cuando la profundidad del daño así lo exigía.

Desde el punto de vista académico, nuestra labor consistió en acompañar, organizar y posteriormente integrar este proceso técnico, conservando la trazabilidad entre la información generada por las consultorías y la interpretación presentada en el trabajo de grado. La generación de los datos primarios, los ensayos especializados y las modelaciones correspondió a los equipos consultores de cada disciplina; el aporte del presente estudio está en reunir esa evolución técnica dentro de una misma lectura, contrastar los resultados entre especialidades y explicar cómo se pasó de la evidencia de campo al diagnóstico, del diagnóstico al mecanismo de daño y, finalmente, a la solución de rehabilitación.

4. Procesos de consolidación e integración

La consolidación del trabajo se realizó a medida que las diferentes consultorías alcanzaban nuevos niveles de avance. No se esperó a contar con un único documento final para iniciar la lectura del caso; por el contrario, los resultados de las visitas, ensayos, mediciones, modelos y mesas técnicas se fueron incorporando de forma sucesiva, permitiendo ajustar la comprensión de las patologías y de los mecanismos de afectación conforme se disponía de evidencia adicional.

Este proceso fue especialmente importante en los sectores donde una misma afectación involucraba más de una especialidad. Los aproches de los puentes exigieron relacionar la respuesta de los terraplenes con la de los elementos estructurales; en el Alto de La Guala fue necesario analizar conjuntamente el sostenimiento geotécnico y el funcionamiento del drenaje; y en los sectores de pavimento con asentamientos o pérdida de soporte, los resultados de IRI y deflectometría tuvieron que interpretarse junto con la condición del relleno. Estas relaciones se fueron discutiendo y consolidando técnicamente antes de definir una lectura integral del corredor.

Tabla 3. *Fases de la metodología de evaluación técnica aplicada al estudio de caso.*

Fase	Actividad principal	Resultado
1. Reconocimiento y delimitación técnica	Inspección inicial, identificación de los sectores afectados y definición de los componentes que requieren evaluación especializada.	Inventario inicial de componentes y sectores a estudiar.
2. Establecimiento de la condición pre-sismo	Revisión de diseños, inspecciones históricas, registros de mantenimiento, factores de seguridad y mediciones previas al evento.	Línea base técnica para comparar la condición posterior al sismo.
3. Investigación especializada	Ejecución de visitas, ensayos de campo y laboratorio, pruebas, auscultaciones, IRI, FWD, georradar y demás actividades requeridas según la especialidad.	Evidencia cualitativa y cuantitativa de la condición post sismo.
4. Procesamiento y análisis de resultados	Interpretación de ensayos y mediciones, análisis estructurales, geotécnicos, hidráulicos y funcionales, y desarrollo o ajuste de modelaciones cuando correspondió.	Parámetros y resultados técnicos para sustentar el diagnóstico.
5. Caracterización de patologías	Identificación y sectorización de fisuras, grietas, desplazamientos, asentamientos, pérdidas de soporte, fallas de drenaje y cambios funcionales o estructurales.	Inventario técnico de patologías y nivel de afectación.

Fase	Actividad principal	Resultado
6. Determinación del mecanismo de daño	Relación entre las patologías y la respuesta dinámica, interacción suelo-estructura, pérdida de confinamiento, infiltración, deformación del terraplén o pérdida de capacidad del componente.	Explicación técnica y causal del daño observado.
7. Definición y verificación de la rehabilitación	Formulación y revisión de la intervención requerida para recuperar estabilidad, integridad y funcionalidad, verificando su correspondencia con la condición pre-sismo.	Alternativa de rehabilitación técnicamente sustentada para cada componente.
8. Integración interdisciplinaria y consolidación	Cruce progresivo de resultados entre estructuras, geotecnia, hidráulica y pavimentos, seguido de la consolidación de los resultados de las consultorías.	Lectura integrada del caso, trazabilidad diagnóstico-mecanismo-rehabilitación y matriz consolidada.

A medida que las consultorías avanzaron, sus resultados fueron contrastados con los registros de campo, resultados de laboratorio e in situ, modelaciones, memorias de cálculo, planos, registros fotográficos y demás soportes técnicos disponibles para cada especialidad. Estos insumos permitieron verificar la coherencia entre las patologías observadas, los mecanismos de afectación identificados y las medidas de rehabilitación propuestas, manteniendo la trazabilidad del proceso desde la evidencia inicial hasta la definición de la intervención.

La secuencia metodológica adoptada para representar este proceso se resume en la Tabla 3. Aunque las actividades se presentan de manera ordenada para facilitar su lectura, en la práctica existió retroalimentación entre etapas. Un resultado de modelación podía requerir una nueva revisión de campo; una patología identificada en una obra hidráulica podía conducir a revisar la condición geotécnica del terraplén; y la definición de una alternativa de rehabilitación podía requerir verificar nuevamente los parámetros de diseño o la condición pre-sismo.

Esta forma de trabajo permitió que el documento se construyera con una lógica de ingeniería: observar, medir, analizar, contrastar, explicar y proponer. La integración final no busca sustituir el criterio de los especialistas, sino mostrar de manera ordenada cómo las distintas disciplinas contribuyeron a comprender el comportamiento de la infraestructura y a definir intervenciones técnicamente compatibles con el objetivo de restituir las condiciones pre-sismo.

La aplicación de esta metodología no implicó utilizar el mismo indicador para todos los componentes. En estructuras se dio mayor peso al estado de apoyos, aisladores, topes, juntas y elementos de concreto; en geotecnia se consideraron deformaciones, mecanismos de falla y factores de seguridad; en hidráulica se revisó continuidad, alineación y capacidad funcional de las

obras; y en pavimentos se compararon las patologías superficiales con la evolución del IRI y de las deflexiones. Mantener esta diferenciación fue necesario, porque aplicar un único criterio de evaluación habría simplificado en exceso la respuesta de sistemas que se comportan de manera distinta ante una sollicitación sísmica.

Una vez analizadas las especialidades por separado, los resultados se integraron mediante la matriz de patologías y rehabilitación presentada en el numeral 14.6. Esta matriz funciona como elemento de enlace entre el diagnóstico y la discusión, ya que resume qué se observó, cuál fue el mecanismo interpretado y de qué manera la solución planteada busca recuperar la condición previa al evento.

5. Criterios técnicos y normativos aplicables

Los criterios técnicos y normativos que orientaron la evaluación fueron aplicados durante el desarrollo de las consultorías especializadas y se mantuvieron como marco de referencia para la integración académica del caso. Cada disciplina utilizó los documentos de diseño, las especificaciones contractuales y las normas propias de su campo para interpretar los resultados obtenidos y verificar las soluciones de rehabilitación. En el presente trabajo estos criterios se retoman para conservar la trazabilidad del proceso y explicar por qué una determinada patología, mecanismo de afectación e intervención resultan técnicamente compatibles, sin pretender sustituir ni reproducir los diseños desarrollados por los especialistas.

Como marco general se consideraron el Contrato de Concesión APP No. 010 de 2015 y su Apéndice Técnico 3, utilizados para establecer las condiciones contractuales y de desempeño que presentaba la infraestructura antes del evento. A partir de este marco, la rehabilitación se entiende como restitución de las condiciones pre-sismo y no como una repotenciación o aumento de los estándares originales. Esta distinción es fundamental para interpretar correctamente el alcance de las soluciones planteadas. (Agencia Nacional de Infraestructura [ANI], 2015).

