

- Metodología de verificación del desempeño de sistemas de agua pulverizada en la etapa de diseño para la industria petroquímica
- Assessment of Railway Live Loads on Buried Pipelines Using API RP 1102: A Case Study for the Colombian Railway Corridor
- Reconstrucción histórica y escenarios prospectivos de la mortalidad vial en Colombia (1986-2025)
- MySQL y Apache CouchDB: análisis comparativo de sistemas de gestión de bases de datos relacionales y NoSQL
- Examen P (Probability): estructura, estadísticas y experiencias de dos candidatos

SECCIÓN ESPECIAL

- Decisions that make a hydropower project successful
- Diagnóstico de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH)
- Modernización de centrales hidroeléctricas y almacenamiento por bombeo: estrategias para fortalecer la estabilidad y la resiliencia de los sistemas eléctricos en la transición energética
- Demanda de energía para la cocción de alimentos de un usuario rural

CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

VOCALES SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ
MANUEL GARCÍA LÓPEZ
GONZALO JIMÉNEZ ESCOBAR
MARÍA DEL ROSARIO MONTEJO PERRY
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
RICARDO SALAZAR FERRO
MARIANA SANDINO ULLOA
JAIRÓ URIBE ESCAMILLA
JORGE ENRIQUE CLAVIJO RAMÍREZ
(representante de los profesores)
DAVID STEVEN OCHOA VÉLEZ
(representante de los estudiantes)

RECTORA MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ

SECRETARIA GENERAL PATRICIA SALAZAR PERDOMO

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
N.º 141 - mayo-agosto de 2026 - Cuatrimestral - Bogotá, Colombia
ISSN 3114-9081 (en línea)

DIRECTORA PH.D. ING. MÓNICA MARCELA SUÁREZ PRADILLA

COMITÉ EDITORIAL PH.D. ING. LUIS DANIEL BENAVIDES NAVARRO
PH.D. ING. GERALD A. CORZO PÉREZ
(Profesor Asociado IHE Delft, Países Bajos)
PH.D. ING. JUAN NICOLÁS GONZÁLEZ SARMIENTO
(Postdoctoral Research KAPSARC, Arabia Saudita)
PH.D. ING. ANDRÉS FELIPE GUZMÁN
(Investigador Senior. KAPSARC, Arabia Saudita)
PH.D. ING. LORENA REYES-RUBIANO
(Postdoctoral Researcher, RWTH Aachen University, Alemania)

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

EDICIÓN **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA
JEYSSON YESID MORENO TOCARRUNCHO
CORRECCIÓN DE ESTILO
ELKIN RIVERA GÓMEZ
TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS
DAVID PEÑA CITA

DIRECCIÓN COMERCIAL EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 # 205-59
TEL.: (60-1) 668 3600, EXT. 533
revista@escuelaing.edu.co
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS.
SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

5-8 / EDITORIAL

Ingeniería para sistemas resilientes: conocimiento, decisiones y transformación

Mónica Marcela Suárez Pradilla

9-17

Metodología de verificación del desempeño de sistemas de agua pulverizada en la etapa de diseño para la industria petroquímica

William Mauricio Bernal Sotelo - Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

En el presente artículo se propone una metodología de verificación del funcionamiento de sistemas de agua pulverizada en su etapa de diseño, orientada a evaluar su capacidad para la absorción de radiación térmica y la dispersión de nubes de gases inflamables o tóxicos.

19-41

Assessment of Railway Live Loads on Buried Pipelines Using API RP 1102: A Case Study for the Colombian Railway Corridor

Juan David Betancur Ríos - Nora Yamile Rojas Cataño

Este estudio aplica la práctica recomendada API RP 1102 (7ª ed., §4.5 — rama ferroviaria) para evaluar las tensiones combinadas inducidas en una tubería enterrada de acero API 5L X65 (12 pulgadas, $t_w = 0,300$ in) por cargas vivas de ferrovía pesada, usando como caso de estudio el corredor multiproductos Yumbo-Buenaventura en Colombia.

43-56

Reconstrucción histórica y escenarios prospectivos de la mortalidad vial en Colombia (1986-2025)

Henry Vergara Barreto

En este estudio se demuestra que la evolución histórica de la mortalidad vial en Colombia no responde a un crecimiento continuo, sino a una dinámica no monótona integrada por tres regímenes temporales diferenciados. La mortalidad por siniestros viales es un desafío central de salud pública y de sostenibilidad del transporte, pero la evidencia longitudinal que caracterice su comportamiento a largo plazo y proyecte su trayectoria es escasa.

57-64

MySQL y Apache CouchDB: análisis comparativo de sistemas de gestión de bases de datos relacionales y NoSQL

Andrés Camilo Vivas Baquero - Laura Natalia Perilla Quintero

En el presente artículo se hace un análisis comparativo entre MySQL 8.x, sistema de gestión de bases de datos relacional de mayor adopción mundial, y Apache CouchDB 3.x, motor NoSQL, orientado a documentos y basado en JSON. El objetivo es proporcionar una referencia técnica detallada que cubra los principales aspectos de ambos sistemas: arquitectura interna, modelo de datos, lenguaje de consultas, mecanismos de concurrencia (MVCC), seguridad, respaldo, replicación, escalabilidad, mantenimiento y casos de uso ideales.

65-74

Examen P (Probability): estructura, estadísticas y experiencias de dos candidatos

Sara Camila Osorio Cantor - Yesid Esteban Clavijo Penagos

Los objetivos de este artículo son presentar un abecé del Examen y estadísticas de aprobación de este, así como compartir las experiencias de dos candidatos de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería que lo han aprobado. Las fuentes consultadas son, principalmente, el sitio web de la Sociedad de Actuarios (SOA), el sitio web de la Asociación Actuarial Internacional (IAA) y Actuarial Lookup, un sitio web independiente de estas asociaciones y con estadísticas basadas en datos de libre consulta (Actuarial Lookup®, 2026).

SECCIÓN ESPECIAL

Second International Small Hydro Meeting

77-83

Decisions that make a hydropower project successful

Bernhard Pelikan

El diseño de una planta hidroeléctrica es una tarea interdisciplinaria que requiere entender tanto los mecanismos naturales como un profundo conocimiento técnico. La inversión inicial de cualquier proyecto hidroeléctrico es considerablemente alta. Al completar el proyecto, las posibilidades de modificarlo son virtualmente nulas, por lo tanto, se deben tomar decisiones que requieren una gestión cuidadosa y que conllevan una gran responsabilidad.

85-92

Diagnóstico de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH)

Ramiro Ortiz Flórez

En este artículo se presentan metodologías para el diagnóstico de PCH, con un aporte importante, basado en la experiencia del autor al hacer el diagnóstico de 16 proyectos con una capacidad nominal en placa de 45,9 MW, los cuales han operado en un rango entre 50 y 115 años. Esta experiencia podrá contribuir a quien esté interesado en extender la vida útil de su PCH.

93-96

Modernización de centrales hidroeléctricas y almacenamiento por bombeo: estrategias para fortalecer la estabilidad y la resiliencia de los sistemas eléctricos en la transición energética

Carlos Alberto Sgro - Carlos Eduardo Jara Ampudia

En este artículo se analizan el papel de la modernización hidroeléctrica (*repowering*), la rehabilitación de centrales existentes y el almacenamiento por bombeo (*pumped storage hydropower*, PSH) como soluciones fundamentales para fortalecer la seguridad energética, aumentar la eficiencia operacional y facilitar la integración masiva de energías renovables.

97-104

Demanda de energía para la cocción de alimentos de un usuario rural

Ramiro Ortiz Flórez - Jonh Camilo Botina - César Andrés Vargas Cerón - Daniela Arboleda Rodríguez - Juan Camilo Cardona Velásquez

La evaluación de la demanda en condiciones rurales debe integrar todos los requerimientos energéticos de los usuarios para satisfacer sus demandas, incluida la preparación de alimentos. Por este motivo, es pertinente disponer de cifras que integren la cocción y que permitan cuantificar su demanda por potencia y por energía (Hernández, 2018; Villamizar, 2023).

105 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Ingeniería para sistemas resilientes: conocimiento, decisiones y transformación

MÓNICA MARCELA SUÁREZ PRADILLA

PhD. M.Sc. Gestión y Valoración Urbana de la Universidad Politécnica de Cataluña. Ing. Civil de la Universidad Nacional de Colombia. Profesora del programa de Ingeniería Civil de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5864-4771> - monica.suarez@escuelaing.edu.co

Cada número de una revista científica es una oportunidad para observar las preguntas que permean la ingeniería en un momento determinado, las herramientas con las que buscamos responderlas y, especialmente, la manera como el conocimiento se transforma en decisiones capaces de incidir en sistemas, infraestructuras y territorios.

En este número 141 de la *Revista de Ingeniería*, reunimos trabajos provenientes de diversos campos que, más allá de sus diferencias temáticas y metodológicas, comparten una preocupación que considero esencial para nuestra profesión: *cómo transformar conocimiento, información y experiencia en decisiones técnicas mejor fundamentadas*.

La ingeniería contemporánea exige ir más allá de la aplicación de procedimientos establecidos. Cumplir una norma, disponer de información o utilizar una determinada tecnología no garantiza, de por sí, una buena solución. Se requiere comprender el problema, reconocer las incertidumbres, evaluar las condiciones particulares del contexto y establecer con claridad las implicaciones de las decisiones adoptadas. Esta perspectiva permite encontrar un hilo conductor entre los trabajos que conforman la presente edición.

El número comienza con tres contribuciones, relacionadas con la *seguridad, el desempeño y la confiabilidad de sistemas e infraestructuras*.

En el artículo “Metodología de verificación del desempeño de sistemas de agua pulverizada en la etapa de diseño para la industria petroquímica” se plantea una cuestión especialmente relevante para la práctica profesional: el cumplimiento normativo constituye una condición indispensable, pero no necesariamente suficiente para garantizar que un sistema responda en forma adecuada ante condiciones reales de operación. En el trabajo se propone una metodología que integra modelos físicos para evaluar tanto la refrigeración de equipos como la dispersión de gases inflamables o tóxicos, complementando así los enfoques prescriptivos utilizados tradicionalmente en el diseño de estos sistemas. Su aporte invita a desplazar la discusión desde el simple cumplimiento hacia la verificación efectiva del desempeño.

En esta misma línea de análisis de la infraestructura, en el texto “Assessment of Railway Live Loads on Buried Pipelines Using API RP 1102: A Case Study for the Colombian Railway Corridor” se estudia la interacción entre cargas ferroviarias y tuberías enterradas, usando como caso de análisis el corredor Yumbo-Buenaventura. A lo largo del trabajo se evalúa el comportamiento estructural frente a cargas ferroviarias pesadas y se identifica la pérdida de espesor de pared como una variable particularmente relevante dentro del análisis de

riesgo. Más allá del caso específico, en la metodología propuesta se ofrecen elementos de interés para otros corredores, donde nuevas infraestructuras ferroviarias deben coexistir con sistemas ya instalados.

La seguridad pasa posteriormente de la escala de la infraestructura a la escala de las personas y de los sistemas de movilidad con “Reconstrucción histórica y escenarios prospectivos de la mortalidad vial en Colombia (1986-2025)”. En este artículo se analizan cuatro décadas de información, se identifican diferentes etapas en la evolución de la mortalidad vial colombiana y se construyen escenarios prospectivos hacia 2030 y 2035. Sus resultados no solamente evidencian la magnitud del desafío que enfrenta el país para avanzar hacia reducciones sostenidas de siniestros, sino también refuerzan la necesidad de consolidar una gestión sistémica de la seguridad vial, basada en seguimiento continuo, evidencia y coordinación entre varios sectores.

Después de este recorrido por problemas asociados con seguridad y desempeño, la edición dirige su atención hacia otra dimensión fundamental de la ingeniería contemporánea: *la gestión de información y la selección de herramientas tecnológicas adecuadas para cada problema*.

En “MySQL y Apache CouchDB: Análisis Comparativo de Sistemas de Gestión de Bases de Datos Relacionales y NoSQL”, se contrastan dos paradigmas de gestión de información considerando aspectos como arquitectura, modelos de datos, concurrencia, seguridad, respaldo, replicación y escalabilidad. Más que establecer una superioridad absoluta entre tecnologías, en el estudio se muestra que cada solución responde de manera diferente a determinados requerimientos y contextos de aplicación.

Esta conclusión trasciende el campo específico de las bases de datos y se conecta con un principio que considero central para la ingeniería: *la mejor solución no es necesariamente la más sofisticada, sino aquella que responde de manera adecuada al problema, al contexto y a las condiciones en las que deberá operar*.

El bloque general de esta edición se completa con “El examen P/1 (Probability): estructura, estadísticas y experiencias de dos candidatos”, artículo en el que se ofrece una contribución que incorpora una perspectiva distinta pero igualmente relevante: la formación y el desarrollo profesional. Así, se presentan las características de uno de los exámenes internacionales básicos de certificación actuarial, se analiza información sobre

sus tasas de aprobación y se recoge la experiencia de dos candidatos que han enfrentado exitosamente este proceso. Además del conocimiento disciplinar, se destacan aspectos asociados con la preparación estratégica, la gestión del tiempo y el desempeño bajo presión, al tiempo que se aporta una aproximación poco documentada en nuestro contexto a los procesos internacionales de certificación profesional.

SECOND INTERNATIONAL SMALL HYDRO MEETING: EXPERIENCIA, CONOCIMIENTO Y FUTURO DE LA HIDROELECTRICIDAD

Este número tiene, además, un significado particular para la *Revista de Ingeniería* porque incorpora una sección especial, derivada del Second International Small Hydro Meeting.

La posibilidad de reunir estos cuatro trabajos nos permite abrir un espacio de reflexión sobre una tecnología que continúa ocupando un lugar estratégico dentro de los sistemas energéticos y que, a la vez, enfrenta importantes desafíos relacionados con el diseño, la operación, el envejecimiento de la infraestructura, la modernización tecnológica, la flexibilidad de los sistemas eléctricos y las necesidades energéticas de los territorios.

Considero especialmente valioso que en los artículos de esta sección no se mire la hidroelectricidad desde una sola escala ni desde una sola etapa del ciclo de vida de los proyectos. Por el contrario, se construye un recorrido que comienza con las decisiones que determinan el éxito de una central, se continúa con el diagnóstico de infraestructuras que han operado durante décadas, se avanza hacia la modernización y el almacenamiento como componentes de la transición energética y se concluye en una escala diferente pero igualmente importante: las necesidades energéticas concretas de los usuarios rurales.

La sección comienza con “Decisions that make a hydropower project successful”, un trabajo en el que se sitúa la discusión precisamente donde debe empezar cualquier proyecto de ingeniería: en la calidad de las decisiones que se toman antes de construir.

En el artículo se enfatiza en el carácter interdisciplinario del diseño hidroeléctrico y se advierte que las elevadas inversiones iniciales, sumadas a las limitadas posibilidades de modificar una central después de construida, hacen indispensable analizar cuidadosamente las condiciones naturales y técnicas desde las primeras eta-

pas del proyecto. Además, se destacan la disponibilidad y la calidad de la información hidrológica, así como los datos relacionados con el transporte de sedimentos, aspectos que pueden representar debilidades importantes cuando no se consideran adecuadamente.

Su planteamiento recoge una idea sencilla, pero de gran profundidad para la práctica de la ingeniería: *los proyectos hidroeléctricos deben comprender los procesos naturales y trabajar con ellos, y no simplemente intentar imponer soluciones sobre el territorio*. La posibilidad de concebir centrales capaces de operar en forma adecuada durante periodos muy prolongados depende, en buena medida, de la calidad de esas decisiones iniciales.

Esta reflexión encuentra continuidad en “Diagnóstico de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH)”, trabajo en el que se abordan metodologías orientadas a evaluar la condición de centrales existentes y a aportar criterios para prolongar su vida útil.

Su contribución se sustenta en la experiencia acumulada a partir del diagnóstico de *16 proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas, con una capacidad nominal conjunta de 45,9 MW y periodos de operación comprendidos entre aproximadamente 50 y 115 años*. Esta experiencia permite reunir aprendizajes derivados de infraestructuras que han permanecido en servicio durante varias décadas y que requieren decisiones técnicas informadas para establecer sus posibilidades de continuidad.

La inclusión de este trabajo dentro de la sección resulta particularmente pertinente porque introduce una dimensión que, con frecuencia, recibe menor atención que el diseño y la construcción de nuevas instalaciones: *cómo evaluar técnicamente aquello que ya existe y cómo determinar si una infraestructura puede continuar prestando servicio de manera confiable*.

En un contexto de transformación de los sistemas energéticos, extender responsablemente la vida útil de los activos existentes puede representar una oportunidad técnica, económica y ambiental significativa. Sin embargo, esta posibilidad depende de diagnósticos rigurosos que permitan reconocer las condiciones reales de los componentes, establecer necesidades de intervención y sustentar las decisiones de rehabilitación o modernización.

Desde esta escala asociada con el diagnóstico y la gestión de activos existentes, la sección avanza hacia una perspectiva sistémica con “Modernización de centrales hidroeléctricas y almacenamiento por bombeo: estra-

tegias para fortalecer la estabilidad y resiliencia de los sistemas eléctricos en la transición energética”.

El artículo parte de uno de los principales desafíos de la transformación energética actual: contar con sistemas eléctricos suficientemente flexibles y resilientes para integrar mayores niveles de generación renovable variable, sin comprometer la estabilidad de la red. En estas condiciones, la hidroelectricidad puede desempeñar funciones que trascienden la generación convencional.

La modernización y rehabilitación de centrales existentes, el *repowering* y el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo aparecen como alternativas capaces de aumentar la eficiencia operacional, aportar flexibilidad y fortalecer la seguridad energética. Esta discusión adquiere especial relevancia para América Latina y el Caribe, donde una parte significativa de las centrales hidroeléctricas ha superado su vida útil de diseño.

Las experiencias internacionales presentadas permiten observar, además, cómo el conocimiento acumulado en la operación de infraestructuras existentes se puede combinar con nuevas tecnologías y con los requerimientos emergentes de los sistemas eléctricos. La transición energética, desde esta perspectiva, no necesariamente implica sustituir todo aquello que existe, sino también significa *reconocer el valor de los activos disponibles, rehabilitarlos y modernizarlos cuando resulte viable, y asignarles nuevas funciones dentro de sistemas energéticos en transformación*.

El recorrido de la sección especial concluye cambiando deliberadamente de escala.

“Demanda de energía para la cocción de alimentos de un usuario rural” dirige la mirada hacia las necesidades cotidianas de las personas y recuerda que las discusiones sobre energía no se pueden limitar a capacidad instalada, grandes infraestructuras o estabilidad de los sistemas eléctricos.

A lo largo del artículo se plantea que la evaluación de la demanda energética en contextos rurales debe integrar todos los requerimientos de los usuarios, incluida la preparación de alimentos. Para esto, se consideran variables asociadas con el energético utilizado, la estufa, los recipientes y los alimentos, mediante una aproximación experimental orientada a cuantificar el consumo de energía.

Los resultados obtenidos para condiciones rurales tropicales señalan al biogás como una alternativa capaz de responder a esta necesidad desde dimensiones técnicas, económicas, ambientales y sociales.

Cerrar la sección con este trabajo tiene, desde mi perspectiva, un significado especial. Permite recordar que detrás de las discusiones sobre generación, almacenamiento, modernización y resiliencia existen personas, hogares y comunidades con necesidades concretas. *La transición energética adquiere verdadero sentido cuando las transformaciones tecnológicas se logran traducir también en soluciones pertinentes para los territorios y en mejores condiciones de vida para sus habitantes.*

Los cuatro trabajos de la sección especial del Second International Small Hydro Meeting se pueden leer, entonces, como diferentes partes de una misma conversación.

- Primero, tomar adecuadamente las decisiones que determinan el desempeño futuro de un proyecto.
- Después, comprender la condición de las infraestructuras existentes y establecer cómo prolongar responsablemente su vida útil.
- Posteriormente, modernizar los sistemas hidroeléctricos y aprovechar alternativas de almacenamiento y flexibilidad capaces de responder a los retos de la transición energética.
- Finalmente, recordar que cualquier transformación del sistema energético debe responder también a las necesidades reales de las personas y de los territorios.

En esta secuencia se sintetiza uno de los principales mensajes que quisiera destacar de esta edición: *la sostenibilidad de la ingeniería no depende únicamente de desarrollar nuevas tecnologías.* También depende de diseñar mejor, conocer y conservar aquello que todavía tiene valor, modernizar responsablemente lo existente y comprender para quién y para qué desarrollamos nuestras soluciones.

Como directora de la *Revista de Ingeniería*, considero especialmente enriquecedor que en este número se reúnan perspectivas tan diversas. La pluralidad temática no se debe entender como una fragmentación del

conocimiento. Por el contrario, refleja la amplitud de una disciplina que participa simultáneamente en la protección de infraestructuras, la seguridad de las personas, la gestión de información, la formación profesional y la transformación de los sistemas energéticos.

En todos estos ámbitos aparece una responsabilidad común: *comprender antes de intervenir y decidir con fundamento.*

Los modelos, las normas, las tecnologías, los datos y la experiencia constituyen herramientas indispensables, pero su verdadero valor surge cuando se utilizan de manera crítica, contextualizada y responsable. Ninguna metodología sustituye completamente el juicio profesional y ninguna innovación tecnológica se puede desligar de las condiciones sociales, ambientales y territoriales en las que se aplicará.

Desde la *Revista de Ingeniería* esperamos que los trabajos reunidos en este número 141 contribuyan no solamente a divulgar resultados de investigación y experiencias profesionales, sino también a generar nuevas preguntas, conversaciones y posibilidades de colaboración entre la academia, la industria, las instituciones y quienes ejercen diariamente la ingeniería.

Seguimos convencidos de que una revista científica debe ser un espacio para comunicar conocimiento, pero también para ponerlo en discusión, contrastarlo y relacionarlo con los desafíos reales de nuestra sociedad.

La sección especial del Second International Small Hydro Meeting aporta a esta edición una reflexión particularmente oportuna: *el futuro no siempre comienza construyendo algo completamente nuevo.* También se puede construir aprendiendo de la experiencia, comprendiendo mejor los sistemas naturales, cuidando y modernizando la infraestructura existente y tomando hoy decisiones que permitan que nuestros sistemas continúen siendo útiles, confiables y sostenibles durante las próximas décadas.

Ese es también, en buena medida, el desafío de la ingeniería que queremos contribuir a construir desde estas páginas.

Metodología de verificación del desempeño de sistemas de agua pulverizada en la etapa de diseño para la industria petroquímica

Methodology for performance verification of fixed water spray systems during the design stage for the petrochemical industry

WILLIAM MAURICIO BERNAL SOTELO¹ - HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ²

1. Magister en Ingeniería Civil. Énfasis en Recursos Hídricos y Medio Ambiente.

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1355-4264>

william.bernal-so@mail.escuelaing.edu.co

2. Especialista en Hidrología. Ingeniero Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6042-8514>

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

Recibido: 19/12/2025 Aceptado: 11/01/2026

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Los sistemas de agua pulverizada utilizados en la protección contra incendios en la industria petroquímica se diseñan comúnmente con base en criterios prescriptivos establecidos por estándares internacionales como NFPA 15 y API 2030, los cuales no contemplan la verificación del desempeño real frente a escenarios específicos de incendio o liberación de gases. Esta limitación puede generar sistemas sobredimensionados o, en algunos casos, sistemas que cumplen la normativa, pero resultan ineficientes en condiciones reales de operación.

En el presente artículo se propone una metodología de verificación del funcionamiento de sistemas de agua pulverizada en su etapa de diseño, orientada a evaluar su capacidad para la absorción de radiación térmica y la dispersión de nubes de gases inflamables o tóxicos. La metodología integra modelos físicos validados en la bibliografía técnica —Sahuquillo (2020), Buchlin (1994), Rana (2008), Pasquill-Gifford, Cheung (2009)— y se estructura en dos módulos de cálculo: refrigeración de equipos (criterios C1-C5) y dispersión de gases (criterios D2-D8).

Los resultados demuestran que el cumplimiento normativo constituye una condición necesaria —pero no suficiente— para garantizar la efectividad del sistema. La metodología permite identificar deficiencias de desempeño no evidentes en los enfoques tradicionales y proporciona una herramienta práctica, auditable y aplicable en el contexto profesional colombiano, sin requerir *software* especializado.

Palabras claves: agua pulverizada, protección contra incendios, industria petroquímica, dispersión de gases, radiación térmica, diseño de sistemas hidráulicos, metodología de verificación.

Abstract

Water spray systems used for fire protection in the petrochemical industry are commonly designed based on prescriptive criteria established by international standards such as NFPA 15 and API 2030, which do not include verification of actual performance under specific fire or gas-release scenarios. This limitation may result in oversized systems or, in some cases, systems that comply with applicable regulations but prove ineffective under actual operating conditions.

This article proposes a methodology for verifying the performance of water spray systems during the design stage, aimed at assessing their capacity to absorb thermal radiation and disperse clouds of flammable or toxic gases. The methodology integrates physical models validated in the literature—including Sahuquillo (2020), Buchlin (1994), Rana (2008), Pasquill-Gifford, and Cheung (2009)—and is structured into two calculation modules: equipment cooling (criteria C1–C5) and gas dispersion (criteria D2–D8).

The results show that regulatory compliance is necessary but not sufficient condition for ensuring system effectiveness. The methodology makes it possible to identify performance flaws that are not apparent

through traditional approaches and provides a practical, auditable tool applicable in the Colombian professional context without requiring specialized software.

Keywords: water spray, fire protection, petrochemical industry, gas dispersion, thermal radiation, hydraulic system design, verification methodology.

INTRODUCCIÓN

La protección contra incendios en la industria petroquímica es un elemento crítico para garantizar la continuidad operativa, la integridad de los equipos y la seguridad del personal. Las instalaciones petroquímicas involucran procesos en los que se manejan sustancias inflamables, combustibles, vapores tóxicos y fluidos presurizados que, ante una falla, pueden desencadenar incendios de rápida propagación, explosiones o liberaciones tóxicas con consecuencias graves. En este contexto, los sistemas de agua pulverizada se utilizan ampliamente debido a su capacidad para absorber radiación térmica y actuar como barrera frente a la dispersión de gases (Center of Chemical Process Safety [CCPS], 2010).

Sin embargo, los diseños actuales se fundamentan principalmente en estándares como NFPA 15 (National Fire Protection Association [NFPA], 2019) y API 2030 (American Petroleum Institute [API] (2015), los cuales establecen criterios prescriptivos de presión, densidad de descarga y cobertura. Colombia referencia los títulos J y K de la NSR-10 para protección contra incendios, pero estos resultan insuficientes para las necesidades específicas del sector petroquímico, lo que obliga a los diseñadores a basarse en estándares internacionales sin herramientas de verificación adaptadas a las condiciones del sitio.

Esta situación genera una brecha entre el cumplimiento normativo y el desempeño real del sistema, lo que puede derivar en soluciones sobredimensionadas o en sistemas que, pese a cumplir la norma, no garantizan una protección efectiva. En la bibliografía técnica se ha documentado que variables como el tamaño de gota, la evaporación en vuelo, el viento y la geometría de descarga influyen significativamente en la eficiencia del sistema (Sahuquillo, 2020a; Sahuquillo, 2020b). En estudios como los de Rana (2008) y Cheung (2009), se evidenció que estas variables, ignoradas a menudo en el diseño convencional, tienen incidencia directa en la capacidad de absorción de radiación y dispersión de gases.

