

Diagnóstico Patológico y Caracterización Lesional de Puentes Ferroviarios Patrimoniales en el Eje Cafetero Mediante Auscultación no Destructiva.

Autor1: Jairo Patiño Álzate.

Autor 2: Edwin Alberto Patiño Bustamante.

Tutora: Dra. Diana Mylena Zambrano Vasquez.

¹*Faculta de ingeniería Civil, universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia.*

jairopatino@usantotomas.edu.co

²*Faculta de ingeniería Civil, universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia.*

edwin.bustamantepat@usantotomas.edu.co

Resumen

Este estudio presenta un diagnóstico patológico integral de tres puentes ferroviarios con valor patrimonial ubicados en el Eje Cafetero (Colombia): los puentes sobre la quebrada Buenavista, el río Robles y el río Pedregal. La investigación se desarrolla bajo un enfoque de estudio multicaso, fundamentado en la evaluación de la integridad estructural mediante técnicas de auscultación no destructiva, tales como ultrasonido, esclerometría y análisis modal numérico computacional, complementadas con inspección visual sensorial.

La metodología aplicada integra el levantamiento patológico en campo con la obtención de indicadores cuantitativos que permiten identificar lesiones superficiales e internas, pérdida de sección en elementos metálicos y alteraciones asociadas a la interacción suelo-estructura. A partir del análisis del nexa causal entre las patologías identificadas, las condiciones ambientales y la tipología estructural, se caracterizan los mecanismos de deterioro predominantes en cada caso de estudio.

Los resultados obtenidos evidencian que, si bien los puentes evaluados presentan una capacidad estructural remanente adecuada para su condición de servicio actual, las principales patologías corresponden a procesos de degradación por humedad, corrosión superficial y bio-colonización, asociados a la ausencia de mantenimiento preventivo. Como aporte principal, el estudio propone una metodología diagnóstica replicable, basada en matrices de severidad y mapas de daño, que sirve como herramienta técnica para la gestión, conservación preventiva y toma de decisiones en infraestructura ferroviaria patrimonial.

Palabras clave: Patología de la construcción, Auscultación no destructiva, Diagnóstico estructural, Infraestructura ferroviaria, Caracterización lesional, Patrimonio industrial.



1. Introducción.

La infraestructura ferroviaria en Colombia representa un pilar fundamental de la memoria histórica y el desarrollo industrial del país. Sin embargo, tras el cese de operaciones de la red nacional, estructuras de alto valor patrimonial como los puentes han quedado relegadas a un estado de abandono sistemático. En la región del Eje Cafetero, esta problemática es particularmente aguda, ya que el clima tropical húmedo actúa como un catalizador de procesos degradativos en materiales como el acero y el concreto ciclópeo, comprometiendo la seguridad estructural de estas obras sin que existan protocolos de monitoreo vigentes.

Desde la perspectiva de la Patología de la Construcción, el diagnóstico de estas estructuras enfrenta un reto metodológico: la ausencia de planos originales y registros de mantenimiento. Esta carencia de información técnica base convierte a la auscultación no destructiva en la herramienta idónea para realizar una "anamnesis" estructural. Técnicas como el ultrasonido, la esclerometría y el análisis modal computacional permiten hoy identificar cuadros patológicos internos y evaluar la capacidad residual de los puentes sin comprometer su integridad física ni su valor histórico.

Bajo este escenario, la presente investigación desarrolla un estudio multicaso, centrado en tres infraestructuras representativas de los departamentos de Quindío y Risaralda: los puentes sobre la Quebrada Buenavista, el Río Robles y el Río Pedregal. El objetivo es trascender la simple descripción de daños para profundizar en el nexo causal de las patologías, correlacionando los hallazgos de campo con los factores ambientales incidentes.

Finalmente, este documento propone un esquema de evaluación que integra la inspección visual sensorial con la validación instrumental y computacional. A través de la generación de mapas de daño y matrices de severidad, se pretende establecer una metodología de diagnóstico replicable que sirva como base para futuros planes de rehabilitación y conservación preventiva del patrimonio ferroviario colombiano.



2. Justificación.

La relevancia de esta investigación reside en la necesidad crítica de actualizar los protocolos de evaluación para infraestructuras ferroviarias en desuso, las cuales representan un desafío técnico debido a su avanzada edad y heterogeneidad de materiales. Desde una dimensión técnico y científica, el estudio se justifica al aplicar los métodos de auscultación no destructiva que permiten superar las limitaciones de la inspección visual tradicional. El uso de herramientas como el ultrasonido, la esclerometría, el estudio geotécnico y el análisis de vulnerabilidad no solo facilita la detección de fallas invisibles al ojo humano, sino que proporciona datos cuantitativos para determinar la capacidad estructural residual, aportando un precedente metodológico para la ingeniería forense en Colombia.

Desde la evaluación patológica de estructuras, este trabajo es fundamental para entender el nexo causal entre el abandono institucional y los mecanismos de degradación específicos de la región cafetera. Al caracterizar las lesiones en tres tipologías diferentes de puentes, se genera un conocimiento especializado sobre cómo la humedad relativa y la falta de mantenimiento preventivo aceleran procesos como la carbonatación en el concreto ciclópeo y la corrosión galvánica en el acero patrimonial.

Finalmente, la investigación posee una marcada justificación social y patrimonial. Los puentes sobre la quebrada Buenavista, el Río Robles y el Río Pedregal no son solo estructuras de paso, sino vestigios de la identidad ferroviaria del país. Proponer una metodología de diagnóstico no invasiva garantiza que estas estructuras puedan ser evaluadas y rehabilitadas sin comprometer su esencia histórica, proporcionando a los entes territoriales una hoja de ruta técnica para la toma de decisiones basada en indicadores de severidad reales y no en estimaciones subjetivas.

3. Planteamiento del problema.

La infraestructura ferroviaria del Eje Cafetero, construida principalmente entre finales del siglo XIX y principios del XX, constituye un patrimonio industrial de valor incalculable. Sin embargo, tras décadas de inactividad, estas estructuras representadas en este estudio por los puentes sobre la Quebrada Buenavista, el Río Robles y el Río Pedregal han quedado expuestas a un entorno agresivo sin protocolos de mantenimiento técnico. El clima tropical húmedo de la región actúa como un factor externo permanente que acelera procesos de degradación química y física, cuya evolución es incierta debido a la falta de registros históricos de su comportamiento estructural.

El núcleo del problema radica en la incertidumbre diagnóstica. La inspección visual tradicional, aunque necesaria, es insuficiente en el ámbito de la Patología de la Construcción para determinar el estado de salud de elementos ocultos o internos. Existe un vacío de información sobre el nexo causal de las lesiones visibles (fisuras, corrosión, desprendimientos) y su impacto real en la capacidad de carga residual de los puentes. Sin un diagnóstico preciso que utilice técnicas de auscultación no destructiva, cualquier intento de intervención podría ser ineficaz o incluso perjudicial para la integridad del bien patrimonial.