En la especialidad de estructuras, se toman como referencia la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14 para revisar el comportamiento de puentes, apoyos, aisladores, topes sísmicos y elementos de concreto. En geotecnia, la NSR-10 constituye la referencia principal para la verificación de estabilidad. En los terraplenes se reportan factores de seguridad previos al sismo entre 1,51 y 1,77 en condición estática y entre 1,05 y 1,52 en condición pseudoestática, frente a mínimos de 1,50 y 1,05, respectivamente. Para Bellanía y Coleo, la rehabilitación se verifica nuevamente bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, utilizando el coeficiente sísmico de diseño correspondiente a la condición que se busca restituir. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica [AIS], 2014; Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Para los terraplenes también se consideraron las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS, particularmente el Artículo 220. La bibliografía señala que esta especificación no desarrolla por sí sola un procedimiento de evaluación sísmica del terraplén, razón por la cual la estabilidad fue complementada mediante análisis de equilibrio límite y criterios de la NSR-10. En las obras hidráulicas se tomaron como referencia las condiciones y secciones de diseño originales y los criterios del Manual de Drenaje para Carreteras del INVIAS,

buscando recuperar la continuidad y capacidad de conducción existente antes del sismo. (Instituto Nacional de Vías [INVÍAS], 2009, 2022).

En pavimentos, la evaluación se apoyó en la comparación de IRI, deflectometría mediante FWD, información de georradar e inspección visual. El componente de pavimentos incluye además parámetros de análisis asociados con AASHTO-93. En este componente el criterio central consistió en distinguir el deterioro natural esperado de un cambio anormal posterior al sismo y, a partir de la profundidad de la afectación, definir si la intervención debía limitarse a las capas superiores o extenderse hasta la subbase, la corona o el terraplén. (American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 1993; Pavinfra Pavimentos e Infraestructura S.A.S., 2025).

Por último, los valores de aceleración máxima del terreno utilizados en los análisis se mantuvieron de acuerdo con la ubicación de cada componente y con el valor adoptado por el estudio especializado correspondiente. De esta forma, no se forzó un único PGA para todo el corredor, ya que las evaluaciones técnicas reportan valores cercanos a 0,148 g, 0,150 g y 0,151 g según la distancia y localización del sector analizado. Este criterio permite conservar la trazabilidad de los análisis originales y evita comparar resultados obtenidos bajo hipótesis de demanda diferentes.

6. Evaluación técnica multidisciplinaria

La evaluación técnica multidisciplinaria que se presenta a continuación corresponde a la consolidación del proceso desarrollado por las diferentes consultorías a medida que avanzaron los estudios posteriores al sismo del 8 de junio de 2025. Los resultados de campo, ensayos, mediciones y modelaciones fueron permitiendo caracterizar progresivamente las afectaciones de cada componente del corredor Villavicencio–Yopal. En este análisis se reconoce que la respuesta frente al evento dependió de la configuración estructural, las características del terreno, las condiciones de drenaje y la función que desempeña cada elemento dentro de la infraestructura vial.

A medida que las especialidades fueron consolidando sus diagnósticos se hizo evidente que varias afectaciones no podían interpretarse de manera aislada. En algunos sectores, una deformación del terraplén se reflejó simultáneamente en el pavimento, en elementos hidráulicos o en los accesos a los puentes; de igual forma, la pérdida de funcionalidad de determinadas obras de drenaje tuvo incidencia directa en el comportamiento geotécnico de los taludes. Esta interacción fue uno de los aspectos que justificó mantener una lectura interdisciplinaria durante la estructuración del trabajo.

Por esta razón, el análisis se organizó por especialidades en estructuras, geotecnia, hidráulica y pavimentos, tratando de relacionar en cada una de ellas tres aspectos principales: la patología encontrada, el mecanismo que pudo generar dicha afectación y la intervención planteada para recuperar las condiciones existentes antes del sismo.

Los documentos técnicos utilizados como base para este análisis fueron desarrollados a partir de inspecciones de campo, ensayos, mediciones y modelaciones propias de cada especialidad, por lo que constituyen el soporte principal para la interpretación realizada en este trabajo.

7. Evaluación estructural

Dentro de la especialidad de estructuras se evaluaron siete puentes vehiculares, un puente peatonal y siete estructuras tipo box culvert. Al revisar los daños reportados, se observa que las afectaciones en los puentes se concentraron principalmente en los elementos encargados de transmitir, absorber o controlar los desplazamientos generados durante el sismo, tales como apoyos de neopreno, aisladores, topes sísmicos, juntas de dilatación y elementos localizados en las zonas de aproximación.

Este comportamiento resulta coherente con la función de estos elementos. Durante un evento sísmico, la masa del tablero genera fuerzas de inercia que deben transmitirse hacia pilas y estribos a través de los sistemas de apoyo. Cuando los desplazamientos superan la capacidad de deformación prevista, pueden presentarse movimientos permanentes en neoprenos y aisladores, activación de los topes sísmicos y daños en juntas o elementos de concreto cercanos.

En términos generales, los puentes vehiculares mantuvieron su estabilidad global; sin embargo, varios de sus sistemas sismorresistentes perdieron parcial o totalmente su capacidad de funcionamiento. Los resultados de la consultoría estructural muestran que las principales afectaciones se concentraron en apoyos, aisladores y otros elementos destinados a controlar la respuesta dinámica.

Uno de los casos que consideramos más representativos es el Puente P2-8 Humea, localizado en el K54+906. En esta estructura se identificó un asentamiento vertical aproximado de 20 cm, desplazamiento de apoyos de neopreno, rotura de topes sísmicos, afectación de pedestales, juntas de dilatación y barreras tipo New Jersey. La magnitud y variedad de estos daños muestran que se presentó un movimiento relativo importante entre la superestructura, los apoyos y los accesos.

Para su rehabilitación se plantea el izado sincrónico de la estructura, el realce de pedestales, reemplazo de neoprenos y juntas de dilatación, además de la reconstrucción de ménsulas, placas de aproximación y topes sísmicos. También se contempla la reparación de las barreras afectadas.

En el Puente P2-86, localizado en el K30+612, se reportó deformación permanente de los aisladores, pérdida de capacidad sísmica, fractura del muro espaldar y daños en los elementos de aproximación. La solución definida consiste en el reemplazo de seis apoyos sísmicos, la junta de dilatación y la reconstrucción del muro espaldar, la ménsula y la placa de aproximación.

Para los puentes P2-93 y P2-96, las principales afectaciones se concentraron igualmente en los aisladores, los cuales presentaron deformaciones permanentes que justifican su reemplazo junto con las juntas de dilatación.

Por su parte, en el Puente peatonal Japón se identificaron roturas en topes sísmicos, deformación de apoyos y fisuración de columnas y elementos de la viga TEE. La intervención se orienta a recuperar los elementos de restricción sísmica y reparar las fisuras de concreto.

Desde nuestro análisis, resulta importante señalar que en estos casos no se presentó una falla generalizada de las superestructuras. Los daños se localizaron principalmente en elementos concebidos para responder ante las deformaciones y movimientos inducidos por un sismo. Por esta razón, las intervenciones planteadas se concentran en recuperar la capacidad de dichos sistemas antes que en sustituir completamente los puentes.

7.1 Box culverts

En las estructuras tipo box culvert se presentó un comportamiento diferente al observado en los puentes. Al encontrarse completamente confinadas por el terraplén, su respuesta depende en buena medida de la deformación del suelo que las rodea.