En las metodologías actuales no se contempla una verificación integrada de variables críticas, como el tamaño de gota descargada, la geometría del cono, el caudal aplicado, la solubilidad del gas o la intensidad de radiación térmica que se debe absorber. En respuesta a este vacío, en el presente artículo se propone una metodología de verificación que permite evaluar, desde la etapa de diseño, el desempeño real de los sistemas de agua pulverizada frente a escenarios específicos, sin requerir pruebas físicas experimentales.

METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta se fundamenta en la revisión de normativa internacional (NFPA, API, IP, CCPS), el análisis de escenarios típicos de la industria petroquímica y la integración de modelos físicos disponibles en la bibliografía técnica. Se estructura en dos módulos de verificación secuencial que parten de la definición del escenario de riesgo y convergen en la confirmación de que el sistema tiene capacidad real para cumplir su función específica.

La pregunta de investigación que orienta el trabajo es la siguiente: ¿se realizan las protecciones contra incendio adecuadas siguiendo el estándar de diseño, sin hacer verificaciones en aplicaciones específicas, particularmente en el sector petroquímico?

A continuación, se presenta un diagrama de flujo general, en el que se definen los dos módulos de verificación, dependiendo del uso del sistema de pulverización. Posteriormente, se hace un resumen general de cada módulo y sus variables evaluadas.

Módulo de refrigeración de equipos (C1-C5)

El módulo evalúa la capacidad del sistema para absorber la radiación térmica incidente sobre equipos expuestos, a partir del valor real de radiación térmica incidente, dato que se debe solicitar a los equipos de análisis de riesgos de incendio, y verificando cinco criterios físicos interdependientes en secuencia. A renglón seguido, se sintetizan los criterios, condiciones de aceptación y referencias (tabla 1):

La verificación se ejecuta en seis etapas secuenciales, y cada una alimenta la siguiente:

- **Radiación incidente:** Se calcula la radiación total q_t [kW/m^2] sobre el equipo a partir del análisis de

VERIFICACIÓN DE DESEMPEÑO — SISTEMAS DE AGUA PULVERIZADA
Diagrama maestro · Criterios de cumplimiento por módulo

Tesis de Maestría · William Bernal · Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito · 2026

Figura 1 de 3
 Diagrama maestro



Figura 1
 Diagrama maestro. Secuencia de verificación del módulo de refrigeración y dispersión de gases.

consecuencias de incendio, y se determina la reducción requerida Δq_{Red} y la energía total $Q_{reducir}$ [kW] que el sistema debe absorber.

- **Boquilla y tamaño de gota (C1-C2):** Se calcula el diámetro mediano dm [mm] = $D_{ori}^{2-3} / P_{kPa}^{1-3}$ (Sahuquillo, 2020). El dm debe estar entre 0,7 y 1,2 mm para instalaciones a la intemperie (C1). La estabilidad en vuelo se verifica mediante el número de Weber $We = \rho_{aire} \cdot U^2 \cdot dm / \sigma$; se requiere $We < 1\,000$ (C2). Gotas fuera de estos límites se fragmentan o evaporan antes de llegar al equipo.
- **Pérdida de masa en vuelo:** Se calcula la evaporación de la gota durante su trayectoria mediante el número de Nusselt Nu y la constante de evaporación K_{ev} [m²/s]. La pérdida de masa Δdm reduce la fracción de agua que efectivamente llega al equipo.
- **Absorción de calor por el sistema (C5):** Se calcula el calor absorbido por gota q_{dh} [kJ] = $\Delta dm \cdot C_{vw} + md \cdot C_{pw} \cdot (T_s - T_a)$, así como la absorción total $Q_{sistema}$ [kW] = $N \cdot m_{boquilla} \cdot q_{dh}$. Se verifica que $Q_{sistema} \geq \Delta q_{Red} \times A_{equipo}$ (C5), criterio definitivo de aprobación del módulo.
- **Densidades ADD y LAD (C3-C4):** Se calculan la densidad descargada ADD [l/min · m²] y la densidad útil LAD [l/min · m²] que efectivamente llega al equipo, descontando las pérdidas. Se verifican $LAD \geq ADD_{diseño}$ (C3) y eficiencia hidráulica = $(LAD/ADD) \times 100 \geq 70\%$ (C4). Una eficiencia

menor indica pérdidas excesivas por evaporación o viento, que pueden llegar a superar el 40 % en instalaciones exteriores (Cheung, 2009).

Módulo de dispersión de gases (D2-D8)

El módulo verifica que la cortina de agua reduce la concentración del gas desde C_0 (sin cortina activa) hasta C_1 (con cortina), de manera que C_1 quede por debajo de los límites de inflamabilidad (LEL) y toxicidad (IDLH) en el punto de evaluación. La selección del tipo de boquilla, el tamaño de gota y el caudal del sistema se deben basar en el mecanismo de acción dominante para el gas específico. La verificación se ejecuta en seis etapas:

- **Solubilidad del gas (D3):** Se determina el tipo de gota recomendado, según la solubilidad del gas en agua: gotas pequeñas ($dm < 350\ \mu m$) para gases muy solubles, como NH_3 o HCl , que actúan por absorción en fase líquida; gotas grandes ($dm > 350\ \mu m$) para gases poco solubles, como H_2S , Cl_2 o propano, que requieren arrastre mecánico por *momentum* de la cortina (Rana, 2008).
- **Caudal másico de fuga (D2):** Se calcula el caudal de gas que escapa Q_m [kg/s] y se verifica el caudal total del sistema $Q_{sis} \geq 5 \times Q_m$ [l/min] (Sahuquillo, 2020), condición mínima para que la cortina tenga suficiente masa de agua frente a la pluma de gas.

Tabla 1
Criterios de verificación del módulo de refrigeración de equipos

Crit.	Parámetro	Condición de aceptación	Si no cumple	Referencia
C1	dm = tamaño de gota mediano	$0,7\ mm \leq dm \leq 1,2\ mm$	Ajustar D_{ori} o presión de operación	Sahuquillo (2020)
C2	We = número de Weber	$We < 1000 \rightarrow$ gota Estable	Reducir presión o aumentar diámetro de orificio	Liu et al. (2006)
C3	LAD vs. ADD de diseño	$LAD \geq ADD_{diseño}$	Aumentar P , K ; reducir $h_{boquilla}$	NFPA 15 §8; Sahuquillo (2020)
C4	η = eficiencia hidráulica	$\eta \geq 70\% \rightarrow$ entrega aceptable	Reducir altura de instalación; ajustar presión	Sahuquillo (2020); Cheung (2009)
C5	Balance energético del sistema	$Q_{sis} \geq \Delta q_{Red} \times A_{equipo}$	Aumentar N boquillas, K o presión	Sahuquillo (2020); NFPA 15

MÓDULO DE REFRIGERACIÓN DE EQUIPOS

Secuencia de verificación y variables de ajuste por criterio

Tesis de Maestría · William Bernal · Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito · 2026

Figura 2 de 3
Refrigeración

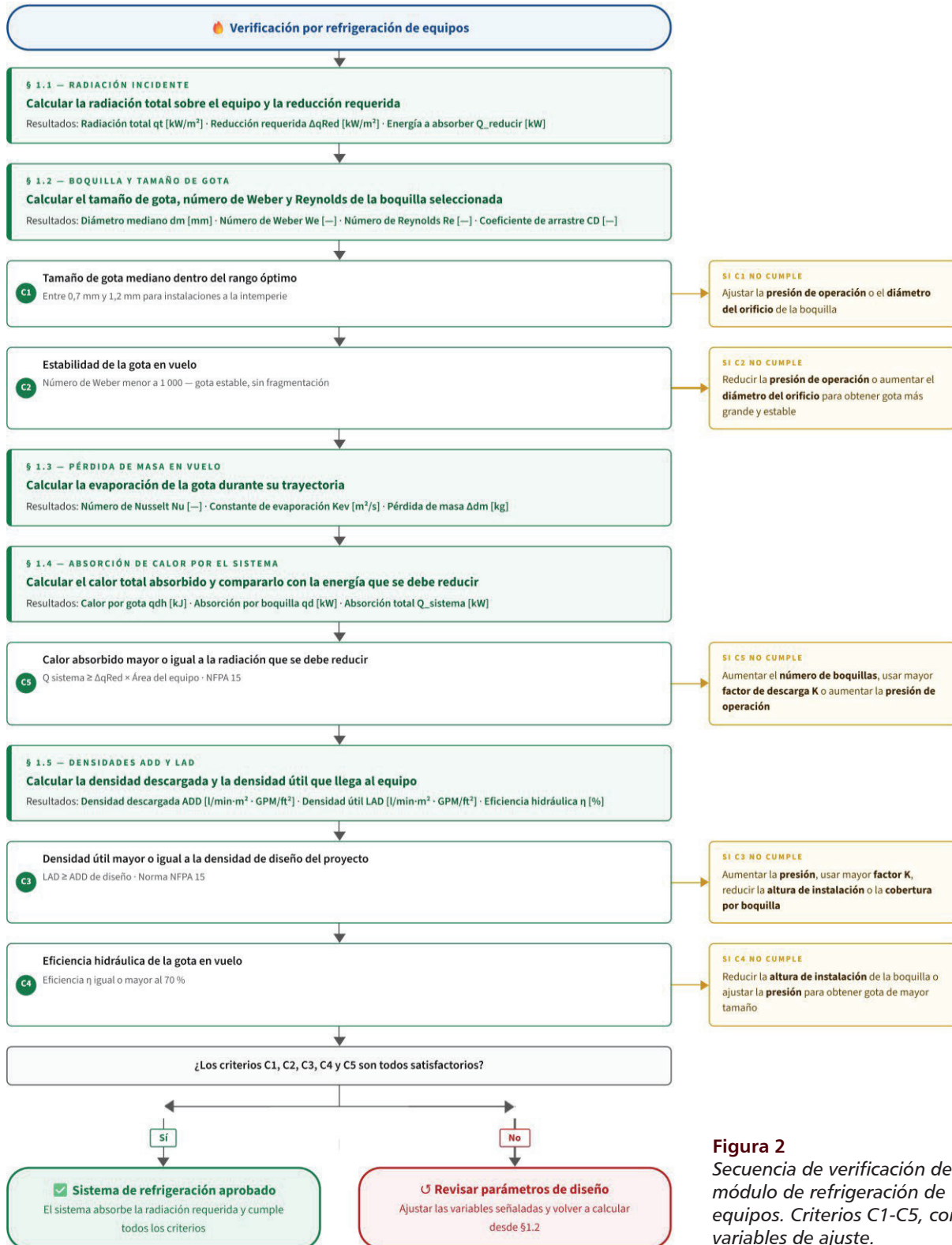


Figura 2
Secuencia de verificación del módulo de refrigeración de equipos. Criterios C1-C5, con variables de ajuste.

MÓDULO DE DISPERSIÓN DE GASES

Secuencia de verificación y variables de ajuste por criterio

Tesis de Maestría · William Bernal · Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito · 2026

Figura 3 de 3
Dispersión

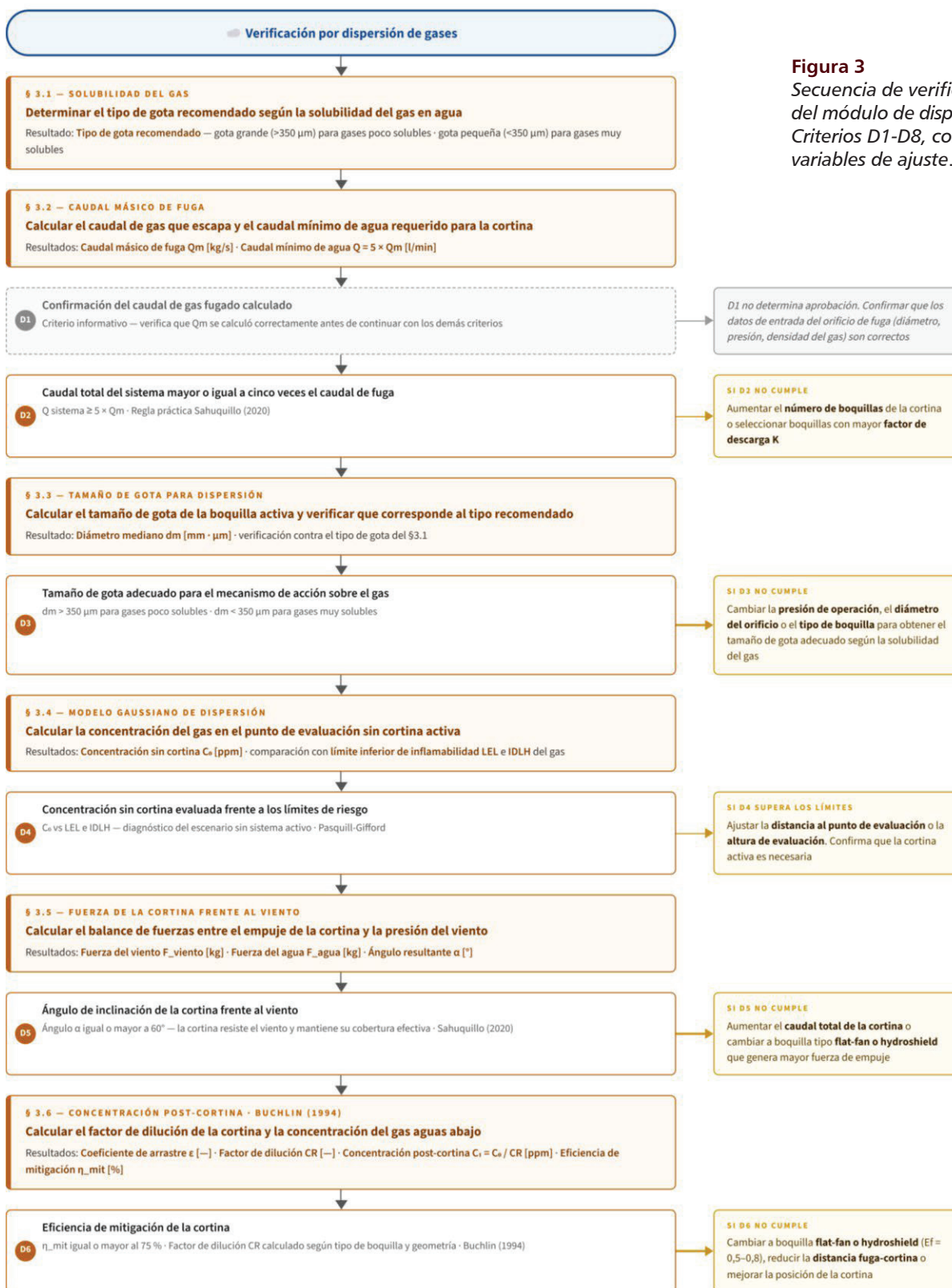


Figura 3
Secuencia de verificación del módulo de dispersión. Criterios D1-D8, con variables de ajuste.

- **Modelo gaussiano (concentración sin cortina C_0) (D4):** Se aplica el modelo de dispersión gaussiana de Pasquill-Gifford para calcular la concentración C_0 [ppm] en el punto de evaluación sin protección activa, en función de la velocidad del viento y la clase de estabilidad atmosférica. C_0 se compara con el LEL (riesgo de inflamabilidad) y el IDLH (riesgo de toxicidad) para determinar la necesidad de cortina activa (D4).
- **Resistencia de la cortina al viento (D5):** Se calcula el balance de fuerzas entre el empuje de la cortina F_{agua} [kg] y la presión del viento F_{viento} [kg], obteniendo el ángulo resultante α [°]. Se requiere $\alpha \geq 60^\circ$ para que la cortina mantenga su cobertura efectiva; por debajo de este umbral, la cortina se derriba y pierde función de barrera (Sahuquillo, 2020).
- **Modelo de Buchlin (eficiencia de mitigación) (D6):** Se calcula el factor de dilución $CR = C_0 / C_1$ en función del coeficiente de eficacia E_f del tipo de boquilla y la longitud de la cortina L (Buchlin, 1994). Se verifica que la eficiencia de mitigación $\eta_{\text{mit}} = (1 - 1/CR) \times 100 \geq 75 \%$.
- **Concentración poscortina C_1 y clasificación del riesgo (D7-D8):** Se calcula $C_1 = C_0 / CR$ y se verifica el criterio definitivo de cumplimiento: $C_1 < \text{LEL}$ si el gas es inflamable, $C_1 < \text{IDLH}$ si es tóxico, y ambos simultáneamente si el gas presenta doble riesgo, como NH_3 o H_2S (D7-D8). La herramienta incluye una tabla automática de propiedades para siete gases industriales, con sus valores de LEL, UEL e IDLH.

Herramienta de cálculo

Los trece criterios se implementan en una hoja de cálculo organizada en cuatro pestañas. La pestaña ESCENARIO es la única hoja de ingreso de datos del proyecto; todas las demás toman sus valores automáticamente desde ella. La pestaña 1-REFRIGERACIÓN ejecuta el cálculo secuencial C1 a C5 con veredicto de cumplimiento por criterio. La pestaña 2-BOQUILLAS hace un comparativo simultáneo de tres boquillas con semáforo de cumplimiento C1 a C5, lo que facilita la selección técnica fundamentada. La pestaña 4-DISPERSIÓN GASES verifica los criterios D2 a D8 e incorpora una tabla automática de propiedades físicas y límites de seguridad para siete gases industriales (NH_3 , HCl , H_2S , Cl_2 , SO_2 , C_3H_8 , gasolina). Todos los cálculos son trazables a la bibliografía citada y la herramienta no

requiere *software* especializado de costo elevado, lo que la hace aplicable en el contexto profesional colombiano.

RESULTADOS

La aplicación sistemática de los módulos de verificación a diferentes configuraciones de boquillas y escenarios de riesgo permitió establecer los siguientes hallazgos principales:

Módulo de refrigeración

La densidad real aplicada al equipo (LAD) puede diferir en forma significativa de la densidad de diseño (ADD) establecida por NFPA 15, debido principalmente a la pérdida de masa por evaporación en vuelo y al arrastre por viento, diferencia que no se capta mediante los procedimientos convencionales. Los análisis efectuados mostraron que el efecto de la evaporación puede reducir la masa efectiva de agua que llega al equipo en condiciones de temperatura ambiental elevada o viento moderado, lo cual genera una eficiencia hidráulica por debajo del 70 % requerido por el criterio C4.

Uno de los hallazgos más relevantes es el empleo frecuente, en la práctica, de valores típicos de radiación de incendio limitados a 37 kW/m^2 como criterio máximo de cálculo, sin verificar si el equipo específico está expuesto a valores superiores. Esta simplificación puede omitir escenarios en los que el sistema resulta insuficiente. La metodología exige partir del valor real de radiación incidente —dato que se debe solicitar a los equipos de análisis de riesgos—, lo que establece un punto de partida más realista y confiable para el diseño.

El criterio C5 —balance energético— es el único que evalúa directamente si la energía total absorbida por el sistema es suficiente para reducir la radiación por debajo del nivel tolerable para el equipo protegido. Este criterio, ausente en los procedimientos de NFPA 15, es el que cierra la cadena de verificación del módulo y trasciende el simple cumplimiento prescriptivo.

Módulo de dispersión de gases

La eficiencia del sistema de dispersión depende no solo del caudal aplicado, sino de la interacción entre tres factores: el mecanismo de acción del agua sobre el gas (absorción vs. arrastre mecánico según solubilidad), las condiciones ambientales (velocidad y dirección del

viento, clase de estabilidad atmosférica) y el tipo de boquilla seleccionada.

Los gases con riesgo simultáneo de inflamabilidad y toxicidad, como el NH_3 (LEL = 15 % vol., IDLH = 300 ppm) y el H_2S (LEL = 4 % vol., IDLH = 50 ppm), requieren verificación doble: $C_1 < \text{LEL}$ y $C_1 < \text{IDLH}$ en forma independiente (criterio D7). Un diseño basado únicamente en el LEL puede resultar insuficiente, dado que el IDLH es varios órdenes de magnitud más restrictivo para estos gases.

El criterio D5 —ángulo de inclinación de la cortina frente al viento ($\alpha \geq 60^\circ$)— se omite con frecuencia en la práctica profesional y puede comprometer la efectividad del sistema en condiciones de viento moderado. Su verificación resulta relativamente simple y tiene impacto directo en la cobertura efectiva de la cortina.

Respecto al tipo de boquilla, el coeficiente de eficacia del *spray* (Ef) diferenciado por geometría muestra, según Buchlin (1994), que las boquillas *flat-fan* o *hydroshield* (Ef = 0,5-0,8) son significativamente más eficientes para dispersión que las de cono completo (*full-cone*, Ef = 0,2-0,4), óptimas para refrigeración. Esta distinción es prácticamente ignorada en los procedimientos convencionales de diseño.

Hallazgo transversal: límite del enfoque prescriptivo

La aplicación de los trece criterios permitió identificar casos en los que sistemas que cumplen con la normativa no alcanzan los niveles de desempeño requeridos, lo que evidencia la necesidad de incorporar procesos de verificación en la etapa de diseño. Esto es consistente con lo documentado por Rana (2008) y Cheung (2009). La herramienta traslada el diseño desde un cumplimiento meramente normativo hacia una verificación basada en condiciones reales de incendio y condiciones ambientales específicas del sitio, mejorando la confiabilidad del sistema.

CONCLUSIONES

- El cumplimiento de los estándares internacionales de diseño (NFPA 15, API 2030) es una condición necesaria, pero no suficiente, para garantizar la efectividad de los sistemas de agua pulverizada. Los módulos de verificación de tamaño de gota, eficiencia de entrega (LAD/ADD) y la relación C_1/C_0 evidencian que un

sistema que cumple la norma puede ser técnicamente insuficiente en condiciones específicas del sitio.

- La eficiencia del sistema depende de variables físicas que no se tienen en cuenta en los enfoques prescriptivos tradicionales: tamaño de gota mediano (dm), pérdida de masa por evaporación en vuelo, efecto del viento sobre la cortina y geometría de descarga de la boquilla. Estas variables se deben integrar en el proceso de diseño para que las decisiones tengan fundamento físico demostrable ante la autoridad competente.
- La metodología propuesta permite integrar estas variables en un procedimiento de cálculo estructurado y auditable, implementado en una herramienta de hoja de cálculo accesible en el contexto profesional colombiano, sin requerir *software* especializado de costo elevado. La trazabilidad explícita hacia Pasquill-Gifford, Buchlin, Sahuquillo y NFPA 15 garantiza la reproducibilidad y auditabilidad de los resultados.
- La diferenciación por tipo de gas, solubilidad, inflamabilidad y toxicidad en el módulo de dispersión permite adaptar la verificación al riesgo específico del escenario, evitando la aplicación de un factor de seguridad único para todos los gases. Para gases con riesgo simultáneo (NH_3 , H_2S), la verificación doble (LEL/IDLH) es determinante.
- Su aplicación contribuye a reducir el riesgo de sobredimensionamiento o subdimensionamiento, al optimizar los recursos hidráulicos y mejorar la seguridad en instalaciones petroquímicas. La herramienta proporciona una verificación técnica intermedia entre el cumplimiento normativo básico y el análisis de riesgo cuantitativo formal.
- La metodología permitió evidenciar que el uso generalizado de valores típicos de radiación térmica de incendio, frecuentemente limitados a 37 kW/m^2 como criterio máximo de cálculo, constituye una simplificación que puede omitir escenarios críticos. El desconocimiento de la radiación térmica real incidente sobre el equipo impide definir con precisión el nivel de mitigación requerido para evitar fallas estructurales, ignición de materiales o pérdida de los fluidos contenidos. La metodología aborda este problema a partir del valor real de radiación térmica incidente, que los diseñadores deben solicitar a las compañías de análisis de riesgos de incendios, estableciendo así un punto de partida más realista.

A partir de este valor se define como objetivo la reducción de la radiación hasta niveles tolerables para el equipo protegido, lo que permite incorporar un criterio de verificación final que evalúa si la radiación residual posterior a la aplicación del sistema de agua pulverizada cumple con los límites permisibles de la instalación.

- La confirmación de la concentración de gas antes (C_0) y después de la cortina (C_1), así como su comparación con los niveles de inflamabilidad (LEL) y toxicidad (IDLH) del gas específico, constituye el criterio definitivo de aprobación del módulo de dispersión. La concentración C_0 calculada mediante el modelo gaussiano de Pasquill-Gifford representa el escenario base sin protección activa y permite diagnosticar si el riesgo es inflamable, tóxico o ambos simultáneamente. La concentración poscortina $C_1 = C_0 / CR$, obtenida mediante el modelo de Buchlin (1994), es la única variable que responde directamente la pregunta de seguridad: ¿el sistema diseñado garantiza que el gas queda por debajo del límite de riesgo en el punto de evaluación? Esta cadena de verificación, ausente en los diseños convencionales, resulta especialmente crítica para gases como NH_3 y H_2S , cuyo IDLH es varios órdenes de magnitud inferior al LEL y cuyo incumplimiento implica riesgo inminente para el personal expuesto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y al director del trabajo, el ingeniero Héctor Alfonso Rodríguez Díaz, por el acompañamiento académico y técnico durante el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- American Petroleum Institute (2008). *API RP 521: Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems* (5.ª ed.). API.
- American Petroleum Institute (2015). *API Publication 2030: Application of Fixed Water Spray Systems for Fire Protection in the Petroleum Industry* (4.ª ed.). API.
- Barcova, K., y Balner, D. (2017). Attenuation of Thermal Radiation Through Water Mist. *Process Safety Progress*, 37(1).
- Buchlin, J. M. (1994). Mitigation of Problem Clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 7(2), 167-174.
- Center of Chemical Process Safety (2010). *Guidelines for Fire Protection in Chemical, Petrochemical and Hydrocarbon Processing Facilities*. AIChE CCPS.
- Cheung, W. (2009). Radiation Blockage of Water Curtains. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 7(2), 167-174.
- Dandrieux, A., y Dusserre, G. (2003). The DVS Model: A New Concept for Heavy Gas Dispersion by Water Curtain. *Environmental Modelling & Software*, 18, 253-259.
- Fitzpatrick, J. M. (1983). Air Entrainment by Water Sprays: Strategies for Application to the Dispersion of Gas Plumes. *Journal of Occupational Accidents*, 5, 121-133.
- National Fire Protection Association (2019). *NFPA 15: Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection*. NFPA.
- National Fire Protection Association (2022). *NFPA 1: Fire Code*. NFPA.
- Rana, M. A., y Cormier, B. R. (2008, 28 de octubre). *Experimental Study of Effective Spray Curtain Application in Dispersing Liquefied Natural Gas Vapor Clouds*. Wiley InterScience.
- Sahuquillo, A. (2020a). *Dispersión de fugas de gases y absorción de radiación de un incendio mediante agua pulverizada y cortinas de agua*.
- Sahuquillo, A. (2020b). *Estimación de la radiación absorbida por los sistemas de agua pulverizada que protegen los tanques de combustible*.