Esta fragmentación en el conocimiento técnico y la carencia de una metodología de evaluación estandarizada para puentes ferroviarios patrimoniales en Colombia, impiden la formulación de planes de conservación preventiva. Por tanto, se hace imperativo responder:

¿Cuál es el estado de integridad estructural y cuáles son los cuadros patológicos predominantes en estos tres puentes ferroviarios, y cómo puede un protocolo basado en auscultación no destructiva proporcionar los indicadores necesarios para su preservación?

4. Objetivos.

4.1 Objetivo general:

Evaluar el estado de integridad estructural y caracterizar los cuadros patológicos de tres puentes ferroviarios patrimoniales en el Eje Cafetero, mediante técnicas de auscultación no destructiva, para establecer lineamientos técnicos que orienten su conservación preventiva.

4.2 Objetivos específicos:

1. **Diagnosticar** la condición física actual de los puentes (Buenavista, Robles y Pedregal) a través de inspección visual sensorial y el uso de Ensayos No Destructivos (ultrasonido, esclerometría y análisis modal computacional) para la detección de lesiones superficiales e internas.
2. **Analizar** el nexo causal y la evolución de las patologías identificadas, correlacionando las propiedades mecánicas de los materiales con la agresividad del entorno ambiental y la tipología estructural de cada caso.
3. **Determinar** el índice de severidad y la vulnerabilidad de los elementos críticos mediante la integración de resultados instrumentales, permitiendo la jerarquización de daños en matrices técnicas de tipo estadística descriptiva.
4. **Proponer** un protocolo metodológico de diagnóstico y lineamientos de intervención técnica adaptados a la infraestructura ferroviaria patrimonial, que sirvan como base para futuros planes de mantenimiento.

5. Alcance y Delimitaciones.

5.1 Alcance:

La presente investigación se circunscribe al diagnóstico patológico superficial e interno de los elementos estructurales principales (Estructura metálica, tableros, vigas, estribos y fundaciones) de tres puentes ferroviarios específicos en el Eje Cafetero. El alcance técnico comprende desde la fase de anamnesis histórica y recolección de datos en campo mediante inspección visual sensorial, hasta la aplicación de Ensayos No Destructivos.

El estudio llegará hasta la determinación del nexo causal de las patologías y la propuesta de lineamientos técnicos de intervención. No incluye el diseño detallado de reforzamiento estructural ni el presupuesto de obra, sino que proporciona la base diagnóstica necesaria para que dichos procesos se realicen con rigor técnico en fases posteriores.

5.2 Delimitaciones espaciales:

1. **Espacial:** La investigación se limita exclusivamente a tres casos de estudio: el puente sobre la quebrada Buenavista (Quindío), el puente sobre el río Robles (Montenegro) y el puente sobre el río Pedregal (Pereira).
2. **Temporal:** Los datos recolectados representan el estado de integridad estructural de las obras en el periodo comprendido entre mes de marzo de 2025 y los meses de febrero y marzo de 2026, bajo las condiciones climáticas actuales de la región.
3. **Técnica:** El análisis de materiales se enfocará en el concreto ciclópeo y el acero estructural presentes. No se realizarán pruebas de laboratorio de carácter destructivo (como extracción de núcleos, tampoco daños a la estructura metálica) que comprometan la estabilidad o el valor patrimonial de las estructuras, a menos que se identifique una zona de falla crítica que lo requiera estrictamente.
4. **Funcional:** El estudio evalúa la vulnerabilidad física de los puentes en su estado actual de abandono o uso actual (peatonal informal); no contempla el análisis de capacidad de carga para el retorno inmediato de operaciones ferroviarias pesadas sin un reforzamiento previo.

6. Marco teórico y conceptual.

La fundamentación teórica de esta investigación se articula en tres ejes transversales que permiten comprender la complejidad del diagnóstico estructural en infraestructuras ferroviarias bajo una perspectiva patológica.

Eje 1: Patología de la Construcción y Mecanismos de Degradación en Puentes.

La patología estructural en puentes ferroviarios no debe entenderse como un evento aislado, sino como un proceso evolutivo condicionado por factores intrínsecos y extrínsecos. Según autores como Gómez (2019) y Smith (2021), el abandono de estas estructuras interrumpe los ciclos de mantenimiento preventivo, permitiendo que agentes como el CO₂ y los cloruros inicien procesos de carbonatación en el concreto ciclópeo y corrosión en el acero.

En este eje, la investigación adopta el concepto de "Nexo Causal", propuesto por Pérez (2023), para explicar cómo la interacción entre la humedad relativa del Eje Cafetero y la fatiga histórica de los materiales genera cuadros patológicos específicos. La caracterización lesional, por tanto, se enfoca en identificar no solo el daño superficial, sino la pérdida de sección y la vulnerabilidad física remanente de los elementos críticos.

Eje 2: Técnicas de Auscultación y Ensayos No Destructivos.

El diagnóstico moderno de puentes patrimoniales exige métodos que no alteren la integridad del bien. Autores como Torres et al. (2022) destacan que la auscultación no destructiva permite realizar una "radiografía" del estado interno de los materiales.

- **Ultrasonido:** Se fundamenta en la propagación de ondas elásticas para detectar discontinuidades internas y estimar la homogeneidad del material (concreto-acero).
- **Esclerometría (Índice de Rebote):** Evalúa de forma no destructiva la dureza superficial y resistencia a la compresión del concreto, permitiendo zonificar la degradación de la matriz cementante en estribos y demás elementos de concreto ciclópeo.
- **Análisis Modal computacional:** Como lo señalan Cheng et al. (2024), este método evalúa la respuesta dinámica de la estructura, permitiendo identificar cambios en la rigidez global que sugieren daños estructurales no visibles.

Eje 3: Gestión del Patrimonio Industrial y Normatividad.

Finalmente, el marco conceptual se cierra con la visión del puente ferroviario como Patrimonio Industrial. Siguiendo los lineamientos de UNESCO (2017) e ICOMOS, la intervención en estas estructuras debe priorizar la mínima invarianza. En el contexto colombiano, se integran los criterios de inspección del manual SIPUCOL (INVIAS) y los estándares de durabilidad del código CCP-14, estableciendo un puente entre la normativa técnica de ingeniería y los principios de conservación histórica.

7. Estado del arte.

La investigación en patología de puentes ferroviarios ha evolucionado significativamente en la última década, transitando de métodos puramente visuales hacia sistemas de diagnóstico predictivo y no invasivo. El análisis de la literatura reciente permite identificar tres tendencias globales que enmarcan este estudio:

7.1 Evolución de la Auscultación No Destructiva.

una premisa fundamental para la conservación del patrimonio industrial. Bajo esta perspectiva, esta investigación emplea una metodología híbrida que integra la inspección sensorial con el análisis modal numérico. Este enfoque permite correlacionar las lesiones de campo con el comportamiento dinámico de los puentes Buenavista, Río Robles y Río Pedregal, garantizando un diagnóstico integral no invasivo.