Se identificaron aperturas de juntas, desplazamientos del cuerpo de las estructuras, fisuras y grietas en muros y losas, fractura de aletas y pérdida de impermeabilidad. En algunos casos las aberturas alcanzaron aproximadamente 17 cm.

La mayor parte de los box culverts puede ser rehabilitada mediante la reconstrucción de las juntas afectadas, buscando recuperar el comportamiento solidario de la estructura. Sin embargo, el box culvert localizado en el K57+727 presenta una condición más severa, con grietas perimetrales que comprometen una parte significativa del cuerpo estructural, por lo cual se determinó la necesidad de demolición y reconstrucción total.

8. Evaluación geotécnica

La especialidad geotécnica fue una de las que presentó mayor variedad de afectaciones, debido a que comprende taludes, terraplenes, aproches, estructuras de contención y zonas de disposición de materiales.

A diferencia de una estructura de concreto o acero, el comportamiento de estos elementos depende directamente de las propiedades del suelo, su grado de confinamiento, las condiciones de humedad y drenaje, la geometría y la respuesta del terreno frente a la carga sísmica. Por esta razón, en varios de los casos analizados fue necesario relacionar los daños observados en campo con resultados de modelaciones y análisis de estabilidad.

8.1 Talud Alto de la Guala

Constituye uno de los sectores con mayor concentración de afectaciones dentro del caso de estudio. En la Ilustración 3, denominada “Afectaciones post-sísmicas en el sistema de sostenimiento de la margen derecha del Talud Alto de La Guala”, se presentan algunas de las patologías de daño identificadas después del evento sísmico, entre ellas la fisuración del concreto lanzado, el desplazamiento de elementos de sostenimiento y la formación de discontinuidades asociadas con el movimiento del terreno.

A partir del inventario realizado en los estudios especializados, en la margen derecha del talud se identificaron 145 anclajes activos y 217 pernos afectados, mientras que en la margen izquierda se reportaron aproximadamente 420 pernos con diferentes tipos y niveles de afectación. Estas cifras muestran que el evento no produjo daños puntuales, sino una afectación distribuida sobre buena parte del sistema de estabilización existente.

Entre las principales patologías observadas se encontraron fisuras y grietas en el concreto lanzado, desplazamiento y punzonamiento de pernos, pérdida de zapatas de reacción, anclajes fuera de servicio, plastificación localizada del terreno, formación de cuñas de desplazamiento, escarpes en corona y daños en las obras de drenaje. En varios sectores, estas manifestaciones se presentaron de forma simultánea, lo cual evidencia la interacción entre la deformación del terreno y los elementos que conforman el sistema de sostenimiento.

En la margen izquierda se identificaron además oquedades y pérdida de material detrás del concreto lanzado, situación que resulta especialmente relevante para el análisis del comportamiento del talud. Las grietas generadas durante el movimiento sísmico modificaron localmente las trayectorias de infiltración y facilitaron el ingreso de agua detrás del revestimiento. Como consecuencia, se favorecieron procesos de lavado de finos, erosión interna y pérdida progresiva de soporte del concreto lanzado.

A partir de estos hallazgos, se observa que la afectación del Talud Alto de La Guala no puede analizarse únicamente desde el comportamiento de los pernos y anclajes. El funcionamiento del sistema de drenaje tiene una incidencia directa sobre la estabilidad del macizo, debido a que el ingreso y circulación no controlada del agua puede incrementar las presiones de poros y reducir la resistencia efectiva del terreno.

Por esta razón, la solución de rehabilitación propuesta contempla dos frentes de intervención que deben desarrollarse de manera complementaria. El primero está orientado a recuperar la capacidad mecánica del sistema de estabilización mediante la reposición de pernos y anclajes afectados, el reperfilado de sectores puntuales y la restitución del concreto lanzado. El segundo corresponde a la recuperación del sistema de manejo de aguas mediante drenes horizontales, zanjas de coronación, canales y estructuras de disipación.

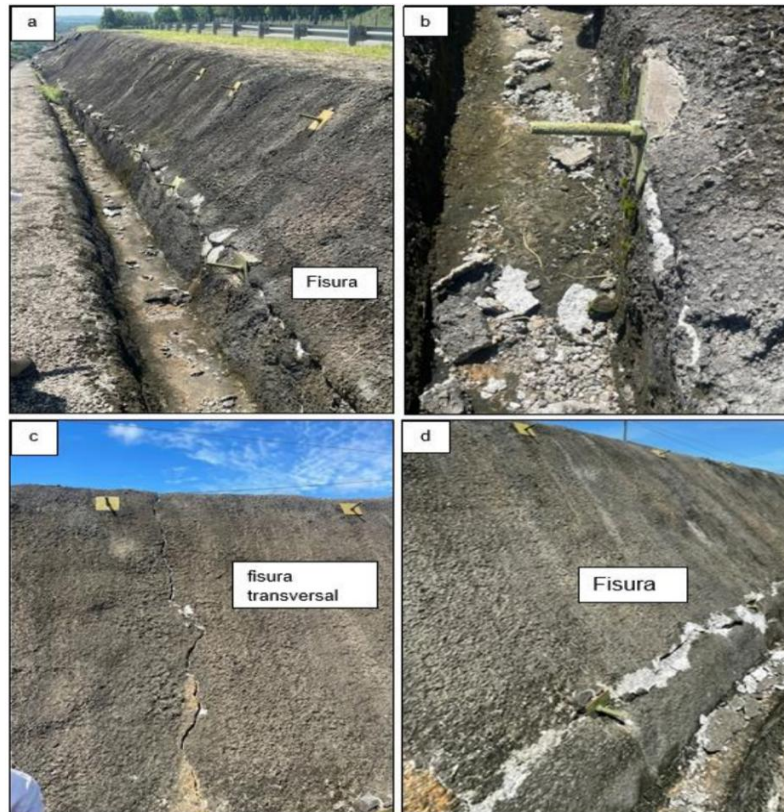
Para la margen derecha, la intervención se concentra principalmente en el reemplazo de los elementos de sostenimiento que perdieron su capacidad de trabajo, incluyendo la instalación de anclajes mediante barras autoperforantes en los sectores definidos por los análisis especializados. Con estas actuaciones se busca recuperar las condiciones de estabilidad que presentaba el talud antes del evento sísmico.

En la margen izquierda, donde la interacción entre las deformaciones del terreno y el agua resultó más evidente, las intervenciones contemplan la instalación y reposición de pernos, construcción de drenes horizontales, tratamiento de oquedades, utilización de concreto aligerado en sectores definidos y reconstrucción de las obras de drenaje afectadas.

El análisis de este sector permite establecer que la recuperación del sostenimiento, por sí sola, no garantiza la restitución de las condiciones de estabilidad. Si las discontinuidades generadas por el sismo continúan permitiendo el ingreso de agua al macizo, pueden mantenerse procesos de incremento de presión de poros, lavado de finos y pérdida de soporte. En consecuencia, la

rehabilitación debe abordar de manera conjunta la estabilidad geotécnica y el control hidráulico del talud.

Figura 3. *Afectaciones post sísmicas en el sistema de sostenimiento de la margen derecha del Talud Alto de La Guala.*



8.2 Muro con Caisson

El muro localizado entre el K42+831 y el K42+906 presentó una condición particular. Las inspecciones no mostraron fallas estructurales propias de los caissons; el problema se concentró principalmente en la pérdida de confinamiento del terreno.

Después del sismo se identificó movilización de material en el intradós, grietas longitudinales y curvilíneas en el terreno, fisuras en el pavimento y separación entre este y las estructuras de concreto cercanas. Además, el desconfinamiento del sistema aumentó aproximadamente de 1,0 m a 3,0 m.