Assessment of Railway Live Loads on Buried Pipelines Using API RP 1102: A Case Study for the Colombian Railway Corridor*

Evaluación de cargas vivas ferroviarias sobre tuberías enterradas mediante API RP 1102: Caso de estudio para el corredor ferroviario colombiano

JUAN DAVID BETANCUR RÍOS¹ - NORA YAMILE ROJAS CATAÑO²

1. PhD. Ciencias-Física. Física.

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

juan.betancur@escuelaing.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2362-0838>

2. Magister en Docencia de las Matemáticas. Licenciada en Educación Matemática y Física.

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2879-5899>

nora.rojas@escuelaing.edu.co

Recibido: 14/02/2025 Aceptado: 12/03/2026

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Abstract

This study applies API Recommended Practice 1102 (7th edition, §4.5 — railway branch) to assess the combined stresses induced in a buried API 5L X65 steel pipeline (12-inch, $t_w = 0.300$ in) by heavy-haul railway live loads, using the Yumbo-Buenaventura multiproduct corridor in Colombia as a case study. The governing design load is the Cooper E-80 standard (Arema), transmitted through a ballast-sleeper-subgrade chain modeled via the Zimmermann (Esveld, 2001), Odemark, and Boussinesq methods. Railway-specific API RP 1102 factors are applied, demonstrating their systematic distinction from the highway-branch factors. The combined effective stress reaches up to 81.4 % of the allowable limit (46.800 psi) in the governing double-track case, confirming structural compliance. The main finding is the fatigue circumferential criterion, as it is near-critical ($\Delta SHr / SFG \cdot F = 88.1$ %). A parametric sensitivity analysis identifies wall-thickness loss as the dominant risk variable, with the critical threshold at 38% wall loss. The methodology is transferable to Colombia's active railway development corridors (Tren del Caribe, Corredor Férreo del Pacífico, Regiotram de Occidente) and to analogous Latin American pipeline-railway co-existence assessments.

Keywords: API RP 1102, pipeline integrity, railway crossings, buried pipeline, Cooper E-80, fatigue assessment, Colombia.

Resumen

Este estudio aplica la práctica recomendada API RP 1102 (7ª ed., §4.5 — rama ferroviaria) para evaluar las tensiones combinadas inducidas en una tubería enterrada de acero API 5L X65 (12 pulgadas, $t_w = 0,300$ in) por cargas vivas de ferrovía pesada, usando como caso de estudio el corredor multiproductos Yumbo-Buenaventura en Colombia. La carga de diseño es el estándar Cooper E-80 (Arema), transmitida mediante la cadena balasto-durmiente-subrasante según los métodos de Zimmermann (Esveld, 2001), Odemark y Boussinesq. Se aplican los factores específicos de la rama ferroviaria de API RP 1102, cuya distinción sistemática respecto a los factores de la rama de carreteras se demuestra explícitamente. La tensión efectiva combinada alcanza el 81,4 % del límite admisible (46.800 psi), gobernando el caso de doble vía, confirmando el cumplimiento estructural. El criterio de fatiga circunferencial es cuasicrítico ($\Delta SHr / SFG \cdot F = 88,1$ %), constituyendo el hallazgo principal del estudio. El análisis de sensibilidad paramétrico identifica

* The results, conclusions, and recommendations of this study are based on publicly available data and are intended for academic purposes only. No engineering decision affecting pipeline integrity shall be based solely on these indicative results.

la pérdida de espesor de pared como la variable de riesgo dominante, con umbral crítico en el 38 % de pérdida. La metodología es transferible a los corredores activos del programa ferroviario colombiano (Tren del Caribe, Corredor Férreo del Pacífico, Regiotram de Occidente) y a evaluaciones análogas en América Latina.

Palabras claves: API RP 1102, integridad de tuberías, cruces ferroviarios, tubería enterrada, Cooper E-80, evaluación de fatiga, Colombia.

INTRODUCTION

The intersection of buried hydrocarbon pipelines with railway infrastructure represents one of the most technically demanding scenarios addressed by API Recommended Practice 1102. Unlike highway crossings, railway loadings are characterized by substantially higher axle loads (up to 32.5 t per axle for heavy-haul freight), load transmission through a rigid ballast-sleeper-rail structural system, higher operating speeds — which amplify dynamic impact factors significantly — and, critically, the potential for high-frequency repetitive loading that makes fatigue assessment a primary design consideration rather than a secondary check. In Colombia, the railway sector is experiencing its most significant revival in recent decades.

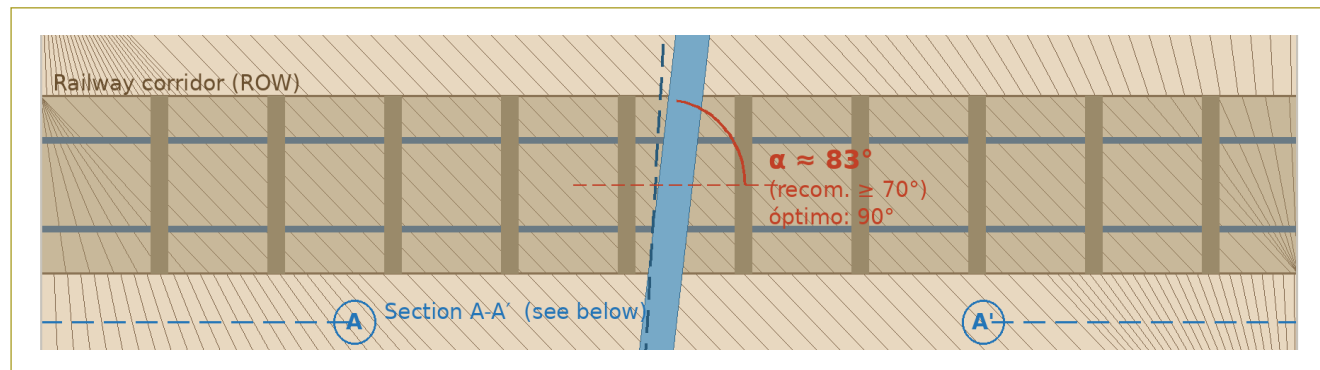
The National Government's Multimodal Transportation Master Plan (Plan Maestro de Transporte Intermodal, PMTI) and subsequent policy frameworks have placed railway infrastructure at the center of the country's logistics transformation strategy. Active projects and concessions include: the rehabilitation and expansion of the Caribbean Railway Corridor (Tren del Caribe, connecting the interior with the ports of Barranquilla, Cartagena, and Santa Marta); the Pacific Railway Corridor (Corredor Férreo del Pacífico, linking the coffee-growing region and Valle del Cauca with the port

of Buenaventura); Regiotram de Occidente (urban-regional light rail, Bogotá-Facatativá-Zipacquirá corridor), and La Dorada-Chiriguaná rehabilitation (central spine connecting the Magdalena Valley with the Caribbean coast). These projects are not purely greenfield developments — they traverse existing pipeline rights-of-way and established hydrocarbon infrastructure corridors managed by Cenit Transporte y Logística de Hidrocarburos S.A.S. (Ecopetrol Group) and other operators. This situation is not unique to Colombia: across Latin America, railway-revival and freight-corridor programs — among them Mexico's Tren Maya and Interoceanic Corridor, Brazil's Ferrogrão and FIOF freight lines, and Argentina's Belgrano Cargas rehabilitation — are being developed over or alongside legacy hydrocarbon transport corridors that were laid out under the same Andean and river-valley topographic constraints. The methodological gap addressed here is therefore regional in scope, and a transparent, standard-based assessment framework is of direct relevance to pipeline-railway coexistence throughout the region.

The Yumbo-Buenaventura corridor is particularly illustrative of this coexistence challenge (Figure 1 shows a plan view of a typical uncased pipeline-railway crossing). The Pacific Railway Corridor (historically operated by Ferrovías and currently under ANI concession framework) runs essentially parallel to and in multiple locations crosses the multiproduct pipeline system that supplies refined products to the Valle del Cauca region and to the port of Buenaventura. This simultaneous spatial presence of rail and pipeline infrastructure makes the engineering assessment of their interaction not merely academic, but an urgent operational and regulatory requirement.

Figure 1

Typical uncased pipeline-railway crossing — pipeline corridor. Plan view showing recommended crossing angle.



API Recommended Practice 1102 — *Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways*, 7th Edition (December 2007, including 2021 Errata) was originally developed precisely for this railway-pipeline crossing scenario. Section §4.5 of the standard provides the railway-specific analytical framework, including dedicated stiffness factors (K_{lr}), geometry factors (G_{lr}), and impact factor formulations calibrated for railway dynamic loading. Importantly, the standard establishes a minimum burial depth of 1.80 m for railway crossings (vs. 1.20 m for highway crossings), reflecting the significantly higher and more concentrated loads transmitted through the ballast-sleeper system.

The present study builds on the authors' prior application of API RP 1102 to non-highway surface loads (Betancur Ríos & Rojas Cataño, 2025), applying the same API RP 1102 framework to the railway case using the same pipeline segment (Yumbo-Buenaventura, 12-in API 5L X65). The railway loading model is based on Cooper E-80 design axle loads (Arema Standard), the industry benchmark for heavy-haul freight railway design in the Americas, supplemented by a representative operational load case using the GE ES44AC diesel-electric locomotive, the predominant heavy-haul unit in Colombian freight operations.

Despite the maturity of API RP 1102 for highway crossings, its railway branch (§4.5) remains comparatively under-applied in the peer-reviewed literature, and no documented application exists for the Latin American context, where pipeline and railway corridors were co-developed along shared Andean alignments and are now being simultaneously rehabilitated. Existing crossing assessments in the region rely predominantly on the highway formulation or on generic soil-overburden checks, which systematically understate both the dynamic amplification and the fatigue demand characteristic of heavy-haul railway loading. This gap is operationally significant: Colombia's active railway program (Corredor Férreo del Pacífico, Tren del Caribe, Regiotram de Occidente) traverses dense in-service multiproduct pipeline networks for which a transparent, fully traceable railway-specific assessment basis is currently lacking.

Accordingly, the objective of this study is to apply the railway branch of API RP 1102 §4.5 in full to a representative in-service Colombian crossing and to characterize the governing stress and fatigue behaviour

under Cooper E-80 loading. The contribution of the work is fourfold: (i) the first fully documented, step-by-step application of the API RP 1102 railway branch to a Latin American pipeline-railway crossing; (ii) an explicit, parameter-by-parameter distinction between the highway (§4.4) and railway (§4.5) formulations and its quantitative effect on the result; (iii) a parametric sensitivity analysis identifying wall-thickness loss as the dominant risk variable and locating the critical compliance threshold; and (iv) a benchmarking of the analytical result against independent finite-element and dual-standard studies reported in the literature.

The paper is structured as follows: Section II describes the materials and methods, including pipeline and soil properties, railway loading models, and the API RP 1102 methodology for railway crossings. Section III presents the step-by-step stress calculation results. Section IV provides a comparative discussion and sensitivity analysis. Section V states conclusions and engineering recommendations relevant to Colombia's railway development context.

Railway Infrastructure and Pipeline Coexistence in Colombia

Colombia's pipeline network and its historical railway corridors were developed largely in parallel during the 20th century, following the same topographic constraints imposed by the Andean mountain ranges and the major river valleys. Therefore, the country's primary hydrocarbon transportation axes — the Ocesa crude oil pipeline, the ODC (Colombia Pipeline), and the Cenit multiproduct system — share corridor space with the historic railway alignments that are now being rehabilitated and expanded. Table 1 summarizes the primary zones of coexistence between active or planned railway corridors and buried hydrocarbon pipelines in Colombia, focusing on those with documented or high-probability crossing interactions.

Regulatory and Normative Framework

In Colombia, the construction and operation of railway crossings over existing buried pipelines is regulated by a combination of national regulations and international technical standards. The principal applicable references are:

ASME B31.4 (American Society of Mechanical Engineers [ASME], 2019) — the design code for

Table 1
Primary zones of railway-pipeline coexistence in Colombia

Railway Corridor	Pipeline System	Operator	Crossing Risk	Source
Pacífico Corridor (Buenaventura-Buga)	Yumbo-Buenaventura multiproduct (6", 8", 12")	Cenit (Ecopetrol)	High (active coexistence)	(Cenit, 2023, 2025)
Caribbean Corridor (La Dorada-Chiriguaná)	ODC / Vasconia-Coveñas (20", 24")	Cenit / Ocesa	High (parallel alignment)	(ANI, 2024; Invías, 2024)
Regiotram de Occidente (Bogotá-Facatativá)	Gasoducto Bogotá (16")	TGI / Promigás	Moderate (urban crossings)	(Regiotram de Occidente, 2023)
FFCC Atlántico (Medellín-Barranquilla)	Ocesa troncal (24", 30")	Ocesa	High (Magdalena corridor)	(ANI, 2024)
Ferrocarril del Norte (Bogotá-Belencito)	Poliducto Salgar-Bogotá (10", 12")	Cenit	Moderate	(Cenit, 2023)

Note: Corridors and risk classifications based on publicly available information from ANI, Invías, and Cenit. Representative scenarios for academic and engineering assessment purposes.

liquid-hydrocarbon pipelines that governs the Yumbo-Buenaventura system, and whose §402.8 requires uncased road and rail crossings to be assessed in accordance with API RP 1102; API RP 1102 §4.5 itself, for the stress assessment of buried steel pipelines at railroad crossings; at the national level, Decreto 1073 de 2015 and the Reglamento de Transporte por Oleoductos unified under Resolución MME 574 de 2026, which govern liquid-hydrocarbon transport and require adherence to internationally recognized standards — with the Colombian standard NTC 3728 and the Reglamento Técnico de Gasoductos (Resolución 40279 de 2024) governing the analogous natural-gas case; and, on the railway side, the Arema Manual for Railway Engineering (Chapter 8, Cooper E-80 live-load standard) together with the ANI guidelines for railway rights-of-way. The minimum burial depth of 1.80 m for railway crossings, mandated by API RP 1102 §4.5, is consistent with Arema requirements and with standard practice in Latin American railway-pipeline crossing management.

MATERIALS AND METHODS

Case Study Description

The case study selected for this analysis is the crossing of the Yumbo-Buenaventura multiproduct pipeline by the Pacific Railway Corridor, at a representative location in the Valle del Cauca department, Colombia. This corridor connects the industrial and commercial hub of Yumbo (Cali metropolitan area) with the Port

of Buenaventura — Colombia's principal Pacific port — traversing the western flank of the Central Andes through challenging tropical mountainous terrain. Figure 1 shows the plan view of the crossing angle recommended by API RP 1102. The selection of this specific corridor serves dual purposes: (1) it provides a direct application of API RP 1102 §4.5 to a well-characterized pipeline-railway crossing, enabling a rigorous and fully documented case study; and (2) the geotechnical and pipeline data are well established, supporting a reliable, self-contained calculation.

Pipeline Characteristics

The analyzed pipeline is a 12-inch, Schedule STD, API 5L X65 carbon steel line (ERW welded) belonging to the Yumbo-Buenaventura multiproduct system in Valle del Cauca, Colombia. The complete pipeline parameters used in the API RP 1102 analysis are summarized in Table 2. The typical parameters of the uncased pipeline-railway crossing configuration and the pipeline characteristics are shown in Figure 2.

Soil and Installation Properties (per API RP 1102)

The geotechnical conditions at the railway crossing site are representative of the Yumbo-Buenaventura corridor. The following soil, pipe, and installation material values were adopted in accordance with API RP 1102 recommendations for Type A cohesive soil:

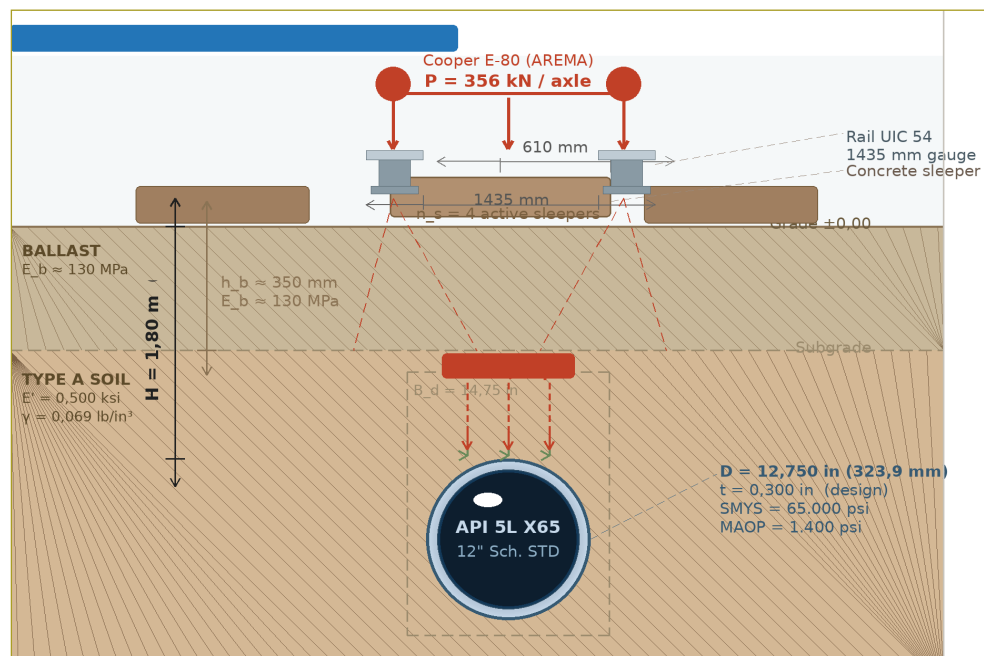
- Young's Modulus of steel (E_s): 3.00×10^7 psi.
- Poisson ratio (ν): 0.3.

Table 2
Pipeline characteristics for API RP 1102 railway analysis

Parameter	Value	Unit	Notes / Justification
Nominal outside diameter (D)	12.750	In	API 5L specification
Nominal wall thickness (t _{nom})	0.375	In	Schedule STD
Design wall thickness (t)	0.300	In	Conservative 20 % wall loss for corrosion allowance
Spec. Minimum Yield Strength (SMYS)	65.000	psi	API 5L X65
Max. Allowable Operating Pressure (MAOP)	1.400	psi	Typical for this multiproduct line
Design factor (F)	0.72	-	ASME B31.4 (ASME, 2019) (liquid hydrocarbons)
Joint efficiency factor (E)	1.00	-	ERW welds qualified per API 1104 (American Petroleum Institute [API], 2013)
Temperature derating factor (T)	1.00	-	Ambient operating temperature
Burial depth (cover)	1.80	m	minimum per API RP 1102 §4.5 for railroads
Soil type (API RP 1102)	Type A (cohesive, soft)	-	Most conservative for tropical clayey soils

Figure 2

Typical uncased pipeline-railway crossing — Yumbo-Buenaventura corridor. Cross-section A-A' per API RP 1102 §4.5. Type A cohesive soil · Cooper E-80 (Arema) $H = 1.80$ m (min.) API 5L X65 · Uncased.



- Coefficient of thermal expansion: $6.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$.
- Weld type: ERW.
- Installation / operation temperature: ambient (RT).
- Trench diameter (B_d): pipe diameter + 2 in = 14.75 in (per API RP 1102 recommendation).
- Soil type: A (most conservative — soft cohesive).
- Soil reaction modulus (E'): 0.500 ksi (recommended value for Type A soil).
- Elastic modulus of the soil subgrade (E_r): 10.0 ksi (recommended).
- Soil unit weight (γ): 0.069 lb/in³.
- Pavement/surface type: ballasted railway track (factor per Table 2, API RP 1102, railway branch).
- Burial depth (H): 1.80 m (minimum per §4.5 for railroad crossings).

The presence of the railway ballast layer (typically 300-450 mm of crushed stone, $E_{\text{ballast}} \approx 150\text{-}200$ MPa) provides additional load distribution above the native soil, marginally reducing peak vertical stress at the pipe crown relative to an equivalent direct surface load (Indraratna et al., 2011; International Union of

Railways [UIC], 2008; Selig & Waters, 1994). This effect is inherently captured in the API RP 1102 railway-specific stiffness and geometry factors (K_{Hr} , G_{Hr}), which were empirically calibrated for the ballasted track configuration. The installation and operating temperatures adopted in this study ($T_1 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C} = 54\text{ }^{\circ}\text{F}$) are consistent with the following normative and industry-practice basis:

- ASME B31.4-2019 §419.6.4 (ASME, 2019) establishes that the design temperature differential for buried liquid hydrocarbon pipelines shall be taken as the difference between the maximum anticipated operating temperature and the temperature at time of installation; for ambient-temperature installations in tropical highland Colombia (Yumbo-Buenaventura corridor, elevation 950-1 200 m a.s.l.), an installation temperature of $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ is representative of mean ground temperature at pipe depth (ISO 13623:2017 §6.4.3 cites 5-35 $^{\circ}\text{C}$ as the design range for most onshore environments).
- For heated or insulated liquid pipelines, API 579-1 / ASME FFS-1 §2.3.2 (API & ASME, 2016) sets the maximum operating skin temperature at $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, consistent with refined product handling below flash-point constraints.
- The resulting $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($54\text{ }^{\circ}\text{F}$) generates a thermal longitudinal contribution of $E_s \cdot \alpha \cdot \Delta T = 3.00 \times 10^7$

$\times 6.5 \times 10^{-6} \times 54 = 10.530\text{ psi}$, which represents an intermediate conservative value: a $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{F}$ (no thermal effect) would overstate S_{eff} by increasing S_2 toward $S_{Hr}/2$, while a $\Delta T > 100\text{ }^{\circ}\text{F}$ (oil pipelines at high temperature) would sharply increase S_2 . The value adopted is therefore both physically justified and conservative for the product and corridor analyzed.

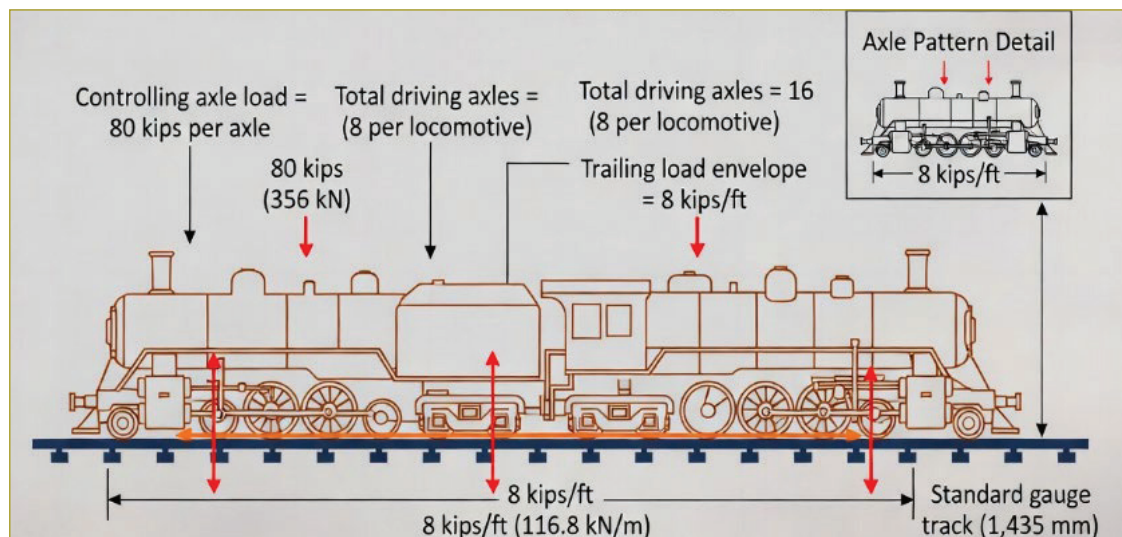
Railway Loading Models

The stress analysis is performed for two complementary railway loading scenarios: (1) the Cooper E-80 design load (Arema), which represents the standard envelope for heavy-haul freight railway design in the Americas and constitutes the appropriate basis for a conservative API RP 1102 assessment; and (2) the GE ES44AC diesel-electric locomotive, as the representative operational load case for Colombian freight railways.

Cooper E-80 Design Load (Arema). The Cooper E-80 loading standard, defined in the Arema Manual for Railway Engineering (Chapter 8), represents a train consisting of two steam locomotive configurations with 8 driving axles each plus a uniform distributed load of 8 kips/ft (116.8 kN/m) representing the trailing carload, as shown in Figure 3. The designation E-80 indicates that the controlling axle load is 80 kips (356 kN) per axle, distributed over the standard gauge track (1435 mm). Key parameters are summarized in Table 3.

Figure 3

Cooper E-80 representative load case in API RP 1102 railway-pipeline crossing analysis



Source: Adapted from Arema Manual, Chapter 8.

Table 3
Cooper E-80 design load parameters (Arema)

Parameter	Value	Unit	Notes
Standard controlling axle load	80	kips (356 kN)	Arema Chapter 8 reference load
Equivalent uniform distributed load (trailing cars)	8	kips/ft (116.8 kN/m)	Conservative trailing load envelope
Track gauge	1435	Mm	Standard gauge (applicable to Colombian railway projects)
Axle spacing (driving axles)	1.524-1.829	M	Typical driving axle spacing
Number of driving axles per locomotive unit	8	-	Classic Cooper E-80 locomotive
Rail load per wheel (half-axle)	40	kips (178 kN)	50 % of controlling axle load
Sleeper (crosstie) spacing	0.610	M	Standard concrete sleeper spacing, 40 in
Contact pressure at rail base (per tie)	Calculated	psi	See Section II.E

GE ES44AC Operational Load Case

The General Electric ES44AC (Evolution Series 4 400 hp AC-traction) diesel-electric locomotive is the predominant heavy-haul unit in Colombian freight operations, currently deployed by Fenoco S.A. on the

Cerrejón coal corridor and expected to be the reference locomotive for the Pacific and Caribbean corridor rehabilitation projects. Its operational parameters, relevant to the API RP 1102 load calculation, are presented in Table 4 and shown in Figure 4.

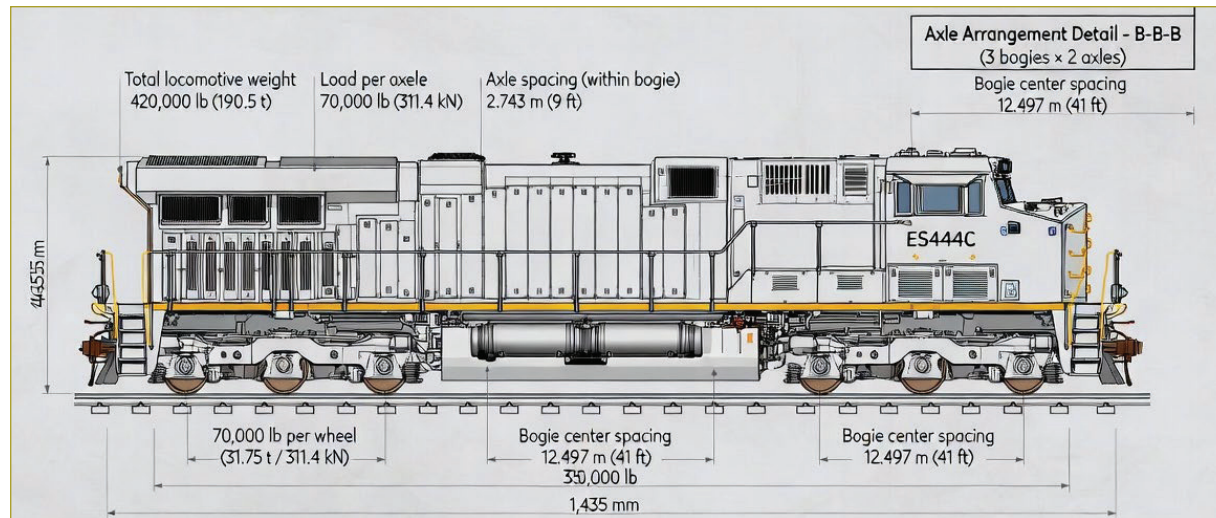
Table 4
GE ES44AC locomotive characteristics (operational load case)

Parameter	Value	Unit	Source / Notes
Total locomotive weight (operative)	420.000	lb (190.5 t)	GE Transportation official specifications (GE Transportation, 2024)
Number of axles	6	-	B-B-B wheel arrangement (3 bogies × 2 axles)
Load per axle (uniform distribution)	70.000	lb (31.75 t / 311,4 kN)	420.000 ÷ 6
Load per wheel (half-axle)	35.000	lb (15.9 t / 155.7 kN)	70.000 ÷ 2
Axle spacing within bogie	2.743	m (9 ft)	Standard GE ES44AC bogie
Bogie center spacing	12.497	m (41 ft)	GE ES44AC specifications
Maximum operating speed (freight)	112	km/h (70 mph)	FRA Class 4 track
Typical operating speed (Colombia freight)	40-80	km/h	Operational constraint — track condition

Note: The GE ES44AC was selected as the representative operational load case for Colombian freight railways solely for academic and didactic purposes. The methodology is transferable to any locomotive configuration. No commercial endorsement is intended.