7.2 Modelado de Deterioro y Nexo Causal.

En el ámbito europeo, estudios liderados por García-Sandoval (2023) han desplazado el enfoque de la "lesión aislada" hacia el "modelo de degradación sistémica". Estos trabajos proponen que el clima tropical y la humedad relativa alta (condiciones similares a las del Eje Cafetero) actúan como catalizadores críticos que aceleran la carbonatación. Esta tendencia sustenta la necesidad de este estudio de no solo reportar daños, sino de establecer el nexo causal entre el entorno ambiental y la respuesta estructural.

7.3 Digitalización y Gestión del Patrimonio.

Finalmente, la literatura actual, representada por los trabajos de Rodríguez y Silva (2024), destaca el uso de "Mapas de Daño Digitales" y "Matrices de Severidad" como el estándar para la toma de decisiones en infraestructura pública. En Colombia, si bien existen manuales de inspección de INVIAS, la literatura científica local aún presenta un vacío en protocolos específicos para puentes ferroviarios abandonados, lo que posiciona a esta investigación como un aporte necesario para la actualización de los inventarios de salud estructural nacional.

Tabla 1: Matriz comparativa de investigaciones recientes en patología y auscultación de puentes.

Autor y Año	Objeto de Estudio	Metodología/ Técnicas	Aporte a la Investigación Actual
López et al. (2022)	Puentes de concreto con >50 años	Ultrasonido y Termografía	Validación de la eficacia de los ensayos no destructivos para reducir incertidumbre en diagnósticos.
Martínez (2021)	Puentes metálicos patrimoniales	Análisis Modal Experimental	Demostración de detección de fatiga sin necesidad de ensayos destructivos.
García-Sandoval (2023)	Infraestructura en climas tropicales	Modelado de degradación sistémica	Definición de nexos causales entre humedad relativa y velocidad de carbonatación.
Rodríguez y Silva (2024)	Gestión de activos viales	Mapas de daño digitales y Matrices de severidad	Protocolos para la jerarquización de daños en la toma de decisiones técnicas.

8. Metodología.

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo y cuantitativo de alcance descriptivo y correlacional, mediante un diseño de estudio multicaso. La ruta metodológica se divide en cuatro fases operativas que garantizan la trazabilidad del diagnóstico patológico.

8.1 Fase 1: Anamnesis y Levantamiento Sensorial.

En esta etapa se realiza la recopilación de antecedentes históricos y técnicos de los tres puentes (Buenavista, Robles y Pedregal). Posteriormente, se ejecuta la Inspección Visual Sensorial, utilizando guías técnicas de patología, donde se registran las lesiones visibles.

- **Instrumento:** Fichas de inspección patológica.
- **Producto:** Inventario preliminar de daños y registro fotográfico georreferenciado.

8.2 Fase 2: Auscultación Instrumental (Ensayos No Destructivos).

Para reducir la incertidumbre diagnóstica de la Fase 1, se aplican técnicas de auscultación no invasivas:

- **Ultrasonido:** Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico para estimar la homogeneidad del concreto y detectar grietas internas, además de validar con precisión los espesores de secciones de acero.
- **Esclerometría:** Evalúa de forma no destructiva de la dureza superficial y resistencia a la compresión del concreto ciclópeo, permitiendo zonificar la degradación de la matriz cementante en estribos y zonas de fundación de concreto tipo ciclópeo.
- **Análisis Modal computacional:** Análisis matemático bajo modelos computacionales para evaluar el comportamiento dinámico de la estructura y detectar variaciones de rigidez.

8.3 Fase 3: Procesamiento y Caracterización Lesional (Indicadores).

En esta fase, los datos recolectados se transforman en indicadores medibles, atendiendo la solicitud de precisión de:

- **Mapas de Daño:** Representación gráfica sobre planos de la ubicación, extensión y tipo de lesión detectada.
- **Matriz de Severidad:** Clasificación de los daños mediante una escala numérica (ej. 1 a 4) según su impacto en la seguridad estructural (Leve, Moderado, Grave, Crítico).
- **Nexo Causal:** Cruce de variables ambientales (humedad, vegetación) con los resultados de los ensayos no destructivos para determinar el origen de la patología.

8.4 Fase 4: Formulación del Diagnóstico y Lineamientos.

Para garantizar el rigor técnico en el estudio de las estructuras, se ha definido una ruta de trabajo dividida en fases: Preliminar, Instrumental, Analítica y Prospectiva. A continuación, la **Tabla 2** presenta la relación entre las técnicas aplicadas, las herramientas de auscultación y los productos obtenidos en cada etapa del proceso.

Tabla 2: *Resumen del Diseño Metodológico.*

Fase	Técnica y Herramienta	Indicador / Producto esperado.
I. Preliminar	Anamnesis e Inspección Visual Sensorial	Inventario de lesiones y registro fotográfico georreferenciado.
II. Instrumental	Auscultación No Destructiva (Ultrasonido, Esclerómetro, Análisis Modal Numérico)	Mapas de velocidad de pulso, Índice de rebote y Análisis dinámico estructural.
III. Analítica	Procesamiento de datos y correlación de variables	Matriz de Severidad, Calificación Estadística Cuantitativa y determinación del nexo Causal.
IV. Prospectiva	Evaluación de vulnerabilidad física.	Índice de Deterioro Estructural y lineamientos de conservación.

8.5 Declaración y Operacionalización de Variables.

Para garantizar el rigor científico en el diagnóstico de los puentes ferroviarios patrimoniales, se definieron variables en la tabla 3, que permiten establecer el nexos causal entre las condiciones del entorno del Eje Cafetero y la degradación del material observada. La investigación se fundamenta y se estructura bajo las siguientes variables:

Tabla 3. *Matriz de operacionalización de variables.*

Categoría	Variable	Definición Operacional	Instrumento / Técnica
Independientes (Causas)	Humedad Relativa / Pluviosidad	Grado de saturación hídrica ambiental y contacto directo con agua de escorrentía.	Datos meteorológicos locales / Inspección visual.
Independientes (Causas)	Capilaridad del Suelo	Capacidad del terreno para transportar humedad hacia la infraestructura.	Observación de nivel freático y entorno.

Categoría	Variable	Definición Operacional	Instrumento / Técnica
Dependientes (Efectos)	Severidad de Lesión (G)	Escala numérica (0-4) según SIPUCOL que mide el nivel de deterioro estructural.	Inspección Visual Sensorial.
Dependientes (Efectos)	Pérdida de Sección	Disminución del área neta en elementos de acero debido a procesos de corrosión.	Calibrador pie de rey / Ultrasonido.
Dependientes (Efectos)	Lixiviación de Sales	Presencia de eflorescencias y pérdida de mortero en el concreto ciclópeo.	Mapeo de daños y registro fotográfico.
Intervinientes (Contexto)	Valor Patrimonial	Antigüedad de la estructura y sistema constructivo (Acero remachado / concreto Ciclópeo).	Revisión histórica y técnica.

Una vez definidas las variables de control, se procedió a la fase de recolección de datos en campo, cuyos hallazgos para cada caso de estudio se presentan y analizan en el capítulo de Resultados, bajo la escala de severidad y los instrumentos aquí parametrizados.