Este cambio modifica de manera directa el comportamiento geotécnico del muro, porque disminuye la resistencia pasiva disponible y aumenta la vulnerabilidad frente a los empujes del terreno.

La intervención propuesta consiste en conservar los caissons existentes e incorporar una nueva viga de amarre en concreto reforzado de aproximadamente $0,40\text{ m} \times 0,50\text{ m}$, conectada a anclajes activos.

Los anclajes considerados tienen una longitud total aproximada de 27 m, con 15 m de longitud libre y 12 m de bulbo, inclinación cercana a 12° y una carga de tensionamiento del orden de 8 toneladas.

Consideramos que este caso es importante porque muestra que una estructura puede mantenerse íntegra y, aun así, perder capacidad debido a la modificación de las condiciones del terreno que la confina.

8.3 Talud izquierdo K49+680-K49+870

En este tramo se identificaron levantamientos de las losas de cuneta, fractura y volcamiento de bordillos, fisuración del pavimento cercano, pérdida de soporte bajo elementos hidráulicos y agrietamiento del concreto lanzado.

En algunos sectores, el levantamiento inicial de la cuneta fue del orden de 3 a 5 cm, mientras que en zonas puntuales se registraron desplazamientos mayores. La modelación post-sismo permitió representar desplazamientos cercanos a 4 cm en la pata del talud.

La rehabilitación propuesta contempla retirar el concreto lanzado desprendido, reperfilear el talud de acuerdo con la geometría de diseño, reemplazar bordillos y cunetas, instalar dos hileras de pernos de 12 m de longitud, incorporar drenes horizontales y restituir el concreto lanzado.

La intención de estas obras es recuperar el factor de seguridad correspondiente a la condición de diseño previa al evento sísmico.

Figura 4. Levantamiento de cuneta.

8.4 Terraplenes y aproches

En los terraplenes se identificaron principalmente grietas longitudinales y transversales, movimientos relativos, asentamientos y deformaciones en las zonas de aproximación a estructuras rígidas.

Uno de los aspectos que más llamó nuestra atención durante la revisión fue la concentración de daños en los accesos a los puentes. Esto puede explicarse por el contraste de rigidez existente entre el terraplén, que tiene una respuesta deformable, y los estribos o placas de aproximación, que presentan una rigidez considerablemente mayor.

Se identifican las afectaciones principalmente en los accesos de los puentes P2-86, Boquerón, P2-92 y Humea.

Dependiendo de la profundidad de la afectación, se definieron diferentes niveles de intervención. En los sectores más superficiales se propone nivelación y perfilado de la corona. Cuando existe mayor compromiso del relleno, se contempla el reemplazo de la corona o incluso la excavación del material afectado hasta alcanzar un terraplén competente, para posteriormente reconstruirlo mediante capas compactadas.

Este criterio nos parece técnicamente adecuado porque evita aplicar una solución única a todos los sectores y relaciona directamente la profundidad de la intervención con el tipo de daño identificado.

8.5 RCD Bellanía

En el RCD Bellanía se presentó una falla de tipo rotacional en el costado posterior, acompañada por grietas de tracción en la corona, abultamiento en el pie, pérdida de continuidad de las bermas y afectación del sistema de drenaje.

Los análisis desarrollados posteriormente permitieron reproducir el mecanismo observado y evidenciaron una disminución de los factores de seguridad respecto de la condición previa.

La solución consiste en retirar el material inestable hasta alcanzar zonas competentes, reconformar el depósito mediante terrazas y bermas y reconstruir el sistema de drenaje perimetral y transversal.

En este caso, más que pensar en un reforzamiento puntual, la solución busca recuperar la geometría estable del depósito y volver a garantizar el control adecuado del agua superficial.

8.6 RCD Coleo

El RCD Coleo presentó una falla rotacional profunda en el sector suroccidental, además de deslizamientos superficiales, grietas de tracción y afectación generalizada del drenaje.

El material movilizado llegó a colmatar algunas de las estructuras hidráulicas existentes, lo que agravó las condiciones del sector.

La intervención planteada corresponde igualmente a la remoción del material inestable y a la reconformación del depósito mediante perfiles diferenciados de terrazas y bermas. Como complemento se contempla la reconstrucción del sistema de drenaje y de las estructuras de disipación.

Los análisis posteriores a la intervención muestran que esta geometría permite recuperar los factores de seguridad previstos para la condición de funcionamiento del depósito.

9 Evaluación hidráulica

Las afectaciones hidráulicas se presentaron principalmente en alcantarillas circulares, box culverts, cunetas, zanjas de coronación, canales y estructuras de disipación.

Al revisar los daños identificados, se encontró que muchos de ellos están directamente relacionados con los movimientos diferenciales del terreno. Las tuberías y estructuras de concreto presentan una rigidez considerable, mientras que el terraplén puede experimentar deformaciones durante un sismo. Cuando estos movimientos no son compatibles, aparecen desacoples, fracturas y cambios de nivel.

En las alcantarillas se observaron tuberías fracturadas, desacopladas o desalineadas, así como daños en cabezales, cajas de entrada y estructuras de disipación. En algunos casos también se generaron filtraciones hacia el cuerpo del terraplén.

De las 14 alcantarillas identificadas con afectaciones, 13 requieren demolición y reconstrucción total. Para la estructura restante se plantea la reposición de la caja de encole y la reconstrucción del dissipador de descole.

En las cunetas y demás obras longitudinales se presentaron fracturas de espaldares, apertura de juntas, levantamientos y cambios de nivel respecto de la calzada. Estos últimos son especialmente relevantes porque pueden modificar el sentido o la capacidad de conducción del agua.

En los sectores donde la estructura perdió continuidad o presentó deformaciones importantes, la intervención consiste en su demolición y reconstrucción utilizando las mismas secciones hidráulicas previstas inicialmente.

Alto de La Guala - Hidráulica

En este sector se plantea reemplazar parte de la cuneta existente por un canal rectangular entre aproximadamente K48+965 y K49+980, construir estructuras de caída y rehabilitar la zanja de coronación del costado izquierdo.

Más allá de recuperar la capacidad hidráulica, estas obras tienen una función geotécnica directa. Al controlar la escorrentía y reducir la infiltración, se disminuye la posibilidad de que se desarrollen presiones de poros, procesos de tubificación o pérdida de material detrás del revestimiento del talud.

Por esta razón, consideramos que la rehabilitación del drenaje no debe entenderse como una obra complementaria sino como parte de la solución de estabilidad del talud. Los análisis hidráulicos y geotécnicos desarrollados para el sector relacionaron la pérdida de funcionalidad del drenaje con la reducción de las condiciones de estabilidad, razón por la cual ambas intervenciones se plantearon de manera complementaria.

10 Evaluación de pavimentos

Para los pavimentos de las UF2 y UF3 se utilizaron inspecciones visuales y mediciones de IRI y deflectometría, complementadas con la información de georradar disponible.

En este caso, uno de los objetivos principales fue diferenciar el deterioro normal que presenta cualquier pavimento con el paso del tiempo de los cambios que podían estar relacionados con el evento sísmico.

10.1 Unidad Funcional 2

En la UF2 se identificaron fisuras y grietas longitudinales y transversales, movimientos relativos entre sectores contiguos, asentamientos y pérdida de capacidad estructural.