Figure 4

General Electric ES44AC representative load case in API RP 1102 railway-pipeline crossing analysis



Source: Adapted from General Electric.

Railway Load Transmission: Ballast-Sleeper-Soil System

Unlike rubber-tired vehicles, railway wheel loads are transmitted to the subgrade through a discrete load path: wheel → rail → sleeper → ballast → subgrade. This approach is consistent with Arema Chapter 8 recommendations (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association [Arema], 2023) and with published analyses of load transfer for pipelines crossing beneath railroad tracks (Gabrielson, 2018). For a single axle load P (kips), the load distributed over n sleepers within the rail influence length is:

$$w_{\text{sleeper}} = \frac{P}{n_s \times L_s \times b_s} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Where: P = 40 kips (half of the 80-kip controlling axle, i.e., load per rail); n_s = number of sleepers effectively sharing the load (typically 3-5 for standard ballast conditions); L_s = sleeper length (m); b_s = sleeper bearing width (m).

For the Cooper E-80 controlling axle and standard concrete sleepers ($L_s = 2.60$ m, $b_s = 0.260$ m), with $n_s = 4$ (conservative), the equivalent surface pressure

at the sleeper-subgrade interface is: $w = 40 \text{ kips} / (4 \times 2.60 \text{ m} \times 0.260 \text{ m}) = 14.82 \text{ psi} (102.2 \text{ kPa})$. This value serves as the design surface pressure w for entry into API RP 1102 railway stress calculations. Table 5 presents the applied surface pressure summary for both loading cases, with the Cooper E-80 value governing the design.

API RP 1102 Methodology — Railway Branch (§4.5)

The overall analytical sequence followed in this study is summarized in the methodological flow diagram provided in the supplementary annex, which maps each stress component to the governing API RP 1102 equation, design chart, and acceptance criterion in their order of application. The notation and definition of every variable entering the calculation are consolidated in Table 6, and the principal modelling assumptions, together with their normative or physical justification and the direction of their conservatism, are listed in Table 7. Together these elements provide a fully traceable audit trail from input data to compliance verdict, so that each reported value can be reproduced directly from the cited standard.

Table 5
Applied surface pressure — railway loading cases

Loading Case	Axle Load (per rail, kips)	Active Sleepers (n_s)	w — Surface Pressure (psi)	w (kPa)	Governing?
Cooper E-80 — Controlling axle	40.0	4	14.82	102.2	YES (design)
GE ES44AC — Operational	35.0	4	12.97	89.4	NO (check case)

Table 6
Notation and definition of variables used in the API RP 1102 railway analysis

Symbol	Definition	Unit
$D, t / t_w$	Nominal outside diameter and design (corroded) wall thickness of the pipe	in
H	Burial depth, pipe crown to grade (1.80 m minimum per §4.5)	m / in
w	Applied design surface pressure at the sleeper-subgrade interface	psi / kPa
F	Design (location) factor per ASME B31.4 (0,72)	-
F_i	Dynamic impact factor (railway; not less than 1,50 per §4.5)	-
K_{Hr}, G_{Hr}	Railway stiffness and geometry factors for cyclic circumferential stress (§4.5)	-
$\Delta S_{Hr}, \Delta S_{Lr}$	Cyclic circumferential and longitudinal stress from railway live load	psi
S_{eff}	Combined effective (von Mises) stress, verified against $F \cdot E \cdot SMYS$	psi

Note: A complete symbol list, including the intermediate soil and geometry factors (B_e, E_e, K_{He}), is provided in the supplementary annex.

Table 7
Principal modelling assumptions and their justification

Assumption	Basis / justification	Conservatism
Type A (soft cohesive) soil	Most unfavorable API RP 1102 soil class; representative of tropical clayey subgrade	Conservative
Design wall thickness 0.300 in (20 % loss)	Corrosion allowance applied to 0.375 in nominal (Schedule STD)	Conservative
Cooper E-80 governing axle	Arema heavy-haul envelope, exceeds the operational GE ES44AC case	Conservative
4 effective sleepers (n_s)	Lower bound of the typical 3-5 range, maximizing surface pressure w	Conservative
$\Delta T = 30^\circ \text{C} (54^\circ \text{F})$	Per ASME B31.4 §419.6.4; intermediate value (see §II.C)	Intermediate

API Recommended Practice 1102 (API, 2007) provides two parallel analytical frameworks: one for highway crossings (§4.4) and one for railroad crossings (§4.5). The railway branch employs distinct stiffness and geometry factors specifically calibrated for the ballasted track configuration and for the higher and more concentrated railway loads. The key differences relative to the highway formulation — directly relevant to understanding the results presented in Section III — are summarized in Table 8. The methodology evaluates the following principal stress components and acceptance criteria per §4.6 of API RP 1102. The calculation follows the same sequential workflow used in Betancur Ríos and Rojas Cataño (2025), modified for the railway-specific factors:

- Calculate circumferential internal hoop stress (S_{Hi}) and verify against $F \times E \times SMYS$.
- Calculate circumferential stress due to ground (dead) load (S_{He}).
- Determine applied design surface pressure (w) for railway loading.
- Calculate cyclic circumferential stress from railway vehicle load (ΔS_{Hr}), using K_{Hr} and G_{Hr} .
- Calculate cyclic longitudinal stress from railway vehicle load (ΔS_{Lr}), using K_{Lr} and G_{Lr} .
- Calculate principal stresses S_1, S_2, S_3 and combined effective stress S_{eff} (von Mises criterion).
- Verify $S_{eff} \leq F \times E \times SMYS$ (overall compliance criterion).
- Assess fatigue: verify $\Delta S_{Hr} \leq S_{FL} \times F$ (girth weld) and $\Delta S_{Lr} \leq S_{FG} \times F$ (longitudinal weld).

Table 8*Key differences: API RP 1102 highway vs. railway branch*

Parameter	Highway Branch (§4.4)	Railway Branch (§4.5) [This study]
Minimum burial depth	1.20 m (non-paved) / 0.90 m (paved)	1.80 m (mandatory)
Design load standard	AASHTO HS-20 / site-specific	Cooper E-80 (Arema)
Stiffness factor — circumferential	K_{Hh} (road)	K_{Hr} (railway — higher values)
Geometry factor — circumferential	G_{Hh} (road)	G_{Hr} (railway)
Impact factor formulation	Table 2, API 1102 (speed-based)	Table 2, API 1102 — railway (higher)
Surface pressure level (this study)	~6,2 psi (highway, non-paved)	~14.8 psi (Cooper E-80)
Fatigue assessment	Often negligible	Required — high frequency

RESULTS AND DISCUSSION

Circumferential Stress Due to Internal Pressure (S_{Hi})

The circumferential (hoop) stress from internal pressure is calculated per Eq. (2). The calculation depends on pipeline geometry and operating pressure:

$$S_{Hi} = \frac{PD}{2t_w} \leq F \cdot E \cdot SMYS \quad [\text{Eq. 2}]$$

With data from Table 2, then:

$$S_{Hi} = \frac{1400 \times 12.750}{2 \times 0.300} = 29.750 \text{ psi}$$

Verification:

$$S_{Hi} = 29750 \text{ psi} \leq F \cdot E \cdot SMYS = 46.800 \text{ psi} \quad \checkmark$$

Circumferential Stress Due to Ground (Dead) Load (S_{He})

The circumferential stress from the permanent soil overburden is calculated per Eq. (3), adapted for the increased burial depth $H = 1.80$ m required by API RP 1102 §4.5 for railway crossings:

$$S_{He} = K_{He} \cdot B_e \cdot E_e \cdot \gamma \cdot D \quad [\text{Eq. 3}]$$

Input values for the railway case with $H = 1.80$ m and soil type A:

- $H = 1.80 \text{ m} = 70.9 \text{ in}$ (burial depth, pipe crown to grade — minimum per §4.5)
- K_{He} (Refer to Figure 5 - API RP 1102) = 1984
- $t_w/D = 0.024$
- $E' = 0.500 \text{ ksi}$
- B_e (Refer to Figure 6 - API RP 1102) = 1.06
- $B_d = D + 2 \text{ in} = 14.75 \text{ in}$ (trench diameter)
- $H/B_d = 70.9 / 14.75 = 4.81$
- $t_w/D = 0.300 / 12.750 = 0.024$
- $H/B_d = 4.81$
- E_e (Refer to Figure 7 - API RP 1102) = 1.13
- $B_d/D = 1.16$
- $g = 0.069 \text{ lb/in}^3$

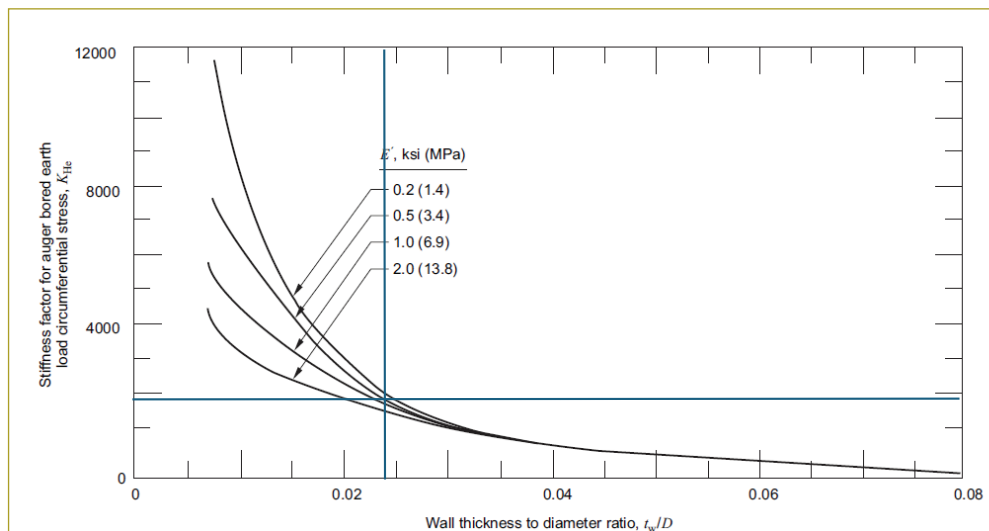


Figure 5
Stiffness Factor for Circumferential Stress of Ground Load, K_{He} (Figure 3 of API RP 1102)

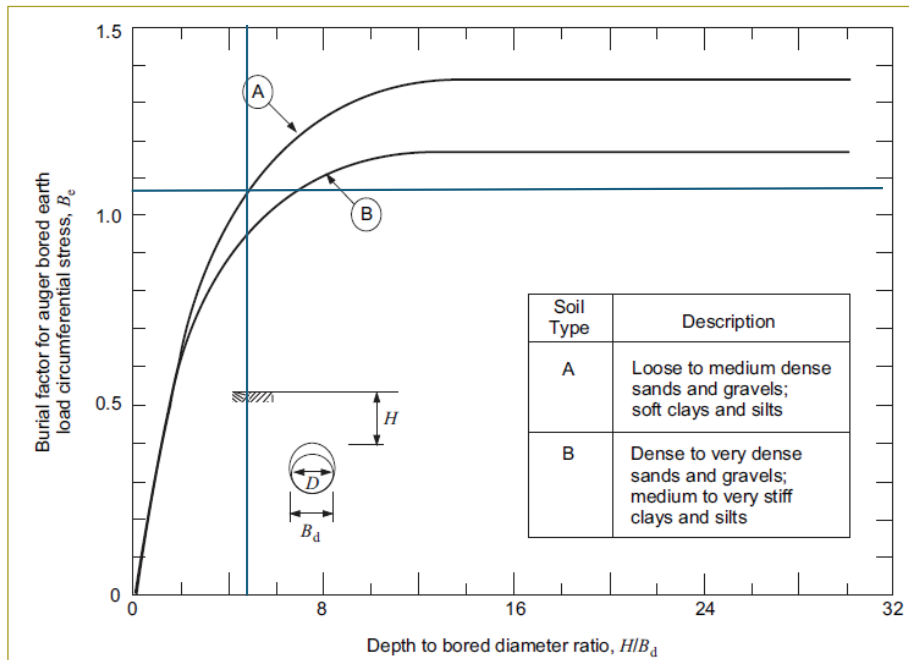


Figure 6
Coverage Factor (Burial Load Factor) for Circumferential Stress of Ground Load, B_e (figure 4 of API RP 1102)

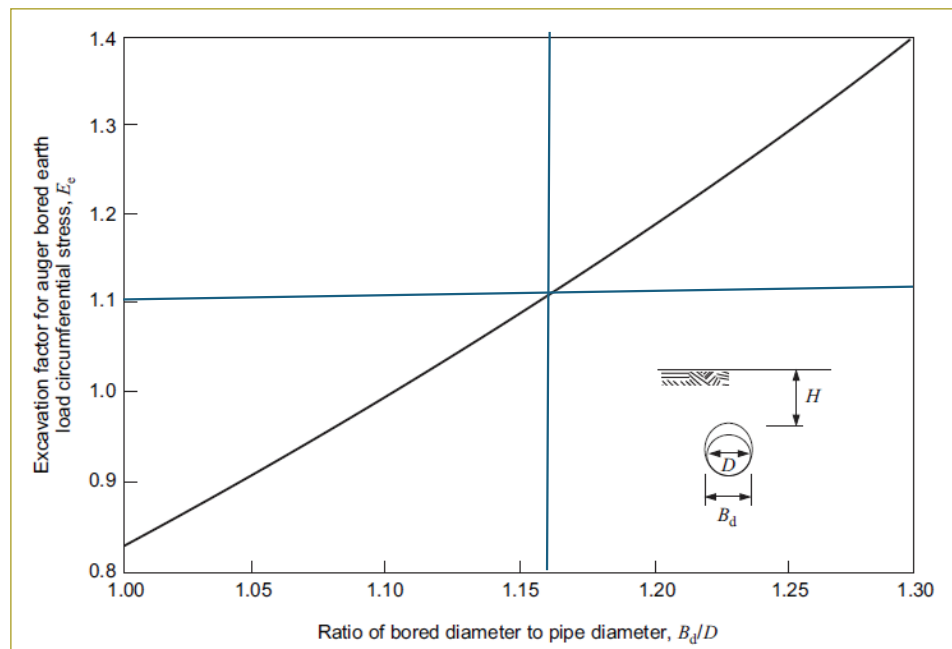


Figure 7
Excavation (Trench) Load Factor for Circumferential Stress of Ground Load, E_e (Figure 5 of API RP 1102)

Result:

$$S_{He} = 1984 \times 1.06 \times 1.13 \times 0.069 \times 12.750 = 2089 \text{ psi (14,4 MPa)}$$

Note: The greater burial depth mandated by API RP 1102 §4.5 for railroad crossings ($H = 1.80 \text{ m}$) relative to the non-paved highway minimum ($H = 1.20 \text{ m}$) results in higher soil overburden stress S_{He} , partially offsetting the live-load attenuation benefit of increased cover depth.

Applied Surface Pressure (w) — Cooper E-80

From the analysis presented in Section II.E, the governing design surface pressure for the Cooper E-80 controlling axle, calculated at the sleeper-subgrade interface, is:

$$w = 14.82 \text{ psi (102.2 kPa - API RP 1102 §4.5 railroad loading)}$$

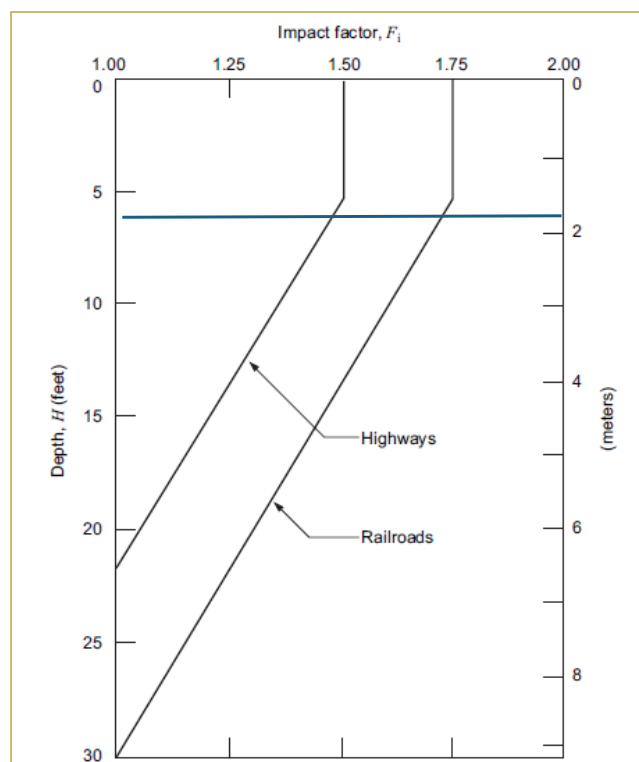
Impact Factor (F_i) — Railway Case

The dynamic impact factor for railway crossings is determined per Figure 7 of API RP 1102 (Figure 8 in this document), as a function of the burial depth H . For the railway case, the API RP 1102 standard specifies that the recommended impact factor for railway crossings shall not be taken as less than 1.50 regardless of depth, reflecting the inherently higher dynamic amplification of railway loads relative to highway loads. For $H = 1.80$ m (approximately 5.906 ft) and a representative operating speed of 80 km/h (50 mph) for the Colombian freight corridor context:

$$F_i = 1.72 \text{ (from Figure 7 of API RP 1102 §4.5, railroad crossings)}$$

Note: For higher operating speeds or shallow burial depths, F_i increases. At 112 km/h (70 mph) — the maximum freight speed of the GE ES44AC — and $H = 1.80$ m, $F_i \approx 1.72$ per API RP 1102. The conservative value $F_i = 1.72$ is used for the primary design calculation; $F_i = 1.75$ is evaluated in the sensitivity analysis (Section IV.C).

Figure 8
Recommended Impact Factor F_i vs. Burial Depth (railroad crossings) (Figure 7 of API RP 1102)



Cyclic Circumferential Stress from Railway Load (ΔS_{Hr})

The cyclic circumferential stress induced by railway live loads is calculated per Eq. (4), using railway-specific factors from API RP 1102 §4.5:

$$\Delta S_{Hr} = K_{Hr} \cdot G_{Hr} \cdot N_H \cdot F_i \cdot w \quad [\text{Eq. 4}]$$

Input values:

- K_{Hr} : Stiffness factor for cyclic circumferential stress — railway (Refer to Figure 9 - API RP 1102) = 305
- $t_w/D = 0.024$
- $E_r = 10.0$ ksi
- G_{Hr} : Geometry factor for cyclic circumferential stress — railway (Refer to Figure 10 - API RP 1102) = 0.98.
- N_H : Axle configuration (single track) factor for Cooper E-80 = 1.0.
- F_i : Impact factor = 1.72
- w : Applied surface pressure = 14.82 psi

$$\text{Result: } \Delta S_{Hr} = 7609 \text{ psi (52.5 MPa)}$$

For the case of double track for cyclic circumferential stress, the factor $N_H = 1.12$ (Taken from 4.7.2.2.3 Railroad Cyclic Stresses API RP 1102). With this, $\Delta S_{Hr} = 8522$ psi (58.8 MPa).

Note: The magnitude of ΔS_{Hr} reflects the concentrated load transmission of steel wheels on rail, amplified by the railway-specific stiffness factor $K_{Hr} = 305$ and the dynamic impact factor $F_i = 1.72$. The circumferential fatigue criterion $\Delta S_{Hr} / (\text{SFG} \cdot F) = 88.1\%$ is the tightest compliance margin in this analysis.

Cyclic Longitudinal Stress from Railway Load (ΔS_{Lr})

The cyclic longitudinal stress is calculated per Eq. (5):

$$\Delta S_{Lr} = K_{Lr} \cdot G_{Lr} \cdot N_L \cdot F_i \cdot w \quad [\text{Eq. 5}]$$

Input values:

- K_{Lr} : Stiffness factor for cyclic longitudinal stress — railway (Refer to Figure 11 - API RP 1102) = 300.
- $t_w/D = 0.024$.
- $E_r = 10.0$ ksi.
- G_{Lr} : Geometry factor for cyclic longitudinal stress — railway (Refer to Figure 12 - API RP 1102) = 0.98.

- N_L : Single or double rail track factor for cyclic longitudinal stress. For single track = 1.00
- $F_i = 1,72$
- $w = 14,82$ psi

For the case of double track for cyclic longitudinal stress, the factor $N_L = 1.02$ (Taken from 4.7.2.2.3 Railroad Cyclic Stresses API RP 1102). With this, $\Delta S_{Lr} = 7644$ psi (52.7 MPa).

Result: $\Delta S_{Lr} = 7494$ psi (51.7 MPa)

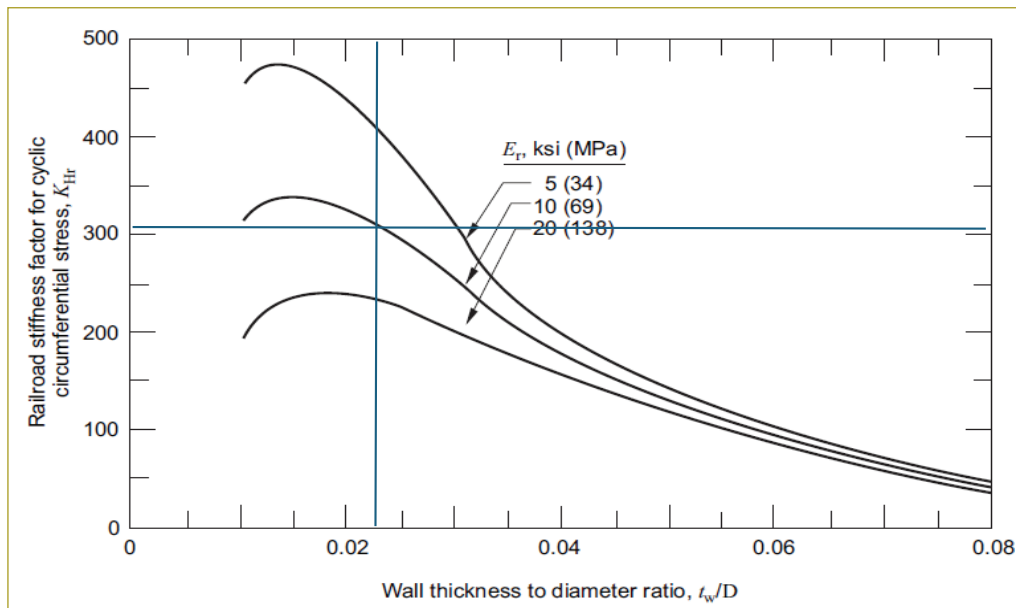


Figure 9
Stiffness Factor for Cyclic Circumferential Stress of Railway Load, K_{Hr} (Figure 8 of API RP 1102)

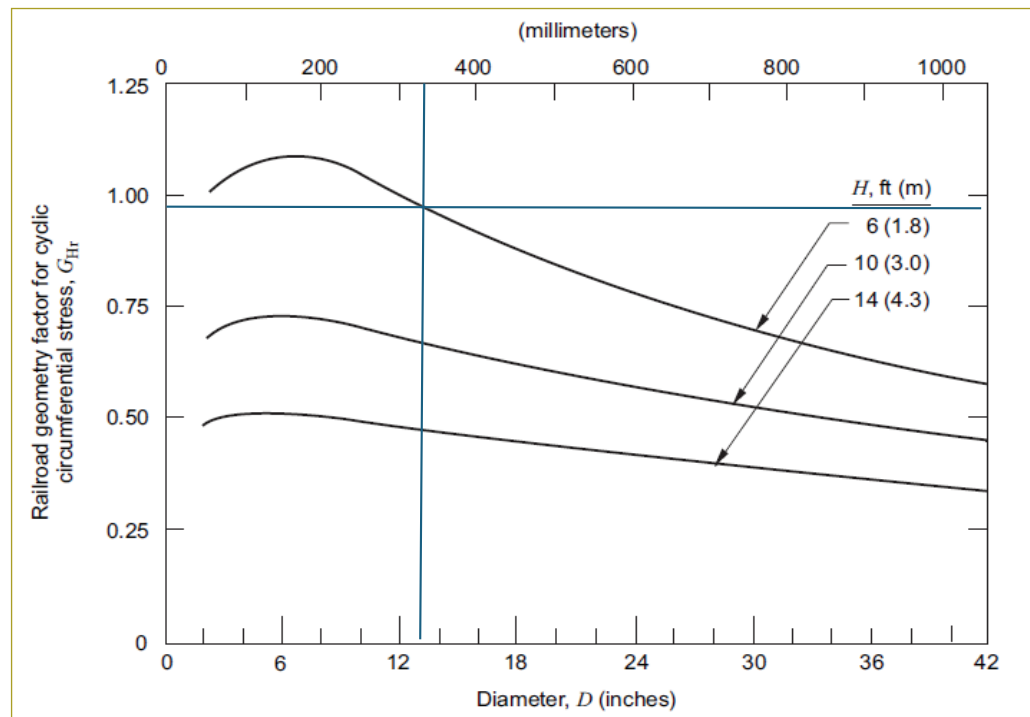


Figure 10
Geometry Factor for Cyclic Circumferential Stress of Railway Load, G_{Hr} (Figure 9 of API RP 1102)