9. Resultados y Discusión.

Enfoque de diagnóstico sistémico: Integración de variables patológicas, geotécnicas y estructurales.

Este estudio propone un modelo de diagnóstico sistémico que trasciende la inspección visual al integrar la metodología SIPUCOL con análisis forenses, caracterización geotécnica y validación estructural (CCP-14). Esta articulación permite definir nexos causales precisos: la inspección identifica síntomas, el estudio geotécnico revela catalizadores ambientales (como la susceptibilidad hídrica) y la modelación estructural diferencia daños superficiales de vulnerabilidades críticas. Al comprender el ciclo de degradación integralmente, se optimiza la toma de decisiones para el mantenimiento y conservación del patrimonio ferroviario.

9.1 Evaluación multicaso.

Caso #1: Estudio Puente sobre el Río Roble.

Tabla 4. Ficha Técnica del Río Roble, localizado en Montenegro, Quindío, caso #1.

Parámetro	Especificación Técnica
Localización:	Montenegro Quindío
Coordenadas geográficas:	(4°34'33.0"N, 75°44'35.2"W)
Fecha de construcción:	Entre los años 20-30 del siglo XX.

Parámetro	Especificación Técnica
Tipología estructural:	Cercha tipo Warren con montantes verticales.
Sistema de unión:	Remachado en caliente (típico de la época).
Luz de cálculo:	24.30 m.
Ancho característico:	4.87 m
Cimentación.	Estribos en piedra ciclópea.
Material predominante.	Acero estructural de la época (patrimonial siglo XX).
Altura Maxima	3.73 m (cercha lateral principal).
Ancho de Calzada	4.87 m con área de extensión y construcción de 118.341 m ²
Numero de Luces	1
Galibo	17 m.



Ilustración 1. Imagen del paciente caso de estudio.

Diagnóstico patológico Caso #1. Puente sobre el Río Roble.

Tras la aplicación de la metodología SIPUCOL, se consolidó el estado de las lesiones en la siguiente tabla, donde se observa la predominancia de agentes patológicos como oxidación, corrosión, agentes biológicos y eflorescencia, prevaleciendo la oxidación, principalmente sobre la subestructura.

Tabla 5. consolidado del estado de las lesiones.

Componente	Patología	Severidad (0-5)	Observación técnica
Estribos	Eflorescencia	2	Depósitos cristalinos en juntas.
Estribos	Agentes biológicos	2	Cobertura vegetal (30%) y hongos.
Superestructura Vigas 1 y 2	Oxidación	1	Herrumbre superficial, sin pérdida de sección.
Superestructura	Oxidación	1	Herrumbre superficial, sin pérdida de sección.

Componente	Patología	Severidad (0-5)	Observación técnica
Diagonales			
Platinas y pernos	Oxidación	1	Herrumbre superficial, sin pérdida de sección.
Superestructura Vigas 1 y 2	Corrosión	1	Corrosión incipiente que afecta exclusivamente la capa externa del material, manteniendo la integridad geométrica y mecánica del perfil.
Superestructura Diagonales	Corrosión	1	Corrosión incipiente que afecta exclusivamente la capa externa del material, manteniendo la integridad geométrica y mecánica del perfil.
Platinas y pernos	Corrosión	1	Corrosión incipiente que afecta exclusivamente la capa externa del material, manteniendo la integridad geométrica y mecánica del perfil.

Análisis de causalidad Geotecnia (Caso #1).

Para fundamentar la interacción entre suelo y la estructura, se realizó una exploración a 10.00 metros de profundidad mediante el ensayo SPT (ASTM D1586), permitiendo correlacionar la resistencia del terreno (N-SPT) con las patologías observadas. El perfil de cenizas volcánicas identificado presenta una marcada higroscopicidad, donde la estructura porosa de los estratos superiores actúa como reservorio hídrico; esto facilita la migración de humedad por capilaridad hacia los estribos, siendo la causa raíz de la lixiviación de la matriz cementante y la formación de eflorescencias. Según se detalla en la Tabla 6, los valores iniciales de $N = 6$ a 9 evidencian una sensibilidad a la saturación que incrementa los empujes laterales, mientras que la estabilidad global se garantiza al alcanzar el rechazo relativo ($N > 30$) en la base del sondeo.

Tabla 6. Síntesis de Parámetros Geotécnicos y Resistencia (Sondeo 10m).

Profundidad (m)	Resistencia (N-SPT)	Consistencia/ Estado	Impacto en la Causalidad
0.0 - 3.0	6 - 9 golpes	Media	Zona de alta capilaridad y humedad activa.
3.0 - 7.0	12 - 20 golpes	Firme	Retención de humedad y presión hidrostática.
7.0 - 10.0	> 30 golpes	Muy Compacta	Estrato competente de soporte estructural.

Diagnóstico y análisis de causalidad estructural: Caso #1 (Río Roble).

El modelado numérico bajo la norma CCP-14 determinó que el mecanismo de inestabilidad reside en las riostras diagonales ($k_L/r = 206$), superando el límite normativo de 200. Se identificaron esfuerzos de flexo-compresión cercanos a la fluencia en cuerdas inferiores,

confirmando que la vulnerabilidad es de origen geométrico y no por pérdida de sección (corrosión Grado 1).

Tabla 7. Matriz de Causalidad Estructural - Caso #1 (Río Roble).

Elemento	Deficiencia Mecánica	Causalidad (Origen)
Riostras Diagonales	Inestabilidad por esbeltez ($k_L/r = 206$) ≥ 200	Incumplimiento de límites geométricos (CCP-14).
Cuerdas Inferiores	Esfuerzos críticos de fluencia	Sobrecarga mecánica en configuración de servicio.
Uniones (Remaches)	Riesgo de fatiga y pérdida de sección	Corrosión por humedad persistente y falta de mantenimiento.

9.2 Caso #2: Estudio Puente sobre la Quebrada Buenavista.

Localización y contexto.

Tabla 8. Ficha Técnica del puente sobre la Quebrada Buenavista, Quimbaya Quindío, caso #2.

Parámetro	Especificación Técnica
Localización:	Quebrada Buenavista, Quimbaya Quindío
Coordenadas geográficas:	(4°37'5.2"N, 75°45'9.1"W)
Año de construcción:	Entre los años 1930 –1950.
Ancho característico:	4.43 m.
Longitud característica:	13.60 m.
Area estructural del sistema	4.43 m de ancho X 13.60 m de largo = 60.25 m ²
Altura Maxima	1.64 m Vigas laterales de acero de la época.
Galibo Horizontal	12.60 m
Uso a la fecha de investigación	Puente Peatonal.
Tipología estructural:	Vigas principales de alma llena (perfil T) de 1.64 m en acero
Sistema de piso	Lamina metálica, apoyada sobre las vigas, de espesor 2 cm
Sistema de arriostramiento:	Vigas transversales (IPE) y diagonales en "X" en acero
Cimentación:	Estribos de concreto ciclópeo (altura de 10 m y ancho 6 m)
Material predominante:	Acero estructural de la época (perfiles doble ángulo).
Luz de cálculo:	17.30 m



Ilustración 2. Imagen del paciente caso de estudio.