Las comparaciones realizadas con mediciones anteriores mostraron incrementos de IRI superiores a los que normalmente podrían esperarse por deterioro natural. De manera similar, las deflexiones obtenidas mediante FWD presentaron aumentos en varios sectores afectados.

A partir de estos resultados, las soluciones se organizaron de acuerdo con la profundidad del daño.

Cuando la afectación compromete el terraplén, se plantea reconstruir tanto la corona como la estructura de pavimento. Cuando existe asentamiento, pero el relleno puede recuperarse, se contempla el perfilado y nivelación del terraplén antes de reconstruir el pavimento.

Para daños intermedios se propone reconstruir carpeta asfáltica y base granular, reconvirmando la subbase; mientras que para afectaciones menores la intervención se limita a la carpeta y a la reconvirformación de la base.

A nuestro juicio, este enfoque resulta apropiado porque evita que una patología superficial sea tratada solamente desde la carpeta asfáltica cuando en realidad puede tener origen en capas inferiores o incluso en el terraplén.

10.2 Unidad Funcional 3

En la UF3 también se identificaron cambios en los parámetros funcionales y estructurales.

El IRI presentó un incremento promedio aproximado de 0,1 m/km, equivalente a cerca del 4 % respecto de la medición anterior, con sectores donde los aumentos fueron considerablemente mayores.

En deflectometría, el carril derecho presentó un incremento promedio de aproximadamente 42,9 μm , mientras que el carril izquierdo registró cerca de 29,1 μm .

Estos resultados permiten afirmar que en determinados sectores el daño no se limitó a fisuras visibles en superficie, sino que existió una modificación en la respuesta estructural del pavimento.

Entre las intervenciones principales se encuentran la reconstrucción de carpeta asfáltica y reconfiguración de base granular en sectores como K74+420–K74+470 y K76+770–K76+870, mientras que en el sector K85+300–K85+450 se requiere reconstruir la corona del terraplén y posteriormente la estructura de pavimento.

La evaluación de pavimentos realizada en los estudios integradores se basó precisamente en la comparación del IRI, deflectometría, georradar e inspección visual antes y después del evento.

11 Consideración general de las patologías y las intervenciones

Una vez revisadas las diferentes especialidades, se observa que varios de los daños están relacionados entre sí y no deberían interpretarse como patologías independientes.

Los movimientos de los terraplenes generaron afectaciones en los pavimentos y en algunas estructuras hidráulicas. De forma similar, las deformaciones del terreno tuvieron incidencia sobre los accesos de los puentes y sobre el comportamiento del muro con caissons. En el Alto de La Guala, la pérdida de continuidad del drenaje favoreció la infiltración y el lavado de material, aumentando la vulnerabilidad del talud.

Este análisis nos permitió entender que la rehabilitación del corredor no puede plantearse únicamente desde la reparación individual de cada elemento. En varios sectores es necesario que las soluciones estructurales, geotécnicas e hidráulicas funcionen de manera conjunta para recuperar las condiciones de estabilidad y servicio existentes antes del evento sísmico.

Por esta razón, en el presente trabajo se adopta el criterio de analizar cada patología no solo desde su manifestación visible, sino también desde el mecanismo que la originó y desde la forma en que la intervención propuesta responde a dicho mecanismo.

12 Matriz consolidada de patologías y rehabilitación

La siguiente matriz resume los principales resultados del análisis por especialidades. Su finalidad es mostrar, de manera conjunta, la relación entre la manifestación del daño, el mecanismo que explica su aparición y la intervención planteada. La matriz no reemplaza el detalle presentado en los numerales anteriores; sirve como síntesis para facilitar la lectura interdisciplinaria del caso.

Tabla 4. *Matriz consolidada de patologías, mecanismos de afectación e intervenciones de rehabilitación.*

Componente	Patologías principales	Mecanismo asociado	Intervención de rehabilitación
Puentes y pontones	Desplazamiento/deformación de apoyos y aisladores; rotura de topes; daños en juntas, muros espaldares y aproches.	Fuerzas inerciales, aceleración vertical, desplazamiento relativo y activación de dispositivos sismorresistentes. Deformación	Reemplazo de apoyos/aisladores y juntas; reconstrucción de topes, ménsulas, placas de aproximación y elementos locales.
Box culverts	Apertura de juntas, grietas en muros y losas, desplazamiento del cuerpo y fractura de aletas.	impuesta por el terraplén, corte y tracción longitudinal en la interacción suelo-estructura.	Reconstrucción de juntas; demolición y reconstrucción total del K57+727.
Talud Alto de La Guala	Fisuración del concreto lanzado, pernos desplazados o punzonados, anclajes fuera de servicio, oquedades, escarpes y daños de drenaje.	Desplazamiento de cuñas, plastificación, pérdida de soporte, infiltración, erosión interna y aumento de presión de poros.	Reposición de pernos/anclajes, reperfilado, concreto lanzado, drenes, zanjas, canales y disipadores.
Muro con caissons	Pérdida de material en intradós, grietas del terreno y pavimento y aumento del desconfinamiento.	Reacomodo del terreno y disminución de la resistencia pasiva disponible frente a los caissons.	Conservación de caissons; viga de amarre y anclajes activos.
Terraplenes y aproches	Grietas longitudinales/transversales, asentamientos y movimientos diferenciales en accesos a puentes.	Deformación sísmica del relleno y contraste de rigidez con estructuras rígidas.	Nivelación/perfilado, reemplazo de corona o reconstrucción del relleno por capas según profundidad.

Componente	Patologías principales	Mecanismo asociado	Intervención de rehabilitación
RCD Bellanía y Coleo	Fallas rotacionales, grietas de tracción, abultamientos, pérdida de bermas y afectación del drenaje.	Reducción de estabilidad bajo condición pseudoestática, movilización del material y pérdida de geometría estable.	Remoción de material, reconformación en terrazas/bermas y reconstrucción del drenaje.
Alcantarillas circulares	Tuberías fracturadas, desacopladas o desalineadas; daños en cajas, cabezales y disipadores.	Asentamientos diferenciales del terraplén y pérdida de compatibilidad con la tubería rígida.	Reconstrucción total de 13 alcantarillas y reparación localizada de la estructura restante.
Cunetas, zanjas y canales	Fracturas, apertura de juntas, cambios de nivel y pérdida de continuidad hidráulica.	Movimientos diferenciales del terreno y baja capacidad de deformación de elementos rígidos.	Demolición y reconstrucción de tramos afectados, conservando la función y sección hidráulica.
Pavimentos UF2 y UF3	Fisuras y grietas, movimientos relativos, aumento de IRI y deflexiones.	Deformación de capas de soporte y del terraplén, con pérdida funcional y/o estructural.	Intervención por niveles: carpeta, base, subbase, corona o terraplén según profundidad y severidad.

Al analizar la matriz se observa que varias intervenciones actúan sobre más de una especialidad. Un ejemplo claro es el Alto de La Guala, donde recuperar los anclajes sin restablecer el drenaje dejaría activo uno de los mecanismos que favorece la pérdida de estabilidad. Algo similar ocurre en los aproches y en las alcantarillas enterradas, donde el comportamiento del terraplén condiciona tanto la respuesta del pavimento como la de los elementos rígidos. Esta lectura integrada es la base de la discusión presentada en el capítulo siguiente.

13 Análisis integrado

El capítulo anterior permitió establecer cuáles fueron los componentes afectados, las principales patologías identificadas y las intervenciones de rehabilitación definidas para cada especialidad. A partir de estos resultados, en esta sección el análisis se orienta a comprender de manera conjunta el comportamiento de la infraestructura frente al evento sísmico, identificando los patrones de afectación que se repiten entre los distintos componentes y las relaciones existentes entre los mecanismos de daño observados.