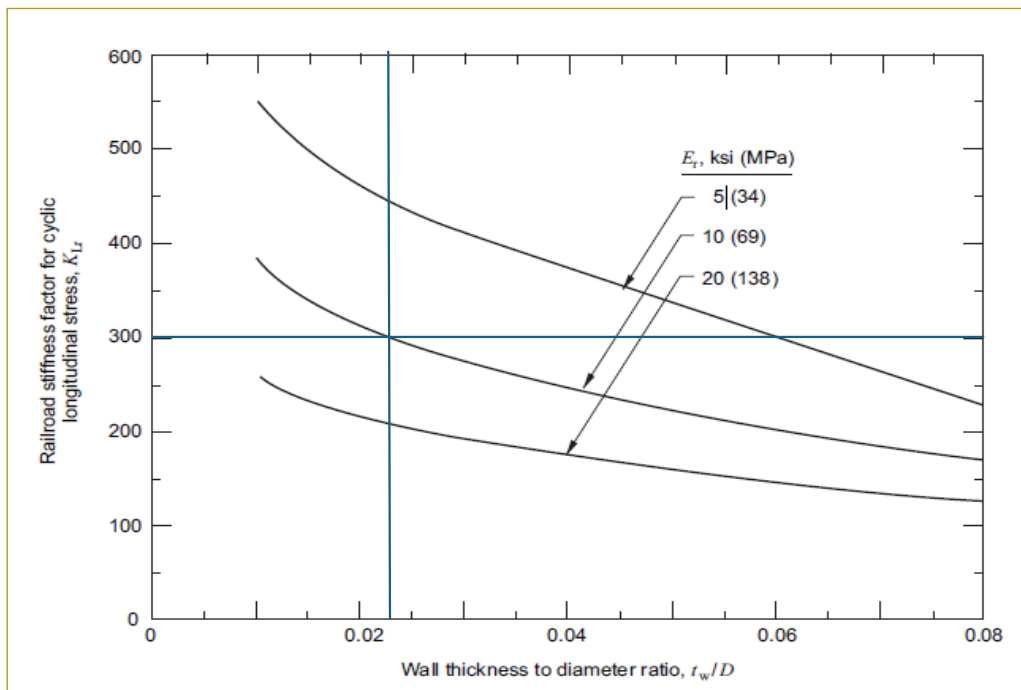


Figure 11
Stiffness Factor for Cyclic Longitudinal Stress of Railway Load, K_{Lr} (Figure 11 of API RP 1102)

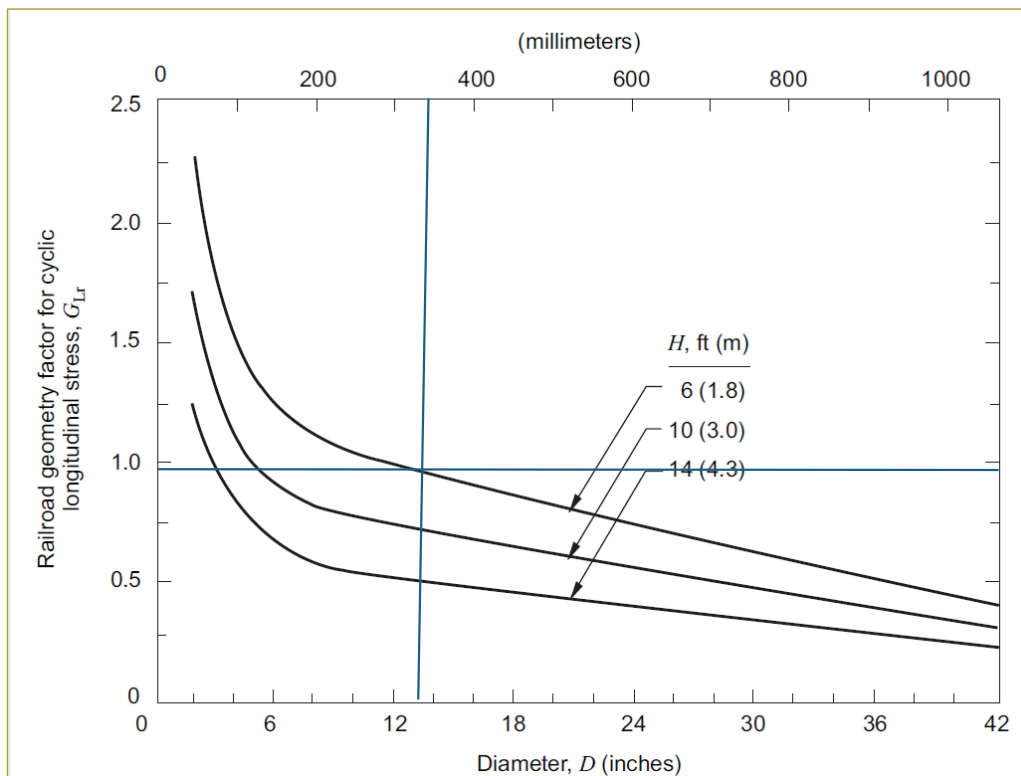


Figure 12
Geometry Factor for Cyclic Longitudinal Stress of Railway Load, G_{Lr} (Figure 12 of API RP 1102)

Combined Effective Stress (S_{eff}) — Von Mises Criterion

The combined effective stress is computed from the three principal stresses S_1 , S_2 , and S_3 per the von Mises criterion (Eq. 6), as specified in API RP 1102 §4.6:

$$S_{\text{eff}} = \sqrt{\left[\frac{1}{2} \left[(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2 \right] \right]} \quad [\text{Eq. 6}]$$

The three principal stresses for single track are:

$$S_1 = S_{He} + \Delta S_{Hr} + S_{Hi} = 2089 + 7609 + 29.750 = 39.448 \text{ psi (272,2 MPa)}$$

$$S_2 = \Delta S_{Lr} - E_s \times \alpha \Delta T + 9(S_{He} + S_{Hi}) = 7326 \text{ psi (50,5 MPa)}$$

$$S_3 = -\text{MAOP} = -1400 \text{ psi (-9,65 MPa)}$$

With the following data for S_2 calculation:

- $E_s = 3,00 \times 10^7 \text{ psi}$.
- $\alpha = 6,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$.

- $T_1 = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ (installation temperature).
- $T_2 = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ (maximum operating temperature).

Applying Eq. (6) for single track: $S_{\text{eff}} = 37259 \text{ psi}$.

$$\text{Compliance verification: } S_{\text{eff}} = 37.259 \text{ psi} \leq F \times E \times SMYS = 0.72 \times 1.00 \times 65.000 = 46.800 \text{ psi} \checkmark$$

Applying Eq. (6) for double track: $S_{\text{eff}} = 38106 \text{ psi}$.

$$\text{Compliance verification: } S_{\text{eff}} = 38.106 \text{ psi} \leq F \times E \times SMYS = 0.72 \times 1.00 \times 65.000 = 46.800 \text{ psi} \checkmark$$

The combined effective stress represents 79,6 % of the allowable limit for single track, rising to 81,4 % for the double track configuration, both confirming structural compliance with API RP 1102 under Cooper E-80 design railway loading at $H = 1.80 \text{ m}$ burial depth. Table 9 presents a summary of all stress components and compliance ratios for the Cooper E-80 railway case.

Table 9
Stress results summary — Cooper E-80 railway case (API RP 1102 §4.5, Yumbo-Buenaventura)

Stress component	Value (psi)	Value (MPa)	% of allowable	Governing criterion
Single track				
S_{Hi} — internal hoop (SHi)	29.750	205.1	63.6 %	Static — dominant
S_{He} — ground dead load	2.089	14.4	4.5 %	Static
ΔS_{Hr} — cyclic circumf. (live)	7.609	52.5	16.3 %	Static + Fatigue
ΔS_{Lr} — cyclic longit. (live)	7.494	51.7	16.0 %	Static + Fatigue
$S_1 = S_{He} + \Delta S_{Hr} + S_{Hi}$	39.448	272.0	84.3 %	
S_2 — longitudinal principal	7.326	50.5	18.6 %	
$S_3 = -\text{MAOP}$	-1.400	-9.65		
S_{eff} (von Mises)	37.259	257.1	79.6 %	Static compliance $\checkmark$
Allowable: $F \times E \times SMYS$	46.800	322.7	100 %	Limit
ΔS_{Hr} fatigue criterion	7.609	52.5	88.1 %	$\leq 8.640 \text{ psi} \checkmark$
ΔS_{Lr} fatigue criterion	7.494	51.7	45.3 %	$\leq 16.560 \text{ psi} \checkmark$
Double track				
S_{eff} (von Mises)	38.106	262.7	81.4 %	Static compliance $\checkmark$
Note: Allowable = $F \times E \times SMYS = 0.72 \times 1.00 \times 65.000 = 46.800 \text{ psi}$. Cooper E-80, $H = 1.80 \text{ m}$, $t = 0.300 \text{ in}$, Type A soil. The circumferential fatigue criterion ($\Delta S_{Hr} = 88.1 \text{ %}$ of limit) is the tightest compliance margin.				

Fatigue Assessment (§4.7 API RP 1102)

API RP 1102 §4.7 requires explicit fatigue verification for railway crossings, given the high frequency of repeated loading inherent to rail operations. Two acceptance criteria must be satisfied:

$$\Delta S_{Hr} \leq S_{FG} \cdot F \quad [\text{Eq. 7}]$$

$$\Delta S_{Lr} \leq S_{FL} \cdot F \quad [\text{Eq. 8}]$$

Where S_{FG} and S_{FL} are the fatigue strength limits for circumferential (girth) and longitudinal welds respectively, as defined in Table 3 of API RP 1102:

- S_{FG} (fatigue strength, circumferential/girth weld): 12.000 psi (Table 3, API RP 1102, ERW pipe).
- S_{FL} (fatigue strength, longitudinal weld): 23.000 psi (Table 3, API RP 1102, ERW pipe).
- $S_{FG} \times F = 12\,000 \times 0,72 = 8.640$ psi.
- $S_{FL} \times F = 23\,000 \times 0,72 = 16.560$ psi.

Verification:

$$\Delta S_{Hr} = 7609 \text{ psi} \leq S_{FG} \cdot F = 8640 \text{ psi} \quad \checkmark$$

$$\Delta S_{Lr} = 7494 \text{ psi} \leq S_{FL} \cdot F = 16.560 \text{ psi} \quad \checkmark$$

The longitudinal criterion is satisfied with ample margin (45 %), while the circumferential criterion is near-critical (88.1 %). Even under intensive freight traffic conditions (50 train passages/day $\times$ 365 days/year $\times$ 30-year design life = 547.500 loading cycles), the cumulative fatigue damage index remains negligible ($D \approx 0.0055 \ll 1,0$). The cumulative fatigue damage index (Palmgren-Miner rule, API RP 1102 §4.7) is computed as follows:

The near-critical utilization of the circumferential fatigue criterion ($\Delta S_{Hr} = 88.1$ % of limit) warrants a quantitative fatigue life assessment. Using the Palmgren-Miner linear cumulative damage rule and the S-N relationship implicit in API RP 1102 Table 3:

$$D_{cumulative} = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_{applied}}{N_{endurance}} \leq 1,0 \quad [\text{Eq. 9}]$$

For the governing circumferential weld (girth weld):

- Applied cycles over 30-year design life: $n_i = 365 \text{ days} \times 30 \text{ yr} \times 50 \text{ passages/day} = 547.500$ cycles (conservative — Colombian freight corridors).
- Endurance limit per API RP 1102 Table 3 (ERW, girth weld): $N_i > 10^8$ cycles at $\Delta S \leq S_{FG} \cdot F = 8.640$ psi.
- Miner index: $D = 547.500/10^8 = 0.0055 \ll 1,0 \quad \checkmark$

However, the narrow margin between ΔS_{Hr} and the fatigue endurance limit (12 % remaining) implies that fatigue governs before the static S_{eff} criterion under two foreseeable deterioration scenarios:

- a) Wall thickness loss > 15 % (which increases S_{Hi} and hence S_1 and indirectly elevates ΔS_{Hr} through increased hoop stiffness).
- b) Axle loads exceeding Cooper E-80 by more than 10 % (which increases w and therefore ΔS_{Hr} proportionally).

For these scenarios, a dedicated fatigue crack growth assessment per API 579-1/ASME FFS-1 Part 14 is recommended.

Benchmarking against Finite-Element and Dual-Standard Studies

Finding

The analytical API RP 1102 §4.5 procedure applied here yields a combined effective stress at 79.6-81.4 % of the allowable limit and a near-critical circumferential fatigue ratio of 88.1 %, with the circumferential (girth-weld) criterion governing. In the absence of a site-specific finite-element model for the present corridor, the credibility of these analytical results is assessed by benchmarking against independent studies that directly compared the API RP 1102 closed-form method with numerical and alternative-standard approaches for buried-pipeline crossings.

Comparison

Joshi et al. (2020) cross-checked API RP 1102 against a full three-dimensional finite-element model and an analytical formulation for representative crossings, reporting that the API RP 1102 procedure is consistently conservative, with the standard generally over-predicting the cyclic stress relative to FEM by a margin commonly in the range of roughly 10-25 % for typical

burial and load configurations. Al-Ghamdi et al. (2023) reached a comparable conclusion when contrasting the American (API RP 1102) and European response methods, finding the API procedure to lie on the safe side of the numerically resolved soil-pipe response.

Explanation

This systematic conservatism arises because the empirically calibrated stiffness and geometry factors of §4.5 envelope the soil-structure interaction rather than resolving the actual three-dimensional load redistribution that an FEM captures; the ballast layer's additional dispersion is only partially credited. The 79.6-81.4 % utilization reported here should therefore be read as an upper-bound estimate, and a dedicated FEM would be expected to return a lower effective stress.

Implication

For screening and regulatory-compliance purposes the analytical result is adequate and appropriately conservative; however, where the compliance margin is tight — as in the near-critical fatigue ratio or under combined wall-loss scenarios — a corridor-specific finite-element validation is warranted to avoid unnecessarily penalizing the asset. A full FEM treatment of this crossing, incorporating the explicit ballast-sleeper-subgrade stack, is identified as the subject of ongoing work by the authors.

Compliance Verification and Engineering Interpretation

The results demonstrate that the Yumbo-Buenaventura 12-in API 5L X65 pipeline, when subjected to Cooper E-80 railway design loading at the minimum API RP 1102-mandated burial depth of 1.80 m, remains fully compliant with all acceptance criteria — with a combined effective stress of 79.6-81.4 % of the allowable limit. This compliance is achieved primarily because of two interconnected factors: the mandatory 1.80 m burial depth provides a significantly longer stress-dispersion path than the 1.20 m minimum applicable to non-railway surface loads; and the large-diameter, latively thick-walled X65 pipe has inherently high resistance to external loading, with internal pressure ($S_{Hi} = 29.750$ psi) representing approximately 75 % of S_1 , the dominant principal stress.

The dominant contribution to S_{eff} is the internal hoop stress S_{Hi} (75 % of S_1), reflecting the fundamental primacy of operating pressure in pipeline integrity

management. The live-load terms ΔS_{Hr} and ΔS_{Lr} , while significant in absolute terms, are secondary to S_{Hi} and S_{He} . Critically, the fatigue circumferential criterion ($\Delta S_{Hr} = 88.1$ % of $SFG \cdot F$) constitutes the tightest compliance margin and should be treated as the governing design criterion for scenarios involving wall loss or increased axle loads.

From a practical engineering and regulatory perspective, these results have important implications for Colombia's railway development program. They confirm that existing buried pipelines at the minimum API RP 1102 burial depth of 1.80 m can safely coexist with heavy-haul freight railways operating under Cooper E-80 loading, provided that the pipeline is in sound mechanical condition (wall loss < 20 %) and the *MAOP* is maintained within the design limits. However — as quantified in the sensitivity analysis below (Table 10), these conclusions are not universally applicable: burial depth shortfalls and progressive corrosion can transform a compliant crossing into a non-compliant one, and the fatigue assessment, while comfortable, should be revisited for higher-frequency operations.

Parametric Sensitivity Analysis

A parametric sensitivity analysis was performed to identify the governing variables for pipeline integrity at this crossing. The analysis varies one parameter at a time while holding all others at their base-case values (Table 10), focusing on variables with the greatest practical relevance for the Colombian railway development context.

The sensitivity analysis yields four key conclusions:

- Wall-thickness loss remains by far the most critical variable. A 38 % reduction in wall thickness ($t_w \leq 0.233$ in) triggers non-compliance with API RP 1102, establishing this as the governing limit state. The critical threshold corresponds to a remaining wall of 62 % of nominal, well within the range detectable by inline inspection (ILI) techniques.
- Operating below the minimum burial depth of 1.80 m is not merely a regulatory violation — it generates stress levels that can approach the allowable limit even for the base-case wall thickness.
- Speed effects (impact factor) and axle load variations within the Cooper E-80 envelope have a secondary but non-negligible influence (~6-8 % increase in S_{eff}

Table 10
Sensitivity analysis — railway loading, Cooper E-80, API RP 1102 Compliance

Parameter Varied	Base Case	Tested Range	(psi)	Stress Ratio (% of allowable)	API RP 1102	Critical Threshold
Wall thickness loss (corrosion)	20 %	0 % → 45 %	37.259 → 46.100	80 % → 99 %	YES → NO	≥ 38 % loss ($t \leq 0.233$ in)
Burial depth (cover)	1.80 m	1.20 m → 2.50 m	37.800 → 33.500	81 % → 72 %	YES	< 1.20 m (non-compliant with §4.5 minimum)
Impact factor F_i (operating speed)	1.72	1.72 → 2.20	37.259 → 39.900	80 % → 85 %	YES	No critical threshold within plausible range
Surface pressure (axle load overload)	14.82 psi (E-80)	12 psi → 20 psi	35.000 → 38.500	75 % → 82 %	YES	No critical threshold within E-80 envelope
Fatigue — high frequency	Negligible	200 trains/day × 30 yr	$\Delta S < 500$ psi	$D_{fat} < 0.01$	YES	Fatigue not governing for X65 ERW
Combined worst case		38 % loss + $F_i=1.75$ + 1.80 m depth	46.500	99 % (marginal)	YES (barely)	Requires active mitigation

from base to worst case); and (4) fatigue remains non-governing for this pipeline grade and geometry under all realistic railway traffic scenarios, though detailed monitoring is recommended for long-duration, high-density operations.

These findings align with the conservatism patterns reported by Joshi et al. (2020) and Al-Ghamdi et al. (2023) for API RP 1102 applied to cohesive soils, where corrosion and cover loss consistently emerge as the predominant risk factors in pipeline-vehicle crossing assessments.

Limitations and Applicability of the API RP 1102 Railway Branch

The validity of the present results is bounded by the explicit scope of the API RP 1102 §4.5 closed-form method and by the modelling choices summarized in Table 7. Five limitations should be borne in mind when transferring these conclusions to other crossings.

First, the procedure applies to *uncased* crossings only; where a casing is mandated by the concession framework, the cased-crossing provisions of §4.8 must be substituted. Second, the analysis assumes a straight, single pipe crossing the track at or near the recommended angle; oblique crossings, bends, mechanical fittings, and pipe-on-pipe interactions fall outside the calibrated charts. Third, the empirical stiffness and geometry

factors were derived for the soil classes and burial-depth ranges tabulated in the standard; the Type A (soft cohesive) idealization adopted here is conservative but does not capture site-specific stratification, water-table effects, or non-uniform bedding. Fourth, the load model is the Cooper E-80 quasi-static envelope amplified by a single dynamic impact factor; it does not represent train-track resonance, individual bogie sequencing, or rail-defect impact, which require a dynamic or finite-element treatment. Fifth, the method addresses mechanical stress and high-cycle fatigue but not time-dependent degradation mechanisms (corrosion growth, environmentally assisted cracking), which must be handled through the operator's integrity-management program. Within these bounds, and given the documented conservatism relative to FEM (§IV.A), the method is appropriate as a transparent, auditable screening and compliance tool for the Colombian railway-crossing portfolio.

Colombian Regulatory Implications

In the Colombian regulatory context, API RP 1102 is already of mandatory application, although not through a single dedicated instrument. For liquid-hydrocarbon pipelines such as the one analyzed here, the governing design code ASME B31.4 §402.8 ("Stresses From Road and Rail Traffic Loads") explicitly requires that the total effective stress in pipe installed under railroads or high-

ways without casing be calculated in accordance with API RP 1102, and that the cyclic stress components be checked for fatigue (ASME, 2019). This mandate is reinforced at the national level: the hydrocarbon-sector framework (Decreto 1073 de 2015, Ministerio de Minas y Energía, 2015) and, most recently, Resolution MME 00574 de 2026 (Ministerio de Minas y Energía, 2026), the Reglamento de Transporte por Oleoductos, whose article on technical standards requires adherence to internationally recognized standards and expressly names API), and, for gas pipelines, the Colombian standard NTC 3728 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec], 2011), which in its special-crossings clause (§5.5.1) directs special works to follow the requirements of API RP 1102, while its design-factor table (Table 2B) and design-load list (§3.2.2.1) separately distinguish railway crossings and external-load effects; this technical standard is complemented by the Reglamento Técnico de Gasoductos (Ministerio de Minas y Energía, 2024). Against this backdrop, the present findings carry three concrete implications.

First, although the reference to API RP 1102 is well established, the national instruments do not specify how the railway branch (§4.5) in particular is to be applied to high-density urban crossings, nor do they prescribe a uniform fatigue-assessment and passage-frequency requirement; these are presently resolved on a project-by-project basis through concession-specific specifications. Explicitly designating §4.5 as the reference method, with an associated fatigue check per §4.7, would close this specification gap and give both the pipeline operator (Cenit/Ecopetrol) and the railway concessionaire (under ANI) a common, auditable acceptance criterion — consistent with the fatigue requirement already mandated by ASME B31.4 §402.8. Second, because the governing criterion identified here is the girth-weld fatigue limit rather than the static stress, this regulatory specification is not a formality but a safety-relevant gap. Third, the co-responsibility for crossing integrity sits across two separately regulated sectors (energy, under the Ministerio de Minas y Energía and the Superintendencia de Industria y Comercio; transport, under ANI and Inviás); a formal inter-agency protocol assigning monitoring and re-evaluation duties — triggered by changes in MAOP, rolling stock, or burial depth — would close the principal coordination gap exposed by this analysis.

CONCLUSIONS

The analysis, conducted in full accordance with API RP 1102 §4.5 (railway crossings) for the Yumbo-Buenaventura 12-in API 5L X65 pipeline under Cooper E-80 design loading and GE ES44AC operational loading, yields the following conclusions:

1. Structural compliance under Cooper E-80 design loading. The pipeline, buried at the mandatory minimum depth of 1.80 m, satisfies all API RP 1102 acceptance criteria with a combined effective stress of 37.259 psi — 79.6 % of the allowable limit (= 46.800 psi) for single track and 81.4 % for double track, both confirming that the pipeline corridor is structurally compatible with heavy-haul freight railway operations under controlled conditions.
2. Fatigue criterion near-critical — compliance with limited margin. $\Delta S_{Hr} = 7\,609$ psi satisfies $\Delta S_{Hr} \leq SFG \times F = 8\,640$ psi (88.1 % utilized) and constitutes the tightest compliance margin; $\Delta S_{Lr} = 7\,494$ psi satisfies $\Delta S_{Lr} \leq SFL \times F = 16\,560$ psi (45 % utilized). Any combination of wall loss ≥ 15 %, axle loads exceeding Cooper E-80 by ≥ 10 %, or burial depth below 1.80 m would drive ΔS_{Hr} beyond the fatigue endurance limit, requiring a dedicated assessment per API 579-1/ASME FFS-1 Part 14.
3. Internal pressure remains the dominant stress mechanism. The operating pressure contribution ($S_{Hi} = 29.750$ psi) represents approximately 75 % of the dominant principal stress $S_i = 39.448$ psi. External railway live loads contribute < 4 % to total stress, underscoring that pressure control and corrosion management remain the primary drivers of long-term pipeline integrity at railway crossings.
4. Wall thickness loss is the dominant risk factor. Sensitivity analysis demonstrates that a 38 % reduction in wall thickness (from $t_{nom} = 0.375$ in to $t_w \leq 0.233$ in) drives S_{eff} to the allowable limit, establishing wall condition as the primary determinant of crossing integrity. This finding reinforces the mandatory requirement for ILI-based integrity verification before any railway construction or rehabilitation work over the pipeline.

Under the analyzed conditions — Cooper E-80 design loading, minimum 1.80 m burial depth, API 5L X65 pipeline with 20 % corrosion allowance, and

MAOP = 1400 psi — the pipeline exhibits safe, stable behavior fully compliant with API RP 1102. The results establish that Colombia's emerging railway network can coexist safely with existing buried hydrocarbon infrastructure, provided that the mandatory burial depth, integrity management protocols, and engineering oversight prescribed herein and in API RP 1102 are rigorously implemented.

RECOMMENDATIONS

Railway crossing design and management

Minimum burial depth — non-negotiable

A minimum burial depth of 1.80 m (pipe crown to finished grade, including ballast subgrade) shall be maintained throughout the full influence zone of the railway crossing. Any reduction below this value shall trigger immediate re-evaluation per API RP 1102 §4.5 and, if necessary, installation of reinforced concrete protective slabs or steel casing.

Pre-crossing integrity verification (API, 2019).

Prior to authorizing any railway construction or rehabilitation work over an existing pipeline, the mechanical integrity of the affected segment shall be confirmed through: direct visual inspection via excavation at all planned crossing points; review of In-Line Inspection (ILI) smart-pig data (MFL, UT, geometry tools) within the previous five years; and NDT verification if anomalies are suspected. The pipeline shall be free of corrosion metal loss $\geq 30\%$ of nominal wall thickness, dents $> 6\%$ of diameter, or any mechanical damage, before railway construction may proceed.

Crossing geometry

The railway shall cross the pipeline at an angle as close to 90° as practicable (minimum 70° per API RP 1102 §4.3.1) to minimize the length of pipeline exposed to railway live loads and to simplify the API RP 1102 stress calculation. Skewed crossings with angles $< 70^\circ$ require supplementary finite-element analysis.

Casing pipe consideration

While API RP 1102 and modern practice in many jurisdictions have moved away from mandatory casing for non-carrier pipe scenarios (due to the risk of annular corrosion under casing), casing pipes may be required by specific Colombian regulatory or concession framework

provisions. Where casing is installed, API RP 1102 §4.8 procedures for cased crossings shall be applied; where uncased crossings are permitted, the present methodology (§4.5, uncased) applies directly.

MAOP control and re-evaluation

Any increase in operating pressure above the MAOP used in the API RP 1102 analysis (1400 psi for this study) shall require a full re-evaluation of all stress components and compliance criteria before implementation.

Operational and monitoring

Integrated monitoring protocol

A joint monitoring protocol shall be established between the pipeline operator and the railway concessionaire, including regular topographic surveys of burial depth in the crossing zone; periodic above-ground corrosion survey (ACVG, DCVG, or CIPS) along the crossing influence zone; vibration monitoring during initial high-speed train operations; and coordinated emergency shutdown procedures.

Fatigue monitoring for high-density operation

For railway corridors with scheduled traffic exceeding 50 train passages per day on a sustained basis, cumulative fatigue damage shall be formally tracked using cycle counting and the Palmgren-Miner rule per API RP 1102 §4.7. Records of train type, axle load, speed, and passage frequency shall be maintained for the duration of operations.

Change management for heavier rolling stock

If rolling stock with axle loads exceeding the Cooper E-80 controlling axle (80 kips / 356 kN) is introduced on the corridor — as may occur with ultra-heavy haul mineral railways — the crossing analysis shall be repeated with updated load parameters before service commencement. Similarly, any change in track configuration (rail type, sleeper spacing, ballast depth) shall trigger a review of the load transmission model.

Protection during railway construction

During railway construction and rehabilitation works, heavy construction equipment (cranes, ballast regulators, tamping machines) may impose loads comparable to or exceeding Cooper E-80 at shallow burial depths.