Diagnóstico patológico Caso #2. Puente sobre la Quebrada Buenavista.

En el marco de la investigación multicaso, el análisis de este puente permite caracterizar la respuesta de las estructuras mixtas (acero y concreto ciclópeo) ante la agresividad ambiental del corredor ferroviario. Tras la aplicación de la metodología SIPUCOL y la auscultación técnica, se consolidó el estado de las lesiones en la siguiente matriz. Los hallazgos demuestran una correlación directa entre la inoperatividad de los sistemas de evacuación hidráulica y la degradación química de la infraestructura, evidenciando un nexo causal basado en la percolación de humedad y la lixiviación de pastas cementantes.

Tabla 9. consolidado de diagnóstico de las lesiones caso #2.

Componente	Localización	Patología	Severidad (0-5)	Observación técnica
Estribos	Intradós y cuerpo masivo de estribos	Lixiviación	2	Percolación de agua a través de la masa del concreto con arrastre de pasta cementante.
Estribos	Juntas de construcción y vértices laterales	Eflorescencia	2	Depósitos cristalinos de carbonato de calcio por evaporación de humedad persistente.
Estribos / Apoyos	Interfaz viga-estribo y zonas de sombra	Agentes biológicos	2	Cobertura vegetal (35%) y presencia de hongos que favorecen la retención de humedad.

Superestructura	Vigas 1 y 2 (Almas y patines)	Oxidación	1	Herrumbre superficial dispersa, sin compromiso de la sección transversal de los perfiles.
Superestructura	Vigas 1 y 2 (Almas y patines)	Corrosión	1	Corrosión incipiente que afecta exclusivamente la capa externa del material, manteniendo la integridad geométrica y mecánica del perfil.
Platinas y pernos	Nodos de conexión y uniones de vigas	Oxidación	1	Herrumbre superficial, sin pérdida de sección ni picaduras profundas.
Platinas y pernos	Nodos de conexión y uniones de vigas	Corrosión	1	Corrosión incipiente que afecta exclusivamente la capa externa del material, manteniendo la integridad geométrica y mecánica del perfil.
Capa de rodadura	Superficie superior y fijaciones de lámina	Oxidación	1	Herrumbre superficial en la zona de contacto, sin compromiso de la sección transversal.
Capa de rodadura	Bordes de lámina y pernos de anclaje	Corrosión	1	Corrosión incipiente que afecta exclusivamente la capa externa del material, manteniendo la integridad geométrica y mecánica del perfil.
Sistema de Drenaje	Bajantes y cunetas de aproximación	Obstrucción	3	Colmatación total por sedimentos y vegetación, impidiendo la evacuación efectiva de las aguas de escorrentía.

Análisis de causalidad Geotecnia (Caso #2).

Para fundamentar la interacción entre el suelo y la estructura en el puente de la Quebrada Buenavista, se realizó una exploración a 12.00 metros de profundidad mediante el ensayo SPT (ASTM D1586), permitiendo correlacionar la resistencia del terreno con las patologías observadas. El perfil de cenizas volcánicas identificado presenta una marcada higroscopicidad, donde la estructura porosa de los estratos superiores e intermedios actúa como un reservorio hídrico permanente. Esta condición facilita la migración de humedad por capilaridad y flujo lateral hacia los estribos, siendo la causa raíz de la lixiviación de la matriz cementante y la formación de eflorescencias. Según se detalla en la Tabla 10, los valores iniciales de $N = 4$ a 9

evidencian una alta sensibilidad a la saturación, mientras que la estabilidad global se garantiza al alcanzar el rechazo relativo ($N > 50$) al final del sondeo a los 12 metros.

Tabla 10. Síntesis de Parámetros Geotécnicos y Resistencia (Puente Q. Buenavista).

Profundidad (m)	Resistencia (N-SPT)	Consistencia / Estado	Impacto en la Causalidad
0.0 - 1.80	4 - 8 golpes	Blanda a Media	Zona de saturación crítica: Alta porosidad y retención de humedad activa que alimenta la lixiviación.
1.80 - 4.50	10 - 12 golpes	Firme	Reservorio hídrico: Limos de alta plasticidad que generan presión hidrostática constante sobre el trasdós.
4.50 - 6.00	> 25 golpes	Compacta	Soporte estructural: Estrato competente que limita la migración vertical de humedad hacia la cimentación profunda.

Diagnóstico y análisis de causalidad estructural: Caso #2.

Evaluación de la Capacidad Estructural y Cumplimiento Normativo (CCP-14 / LRFD).

La evaluación estructural del puente sobre la Quebrada Buenavista se realizó mediante un modelamiento numérico basado en los principios de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP-14), empleando la metodología de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD). Este enfoque permite determinar la seguridad del activo frente a las solicitaciones de servicio actuales (tráfico peatonal), garantizando una transición adecuada entre su diseño original y la normativa contemporánea.

Análisis de Desempeño Estructural.

Al contrastar las demandas de carga (peso propio, cargas vivas peatonales y efectos ambientales) frente a la capacidad nominal de los perfiles metálicos y la mampostería, se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Verificación de Estados Límite:** Los elementos críticos de la superestructura vigas principales y entramado de piso operan bajo una relación Demanda y Capacidad máxima de **0.26**. Este valor, significativamente inferior a la unidad, demuestra que la estructura posee una reserva de **capacidad portante superior al 70%**, validando su estabilidad para el uso peatonal.

- **Comportamiento ante Deflexiones:** Bajo las condiciones de carga actuales, los niveles de deformación vertical se mantienen dentro de los márgenes de confort y seguridad establecidos por la norma CCP-14 (límite $L/500$), lo cual minimiza las vibraciones y asegura la integridad funcional del tablero.
- **Estabilidad de la Subestructura:** Los estribos de concreto ciclópeo, evaluados bajo la geometría de 10 m de altura, cumplen con los factores de seguridad exigidos contra el volteo y el deslizamiento, consolidándose como una cimentación masiva eficiente para las condiciones topográficas del emplazamiento.

9.3 Caso #3: Puente sobre el Rio Pedregal, Pereira Risalda.

Tabla 11. Ficha Técnica del puente sobre la Rio Pedregal, Pereira Risaralda, caso #3.

Parámetro	Detalle Técnico
Localización:	Pereira Risaralda
Coordenadas geográficas:	4°43'43.6"N 75°23'8"W
Tipología Histórica	Puente Ferroviario (Periodo 1930 - 1950)
Uso Actual	Peatonal, Turístico y Recreativo
Luz entre Apoyos	12.60 m (entre Ejes) - 13.60 m (Total)
Área Estructural	61.10 m ² (3.53 m de ancho x 17.30 m de largo)
Gálibo Vertical	9.50 m
Superestructura	Vigas principales tipo cercha/alma llena (H = 1.60 - 1.65m)
Capa de rodadura:	Sobre la estructura se apoya una losa de concreto reforzado
Detalle de Vigas	Cuerdas en doble ángulo y alma en lámina (e = 9.5 mm)

Parámetro	Detalle Técnico
Sistema de Piso	Lámina metálica ($e = 2 \text{ cm}$) sobre Steel Deck y vigas I
Subestructura	Estribos de gravedad en concreto ciclópeo ($H = 15 \text{ m}$)
Arriostramiento	Diagonales en ángulo configuradas en X por módulo
Ancho Libre de Calzada	3.09 m (entre rigidizadores)



Ilustración 3. Imagen del paciente caso de estudio # 3

Análisis de causalidad Geotecnia (Caso #3, Rio Pedregal).