La discusión busca determinar hasta qué punto las soluciones planteadas responden técnicamente a las causas y mecanismos que originaron las afectaciones, considerando la interacción entre estructuras, geotecnia, hidráulica y pavimentos. Este enfoque permite ir más allá de la descripción individual de cada patología y facilita una lectura integral del comportamiento del corredor, reconociendo que en varios sectores los daños fueron el resultado de fenómenos asociados entre sí.

De esta manera, el análisis desarrollado permite extraer aprendizajes técnicos del caso de estudio, particularmente en relación con la respuesta de la infraestructura vial ante solicitaciones sísmicas, la importancia de la interacción entre especialidades y la necesidad de definir intervenciones que respondan no solo a la manifestación visible del daño, sino también al mecanismo que lo produjo.

14 Patrones y mecanismos de afectación

Al superponer los resultados de las diferentes especialidades no se identifica un único mecanismo de daño para todo el corredor. Por el contrario, la respuesta fue heterogénea y estuvo condicionada por la rigidez de los elementos, la naturaleza del terreno, la presencia de agua y la forma en que cada componente se relaciona con los elementos vecinos. Aun así, durante la revisión encontramos varios patrones que se repiten y ayudan a explicar por qué ciertos sectores concentraron las afectaciones.

El primero corresponde a las transiciones entre elementos con rigideces diferentes. Este patrón se observa en los apoyos de los puentes, donde el terraplén deformable entra en contacto con estribos, losas de aproximación y otras estructuras rígidas. También aparece en las alcantarillas y box culverts embebidos en rellenos. Cuando el terreno se deforma durante el sismo, el elemento rígido no necesariamente acompaña ese movimiento en la misma magnitud, lo que favorece asentamientos diferenciales, apertura de juntas, fisuración y movimientos relativos. Por esta razón, varios daños visibles en el pavimento o en una obra de drenaje tienen su origen en la respuesta del relleno que los soporta.

Un segundo patrón se relaciona con la concentración de daños en los dispositivos encargados de admitir o restringir movimientos. En los puentes, las afectaciones se localizaron principalmente en apoyos de neopreno, aisladores, topes sísmicos, juntas de dilatación y zonas de aproximación. Este comportamiento es coherente con la función de estos elementos: durante el sismo reciben una parte importante de la demanda de desplazamiento y de las fuerzas transmitidas por el tablero. El hecho de que la superestructura de los puentes se mantuviera estable mientras varios dispositivos perdían capacidad muestra que el daño se concentró en componentes específicos de la respuesta sísmica y no en una falla generalizada del sistema.

El tercer patrón es la relación entre deformación geotécnica y agua. El Alto de La Guala es el caso más evidente. Las grietas y discontinuidades generadas por el movimiento sísmico modificaron las rutas de escorrentía e infiltración, permitiendo que el agua ingresara detrás del concreto lanzado y favoreciendo lavado de finos, tubificación, oquedades y pérdida de soporte. En este punto el agua no puede interpretarse únicamente como una condición ambiental posterior: una vez alterado el drenaje, se convierte en un mecanismo que puede prolongar o agravar la inestabilidad iniciada por el sismo.

También se reconoce un patrón de pérdida de soporte o confinamiento. En el muro con caissons los elementos estructurales no presentaron una falla propia, pero el terreno que contribuía al confinamiento se movilizó y el intradós quedó más expuesto. En los RCD Bellanía y Coleo, la movilización del material modificó la geometría estable y afectó simultáneamente las bermas y las obras de drenaje. Estos casos muestran que la capacidad de una obra geotécnica no depende solamente de la resistencia del elemento construido, sino de que se mantengan las condiciones del terreno consideradas en su diseño.

Finalmente, los pavimentos funcionaron en varios sectores como una expresión superficial de problemas desarrollados a mayor profundidad. Las grietas y deformaciones observadas fueron contrastadas con incrementos de IRI y deflexiones superiores al deterioro natural esperado. Esto permitió diferenciar una patología limitada a la capa de rodadura de otra asociada con pérdida de soporte o deformación del terraplén. Desde nuestro análisis, esta diferencia es importante porque condiciona directamente la profundidad de la rehabilitación y evita tratar únicamente la manifestación superficial del daño.

15 Interacción entre especialidades

Al contrastar progresivamente los resultados de cada especialidad, una patología que inicialmente podía interpretarse desde un único componente adquirió una lectura más completa al relacionarse con las condiciones del mismo sector. Este cruce permitió reconocer cadenas de respuesta en las que el terreno, las estructuras, el drenaje y el pavimento interactuaron entre sí. La identificación de estas relaciones durante el avance de las consultorías fue una de las principales razones para mantener un enfoque multidisciplinario en el trabajo.

La interacción más frecuente se presenta entre geotecnia y pavimentos. Los asentamientos, desplazamientos y deformaciones de los terraplenes se manifiestan en superficie mediante grietas longitudinales o transversales, pérdida de regularidad y aumento de las deflexiones. En los enfoques de P2-86, Boquerón, P2-92 y Humea, además, esa deformación del relleno coincide con la presencia de estructuras rígidas, por lo que el análisis del pavimento por sí solo no explica completamente el daño.

Otra interacción relevante es la existente entre geotecnia e hidráulica. En el Alto de La Guala, la pérdida de continuidad de cunetas, zanjas y canales alteró el manejo del agua y favoreció procesos de infiltración detrás del revestimiento. Al mismo tiempo, la deformación del talud fue la que inicialmente fracturó o desplazó varias de esas obras hidráulicas. Se configura así una relación de doble vía: el movimiento del terreno afecta el drenaje y, posteriormente, el drenaje deficiente puede contribuir a mantener condiciones desfavorables de presión de poros y erosión interna.

En las estructuras enterradas ocurre una interacción similar entre hidráulica, estructuras y geotecnia. Las alcantarillas y box culverts cumplen una función hidráulica, pero su daño depende en buena medida de la deformación del terraplén y de la interacción suelo-estructura. Por ello, la reconstrucción de algunas obras requiere intervenir también el relleno y posteriormente restituir la estructura de pavimento. Esto demuestra que el límite entre especialidades es útil para organizar el estudio, pero no siempre representa el comportamiento real de la infraestructura.

El muro con caissons aporta otro ejemplo. Las grietas del pavimento y la pérdida de material podían sugerir inicialmente una afectación estructural del muro; sin embargo, el diagnóstico mostró que los caissons conservaron su integridad y que el problema principal estaba en la pérdida de confinamiento del terreno. En consecuencia, la solución se orientó a recuperar el

equilibrio del sistema suelo-estructura mediante anclajes y una nueva viga de amarre, en lugar de reemplazar los elementos de cimentación.

En los RCD Bellanía y Coleo también se observa la relación entre estabilidad y drenaje. Los movimientos en masa afectaron canales, cunetas y dissipadores y, a su vez, la recuperación de la geometría del depósito no sería suficiente sin reconstruir esas obras. De esta revisión concluimos que, en los sectores donde confluyen varias especialidades, la rehabilitación debe evaluarse como un sistema y no como una suma de reparaciones independientes.

16 Relación entre diagnóstico y rehabilitación

La relación entre diagnóstico y rehabilitación se analizó verificando si la intervención propuesta actúa sobre el mecanismo identificado y si su alcance guarda relación con la severidad del daño. Bajo este criterio, no todas las patologías requieren reconstrucción total, pero tampoco todas pueden resolverse con una reparación superficial.