An API RP 1102 assessment of construction equipment loads shall be conducted prior to construction commencement, with mechanical protection (concrete slabs, steel plates) installed if required.

Implications for Colombia's Railway Development Program

The results and methodology of this study are directly applicable to the engineering assessment requirements of Colombia's three principal active railway development projects:

- **Corredor Férreo del Pacífico (Buenaventura-La Tebaida-La Felisa).** Highest priority for pipeline-railway coexistence assessment, given the dense Cenit multiproduct network in Valle del Cauca. The Yumbo-Buenaventura pipeline analyzed in this study is a direct case study for this corridor.
- **Tren del Caribe (La Dorada-Chiriguaná rehabilitation).** Crossings with the ODC and Ocesa pipelines in the Magdalena Valley require systematic API RP 1102 §4.5 assessments, particularly for the Ocesa 24-in X70 pipeline segments where higher operating pressures reduce the stress margin.
- **Regiotram de Occidente (Bogotá-Facatativá light rail).** Lower axle loads (light rail) relative to Cooper E-80 result in more conservative stress margins; however, the high frequency of urban light-rail operations (up to 300+ passages/day) necessitates rigorous fatigue assessment per API RP 1102 §4.7.

The authors recommend that Colombia's pipeline and railway regulatory agencies — specifically the Ministerio de Minas y Energía, Invías, ANI, and the Superintendencia de Industria y Comercio — formally adopt API RP 1102 §4.5 as the mandatory technical standard for engineering assessment of all new railway crossings over buried steel pipelines, supplemented by the regional calibrations and sensitivity analysis framework demonstrated in this study. Its integration into Pipeline Integrity Management Systems (PIMS), in accordance with API 1160 and ASME B31.8S, would harmonize risk-management practices and promote the safe, sustainable development of Colombia's railway and energy infrastructure in parallel.

CREDIT (CONTRIBUTOR ROLES TAXONOMY)

Authors' contributions: Conceptualization: JD BR; Methodology: JD BR, NY RC; Investigation: JD BR, NY RC; Preparation of the original draft: JD BR; Writing, proofreading and editing: NY RC; Formal analysis: JD BR; Acquisition of funds: Not applicable.

Funding: The authors state that no acquisition of funds was required for this study.

Data Availability Statement: The data supporting the findings of this study are contained within the article.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

REFERENCES

- Agencia Nacional de Infraestructura (2024). *Plan de desarrollo de infraestructura ferroviaria en Colombia*. <https://www.ani.gov.co>.
- Al-Ghamdi, A., Al-Osta, M. A., Saleh, T. A., & Al-Ghamdi, A. A. (2023). Evaluation of buried pipeline response to vehicle loads using American and European standards. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 3(4).
- American Petroleum Institute (2007). *API recommended practice 1102: Steel pipelines crossing railroads and highways* (7th ed., 2021 errata incl.).
- American Petroleum Institute (2013). *API standard 1104: Welding of pipelines and related facilities* (21st ed., 2018 errata incl.).
- American Petroleum Institute (2019). *API recommended practice 1160: Managing system integrity for hazardous liquid pipelines* (3rd ed., reaffirmed 2024).
- American Petroleum Institute & American Society of Mechanical Engineers (2016). *API 579-1/ASME FFS-1: Fitness-for-service* (3rd ed.).
- American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (2023). *Manual for railway engineering* (Chapter 8. Bridges and structures — Loads).
- American Society of Mechanical Engineers (2019). *ASME B31.4: Pipeline transportation systems for liquids and slurries* (2019 ed.).
- Betancur Ríos, J. D., & Rojas Cataño, N. Y. (2025). Assessment of forestry machinery mobile loads on buried pipelines using API RP 1102 and empirical soil-tire contact pressure models. *Científica*, 29(2), 1-29. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v29n2a07>.
- Cenit Transporte y Logística de Hidrocarburos (2023). *Manual de servidumbre de hidrocarburos*. <https://www.cenit.com.co/transparencia/Documents/Manual-Servidumbre-2023.pdf>.
- Cenit Transporte y Logística de Hidrocarburos (2025). *Poliducto Cartago-Yumbo-Buenaventura*. <https://www.cenit.com.co>.
- Esveld, C. (2001). *Modern railway track* (2nd ed.). MRT-Productions.
- Gabrielson, M. C. (2018). *Underground pipelines crossing beneath railroad tracks: Load transfer and design considerations* [Conference paper]. ASME International Pipeline Conference (IPC). Calgary, Canada.

- GE Transportation (2024). *ES44AC Evolution Series locomotive: Technical specifications*. <https://www.wabteccorp.com/locomotives>.
- Indraratna, B., Salim, W., & Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced rail geotechnology: Ballasted track*. CRC Press.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2011). *NTC 3728: Gasoductos. Líneas de transporte y redes de distribución de gas* (2nd update).
- Instituto Nacional de Vías (2024). *Corredores férreos concesionados y en rehabilitación: Informe de estado 2024*.
- International Union of Railways (2008). *UIC code 719 R: Earthworks and track-bed for railway lines* (3rd ed.).
- Joshi, N., Ghosh, P., Brewer, J., & Matta, L. (2020). *Comparison of buried pipeline crossing assessments using API RP 1102, analytical method and finite element approach* [Conference paper]. 13th International Pipeline Conference (IPC2020), Calgary, Canada.
- Ministerio de Minas y Energía (2015). *Decreto 1073 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía*. República de Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía (2024). *Resolución 40279 de 2024: Reglamento Técnico de Gasoductos*. República de Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía (2026). *Resolución 00574 de 2026: Por la cual se establece el Reglamento de Transporte por Oleoductos* (*Diario Oficial*, 53.487). República de Colombia.
- Regiotram de Occidente (2023). *Estudio de impacto ambiental: corredor Bogotá-Facatativá-Zipacquirá*. <https://www.regio-tram.gov.co>.
- Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). *Track geotechnology and substructure management*. Thomas Telford.

ANNEX

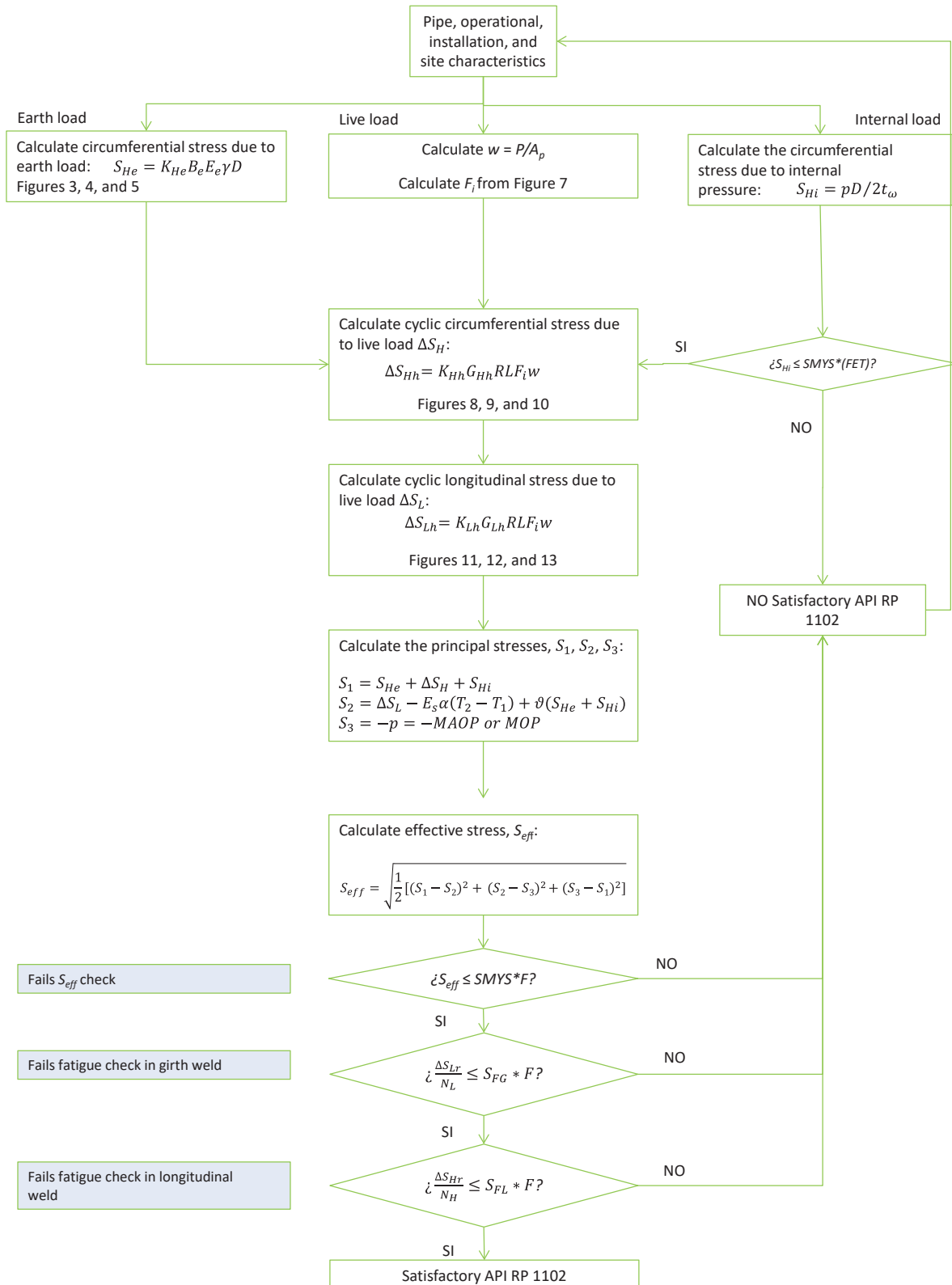
The methodology evaluates the following principal stress components and acceptance criteria (§4.6 and §4.6 API RP 1102), as shown in Figure 1. The figure references the equations, figures, and acceptance criteria from API RP 1102, listed in order of appearance in this document. These equations are subsequently applied in the results section, with the corresponding citations repeated for completeness and traceability.

The factors related to the pipeline and the terrain such as depth, geometry, stiffness of the track or railway, type of road, impact factor, type of pavement and resistance limits, to proceed with the calculation of the stresses on the pipeline, are described below:

- B_g : Burial factor for circumferential stress per ground load.
- E_g : Digging factor for circumferential stress per ground load.
- G_{Hb} : Geometry factor for the cyclic circumferential stress of vehicle load on tracks.
- G_{Lb} : Geometry factor for the cyclic longitudinal stress from the loading of vehicles on tracks.
- K_{He} : Stiffness factor for the circumferential stress of the ground load.
- K_{Hb} : Stiffness factor for the cyclic circumferential stress of road vehicle load.
- K_{Hr} : Stiffness factor for the cyclic circumferential stress of railway cargo.
- K_{Lb} : Stiffness factor for the cyclic longitudinal stress of the road load.
- L : Road axle configuration factor.
- F_i : Impact factor (taken from API RP 1102 as 1.5).
- A : Road pavement type factor.
- RL : Longitudinal stress reduction factor due to fatigue.
- SFG : Fatigue strength limit of circumferential welding.
- SFL : Fatigue strength limit longitudinal welding.
- ΔS_{Hb} : Cyclic circumferential stress of the load of vehicles on roads, in psi or kPa.
- ΔSL : Cyclic longitudinal stress, in psi or kPa.
- ΔS_{Lb} : Cyclic longitudinal stress of road vehicle load, in psi or kPa.
- S_{Hr} : Internal pressure stress.
- S_{He} : Ground load stress.
- ΔSH : Stress by live loads.
- S_1, S_2, S_3 : Main efforts.
- S_{eff} : Total effective effort.
- w : Applied design surface pressure.

Figure 1

Flow diagram of procedure for uncased crossings of highways. Adapted from API RP 1102 (API, 2007)



Reconstrucción histórica y escenarios prospectivos de la mortalidad vial en Colombia (1986-2025)

Historical reconstruction and prospective scenarios of road traffic mortality in Colombia (1986-2025)

HENRY VERGARA BARRETO

Candidato a Doctorado en Ingeniería. Magister en Ingeniería Civil.
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2422-2351>
henryvergara@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 19/01/2026 Aceptado: 24/02/2026

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este estudio se demuestra que la evolución histórica de la mortalidad vial en Colombia no responde a un crecimiento continuo, sino a una dinámica no monótona integrada por tres regímenes temporales diferenciados. La mortalidad por siniestros viales es un desafío central de salud pública y de sostenibilidad del transporte, pero la evidencia longitudinal que caracterice su comportamiento a largo plazo y proyecte su trayectoria es escasa. Se analizaron la serie anual de personas fallecidas y la tasa por 100.000 habitantes entre 1986 y 2025 ($n = 40$), integrada a partir de registros oficiales con criterios de trazabilidad. Se ajustaron modelos Arima con un término de intervención de tipo pulso para el choque pandémico de 2020, seleccionados por AICc y validados fuera de muestra, y se contrastaron con un modelo estructural de componentes no observados y una regresión segmentada.

La serie exhibe tres fases —crecimiento (1986-1997), descenso (1997-2006) y recuperación (2006-2025)—: la tasa alcanzó su máximo histórico en 1995 (22,0 por 100.000), y pese a que 2025 registra el máximo absoluto de fallecidos, el riesgo per cápita (16,4) permanece por debajo de aquel pico. El modelo Arima (0,1,2) con intervención presentó residuos sin autocorrelación ni heterocedasticidad, con un error porcentual absoluto medio fuera de muestra del 11,4 %. La inferencia a 2030 y 2035 delimita un rango entre la estabilización en torno a 8.850 fallecidos anuales y una continuidad ascendente hacia

10.000. La trayectoria proyectada más que duplica la meta del Plan Nacional de Seguridad Vial 2022-2031, que resulta inalcanzable si no se produce un cambio estructural sin precedentes. Los hallazgos justifican fortalecer el enfoque de sistema seguro, el monitoreo continuo de la serie y una gobernanza multisectorial que incorpore a los sectores de salud y educación.

Palabras claves: seguridad vial, mortalidad vial, análisis de tendencias, modelos Arima, intervención, motociclistas, sistema seguro, gobernanza multisectorial, Colombia.

Abstract

This study shows that the historical evolution of road traffic mortality in Colombia does not follow continuous growth but a non-monotonic dynamic comprising three distinct temporal regimes. Road traffic mortality is a central public-health and transport-sustainability challenge, yet longitudinal evidence characterizing its long-term behavior and projecting its trajectory remains scarce. We analyzed the annual series of road traffic fatalities and the rate per 100,000 inhabitants between 1986 and 2025 ($n = 40$), compiled from official records under explicit traceability criteria. Arima models with a pulse intervention term for the 2020 pandemic shock were fitted, selected by AICc and validated out of sample, and contrasted with an unobserved-components structural model and a segmented regression.

The series displays three phases —growth (1986-1997), decline (1997-2006) and recovery (2006-2025): the rate peaked in 1995 (22.0 per 100,000) and, although 2025 records the all-time high in counts, per-capita risk (16.4) remains below that peak. The Arima (0,1,2) model with intervention showed residuals free of autocorrelation and heteroscedasticity, with an out-of-sample mean absolute percentage error of 11.4 %. Inference to 2030 and 2035 sets a range between stabilization around 8,850 annual fatalities and a continued rise toward 10,000. The projected trajectory more than doubles the target of the National Road Safety Plan 2022-2031, which is unattainable without unprecedented structural change. The findings encourage strengthening the safe system approach, continuous monitoring of the series and multisectoral governance involving the health and education sectors.

Keywords: road safety, road mortality, trend analysis, Arima models, intervention, motorcyclists, safe system, multisectoral governance, Colombia.

INTRODUCCIÓN

Los siniestros viales causan cerca de 1,19 millones de muertes anuales en el planeta y constituyen la principal causa de defunción entre las personas de 5 a 29 años, una carga que recae de manera desproporcionada sobre los países de ingresos bajo y medio (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2023). Más allá de su magnitud sanitaria, esta mortalidad compromete la sostenibilidad del sistema de transporte y el bienestar social, lo que la sitúa en el centro de la agenda de política pública.

Colombia ilustra este problema con una trayectoria histórica particular. Entre 1986 y 2025, las personas fallecidas en siniestros viales pasaron de 3.535 a 8.697, pero esta evolución no ha sido monótona: tras alcanzar un máximo a mediados de los años noventa, la mortalidad descendió durante la década siguiente y volvió a crecer con posterioridad. Diversos factores estructurales —la motorización acelerada, la expansión del parque de motocicletas, la maduración institucional del sector y los cambios en la exposición al riesgo— se han propuesto como impulsores de esta dinámica (Castañeda-Millán & Eslava-Schmalbach, 2024; Rodríguez Hernández et al., 2025). Frente a referentes internacionales con tasas inferiores a 5 por 100.000, el país mantiene niveles sustancialmente más altos (International Transport Forum [ITF], 2024).

El problema científico no se limita al incremento en el número de víctimas. Aun cuando existen múltiples reportes descriptivos periódicos, todavía se desconoce si la evolución observada corresponde a un crecimiento continuo o a una sucesión de regímenes temporales

diferenciados, y qué trayectoria es previsible una vez controlado el choque extraordinario introducido por la pandemia de covid-19 en 2020. Resolver esta cuestión con métodos de series de tiempo es condición necesaria para fundamentar decisiones de política basadas en evidencia.

De esta formulación se desprenden tres vacíos. En el plano empírico, son escasos los estudios longitudinales que aprovechan la serie nacional completa, puesto que la mayoría se concentra en ventanas recientes o en subpoblaciones. En el plano metodológico, es limitada la integración entre la modelación de tendencia y el tratamiento explícito de choques extraordinarios, en tanto que en el plano prospectivo existen pocas proyecciones con cuantificación honesta de la incertidumbre. El presente estudio se posiciona en esa intersección.

Pregunta de investigación

¿Cómo ha evolucionado la mortalidad vial en Colombia entre 1986 y 2025 y qué trayectoria es esperable para el horizonte 2026-2035, con hitos a cinco (2030) y diez (2035) años, una vez controlado el choque pandémico de 2020? De esta se derivan dos hipótesis: (H1) la tendencia a largo plazo es no monótona, con un máximo en los años noventa, y (H2) el efecto de 2020 corresponde a un choque transitorio y no a un cambio permanente de régimen.

Objetivos

El objetivo general es caracterizar y proyectar la dinámica temporal de la mortalidad vial en Colombia. Los objetivos específicos son dos:

- Ajustar modelos de series de tiempo a las series de fatalidades y de tasa por 100.000 habitantes, incorporando el choque de 2020 como intervención.
- Generar pronósticos para el horizonte 2026-2035, con hitos a cinco (2030) y diez (2035) años e intervalos de predicción.

La contribución central es demostrar que la mortalidad vial colombiana no sigue una tendencia creciente continua, sino una dinámica no monótona en tres fases —crecimiento (1986-1997), descenso (1997-2006) y recuperación (2006-2025)—, de modo que el máximo absoluto de fallecidos de 2025 coexiste con un riesgo per cápita incluso inferior al pico de los años noventa;

este hallazgo modifica la interpretación de política pública. Tres aportes la sustentan: empírico —cuarenta años de datos armonizados con documentación de sus discontinuidades—, metodológico —integración de Arima con un término de intervención y validación fuera de muestra, evitando imputar el dato pandémico— y aplicado —vínculo de los puntos de giro con la cronología institucional para orientar el monitoreo—.

El estudio se limita a una caracterización descriptiva y prospectiva de la dinámica agregada; no persigue un modelo causal de los determinantes —exposición, parque automotor, vehículos-kilómetro o composición modal—, cuya incorporación constituye una agenda posterior.

En el resto del artículo se revisan la bibliografía existente (sección 2), la metodología (sección 3), los resultados (sección 4), la discusión (sección 5), las conclusiones (sección 6) y las implicaciones (sección 7).

REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA EXISTENTE

Modelación temporal

El análisis de tendencias de siniestralidad dispone de un cuerpo metodológico consolidado. Commandeur et al. (2013) mostraron que los modelos de espacio de estados superan las aproximaciones determinísticas al captar tendencias estocásticas, mientras que Yannis et al. (2011) extendieron el enfoque a modelos autorregresivos no lineales en Europa. La tradición Box-Jenkins de modelos Arima (Box et al., 2015) y las guías de pronóstico contemporáneas (Hyndman & Athanasopoulos, 2021) ofrecen el andamiaje para series anuales, en tanto que Hauer (2015) advierte sobre los riesgos de sobreajuste.

En América Latina, Quintero Valverde et al. (2023) emplearon un diseño de series de tiempo interrumpidas para evaluar políticas de seguridad vial en Ciudad de México, lo que evidencia el valor de los términos de intervención; sin embargo, falta la aplicación de este instrumental a la serie nacional colombiana a largo plazo.

Sistema seguro

El paradigma de sistema seguro reorienta la responsabilidad desde el usuario hacia los diseñadores del sistema. Tingvall y Haworth (1999) formularon la filosofía de visión cero, en tanto que Larsson et al. (2010) la fun-

damentaron desde la teoría de sistemas, concibiendo la seguridad como propiedad emergente de la interacción entre infraestructura, vehículos, velocidades y atención postsiniestro. Los países que lo adoptaron de manera integral registran las tasas más bajas del mundo (ITF, 2024; Wegman, 2017). Para Colombia, este marco es pertinente porque su adopción formal es reciente y aún no se refleja en los resultados.

Evidencia internacional y latinoamericana

La evidencia regional documenta trayectorias preocupantes. En Brasil, Malta et al. (2023) analizaron la mortalidad por transporte en municipios entre 2000 y 2018, y destacaron la heterogeneidad territorial. En Colombia, Murillo-Hoyos et al. (2023) revelaron desigualdades sociales en la mortalidad por lesiones de tránsito, y Rodríguez Hernández et al. (2025) cuantificaron el subregistro derivado de la mala clasificación de causas, un hallazgo crítico para la calidad de las series.

En la bibliografía se documenta, además, una participación creciente de los motociclistas en la mortalidad regional (Castañeda-Millán & Eslava-Schmalbach, 2024; De Oliveira Santiago et al., 2023; Ospina-Mateus et al., 2020; Berrones-Sanz, 2017), rasgo característico de los países de motorización acelerada. En conjunto, esta evidencia confirma que la comparabilidad y la trazabilidad de los datos son condiciones previas a cualquier modelación rigurosa.

Vacíos del conocimiento y posicionamiento

La bibliografía permite delimitar el vacío con precisión. Se sabe que la mortalidad regional crece, que los motociclistas concentran el riesgo y que la calidad de los registros es problemática; no se sabe, en cambio, cómo se comporta la serie nacional colombiana a largo plazo, ni si su evolución reciente es una tendencia continua o el tramo ascendente de una dinámica más compleja, ni qué trayectoria se espera una vez controlado el choque pandémico. De ahí, tres vacíos: empírico —escasez de estudios sobre la serie completa de cuatro décadas—, metodológico —limitada integración entre los modelos de tendencia y el tratamiento explícito de choques extraordinarios— y prospectivo —ausencia de proyecciones con incertidumbre transparente—.

En el presente estudio se abordan los tres mediante la reconstrucción histórica de la serie 1986-2025 y un enfoque Arima con intervención, y su aporte distintivo

consiste en mostrar que la lectura de un crecimiento continuo es incompleta. En conjunto, la bibliografía revela una tensión no resuelta: mientras la modelación de series de tiempo ha alcanzado sofisticación creciente —del enfoque Box-Jenkins a los modelos de espacio de estados y a los diseños de series interrumpidas—, su aplicación a la seguridad vial latinoamericana sigue subordinada a la calidad y comparabilidad de los registros, de modo que el principal cuello de botella no es metodológico, sino de datos; este trabajo se posiciona precisamente en esa intersección, priorizando la trazabilidad de una serie larga antes que la complejidad del modelo.

METODOLOGÍA

Datos y trazabilidad

La variable de estudio es el número anual de personas fallecidas en siniestros viales en Colombia, 1986-2025 ($n = 40$), y su tasa por 100.000 habitantes, calculada con proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2023). La serie integra fuentes oficiales sucesivas —el Fondo de Prevención Vial, el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, y el Observatorio Nacional de Seguridad Vial de la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV)—, con criterios explícitos de trazabilidad (Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses [INMLCF], 2024; Observatorio Nacional de Seguridad Vial [ONSV], 2025). Se reconocen discontinuidades metodológicas (cambios en módulos de consulta, definición del indicador tradicional frente al de fallecidos a 30 días y depuración de cifras preliminares de 2025), documentadas en el anexo de trazabilidad. El normograma de la legislación nacional asociada se reporta también en el anexo.

Tratamiento del choque de 2020

El año 2020 registró un descenso atípico, atribuible a las restricciones de movilidad por la pandemia de covid-19. En lugar de sustituir el dato observado por un valor imputado, se trató como un choque exógeno mediante un término de intervención de tipo pulso (variable indicadora igual a uno en 2020 y cero en el resto), incorporado como regresor. Se optó por un pulso y no por un escalón porque la evidencia posterior muestra el retorno de la serie a su nivel previo en 2021-2022:

un escalón supondría un cambio permanente de nivel que los datos no respaldan, mientras que el pulso capta un efecto transitorio, coherente con la hipótesis H2. Este procedimiento permite que el dato real informe la estimación y que la magnitud del choque se cuantifique con su propia incertidumbre, evitando los sesgos de la imputación determinística.

Estrategia de modelación

El orden de integración se evaluó con las pruebas de Dickey-Fuller aumentada (ADF; Dickey & Fuller, 1979) y KPSS (Kwiatkowski et al., 1992), complementadas con la prueba de Zivot-Andrews de raíz unitaria con quiebre endógeno (Zivot & Andrews, 1992) y con pruebas de Chow (Chow, 1960) en puntos candidatos. Se eligió la familia Arima porque, para una serie anual univariada, no estacionaria y de longitud moderada ($n = 40$) como la analizada, ofrece el mejor compromiso entre parsimonia y capacidad de representar la dependencia temporal mediante diferenciación y términos de media móvil, admite en forma natural un regresor de intervención para aislar el choque de 2020 y dispone de un marco inferencial y de validación consolidado (Box et al., 2015; Hyndman & Athanasopoulos, 2021); frente a alternativas más complejas, contiene el sobreajuste que Hauer (2015) advierte para muestras cortas.

Sobre cada serie se ajustaron modelos Arima (p, d, q) seleccionados por el criterio de información de Akaike corregido para muestras pequeñas (AICc), comparando especificaciones con el término de intervención de 2020 y sin este. Como contrastes de robustez, desde familias metodológicas distintas, se estimaron un modelo de componentes no observados de tendencia local lineal (Harvey, 1989), que separa nivel, pendiente latente e irregular, y permite contrastar si la tendencia subyacente se estabiliza o sigue creciendo, y una regresión segmentada (*joinpoint*), que identifica regímenes de pendiente mediante puntos de quiebre óptimos (Kim et al., 2000); como referencia de pronóstico se incluyó, además, un suavizamiento exponencial de tendencia amortiguada. Todos los cálculos se hicieron en Python.