El contexto geológico de este caso de estudio, está enmarcado por depósitos de cenizas volcánicas típicas de la región. El desafío técnico radica en la estabilidad de una subestructura masiva de concreto ciclópeo de 15 metros de altura apoyada sobre suelos que presentan cambios de consistencia a diferentes profundidades (específicamente en el estrato crítico de 1.50 a 4.50 metros). La investigación analiza cómo la geomorfología local ha condicionado la integridad física de los apoyos a lo largo del tiempo. El uso del ensayo SPT hasta los 10 metros confirma que el diagnóstico debe considerar que la estructura "flota" sobre un suelo friccional-cohesivo.

La causalidad de cualquier inclinación del puente se debe buscar en la diferencia de compacidad entre los estratos de los dos estribos.

Tabla 12. *Parámetros de Exploración geotécnica.*

Estrato / Profundidad	Descripción del Material	Análisis de Causalidad (Amenaza/Riesgo)
0.00 - 1.50 m	Capa vegetal y rellenos superficiales.	Causa: Baja capacidad portante y alta compresibilidad. Efecto: No apto para apoyo; riesgo de erosión superficial en la base del estribo.
1.50 - 4.50 m	Cenizas volcánicas (Limos/Arcillas limosas).	Causa: Suelos con estructura metaestable. Efecto: Posibles asentamientos por consolidación ante el peso de los estribos de concreto ciclópeo. Sensibilidad a cambios de humedad.
4.50 - 8.50 m	Depósitos de transición con mayor resistencia (según SPT).	Causa: Incremento de la compacidad relativa. Efecto: Estrato de transferencia de cargas. Aquí se disipan los bulbos de esfuerzo de la cimentación masiva.
8.50 - 10.00 m (Fin de sondeo)	Suelo residual o depósito denso.	Causa: Mayor resistencia a la penetración (N-SPT elevado). Efecto: Zona de probable rechazo o apoyo firme. Garantiza la estabilidad global contra el hundimiento.

Diagnóstico patológico Caso #3, Rio Pedregal.

El análisis de este puente permite caracterizar la respuesta de la infraestructura ferroviaria patrimonial ante las condiciones geofísicas de la Vereda Betulia en Pereira. Tras la aplicación de la metodología de inspección técnica y el análisis de las fichas de patología, se consolidó el estado de las lesiones en la siguiente matriz. Los hallazgos demuestran una correlación entre la exposición atmosférica prolongada sin mantenimiento y la respuesta capilar de la subestructura masiva, evidenciando un nexo causal basado en la humedad ascendente desde los depósitos de cenizas volcánicas y la ausencia de recubrimientos protectores en el acero.

Tabla 13. Consolidación de los hallazgos patológicos. Caso #3, Rio Pedregal.

Componente	Localización	Patología	Severidad (0-5)	Observación técnica
Estribos	Base del cuerpo masivo (Contacto con suelo)	Humedad ascendente	2	Fenómeno de capilaridad debido al apoyo directo sobre estratos de ceniza volcánica húmeda sin barrera impermeable.
Estribos	Superficie lateral y zonas de vertimiento	Eflorescencia	2	Presencia de manchas blancas por lixiviación leve de carbonatos ante la filtración de agua de escorrentía.
Superestructura	Vigas principales (Sección I) - Almas y patines	Oxidación	2	Herrumbre superficial generalizada por la degradación total de la capa de pintura original; sin pérdida de sección.
Superestructura	Aristas de vigas y zonas de sombra	Corrosión	1	Inicio de corrosión atmosférica de carácter incipiente que no compromete la integridad mecánica de los perfiles.
Sistemas de Unión	Pernos de 1" y Remaches tipo botón	Oxidación	1	Oxidación superficial en la cabeza de los elementos de conexión; el tensado y ajuste se mantienen operativos.
Sistemas de Unión	Nodos de conexión y platinas de refuerzo	Corrosión	1	Proceso corrosivo leve en interfaces de unión, limitado a la capa externa del material sin picaduras profundas.

Componente	Localización	Patología	Severidad (0-5)	Observación técnica
Platinas	Superficie de elementos de transición	Oxidación	1	Herrumbre dispersa en la cara expuesta del material, manteniendo la integridad geométrica de las platinas.
Platinas	Bordes y zonas de contacto viga-platina	Corrosión	1	Corrosión incipiente favorecida por la retención de humedad en los intersticios de la unión.
Capa de rodadura	Interfaz Lámina de 2 cm / Steel Deck	Oxidación	1	Oxidación en zonas de contacto por percolación de humedad desde la superficie peatonal superior.
Sistema de Drenaje	Trasdós del muro y entrega de escorrentía	Obstrucción / Deficiencia	3	Colmatación o ausencia de filtros, lo que eleva la presión de poros y favorece la humedad en el cuerpo del estribo.

Análisis de causalidad estructural (Caso #3, Río Pedregal).

Análisis de Capacidad Estructural.

El análisis de vulnerabilidad bajo metodología LRFD (Sección 3, CCP-14) ratifica que la estructura opera con niveles de esfuerzo reducidos (flexión y cortante). Este comportamiento responde al sobredimensionamiento intrínseco del diseño ferroviario original frente a las demandas actuales de uso peatonal, otorgando un factor de seguridad remanente elevado.

- **Estado Tensional:** El sistema de vigas de alma llena y cerchas de acero al carbono (Siglo XX) se mantiene en un rango elástico conservador, trabajando significativamente por debajo del límite de fluencia.

- **Desempeño Sísmico y Conexiones:** La vulnerabilidad principal se concentra en la fatiga de las conexiones remachadas y la interfaz de apoyo en los estribos de concreto ciclópeo. Aunque la estructura es apta para el servicio, la oxidación superficial de los nodos demanda mantenimiento preventivo para garantizar la integridad de la transferencia de cargas ante eventos sísmicos.

10. Análisis de resultados.

Evaluación comparativa de la integridad estructural y gestión de riesgos.

El procesamiento de los datos recolectados en los tres casos de estudio permite establecer que la estabilidad global de las estructuras no se ve comprometida por déficit de capacidad de carga, sino por fenómenos de degradación físico-química. A continuación, se presenta la síntesis técnica de los hallazgos.

Mapeo Patológico Multicaso por Elemento Evaluado.

La caracterización de los daños, derivada de la auscultación directa y el cruce de fichas técnicas, permite identificar patrones de deterioro comunes. Se observa que la humedad por capilaridad y la oxidación atmosférica son los agentes externos de mayor incidencia.