En los puentes, por ejemplo, la estabilidad general de las superestructuras permitió concentrar las intervenciones en apoyos, aisladores, topes, juntas y elementos locales afectados. Esta decisión es coherente con el diagnóstico, porque el daño se concentró en los sistemas encargados de controlar y transmitir los desplazamientos. En los box culverts se observa además una diferenciación por severidad: las aperturas de juntas pueden repararse cuando la integridad global se conserva, mientras que el K57+727 requiere reconstrucción total por el agrietamiento extendido de muros y losas.

En el muro con caissons la correspondencia resulta especialmente clara. Como los caissons no presentaron daño estructural intrínseco, la solución no plantea su demolición. La intervención mediante anclajes activos y viga de amarre responde directamente a la pérdida de confinamiento y al aumento de los empujes derivados de la movilización del terreno. Reparar únicamente las grietas superficiales habría atendido la manifestación, pero no el mecanismo que comprometió la estabilidad.

Para el Alto de La Guala, la solución combina sostenimiento y drenaje porque el diagnóstico también identifica ambos mecanismos. La reposición de pernos y anclajes busca recuperar la resistencia mecánica, mientras que drenes, zanjas y canales controlan el ingreso y conducción del agua. En los RCD Bellanía y Coleo se sigue una lógica equivalente: la remoción del material inestable y la reconfiguración restablecen la geometría, y la reconstrucción del drenaje reduce la posibilidad de que el agua vuelva a comprometer las condiciones de estabilidad.

En terraplenes y pavimentos, la intervención se gradúa según la profundidad del daño. Cuando la afectación es superficial, se actúa sobre las capas superiores; cuando existe pérdida de soporte o compromiso del terraplén, la rehabilitación alcanza la corona o el relleno. Consideramos que esta relación entre diagnóstico y profundidad de intervención es uno de los aspectos más importantes del caso, porque evita adoptar una solución estándar para sectores que presentan mecanismos diferentes.

Un aspecto que debe mantenerse presente al interpretar todas las alternativas es que los informes fueron formulados con el propósito de restituir las condiciones existentes antes del sismo. Por tanto, las soluciones no deben evaluarse como si su objetivo fuera repotenciar o elevar el nivel de diseño de la infraestructura. Desde el punto de vista académico, esta distinción permite valorar la coherencia de las intervenciones dentro de su alcance real: recuperar estabilidad, integridad y funcionalidad, sin convertir la rehabilitación en un proyecto de mejoramiento.

En conjunto, la revisión muestra una correspondencia técnica razonable entre las patologías diagnosticadas y las intervenciones propuestas. El valor del análisis integrado está en hacer visible esa trazabilidad: la rehabilitación deja de verse como un listado de cantidades de obra y se entiende como la respuesta técnica a un mecanismo de afectación previamente identificado.

17 Limitaciones, incertidumbres y aporte técnico

El estudio presenta limitaciones que deben ser reconocidas para interpretar correctamente sus resultados. Aunque el trabajo de grado se fue estructurando de manera paralela al avance de las consultorías y permitió seguir la evolución de los diagnósticos, la ejecución directa de las campañas de exploración, ensayos especializados, auscultaciones y modelaciones correspondió a los equipos consultores de cada disciplina. Por esta razón, el documento integra y analiza técnicamente los resultados generados durante ese proceso, pero no pretende atribuir a los autores la ejecución de la totalidad de los cálculos, ensayos o modelos especializados.

Una segunda limitación es la diferencia en el tipo y momento de las evidencias. Las inspecciones visuales, mediciones de IRI, deflectometría, visitas geotécnicas y modelaciones no se ejecutaron todas en una misma fecha ni con una única metodología. Esto significa que el nivel de detalle disponible cambia entre componentes. En consecuencia, el estudio evita comparar directamente magnitudes que provienen de procedimientos distintos y utiliza cada indicador dentro del contexto técnico para el cual fue obtenido.

En geotecnia existe además la incertidumbre propia de la caracterización del subsuelo y de las modelaciones. Los factores de seguridad, desplazamientos y parámetros obtenidos mediante análisis de estabilidad o retroanálisis representan una idealización del comportamiento real. Su utilidad está en comprobar que el mecanismo modelado sea compatible con las evidencias observadas en campo, no en asumir que el modelo reproduce de manera exacta todas las condiciones del terreno.

Durante el desarrollo del estudio se identificó una diferencia entre algunos registros técnicos respecto de la magnitud asignada al evento sísmico, encontrándose valores de M_w 6,5 y M_w 6,4. Para evitar que esta variación documental afectara la comparación entre componentes, el análisis conservó los valores de aceleración máxima del terreno empleados por cada especialidad —aproximadamente 0,148 g, 0,150 g y 0,151 g según el sector—, dado que estos corresponden a los parámetros efectivamente utilizados en las evaluaciones de respuesta y estabilidad. Esta diferencia se reconoce como una limitación de consistencia entre las fuentes técnicas disponibles, sin modificar los resultados particulares obtenidos por cada consultoría.

Otra consideración es que el alcance del trabajo se limita a la evaluación técnica. No se analizaron costos, presupuestos, programación, reclamaciones, seguros ni aspectos jurídicos o

contractuales asociados con la ejecución de las rehabilitaciones. Del mismo modo, la discusión no pretende definir nuevas soluciones de diseño distintas de las formuladas por los especialistas, sino analizar su relación con los daños y mecanismos documentados.

A pesar de estas limitaciones, consideramos que el aporte técnico del estudio se encuentra en haber documentado e integrado, dentro de una misma estructura académica, la evolución de un proceso real de evaluación postsísmica que se desarrolló simultáneamente desde varias especialidades. La matriz consolidada permite seguir una secuencia común entre condición previa, patología, evidencia, mecanismo e intervención, y muestra cómo los resultados parciales fueron adquiriendo sentido a medida que se contrastaban entre disciplinas. Esta estructura puede ser útil como referencia para futuras evaluaciones postsísmicas de corredores viales con componentes diversos.

El principal aprendizaje obtenido es que la manifestación visible del daño no siempre coincide con su causa. Una fisura en pavimento puede estar asociada con un movimiento del terraplén; una falla aparente en un muro puede originarse en la pérdida de confinamiento del suelo; y una fractura de drenaje puede convertirse posteriormente en un factor de inestabilidad geotécnica. Reconocer estas relaciones constituye, a nuestro juicio, el aporte más importante del análisis integrado desarrollado en este trabajo.