Validación y pronóstico

La capacidad predictiva se evaluó fuera de muestra, entrenando los modelos con las observaciones hasta 2021 y comparando sus predicciones contra el periodo

reservado 2022-2025, mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE); se incluyó un modelo ingenuo con deriva como referencia mínima. El modelo seleccionado se reestimó sobre la serie completa para generar pronósticos en el horizonte 2026-2035, con hitos a 2030 y 2035 e intervalos de predicción al 95 %. La elección del horizonte respondió a un criterio de utilidad y de prudencia estadística: diez años (2035) coinciden con el cierre del Decenio de Acción 2021-2030, más un año de holgura, y con el término del Plan Nacional de Seguridad Vial 2022-2031, lo que hace la proyección directamente comparable con las metas de política; extenderla a 2040 habría ampliado los intervalos de predicción hasta niveles poco informativos para una serie anual de cuarenta observaciones.

Supuestos

El análisis asume estabilidad de la estructura paramétrica en el régimen posterior al último quiebre, independencia de los residuos una vez modelada la dependencia temporal y continuidad de las condiciones observadas durante el horizonte de proyección. Las desviaciones respecto a estos supuestos se discuten en las limitaciones.

Reproducibilidad

El análisis se implementó en Python 3.10 con *statsmodels* 0.14.6, *numpy* y *scipy*, con semilla fija. El código fuente,

los datos, las tablas de resultados, las figuras y un registro de versiones se entregan como material de soporte, de modo que cualquier revisor o coautor pueda reproducir íntegramente los cálculos. A continuación, se sintetiza el flujo metodológico (tabla 1).

RESULTADOS

Evolución temporal

La serie objeto de estudio se presenta más adelante (figura 1), que muestra en forma directa las dos variables sin superposición de modelos. El patrón es claramente no monótono y se ordena en tres fases diferenciadas: crecimiento (1986-1997), descenso (1997-2006) y recuperación (2006-2025). Las fatalidades crecieron desde 3.535 en 1986 hasta un máximo relativo a mediados de los años noventa, la tasa por 100.000 habitantes alcanzó su valor más alto de todo el periodo en 1995 (22,0) y la mortalidad descendió de manera sostenida hasta un valle extendido entre 2005 y 2012 —con el mínimo de fatalidades en 2005 (5.413) y el de la tasa en 2012 (11,9)— y posteriormente reanudó su crecimiento. En 2025, la tasa se ubica en 16,4 por 100.000: un nivel elevado, pero todavía inferior en aproximadamente un cuarto al pico de los años noventa. Este hallazgo matiza la lectura de los conteos absolutos, cuyo máximo histórico en 2025 obedece en parte al crecimiento poblacional.

Tabla 1
Síntesis metodológica: etapa, método y resultado asociado

Etapa	Método	Resultado
Trazabilidad	Integración de fuentes oficiales y normograma	Serie 1986-2025 (n = 40)
Estacionariedad	ADF, KPSS, Zivot-Andrews	Orden de integración d = 1
Quiebre	Pruebas de Chow en puntos candidatos	Región de quiebre $\approx$ 2000 (cambio de siglo)
Choque 2020	Término de intervención (pulso)	Efecto transitorio significativo
Modelación	Arima (p, d, q) por AICc + ETS amortiguado	Arima (0,1,2) con intervención
Validación	Fuera de muestra 2022-2025 (RMSE, MAE, MAPE)	Desempeño contrastado
Pronóstico	Arima, UCM y fase reciente; IP al 95 %	Escenarios 2026-2035 (hitos 2030, 2035)

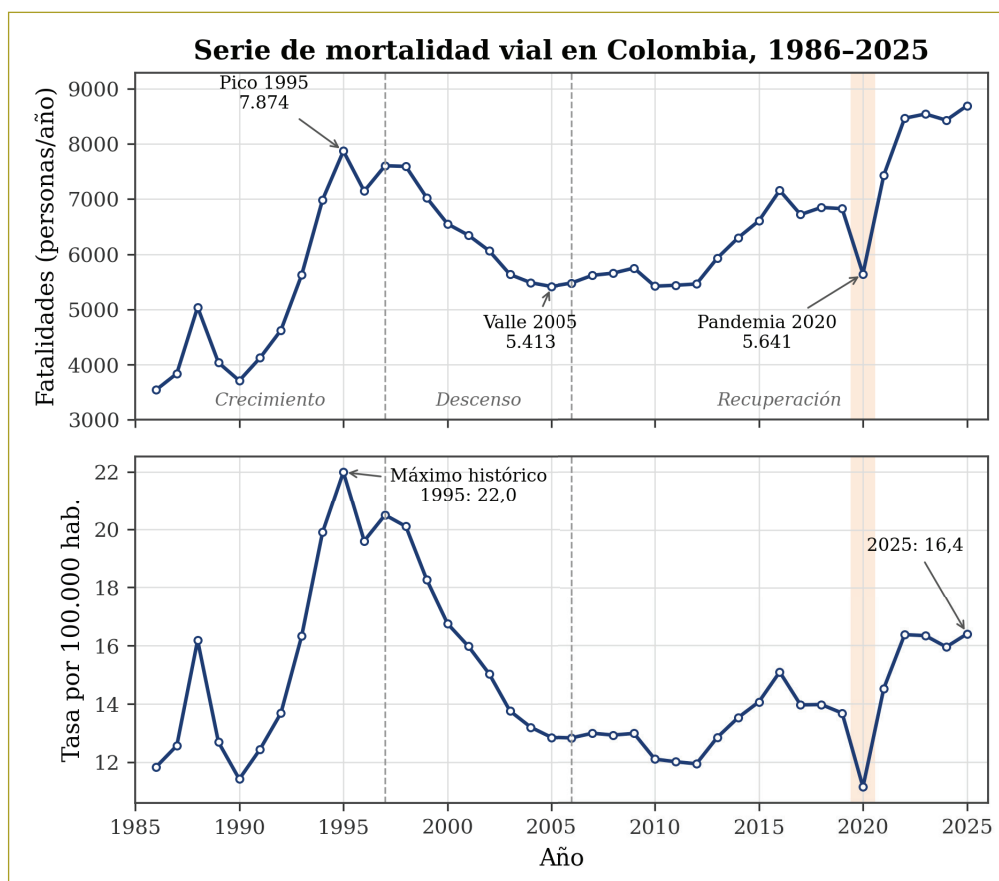


Figura 1. Serie objeto de estudio: fatalidades (panel superior) y tasa por 100.000 habitantes (panel inferior), Colombia 1986-2025, con los puntos de giro señalados.

Estacionariedad y quiebre estructural

La evidencia sugiere tratar ambas series como integradas de orden uno, principalmente por la ADF —que no rechaza la raíz unitaria en niveles ($p = 0,515$ para fatalidades; $p = 0,310$ para la tasa) y la rechaza en primeras diferencias ($p < 0,001$)— y por el comportamiento de las primeras diferencias; la KPSS ofrece un respaldo solo parcial, pues en niveles no rechaza la estacionariedad de la tasa (tabla 2).

La prueba de Zivot-Andrews ubica un candidato de quiebre hacia 1998, aunque no rechaza la hipótesis de raíz unitaria con quiebre, por lo que no constituye evidencia concluyente. Las pruebas de Chow alcanzan su máximo en el cambio de siglo —en torno a 2.000 ($F \approx 20$ para fatalidades y ≈ 24 para la tasa; $p < 0,001$), con 1999-2002 igualmente significativos—; el corte de 2002 es importante, pero no es el punto de máxima ruptura, de modo que su coincidencia con la expedición

del Código Nacional de Tránsito se debe leer como una asociación temporal y no como un quiebre estadísticamente dominante. El corte en 2020 resulta más débil, lo que respalda interpretar la pandemia como un choque transitorio antes que como un cambio estructural permanente.

En forma consistente, y desde una familia metodológica distinta, una regresión segmentada localiza puntos de quiebre en 1997 (IC 95 % *bootstrap* [1995; 1999]) y 2006 ([2004; 2009]) y delimita tres regímenes de pendiente bien diferenciados —crecimiento (+406), descenso (−290) y recuperación (+173 fatalidades/año)—; el procedimiento, su selección por BIC y los intervalos de los quiebres se documentan en el material suplementario (anexo C). Este resultado no valida las inferencias del Arima, pero es coherente con la estructura no monótona que aquí se describe (Kim et al., 2000).

Tabla 2

Pruebas de raíz unitaria (ADF y KPSS). La KPSS reporta $p \geq 0,10$ como límite superior. En niveles, no rechaza la estacionariedad; de ahí el respaldo solo parcial a un proceso $I(1)$

Serie / transformación	ADF (p)	KPSS (p)	Lectura combinada
Fatalidades (nivel)	0,515	0,067	ADF: raíz unitaria; KPSS no concluyente
Fatalidades (primera diferencia)	< 0,001	$\geq 0,10$	Estacionaria
Tasa (nivel)	0,310	$\geq 0,10$	ADF: raíz unitaria; KPSS no rechaza estacionaria
Tasa (primera diferencia)	< 0,001	$\geq 0,10$	Estacionaria

Modelo Arima con intervención

Para ambas series, el modelo seleccionado por AICc fue un Arima (0, 1, 2), con el término de intervención de 2020. El coeficiente del pulso es negativo y estadísticamente significativo —aproximadamente -1.295 fallecidos ($p < 0,001$) y $-2,53$ puntos en la tasa ($p = 0,002$)—, lo que confirma la magnitud del choque pandémico (tabla 3). El primer término de medias móviles es significativo pero el segundo no lo es, de modo que la dinámica se aproxima a un proceso de raíz unitaria con un componente de promedio móvil. Sobre el conjunto del periodo, la especificación no requirió término de deriva, hallazgo coherente con el carácter no monótono de la serie.

El modelo se seleccionó tras estimar una malla de especificaciones Arima (p, d, q) con $p, q \leq 2$ sobre las

series diferenciadas, con el término de intervención y sin este y con deriva y sin esta —treinta y cuatro configuraciones por serie—, ordenadas por AICc. En fatalidades, las dos mejores especificaciones resultaron muy próximas —Arima (1, 1, 2), con AICc de 548,7 y Arima (0, 1, 2) con 548,4—; se prefirió Arima (0, 1, 2) por parsimonia, por su menor BIC y por replicarse como óptimo en la serie de la tasa. De un modo decisivo, todas las especificaciones que omitían la intervención de 2020 mostraron un AICc sustancialmente peor (del orden de 566 frente a 548), lo que confirma la pertinencia de modelar el choque pandémico como regresor y no como dato imputado. La malla completa de modelos evaluados se reporta en el material suplementario.

Tabla 3

Modelo Arima (0, 1, 2) con intervención en 2020: coeficientes y diagnósticos de residuos (valores p; Durbin-Watson reportado como estadístico)

Parámetro / Prueba	Fatalidades	Tasa
Coeficientes: estimación (EE); valor p		
Intervención 2020	$-1.294,9$ (243,4); $p < 0,001$	$-2,53$ (0,81); $p = 0,002$
MA(1)	0,440 (0,129); $p < 0,001$	0,452 (0,118); $p < 0,001$
MA(2)	0,078 (0,161); $p = 0,627$	0,064 (0,145); $p = 0,660$
Diagnósticos de residuos (valor p; DW, estadístico)		
Ljung-Box, rezago 10 (sin autocorrelación)	0,282	0,237
Jarque-Bera (normalidad)	0,862	0,252
ARCH-LM, rezago 4 (homocedasticidad)	0,186	0,141
Durbin-Watson (estadístico)	2,17	2,28

Los diagnósticos de residuos son satisfactorios para ambas series (tabla 3). La prueba de Ljung-Box no detecta autocorrelación residual, la de Jarque-Bera no rechaza la normalidad y la prueba ARCH no evidencia heterocedasticidad condicional; por su parte, el estadístico de Durbin-Watson se sitúa próximo a 2. El modelo, por tanto, está correctamente especificado.

Validación fuera de muestra

Al entrenar con datos hasta 2021 y predecir 2022-2025, el modelo Arima alcanza un MAPE del 11,4 % en fatalidades y del 9,4 % en la tasa (tabla 4). En este horizonte particular —una meseta posterior al rebote pospandémico—, un modelo ingenuo con deriva resulta competitivo e incluso ligeramente superior en fatalidades, lo que se reporta con transparencia. La elección del Arima no se sostiene, por ende, en una superioridad de pronóstico específico, sino en tres ventajas de las que el modelo ingenuo carece: trata explícitamente el choque de 2020 como intervención, en vez de absorberlo como ruido; genera intervalos de predicción estadísticamente fundamentados, indispensables para comunicar la incertidumbre a la decisión pública, y modela la estructura de dependencia temporal de la serie. Esa es la justificación de su uso, pese a la competitividad del modelo ingenuo.

Pronósticos a cinco y diez años (2030 y 2035)

La inferencia se proyectó hasta 2035, fijando dos hitos —2030 (cinco años) y 2035 (diez años)—, y se contrastó mediante tres enfoques (tabla 5, figura 2). El escenario base, derivado del Arima sobre la serie completa, no incorpora deriva y proyecta una estabilización en torno a 8.850 fallecidos, con intervalos que se ensanchan de manera pronunciada (en 2035, de 4.922 a 12.782). Un modelo de componentes no observados de tendencia local lineal (Harvey, 1989), que estima la pendiente subyacente de la serie, arroja en cambio una pendiente latente positiva ($\approx +131$ fatalidades/año) y proyecta una subida moderada: 9.354 fallecidos en 2030 y 10.012 en 2035. Un tercer enfoque, que extrapola la fase de recuperación reciente (2006-2025) con un modelo con deriva, converge casi exactamente con el anterior: 9.274 en 2030 y 10.183 en 2035.

El resultado relevante es que dos enfoques independientes —el estructural y el de la fase reciente— coinciden en una trayectoria ascendente que superaría los 10.000 fallecidos hacia 2035, mientras que solo el Arima agrupado, al carecer de deriva sobre el conjunto del periodo, proyecta estabilidad. La inferencia prospectiva es, por consiguiente, sensible a cómo se especifique la tendencia, y el balance de los métodos se inclina hacia la continuidad del crecimiento más que hacia la estabilización.

Tabla 4

Validación fuera de muestra (2022-2025): error porcentual absoluto medio (MAPE, %)

Modelo	Fatalidades (MAPE)	Tasa (MAPE)
Arima (0, 1, 2) + intervención	11,4	9,4
ETS (tendencia amortiguada)	13,5	10,7
Ingenuo con deriva	9,6	9,5

Tabla 5

Pronósticos de fatalidades a 2030 y 2035 por tres enfoques: Arima base (serie completa, sin deriva), UCM de tendencia local lineal (Harvey) y extrapolación de la fase de recuperación reciente (2006-2025). Entre paréntesis, intervalos al 95 %

Horizonte	Arima base	UCM estructural	Tendencia reciente
2030 (5 años)	8.852 (6.174 - 11.530)	9.354 (6.942 - 11.766)	9.274 (8.068 - 10.481)
2035 (10 años)	8.852 (4.922 - 12.782)	10.012 (6.413 - 13.610)	10.183 (8.974 - 11.392)

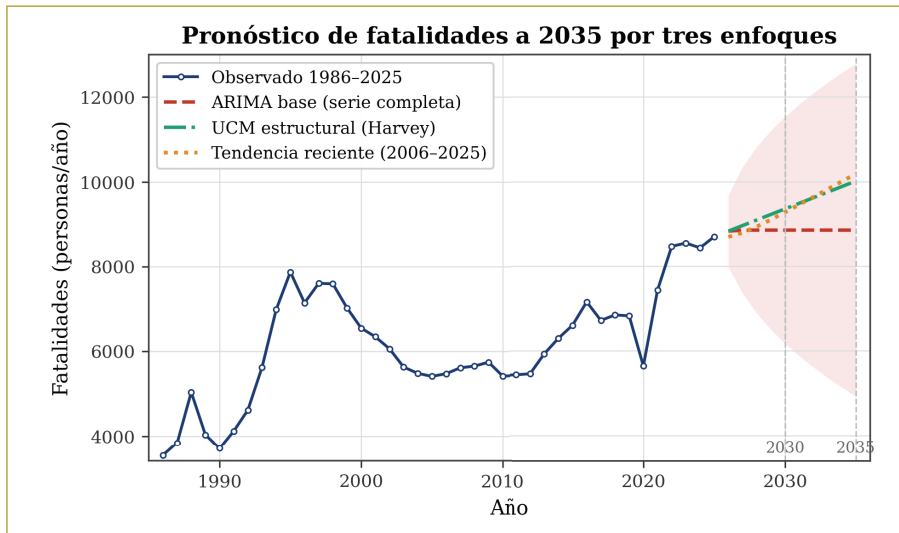


Figura 2. Pronóstico de fatalidades a 2035 por tres enfoques: Arima base, UCM estructural (Harvey) y tendencia reciente (2006-2025), con los hitos a cinco y diez años. El Arima agrupado proyecta estabilidad; los otros dos convergen en una subida moderada hacia ~10.000 fallecidos en 2035.

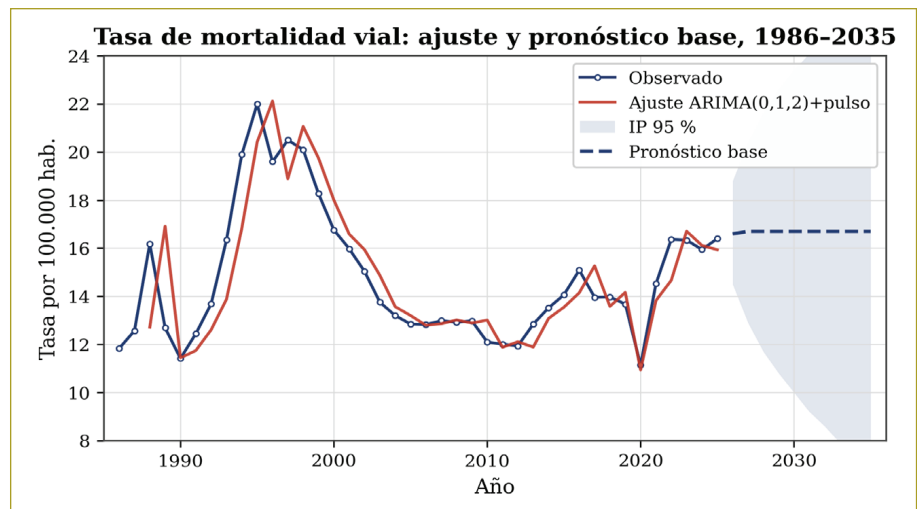


Figura 3. Tasa de mortalidad vial por 100.000 habitantes, con ajuste y pronóstico del escenario base (Colombia 1986-2025).

Confrontación con la meta del Plan Nacional de Seguridad Vial 2022-2031

El Plan Nacional de Seguridad Vial (PNSV) 2022-2031, adoptado por el Decreto 1430 de 2022, fija como meta central reducir la mortalidad vial en un 50 %, lo que en la tasa equivale a pasar de 14,2 (línea base 2021) a 7,1 por 100.000 habitantes en 2031 (Ministerio de Transporte, 2022). La confrontación con la trayectoria estimada es contundente (figura 4): ninguno de los tres enfoques se aproxima a la meta. La proyección base de la tasa para 2031 ($\approx 16,7$ por 100.000) más que duplica el objetivo —2,35 veces—,

y en fatalidades la meta (≈ 3.860) equivale a menos de la mitad de la cifra proyectada (~ 8.900 -9.400). El punto crítico es que la serie se aleja del objetivo: entre la línea base de 2021 y la de 2025 la tasa aumentó un 12,9 % en lugar de descender. Alcanzar 7,1 en 2031 exigiría, desde 2025, una caída del 57 % en seis años (≈ -13 % anual sostenido), un ritmo más del doble del mayor descenso histórico documentado en la serie (≈ -5 % anual durante la fase 1997-2006). Salvo una intervención estructural sin precedentes, la meta del plan resulta, con la evidencia disponible, inalcanzable en su horizonte.

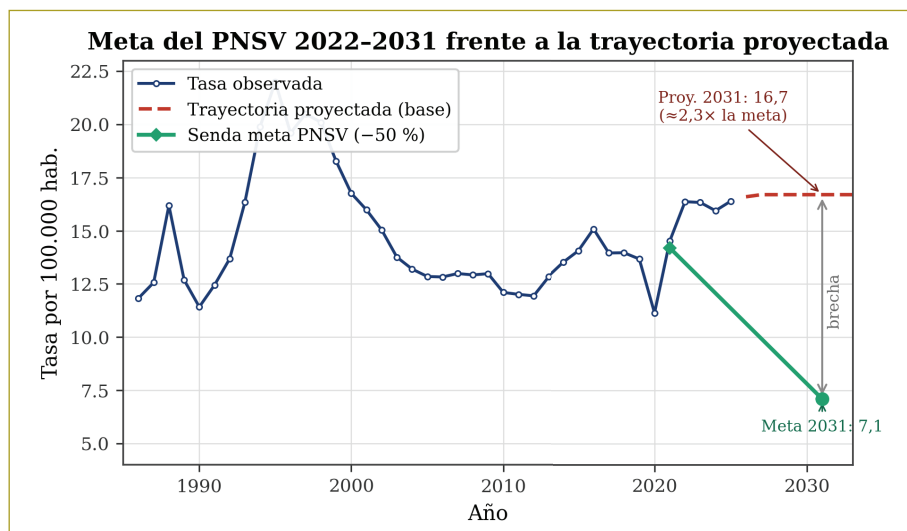


Figura 4
Meta del PNSV 2022-2031
(tasa de 14,2 a 7,1 por 100.000: -50 %) frente a la trayectoria proyectada de la tasa. La brecha en 2031 supera el doble de la meta.

Síntesis de hallazgos

Tres hallazgos resumen los resultados. Primero —y es el hallazgo central—, la reconstrucción de cuatro décadas revela una dinámica no monótona en tres fases (crecimiento 1986-1997, descenso 1997-2006 y recuperación 2006-2025): 2025 marca el máximo absoluto de fallecidos, pero no el máximo de riesgo per cápita, que sigue por debajo del pico de 1995, lo que refuta la lectura de un crecimiento continuo y reordena la interpretación de política. Segundo, el choque de 2020 es transitorio y significativo, y el modelo queda correctamente especificado. Tercero, el horizonte 2026-2035 se acota entre la estabilización (~8.850 fallecidos) que proyecta el Arima agrupado y una continuidad ascendente hacia ~10.000 fallecidos en 2035, sugerida en forma convergente por el modelo estructural de componentes no observados y por la extrapolación de la fase de recuperación; el balance de los métodos favorece esta segunda lectura.

DISCUSIÓN

La lectura de la serie completa modifica la narrativa habitual. Cuando el análisis se restringe a la última década y media, la mortalidad parece crecer inexorablemente; al incorporar cuatro décadas, se observa que Colombia ya había logrado revertir su mortalidad vial entre mediados de los años noventa y 2010, y que la situación actual representa una reversión parcial de aquel logro, más que un máximo sin precedentes en términos de riesgo per cápita. Esta perspectiva es coherente con la evidencia de que el descenso coincidió con la consolidación del

marco normativo; las pruebas de Chow alcanzan su máximo en el cambio de siglo (en torno a 2000), un periodo que coincide temporalmente con la expedición del Código Nacional de Tránsito (Ley 769 de 2002), si bien esa coincidencia no se debe leer como un quiebre estadísticamente atribuible a la norma. No obstante, la asociación entre hitos normativos y puntos de giro se debe interpretar con cautela: la fecha de promulgación no equivale a la de aplicación efectiva, y el repunte posterior a 2010 está dominado por la expansión del parque de motocicletas más que por cambios legislativos (Ospina-Mateus et al., 2020; Quintero Valverde et al., 2023).

Un elemento institucional ayuda a interpretar la forma de la serie. La fase de descenso —de mediados de la década de los noventa al año 2010— se solapa con el periodo de operación del Fondo de Prevención Vial (FPV), creado por el artículo 244 de la Ley 100 de 1993 y financiado de manera estable con el 3 % de las primas del Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito (SOAT), que durante cerca de dos décadas desarrolló campañas masivas y estudios técnicos de prevención (Alarcón et al., 2018). La Ley 1702 de 2013 liquidó el FPV y creó la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV), la cual, sin embargo, solo inició operaciones a finales de 2015.

El repunte sostenido de la mortalidad coincide temporalmente con esa transición institucional y con la expansión acelerada del parque de motocicletas. La coincidencia sugiere una hipótesis —que la continuidad

de una institución especializada con financiación estable contribuyó al descenso y que su discontinuidad debilitó la prevención— que el presente diseño no permite confirmar: se trata de una asociación temporal, no de una relación causal establecida, y concurre con otros factores, como la recesión de 1999, la motorización y los cambios de exposición. Contrastarla exigiría un diseño de series de tiempo interrumpidas en torno a 2013-2015 (Quintero Valverde et al., 2023), esto es, una línea de investigación prioritaria. En términos metodológicos, una serie agregada anual como la analizada permite localizar puntos de giro y formular hipótesis, pero no identificar sus causas: la atribución causal requiere variación exógena, controles de exposición y un diseño cuasiexperimental, ausentes por construcción en un solo agregado nacional. Esta es, precisamente, la frontera entre lo que el presente estudio establece —una reconstrucción y caracterización robustas— y lo que deja planteado como agenda.

La lectura institucional conduce a una reflexión de gobernanza que la evidencia del estudio respalda indirectamente. Desde el Informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito (Peden et al., 2004), la siniestralidad vial se entiende como un problema de salud pública prevenible que exige acción multisectorial; tanto la Declaración de Estocolmo como el Plan Mundial para el Decenio de Acción 2021-2030 enmarcan la respuesta en un enfoque de «todo el gobierno» y «toda la sociedad», con responsabilidad compartida entre sectores (OMS, 2021 y 2023). La persistencia de la tendencia y la magnitud de la brecha frente a la meta del PNSV sugieren que mantener un modelo de respuesta liderado de manera predominante por el sector del transporte —por intermedio del Ministerio de Transporte y la ANSV— difícilmente revertirá la trayectoria.

En ese orden de ideas, dos sectores que desempeñan un papel organizacional aparecen subrepresentados en la estructura colombiana. El sector de la salud es central por la rectoría del fenómeno como asunto de salud pública, por la vigilancia epidemiológica y los sistemas de información de lesiones, así como por la atención prehospitalaria y de trauma que determina la letalidad de los siniestros: el quinto pilar del sistema seguro —la respuesta postsiniestro— es, en esencia, competencia sanitaria (OMS, 2021; Larsson et al., 2010). El sector educativo, por su parte, es decisivo por su capacidad

de formar comportamientos y cultura vial de manera temprana y sostenida, una palanca a largo plazo que ningún organismo de tránsito puede sustituir.

En este análisis no se mide la contribución de cada sector —esto excede su alcance—, pero la conjunción de una mortalidad que no cede, una meta inalcanzable en el marco vigente y un único episodio histórico de descenso, asociado a una institucionalidad especializada y financiada, es coherente con la hipótesis de que la acción concentrada en un solo sector resulta insuficiente. La inferencia de política no es, por tanto, «hacer más de lo mismo», sino transitar hacia una gobernanza genuinamente intersectorial, en la que la salud y la educación sean corresponsables y no actores periféricos; evaluar empíricamente el aporte diferencial de cada sector constituye, en sí mismo, una agenda de investigación (Wegman, 2017).