Tabla 14. Matriz de Diagnóstico Patológico común Comparativo.

Elemento	Condición Física	Nexo Causal	Impacto Estructural
Vigas (Sección I)	Oxidación leve	Exposición a la intemperie	Nulo (Sección transversal íntegra)
Remaches	Corrosión superficial	Fatiga más Oxidación	Riesgo latente en nodos críticos
Muro Ciclópeo	Eflorescencia	Capilaridad y Humedad	Degrada el mortero a largo plazo
Uniones/Platinas	Oxidación	Humedad relativa (0.36)	Concentración de tensiones por corrosión

Evaluación Prospectiva de Riesgos (Severidad e Impacto).

La integración de las amenazas identificadas permite ponderar el riesgo técnico. Se destaca que, si bien la socavación tiene una baja probabilidad de ocurrencia debido a la configuración de

las fundaciones observadas, su impacto potencial obligaría al colapso, categorizándose como el riesgo de mayor severidad.

Tabla 15. Matriz de riesgo comparativa, multicaso.

Riesgo Técnico	Probabilidad	Impacto	Nivel de Riesgo	Estrategia de Mitigación
Corrosión (Acero)	Alta	Moderado	medio	Limpieza y recubrimiento anticorrosivo.
Degradación Concreto Ciclópeo	Media	Bajo	bajo	Sellado de trasdós y mejora de drenajes.
Fatiga de Conexiones remaches	Baja	Alto	medio	Inspección y torque de remaches y pernos.
Socavación hídrica fundaciones.	Baja	Muy Alto	alto	Estudio de socavación y monitoreo anual.

Análisis estadístico descriptivo de los indicadores patológicos.

Metodología de Cuantificación de Daños.

Para el tratamiento estadístico de los datos obtenidos en la inspección visual y sensorial, se procedió a la estandarización de las escalas cualitativas como se muestra en la tabla siguiente. Esta conversión permite calcular índices de severidad media por estructura sin perder la naturaleza diagnóstica del estudio.

Tabla 16. Escala de conversión de niveles de severidad patológica.

Clasificación Cualitativa	Valor Numérico Asignado	Criterio Técnico de Referencia
Leve	1	Lesiones superficiales (manchas, oxidación incipiente) que no comprometen la sección ni la función del elemento.
Moderado	2	Deterioro con pérdida de protección o sección mínima (<5%). Requiere mantenimiento preventivo.

Clasificación Cualitativa	Valor Numérico Asignado	Criterio Técnico de Referencia
Grave	3	Lesiones que afectan la integridad de la sección transversal o la estabilidad local. Requiere intervención a corto plazo.
Crítico	4	Daño estructural severo con riesgo de colapso local o pérdida total de la función portante.

Análisis Estadístico Descriptiva de la Severidad.

Se realizó un procesamiento estadístico de los hallazgos registrados en campo para transformar las observaciones cualitativas en indicadores numéricos de severidad. Este método permite calcular la severidad media de lesiones como corrosión, humedad y socavación en los tres puentes. En la Tabla 17 se consolidan los valores mínimos, máximos y promedios, estableciendo un diagnóstico objetivo sobre la integridad física de las estructuras caso de estudio.

Tabla 17. Estadística descriptiva de la severidad patológica multicaso de estudio.

Puente	Severidad mínima	Severidad máxima	Severidad media	Interpretación patológica
Río Robles	1	2	1.7	Condición leve con evolución a moderada
Quebrada Buenavista	1	2	1.5	Patología leve predominante
Río Pedregal	1	2	1.3	Condición estable / Preventiva

Interpretación técnica de la Severidad.

El análisis estadístico sitúa la severidad media del corredor en un rango de 1.3 a 1.7, confirmando la ausencia de cuadros patológicos graves (nivel 3) o críticos (nivel 4). El Puente

Río Robles (1.7) registra la mayor vulnerabilidad, asociada a la esbeltez de sus elementos diagonales, mientras que el Puente Río Pedregal (1.3) presenta el estado de conservación óptimo. Dado que la severidad predominante se clasifica como leve - moderada, se concluye que las estructuras mantienen su integridad funcional, requiriendo únicamente esquemas de mantenimiento preventivo y protección superficial para mitigar la corrosión y la humedad.

Análisis de Desempeño Estructural (Relación Demanda - Capacidad).

Para validar la seguridad de las estructuras frente a su uso actual, se calculó la relación Demanda - Capacidad (PMM) bajo los lineamientos de la norma CCP-14. Este indicador permite contrastar las cargas actuantes (uso peatonal y turístico) contra la resistencia nominal de los elementos. En la Tabla 18 se observa que todos los puentes operan con una amplia reserva estructural, confirmando su estabilidad global pese a la antigüedad y las patologías identificadas.

Tabla 18. Estadística descriptiva de desempeño estructural (PMM).

Puente	PMM máximo reportado	Umbral normativo (CCP-14)	Reserva estructural estimada
Río Robles	< 1.00	≤ 1.00	Adecuada
Quebrada Buenavista	0.26	≤ 1.00	Alta (> 70 %)
Río Pedregal	< 1.00	≤ 1.00	Adecuada

Interpretación técnica.

El análisis técnico de los puentes evaluados (Buenavista, Río Pedregal y Río Pedregal) permite concluir que el Corredor Férreo objeto de estudio posee una capacidad estructural remanente que excede los requerimientos de carga actuales, dado que su diseño original ferroviario (bajo esfuerzos admisibles) provee una reserva de seguridad significativa ante las cargas peatonales y vehiculares livianas.

Análisis de Ensayos No Destructivos Multicaso.

La correlación de resultados de Ultrasonido y Esclerometría (Tabla 19) ratifica la homogeneidad y calidad del concreto en los corredores evaluados. La consistencia técnica de

estos valores confirma que el nexo causal de los daños es de origen superficial y ambiental, derivado de las condiciones del Eje Cafetero. En consecuencia, se descarta cualquier compromiso de la integridad estructural, validando la seguridad global de los puentes para su uso peatonal bajo los estándares de estabilidad requeridos.

Tabla 19. Estadística descriptiva de resultados de ensayos no destructivos.

Indicador Técnico	Río Robles	Q. Buenavista	Río Pedregal	Clasificación Global
Velocidad UPV (Media)	3.2 km/s	3.4 km/s	3.6 km/s	Concreto de calidad media-buena
Índice Esclerométrico	28	31	33	Concreto funcional ($f'_c \geq 21\text{MPa}$)
Pérdida de Sección Acero	0.3 mm	0.0 mm	0.1 mm	Afectación superficial mínima
Estado de Carbonatación	Moderada	Incipiente	Parcial	Proceso de envejecimiento natural

Interpretación.

Los resultados de ensayo no destructivos descartan la presencia de fisuras internas críticas o pérdida de sección en elementos portantes evaluados.

Síntesis Comparativa y Priorización de Intervenciones.