18 Conclusiones y recomendaciones

18.1 Conclusiones

- La evaluación integrada permitió establecer que las afectaciones registradas en las Unidades Funcionales 2 y 3 no respondieron a un único patrón de daño, sino a la interacción entre la demanda sísmica, la rigidez de cada componente y las condiciones particulares del terreno. En los puentes, los daños se concentraron principalmente en apoyos, aisladores, topes sísmicos, juntas y zonas de aproximación; en los terraplenes y taludes predominaron los asentamientos, desplazamientos, pérdida de confinamiento y disminución de la estabilidad; mientras que en las obras hidráulicas y pavimentos se evidenciaron fracturas, desacoples, cambios de nivel, fisuración y pérdida de capacidad funcional o estructural. Esta lectura conjunta permitió comprender que una misma deformación del terreno podía manifestarse simultáneamente en diferentes elementos de la vía.
- La revisión de los registros previos al evento, las inspecciones posteriores, los ensayos, las mediciones y las modelaciones desarrolladas por las diferentes especialidades mostró una correspondencia consistente entre las patologías observadas y los mecanismos de afectación atribuidos al sismo del 8 de junio de 2025, dentro del alcance de los informes analizados. Esta trazabilidad fue especialmente clara en los enfoques de puentes, donde el contraste de rigideces produjo asentamientos y grietas; en el Talud Alto de La Guala, donde la pérdida de funcionalidad del drenaje incrementó la vulnerabilidad geotécnica; y en los RCD Bellanía y Coleo, donde los análisis pseudoestáticos reprodujeron mecanismos de inestabilidad compatibles con los daños encontrados en campo.
- Las soluciones de rehabilitación revisadas presentan correspondencia técnica con la naturaleza y profundidad de los daños diagnosticados. En estructuras, las intervenciones se concentran en restituir la capacidad de los dispositivos y elementos afectados sin reemplazar innecesariamente las superestructuras que conservaron su integridad; en geotecnia se combinan sostenimiento, reconformación y drenaje; en pavimentos la profundidad de la intervención aumenta cuando el daño compromete las capas inferiores o el terraplén; y en hidráulica se reconstruyen los elementos que perdieron continuidad o capacidad de conducción. En todos los casos se mantiene como criterio rector la restitución

de las condiciones de seguridad, estabilidad y servicio existentes antes del sismo, sin interpretar las obras como una repotenciación de la infraestructura.

- El caso de estudio confirmó la necesidad de abordar la evaluación postsísmica de un corredor vial mediante una visión interdisciplinaria. La revisión por especialidades fue necesaria para caracterizar cada patología, pero la explicación de los daños más relevantes solo fue posible al relacionar estructuras, geotecnia, hidráulica y pavimentos. De manera particular, el comportamiento del Alto de La Guala evidenció que la rehabilitación del sostenimiento no puede separarse del control de las aguas, y los aproches demostraron que la condición del terraplén influye directamente sobre la respuesta del pavimento y de los elementos de transición de los puentes.
- Como aporte del trabajo, la estructuración progresiva de la información bajo la secuencia condición pre-sismo–evidencia–patología–mecanismo–intervención permitió acompañar y documentar la evolución del diagnóstico desde las primeras inspecciones hasta la definición de las soluciones de rehabilitación. Esta trazabilidad facilita comprender por qué se propone cada intervención y evita que la rehabilitación sea entendida únicamente como una respuesta a la manifestación superficial del daño. Para futuros estudios de infraestructura vial afectada por sismos, esta lógica puede servir como base para organizar el diagnóstico, articular resultados entre disciplinas y sustentar técnicamente la priorización de las intervenciones.

18.2 Recomendaciones

- Implementar un programa de seguimiento técnico post rehabilitación en los sectores críticos, utilizando indicadores compatibles con los empleados durante el diagnóstico. En puentes se recomienda verificar periódicamente la posición y condición de apoyos, aisladores, topes y juntas; en taludes y estructuras de contención, controlar desplazamientos, apertura de grietas, funcionamiento de drenes y condición de los elementos de sostenimiento; y en pavimentos, mantener campañas comparables de IRI y deflectometría. El objetivo debe ser comprobar que las intervenciones recuperan y conservan el desempeño esperado, y detectar oportunamente cualquier evolución posterior de las patologías.

- Programar la ejecución de las obras considerando la dependencia técnica entre especialidades. En sectores como el Alto de La Guala, las intervenciones hidráulicas y geotécnicas deben coordinarse antes de restituir acabados superficiales o elementos que puedan volver a afectarse por infiltración, pérdida de soporte o movimientos del terreno. De la misma manera, en los aproches y sectores con reconstrucción de obras hidráulicas, la recuperación del terraplén debe preceder a la restitución definitiva de la estructura de pavimento, con el fin de evitar reparaciones aisladas que no atiendan el mecanismo que originó el daño.
- Verificar durante la ejecución de las obras la extensión real de las afectaciones, especialmente en terraplenes, aproches, zonas con pérdida de soporte y sectores donde la modelación representa una idealización de las condiciones del subsuelo. La excavación y exposición de los materiales pueden revelar profundidades de daño distintas a las estimadas en la etapa de diagnóstico; por ello, se recomienda documentar las condiciones encontradas en obra y ajustar, cuando técnicamente corresponda, los límites de excavación, reemplazo, compactación o sostenimiento sin modificar el objetivo de restitución definido para cada intervención.
- Consolidar una línea base técnica única para la infraestructura del corredor, integrando inspecciones periódicas, registros fotográficos georreferenciados, resultados de auscultación, inventario de drenajes, condición de terraplenes y taludes, y estado de los sistemas sismorresistentes de los puentes. La experiencia de este caso mostró el valor de contar con información previa al evento para diferenciar un daño súbito de un proceso de deterioro existente. Una base histórica homogénea permitiría reducir incertidumbres en futuras evaluaciones y mejorar la capacidad de respuesta después de eventos sísmicos o climáticos extraordinarios.
- Adoptar para futuros eventos un protocolo de evaluación postsísmica del corredor que establezca una inspección inicial de seguridad, una segunda etapa de diagnóstico especializado y una fase de integración interdisciplinaria antes de definir las obras definitivas. El protocolo debería incluir criterios de priorización relacionados con seguridad vial, estabilidad global, pérdida de funcionalidad, posibilidad de evolución progresiva del daño y dependencia entre componentes. Esta secuencia permitiría orientar los recursos técnicos hacia los sectores que puedan comprometer la continuidad operativa o presentar mecanismos de deterioro activo.

Referencias

- Agencia Nacional de Infraestructura. (2015). *Contrato de Concesión bajo esquema de asociación público-privada No. 010 de 2015: Proyecto corredor Villavicencio–Yopal*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO guide for design of pavement structures*. AASHTO.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2014). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14*. Ministerio de Transporte e Instituto Nacional de Vías. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3709-norma-colombiana-de-diseno-de-puentes-ccp14>
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). *NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes*. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057–1085. <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- Concesionaria Vial del Oriente S.A.S. (2026a). *Evaluación de daños y rehabilitación de la infraestructura afectada por el sismo del 8 de junio de 2025: Estructuras, Talud La Guala, obras hidráulicas y sector muro con caissons* [Informe técnico de integración interno].
- Concesionaria Vial del Oriente S.A.S. (2026b). *Evaluación de daños y rehabilitación de la infraestructura afectada por el sismo del 8 de junio de 2025: Terraplenes, pavimentos y RCD Bellanía y Coleo* [Informe técnico de integración interno].
- Gómez, J., & Montes, N. E. (Comps.). (2020). *Atlas Geológico de Colombia 2020. Escala 1:500 000 (26 hojas)*. Servicio Geológico Colombiano. https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/agc_500K2020.aspx
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Ministerio de Transporte. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/especificaciones-tecnicas/984-manual-de-drenaje-para-carreteras/file>
- Instituto Nacional de Vías. (2022). *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022*. Ministerio de Transporte. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/14480-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-2022-1/file>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Decreto 926 de 2010)*. <https://minvivienda.gov.co/normativa/decreto-0926-2010>

Pavinfra Pavimentos e Infraestructura S.A.S. (2025). *Evaluación de la afectación del sismo sobre las estructuras de pavimento UF2 y UF3 (PAV-PROY-047-2025)* [Informe técnico].

Servicio Geológico Colombiano. (2025). *Boletín de sismos: junio de 2025*.
<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Boletines%20Sismicidad/Bolet%C3%ADn%20Junio%20de%202025.pdf>