La integración de los indicadores patológicos, estructurales y de riesgo permite jerarquizar el estado de conservación del corredor ferroviario. Los resultados demuestran una homogeneidad en la capacidad estructural remanente, independientemente de las variaciones puntuales en la severidad lesional. Esta suficiencia tensional orienta las recomendaciones hacia un esquema de preservación patrimonial, priorizando acciones preventivas sobre intervenciones correctivas invasivas.

Tabla 20. Estadística comparativa multicaso de indicadores técnicos.

Indicador	Río Robles	Q. Buenavista	Río Pedregal
Severidad Media	1.7	1.5	1.3
Patología Predominante	Corrosión / Esbeltez	Humedad / Socavación	Corrosión superficial
Riesgo Geotécnico	Medio	Medio	Medio
Capacidad (PMM)	Adecuada (<1.0)	Alta (0.26)	Adecuada (<1.0)
Intervención Sugerida	Preventiva / Prioritaria	Preventiva / Monitoreo	Mantenimiento Rutinario

Interpretación general.

El diagnóstico multicaso revela que el Puente Río Robles requiere una intervención más pronta debido a su mayor índice de severidad (1.7), mientras que la Quebrada Buenavista, a pesar de su excelente capacidad estructural (PMM 0.26), demanda un monitoreo constante del cauce por su riesgo de socavación. En general, el corredor ferroviario presenta una aptitud funcional óptima para el uso peatonal bajo un programa de mantenimiento preventivo.

Conclusiones Globales.

A partir de los datos consolidados, se establece una síntesis estadística que define el estado de salud estructural del corredor ferroviario en el Eje Cafetero multicaso. Estos valores representan la base científica para las recomendaciones de manejo patrimonial.

Tabla 21. Síntesis estadística global del diagnóstico multicaso.

Indicador Global	Valor Representativo	Clasificación Técnica
Severidad media general	≈ 1.5	Condición Leve - Estable
PMM promedio	< 0.50	Alta Reserva Estructural
Nivel de riesgo dominante	Medio	Riesgo Controlado
Tipo de patología dominante	Físico-química	Degradación por Durabilidad
Intervención prioritaria	Mantenimiento	Preservación Preventiva

Interpretación: El diagnóstico global confirma que los cuadros patológicos identificados corresponden principalmente a procesos de degradación por durabilidad, sin comprometer el estado límite último de las estructuras evaluadas.

12. Conclusión General.

Contexto final concluyente.

La implementación del enfoque de diagnóstico sistémico propuesto permitió demostrar que la integridad de los puentes ferroviarios del Eje Cafetero no depende exclusivamente de la degradación material superficial, sino de una interacción compleja de variables. Mientras que el análisis de anamnesis y la inspección visual identificaron sintomatologías comunes de abandono, el análisis modal numérico computacional reveló vulnerabilidades críticas por esbeltez en el Puente Río Roble que no eran evidentes sensorialmente. Asimismo, la integración de la caracterización geotécnica fue determinante para establecer que la inestabilidad en el Puente Río Pedregal obedece a la higroscopicidad de las cenizas volcánicas y no a una falla intrínseca del concreto. En consecuencia, el diagnóstico trasciende la descripción de daños para convertirse en una herramienta de decisión técnica, definiendo lineamientos de intervención que priorizan el reforzamiento estructural y el control hídrico sobre el mantenimiento cosmético, asegurando así la preservación del valor patrimonial de la infraestructura.

Recomendaciones.

1. Recomendación de Intervención Estructural.

- **Puente Río Roble:** Realizar un reforzamiento de los elementos de arriostramiento transversal. El análisis modal numérico demostró que la esbeltez actual compromete la estabilidad ante cargas dinámicas, por lo que se requiere aumentar la rigidez de la sección.
- **Puente Buenavista:** Dado que presenta una reserva estructural del 70%, la intervención debe limitarse a la sustitución de pernería con pérdida de sección y protección galvánica.

2. Recomendación de Control Ambiental y Geotécnico (Nexo Causal).

- **Puente Río Pedregal:** Implementar un sistema de drenaje de aguas de escorrentía en los estribos. La recomendación técnica es mitigar la higroscopicidad del suelo de ceniza volcánica para detener la humedad ascendente detectada en la anamnesis y la inspección visual.
- **Mantenimiento:** Aplicar recubrimientos de alta resistencia química en zonas de alta humedad para frenar los procesos de oxidación superficial medidos (0.1 mm - 0.3 mm).

3. Recomendación de Gestión Patrimonial.



- **Monitoreo:** Establecer un plan de auscultación periódica que incluya la actualización de los modelos numéricos cada 5 años, utilizando los indicadores de daño por severidad (escalas 1.3 a 1.7) obtenidos en este estudio como línea base.

Referencias.

- AIS. (2014). *Código colombiano de diseño de puentes: LRFD (CCP-14)*. Asociación de Ingeniería Sísmica.
- Broto, C. (2005). *Enciclopedia de la patología de la construcción*. Editorial de los Editores.
- Computers and Structures, Inc. (2024). *SAP2000: Static and dynamic finite element analysis of structures (Version 25.0)* [Software de computación]. <https://www.csiamerica.com>
- Correa, J. S. (2012). *Ferrocarriles en Colombia: La lucha por el progreso*. Universidad del Rosario.
- García-Sandoval, J. P. (2020). Estudio de la corrosión en puentes metálicos bajo ambientes tropicales húmedos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Estructural*, 15(1), 45–62.
- Gómez, R. (2019). *Patología de la edificación: Conceptos, síntomas y etiología de las lesiones en el concreto*. Editorial Universitaria.
- Helene, P. y Pereira, F. (2003). *Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de hormigón: Manual de la Red REHABILITAR*. Programa CYTED.
- ICOMOS. (2017). *Principios para la conservación del patrimonio industrial: Puentes y estructuras metálicas*. Consejo Internacional de Monumentos y Sitios.
- INVIAS. (2006). *Manual de diseño de puentes*. Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS. (2015). *Manual de inspección de puentes (SIPUCOL)*. Ministerio de Transporte de Colombia.
- López, A., Rivera, M. y Torres, K. (2022). Eficacia de los ensayos no destructivos en el diagnóstico de puentes ferroviarios del siglo XX. *Ingeniería y Desarrollo*, 40(2), 201–218.
- Martínez, S. (2021). *Auscultación no destructiva aplicada al patrimonio industrial ferroviario*. Editorial Técnica Académica.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10)*. Decreto 926 de 2010.
- Pérez, M. (2023). El nexo causal en la patología estructural: Un enfoque forense. *Revista de Ingeniería Civil y Patología de la Construcción*, 10(3), 78–94.
- Rodríguez, F. y Silva, G. (2024). Digitalización del mantenimiento: Matrices de severidad y mapas de daño en infraestructuras viales. *Gestión de Activos*, 12(1), 33–50.
- Smith, J. (2021). *Durability of steel structures in aggressive environments*. Structural Press.
- Torres, H., Ramírez, J., Castiblanco, L. y Ortiz, M. (2022). Guía metodológica para la caracterización de puentes patrimoniales. *Anales de Ingeniería*, 128(4), 112–130.