El tratamiento del año 2020 como intervención y no como dato imputado resultó decisivo. El coeficiente del pulso cuantifica el descenso pandémico con su propia incertidumbre y deja que el modelo capte la dinámica subyacente, sin contaminar la estimación con un valor artificial. Frente a aproximaciones previas que proyectaban una aceleración pronunciada, el Arima sobre la serie larga sugiere una estabilización en torno a los niveles recientes. No obstante, esa lectura depende de cómo se especifique la tendencia: un modelo estructural de componentes no observados, que admite una pendiente latente, detecta un crecimiento subyacente persistente ($\approx +130$ fatalidades/año) y proyecta una subida moderada hacia 2035, coincidente con la extrapolación de la fase de recuperación.

El balance de los métodos se inclina, por consiguiente, hacia una continuidad del crecimiento más que hacia la estabilización, y lo prudente es comunicar el pronóstico como un rango —entre estabilización y subida moderada— antes que como una cifra única, sin minimizar su gravedad para la política pública.

La calidad de los datos condiciona toda inferencia: el subregistro y la mala clasificación documentados para Colombia (Rodríguez Hernández et al., 2025) y las discontinuidades metodológicas de la serie obligan a tratar el tramo reciente con prudencia. A su vez, en la bibliografía regional se documenta una participación creciente de los motociclistas en la mortalidad (Castañeda-Millán & Eslava-Schmalbach, 2024; De Oliveira Santiago et al., 2023; Malta et al., 2023), un fenómeno

cuya caracterización desagregada para Colombia excede el alcance de la serie agregada analizada aquí y constituye una línea de trabajo futura. Finalmente, la ausencia de una estimación local del valor estadístico de la vida (VEV) limita la valoración económica del costo social de la inacción (Viscusi & Aldy, 2003; Andersson & Treich, 2011), una brecha que esta línea de investigación busca cerrar.

Limitaciones

Cuatro limitaciones acotan el alcance de las inferencias, por lo cual conviene explicarlas:

1. Se trata de una serie agregada anual, sin variables de exposición —parque automotor, vehículos-kilómetro recorridos o composición modal—, por lo que el análisis caracteriza la dinámica temporal pero no identifica sus determinantes.
2. La asociación entre los puntos de giro y los hitos normativos e institucionales es de naturaleza temporal, no causal, y concurre con factores económicos y de motorización; establecer causalidad exigiría variación exógena, controles de exposición y un diseño cuasiexperimental, ausentes por construcción en un solo agregado nacional.
3. El subregistro y las discontinuidades metodológicas documentadas para la serie obligan a tratar el tramo reciente con prudencia.
4. Los pronósticos asumen la continuidad del régimen posterior al último quiebre, de modo que un cambio estructural —regulatorio, tecnológico o de exposición— alteraría la trayectoria proyectada.

Estas limitaciones delimitan con precisión la frontera entre lo que se establece en el estudio —una reconstrucción y caracterización robustas— y lo que se deja planteado como agenda de investigación.

CONCLUSIONES

En relación con el primer objetivo, los modelos de series de tiempo indican que la mortalidad vial colombiana sigue un proceso integrado de orden, uno cuya dinámica a largo plazo es no monótona; la evidencia es consecuente con la hipótesis H1, de un máximo en los años noventa y una reversión parcial reciente. En

lo referente al tratamiento del choque de 2020, los resultados sugieren un efecto transitorio y significativo, en consonancia con la hipótesis H2, lo que valida su modelación como intervención antes que como cambio permanente de régimen.

Respecto del segundo objetivo, la inferencia a cinco y diez años (2030 y 2035) delimita un rango entre la estabilización en torno a 8.850 fallecidos que proyecta el Arima agrupado y una trayectoria ascendente hacia 10.000 fallecidos en 2035, sugerida en forma convergente por el modelo estructural de componentes no observados y por la extrapolación de la fase de recuperación; el balance de los métodos favorece la continuidad del crecimiento. La amplitud creciente de los intervalos aconseja interpretar estos hitos como un rango de escenarios y no como cifras cerradas.

De esta inferencia se desprende una implicación de política directa: la meta del Plan Nacional de Seguridad Vial 2022-2031 —reducir la mortalidad un 50 %, hasta 7,1 por 100.000 habitantes en 2031— resulta, con la trayectoria estimada, inalcanzable. La proyección para 2031 ($\approx 16,7$ por 100.000) más que duplica el objetivo, y el país se ha alejado de la línea base desde 2021; cumplirla exigiría una reducción cercana al 57 % en seis años, un quiebre estructural sin precedentes en cuatro décadas de registro. Revertir esa trayectoria exige, más que intensificar el esfuerzo de un solo sector, una gobernanza intersectorial que incorpore como corresponsables a los sectores de salud y educación, coherente con el enfoque de «todo el gobierno» del sistema seguro (OMS, 2021; Peden et al., 2004).

El estudio aporta una actualización empírica basada en una serie de cuatro décadas, una contribución metodológica al integrar modelos Arima con un término de intervención y validación fuera de muestra, y una contribución aplicada al vincular la dinámica con la cronología normativa e institucional. Entre las limitaciones, la serie no se pudo normalizar por vehículos-kilómetro recorridos, el horizonte de validación es corto y la calidad del dato reciente está sujeta a discontinuidades. La agenda incluye modelos explicativos con variables de exposición, la estimación local del valor estadístico de la vida, la evaluación causal de la transición del Fondo de Prevención Vial a la ANSV mediante series de tiempo interrumpidas, al igual que la actualización de la serie a medida que se acumulen observaciones.

IMPPLICACIONES Y RECOMENDACIONES

En materia de monitoreo y gestión, los resultados aconsejan institucionalizar un seguimiento continuo de la serie con criterios de trazabilidad estables, que permita distinguir oportunamente entre fluctuaciones y verdaderos cambios de régimen, y evaluar el efecto de las intervenciones con diseños de series de tiempo interrumpidas. La experiencia del periodo de descenso, asociado a una institucionalidad especializada con financiación estable, sugiere además la conveniencia de preservar continuidad y recursos sostenidos en la gestión de la seguridad vial. Ese seguimiento debería contrastar en forma explícita la trayectoria observada con la senda de la meta del PNSV 2022-2031 —hoy ampliamente incumplida— para activar correcciones tempranas y evaluar la verosimilitud del objetivo.

Por último, la evidencia respalda transitar de un esfuerzo liderado por el sector del transporte hacia una gobernanza multisectorial con corresponsabilidad explícita de los sectores de salud y educación, coherente con el principio de responsabilidad compartida del sistema seguro; persistir en un abordaje monosectorial hace poco verosímil cualquier meta ambiciosa de reducción.

En materia de seguridad de los usuarios de dos ruedas, la evidencia regional sobre la creciente participación de los motociclistas en la mortalidad (Castañeda-Millán & Eslava-Schmalbach, 2024) sugiere la conveniencia de intervenciones diferenciadas que atiendan la exposición, la motorización informal y la vulnerabilidad de este grupo, en coherencia con el enfoque de sistema seguro adoptado por el país; su caracterización desagregada para Colombia constituye, además, una línea prioritaria de investigación.

Como líneas futuras de investigación, se recomienda incorporar variables de exposición, avanzar en la estimación del valor estadístico de la vida para Colombia mediante métodos de preferencias declaradas, y explorar modelos estructurales y explicativos que articulen la dinámica observada, con sus determinantes normativos, económicos y de movilidad.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Durante la preparación de este trabajo, el autor utilizó herramientas de inteligencia artificial como apoyo en la organización del análisis estadístico, la depuración del

código de procesamiento, la verificación de consistencia numérica y la edición de estilo del manuscrito. Todas las decisiones metodológicas, la interpretación de los resultados y la redacción final las hizo y revisó el autor, quien asume la responsabilidad plena del contenido. Los datos, el código y los soportes de los cálculos se conservan para su verificación.

REFERENCIAS

- Alarcón, J. D., Gich, I., Vallejo, L., Ríos, A. M., Montalvo, C., y Bonfill, X. (2018). Mortalidad por accidentes de tráfico en Colombia. Estudio comparativo con otros países. *Revista Española de Salud Pública*, 92, e201807040.
- Andersson, H., y Treich, N. (2011). The value of a statistical life. En *A handbook of transport economics* (pp. 396-424). Edward Elgar.
- Berrones-Sanz, L. D. (2017). Analysis of accidents and injuries on motorcycles in Mexico. *Gaceta Médica de México*, 153(6), 662-671. <https://doi.org/10.24875/GMM.M18000053>.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., y Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: forecasting and control* (5th ed.). Wiley.
- Castañeda-Millán, G., y Eslava-Schmalbach, J. (2024). Tendencias en la mortalidad por accidentes de tránsito en motocicleta en Colombia, 2008-2021. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 48, e44. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2024.44>.
- Chow, G. C. (1960). Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. *Econometrica*, 28(3), 591-605. <https://doi.org/10.2307/1910133>.
- Commandeur, J. J. F., Bijleveld, F. D., Bergel-Hayat, R., Antoniou, C., Yannis, G., y Papadimitriou, E. (2013). On statistical inference in time series analysis of the evolution of road safety. *Accident Analysis & Prevention*, 60, 424-434. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.11.006>.
- Congreso de la República de Colombia (2002). *Ley 769 de 2002. Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5557>.
- Congreso de la República de Colombia (2013). *Ley 1702 de 2013. Por la cual se crea la Agencia Nacional de Seguridad Vial y se dictan otras disposiciones*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=56286>.
- De Oliveira Santiago, M. L., et al. (2023). Mortalidade e anos de vida ajustados por incapacidade de motociclistas na América Latina e Caribe. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 47, e68. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2023.68>.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2023). Proyecciones de población nacional, 1985-2035 [conjunto de datos]. DANE. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>.
- Dickey, D. A., y Fuller, W. A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74(366), 427-431. <https://doi.org/10.2307/2286348>.
- Harvey, A. C. (1989). *Forecasting, structural time series models and the Kalman filter*. Cambridge University Press.
- Hauer, E. (2015). *The art of regression modeling in road safety*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12529-9>.
- Hyndman, R. J., y Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: principles and practice* (3rd ed.). OTexts. <https://otexts.com/fpp3/>.

- Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (2024). Cifras de lesiones de causa externa: muertes en accidentes de transporte [conjunto de datos]. <https://www.medicinalegal.gov.co/cifras-de-lesiones-de-causa-externa>.
- International Transport Forum (2024). *Road safety annual report 2024*. OECD Publishing.
- Kim, H.-J., Fay, M. P., Feuer, E. J., y Midthune, D. N. (2000). Permutation tests for joinpoint regression with applications to cancer rates. *Statistics in Medicine*, 19(3), 335-351.
- Kwiatkowski, D., Phillips, P. C. B., Schmidt, P., y Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. *Journal of Econometrics*, 54(1-3), 159-178. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(92\)90104-Y](https://doi.org/10.1016/0304-4076(92)90104-Y).
- Larsson, P., Dekker, S. W. A., y Tingvall, C. (2010). The need for a systems theory approach to road safety. *Safety Science*, 48(9), 1167-1174. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.10.006>.
- Malta, D. C., et al. (2023). Mortality by road transport injury in Brazilian municipalities between 2000 and 2018. *Public Health*, 220, 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2023.04.013>.
- Ministerio de Transporte (2022). *Plan Nacional de Seguridad Vial 2022-2031* (Decreto 1430 de 2022). República de Colombia. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=191348>.
- Murillo-Hoyos, J., García-Moreno, L. M., Tinjacá, N., y Jaramillo, C. (2023). Mortalidad por lesiones de tránsito y desigualdades sociales en Colombia, 2019. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 47, e121. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2023.121>.
- Observatorio Nacional de Seguridad Vial (2025). Personas fallecidas en siniestros viales. Colombia, 1986-2025 [conjunto de datos]. Agencia Nacional de Seguridad Vial. <https://ansv.gov.co/es/observatorio/estadisticas/personas-fallecidas-en-siniestros-viales>.
- Organización Mundial de la Salud (2021). *Plan Mundial para el Decenio de Acción por la Seguridad Vial 2021-2030*. OMS. <https://www.who.int/publications/m/item/global-plan-for-the-decade-of-action-for-road-safety-2021-2030>.
- Organización Mundial de la Salud (2023). *Global status report on road safety 2023*. OMS. <https://www.who.int/publications/item/9789240086517>.
- Ospina-Mateus, H., Quintana Jiménez, L. A., y Lopez-Valdes, F. J. (2020). Understanding motorcyclist-related accidents in Colombia. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, 27(2), 215-231. <https://doi.org/10.1080/17457300.2020.1725895>.
- Peden, M., Scurfield, R., Sleet, D., Mohan, D., Hyder, A. A., Jarawan, E., y Mathers, C. (eds.) (2004). *World report on road traffic injury prevention*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/42871>.
- Quintero Valverde, C., et al. (2023). Evaluation of road safety policies and their enforcement in Mexico City, 2015-2019: an interrupted time-series study. *Injury Prevention*, 29(1), 35-41. <https://doi.org/10.1136/ip-2022-044590>.
- Rodríguez Hernández, J. M., Chaparro Narváez, P. E., Hidalgo Troya, A., y Piñeros Garzón, F. S. (2025). Undercounts stemming from misclassification derived from fatal injuries in traffic crashes in Colombia, 2010 to 2021. *Traffic Injury Prevention*, 27(3), 278-286. <https://doi.org/10.1080/15389588.2025.2495863>.
- Tingvall, C., y Haworth, N. (1999). *Vision Zero: An ethical approach to safety and mobility*. 6th ITE International Conference, Melbourne.
- Viscusi, W. K., & Aldy, J. E. (2003). The value of a statistical life: a critical review of market estimates throughout the world. *Journal of Risk and Uncertainty*, 27(1), 5-76. <https://doi.org/10.1023/A:1025598106257>.
- Wegman, F. (2017). The future of road safety: a worldwide perspective. *IATSS Research*, 40(2), 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2016.05.003>.
- Yannis, G., Antoniou, C., y Papadimitriou, E. (2011). Autoregressive nonlinear time-series modeling of traffic fatalities in Europe. *European Transport Research Review*, 3(3), 113-127. <https://doi.org/10.1007/s12544-011-0055-4>.
- Zivot, E., y Andrews, D. W. K. (1992). Further evidence on the great crash, the oil-price shock, and the unit-root hypothesis. *Journal of Business & Economic Statistics*, 10(3), 251-270. <https://doi.org/10.1080/07350015.1992.10509904>.

MySQL y Apache CouchDB: análisis comparativo de sistemas de gestión de bases de datos relacionales y NoSQL

MySQL and Apache CouchDB: Comparative analysis of relational and NoSQL database management systems

ANDRÉS CAMILO VIVAS BAQUERO¹ - LAURA NATALIA PERILLA QUINTERO²

1. Estudiante de ingeniería de Sistemas
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4664-6325>
andres.vivas-b@mail.escuelaing.edu.co
2. Estudiante de ingeniería de Sistemas
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3767-4938>
laura.perilla-q@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 14/03/2026 Aceptado: 5/04/2026

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/revi>

Resumen

En el presente artículo se hace un análisis comparativo entre MySQL 8.x, sistema de gestión de bases de datos relacional de mayor adopción mundial, y Apache CouchDB 3.x, motor NoSQL, orientado a documentos y basado en JSON. El objetivo es proporcionar una referencia técnica detallada que cubra los principales aspectos de ambos sistemas: arquitectura interna, modelo de datos, lenguaje de consultas, mecanismos de concurrencia (MVCC), seguridad, respaldo, replicación, escalabilidad, mantenimiento y casos de uso ideales. La novedad del trabajo reside en la integración de un análisis técnico comparativo exhaustivo de estos dos paradigmas contrastantes dentro del contexto académico colombiano, complementado con ejemplos prácticos de operaciones CRUD y una tabla comparativa estructurada.

La metodología empleada es de naturaleza documental-comparativa: se revisaron fuentes primarias (documentación oficial de MySQL y CouchDB), bibliografía académica especializada y estudios de rendimiento publicados, articulando los hallazgos en un marco comparativo sistemático.

Los resultados indican que MySQL sobresale en entornos transaccionales con datos altamente estructurados, garantizando consistencia ACID multifila, mientras que CouchDB ofrece ventajas significativas en escenarios de alta distribución, sincronización *offline* y esquemas dinámicos, priorizando disponibilidad y consistencia eventual.

La elección entre ambos motores depende del tipo de problema, el volumen de datos, los requisitos de consistencia y la arquitectura del

sistema, y no constituye una relación de superioridad sino de idoneidad contextual.

Palabras claves: MySQL, CouchDB, bases de datos relacionales, NoSQL.

Abstract

This article presents a comparative analysis between MySQL 8.x, the world's most widely adopted relational database management system, and Apache CouchDB 3.x, a JSON-based NoSQL document-oriented database engine. The objective is to provide a detailed technical reference covering the main aspects of both systems: internal architecture, data model, query language, concurrency mechanisms (MVCC), security, backup, replication, scalability, maintenance, and ideal use cases. The novelty of this work lies in the integration of an exhaustive comparative technical analysis of these two contrasting paradigms within the Colombian academic context, complemented by practical CRUD operation examples and a structured comparison table.

The methodology is documentary-comparative in nature: primary sources (official MySQL and CouchDB documentation), specialized academic literature, and published performance studies were reviewed, articulating findings in a systematic comparative framework.

Results indicate that MySQL excels in transactional environments with highly structured data, guaranteeing multi-row ACID consistency, while CouchDB offers significant advantages in high-distribution

scenarios, offline synchronization and dynamic schemas, prioritizing availability and eventual consistency.

The choice between both engines depends on problem type, data volume, consistency requirements and system architecture, and does not constitute a relationship of superiority but of contextual suitability.

Keywords: MySQL, CouchDB, relational databases, NoSQL.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial del volumen de datos en la era digital ha llevado a la industria tecnológica a desarrollar soluciones de almacenamiento cada vez más diversas. Desde la consolidación del modelo relacional en la década de los setenta hasta la explosión de las bases de datos NoSQL a principios del siglo XXI, los sistemas de gestión de bases de datos (SGBD) han evolucionado para responder a necesidades específicas de rendimiento, flexibilidad y escalabilidad (Date, 2004).

En el contexto del curso de Sistemas de Gestión de Bases de Datos de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, se seleccionaron dos motores con filosofías de diseño contrastantes: MySQL, el SGBD relacional de código abierto más popular del mundo, y Apache CouchDB, un motor NoSQL orientado a documentos que abraza los principios de la web y la computación distribuida. Esta selección permite ilustrar la dicotomía SQL/NoSQL, los fundamentos de ambos paradigmas y las implicaciones prácticas de elegir uno u otro en proyectos reales.

El objetivo de este artículo es proporcionar una referencia técnica detallada que cubra los temas abordados a lo largo del semestre: instalación, modelado de datos, operaciones CRUD, lenguaje de consultas, concurrencia, seguridad, respaldo, replicación, estructura de alta disponibilidad, mantenimiento y optimización. Al final, se muestra una tabla comparativa y se hacen recomendaciones de uso según el tipo de problema.

El artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan la revisión de la bibliografía y el estado del arte; en la sección 3 se describe la metodología empleada; en la sección 4 se desarrolla el análisis técnico comparativo detallado de ambos motores, incluyendo arquitectura, modelo de datos, concurrencia, seguridad, respaldo, replicación, optimización y casos de uso, y en la sección 5 se sintetizan las conclusiones del trabajo.

REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA (ESTADO DEL ARTE)

La distinción entre bases de datos relacionales y NoSQL se ha estudiado ampliamente desde la proliferación de los sistemas distribuidos a gran escala. Pokorny (2013) señala que las bases de datos NoSQL no surgieron como remplazo de las relacionales, sino como respuesta a las limitaciones de escalabilidad horizontal y flexibilidad de esquema que el modelo relacional impone en entornos web de alta demanda. En la misma línea, Fowler y Sadalage (2013) introducen el concepto de persistencia polígota, según el cual una arquitectura moderna puede combinar múltiples motores de bases de datos, según las necesidades específicas de cada componente del sistema.

El teorema CAP, formulado por Brewer (2000), constituye el marco teórico fundamental para comprender las diferencias de diseño entre MySQL y CouchDB: ningún sistema distribuido puede garantizar simultáneamente consistencia, disponibilidad y tolerancia a particiones de red. MySQL, en configuración *standalone* o con Group Replication, da prioridad a consistencia y disponibilidad (CA), mientras que CouchDB, diseñado para entornos distribuidos, prioriza disponibilidad y tolerancia a particiones (AP), además de que garantiza consistencia eventual.

Kaur y Rani (2013) analizaron las capacidades de modelado y consulta de los sistemas NoSQL frente a los relacionales, y concluyeron que la elección del paradigma se debe basar en el análisis de los patrones de acceso, la naturaleza de los datos y los requisitos de consistencia. Por su parte, Chickerur, Goudar y Kinnerkar (2015) compararon el rendimiento de bases de datos relacionales con MongoDB en aplicaciones de *big data*, y evidenciaron ventajas de los sistemas documentales en inserción masiva de registros, mientras que los sistemas relacionales superan en consultas complejas con múltiples *joins*.

Patil, Sonsale y Kamble (2020), en un estudio publicado en *Applied Sciences*, hicieron un análisis de rendimiento específico entre CouchDB y MySQL, en el que se confirma que las diferencias se estrechan para conjuntos de datos pequeños (menos de 100.000 registros) y se amplían significativamente en cargas de trabajo masivas, con ventajas de CouchDB en inserción distribuida y de MySQL en eliminación y consultas complejas. IBM (2024) refuerza esta perspectiva al describir CouchDB como una solución madura para aplicaciones

offline-first y sincronización multirregión, en tanto que MySQL mantiene su dominio en sistemas transaccionales empresariales, de acuerdo con DB-Engines (2025).

La documentación oficial de MySQL (Oracle Corporation, 2023) y la de Apache CouchDB (Apache Software Foundation, 2023) constituyen las fuentes primarias más actualizadas sobre la arquitectura interna, el modelo de datos y los mecanismos de concurrencia de cada motor; además, sirven como referencia técnica base para el análisis hecho en este artículo.

METODOLOGÍA

En el presente artículo se adopta una metodología documental-comparativa de carácter cualitativo y técnico. El análisis se desarrolló en tres fases articuladas.

En la primera fase se hizo una revisión sistemática de fuentes primarias: la documentación oficial de MySQL 8.x (Oracle Corporation, 2023) y de Apache CouchDB 3.x (Apache Software Foundation, 2023), complementada con bibliografía académica especializada indexada en bases de datos como IEEE Xplore y Google Scholar, al igual que con informes técnicos de organizaciones de referencia (IBM, DB-Engines). En los criterios de selección de fuentes se dio prioridad a publicaciones de los últimos doce años, pertinencia técnica directa con los motores analizados y disponibilidad de acceso abierto.

En la segunda fase se construyó un marco comparativo estructurado en doce dimensiones técnicas: historia y evolución, arquitectura interna, modelo de datos y lenguaje de consultas, instalación y configuración, gestión de objetos y almacenamiento, control de concurrencia (MVCC), seguridad, respaldo y recuperación, replicación y alta disponibilidad, optimización y mantenimiento, migración e importación de datos, y casos de uso. Para cada dimensión se documentaron ejemplos prácticos de operaciones CRUD, así como fragmentos de configuración extraídos de la documentación oficial, con el fin de ilustrar las diferencias de paradigma en forma concreta.

En la tercera fase se sintetizaron los hallazgos en una tabla comparativa estructurada (tabla 1) y se contrastaron con los estudios de rendimiento disponibles en la bibliografía, al tiempo que se elaboraron criterios de selección aplicables a distintos tipos de proyectos. Este enfoque metodológico es coherente con estudios comparativos previos del área, como los de Kaur y

Rani (2013) y Patil et al. (2020), que emplearon marcos dimensionales similares para comparar sistemas de bases de datos heterogéneos.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En esta sección se desarrolla el análisis comparativo de MySQL 8.x y Apache CouchDB 3.x en las doce dimensiones técnicas definidas en la metodología. Para cada dimensión se presentan las características de cada motor y se discuten las implicaciones prácticas de sus diferencias de diseño.

Historia y evolución

MySQL nació en Suecia en 1995, de la mano de Michael “Monty” Widenius, David Axmark y Allan Larsson, quienes fundaron la empresa MySQL AB. El nombre MySQL combina el prefijo “My” (en honor de la hija de Widenius) con la sigla SQL. El proyecto surgió de la necesidad de un sistema de bases de datos más rápido y flexible que mSQL (MySQL AB, 1995).

En el año 2000, MySQL se publicó íntegramente bajo la licencia GPL v2, lo que impulsó su adopción masiva como componente del *stack* LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP/Perl/Python). En 2008, Sun Microsystems adquirió MySQL AB; dos años después, Oracle Corporation completó la compra, lo que motivó a un grupo de desarrolladores originales a crear en 2009 el *fork* MariaDB como alternativa comunitaria. Desde la versión 5.0 (2005) hasta la actual 8.0/8.4 LTS, MySQL ha incorporado soporte UTF-8, particionamiento, procedimientos almacenados, soporte JSON, replicación GTID e InnoDB Cluster. La versión 9.0 de 2024 introdujo programas almacenados en JavaScript y las capacidades de HeatWave GenAI.

Damien Katz, exdesarrollador de Lotus Notes en IBM, creó Apache CouchDB en abril de 2005 con la visión de construir una base de datos orientada a documentos que adoptara los principios de la web. El nombre CouchDB es un acrónimo de “Cluster Of Unreliable Commodity Hardware”, filosofía que refleja su diseño para tolerar fallos de nodos individuales. Desarrollado inicialmente en C++, el proyecto migró a Erlang en 2006 e ingresó al incubador de la Apache Software Foundation en 2008. La versión 2.0.0 (2016) incorporó *clustering* nativo, heredado del proyecto BigCouch. La versión 3.x (vigente a 2025) consolidó

el Mango Query Server y ofreció mayores garantías de seguridad por defecto.

Arquitectura interna

MySQL emplea una arquitectura de tres capas bien definidas (Schwartz et al., 2012):

- Capa de conexión y autenticación, que gestiona conexiones de clientes mediante un *pool* de hilos.
- Capa de servicios del servidor, que contiene el *parser*, el optimizador de consultas y los objetos de servidor (procedimientos, disparadores, vistas).
- Capa de motores de almacenamiento, que expone una API abstracta para motores intercambiables.

El motor predeterminado es InnoDB, que utiliza un índice agrupado en páginas de 16 KB almacenadas en tablespaces, con un *buffer pool* en memoria y un *redo log* para garantizar la durabilidad (WAL). MySQL escucha en el puerto 3306 (TCP); el proceso principal se denomina *mysqld*.

CouchDB está construido sobre Erlang/OTP y sigue el principio “everything is HTTP”: toda interacción se hace mediante una API RESTful (Lehnardt, 2014). Internamente, cada base de datos se almacena en un único archivo B-tree de *solo-append*, lo que simplifica la recuperación ante fallos y habilita MVCC sin bloqueos de lectura. A partir de la versión 2.0, CouchDB implementa *clustering* nativo mediante un anillo de *hashing* consistente, con *sharding* y réplicas configurables por base de datos. CouchDB escucha en los puertos 5984 (HTTP) y 6984 (HTTPS); el proceso principal es *beam.smp*.

Modelo de datos y lenguaje de consultas

MySQL organiza los datos en tablas con esquema rígido predefinido (DDL), siguiendo el modelo relacional de E. F. Codd (1970). Las relaciones entre tablas se expresan mediante claves foráneas que habilitan operaciones JOIN eficientes. El lenguaje de consultas es SQL (SQL:2023), con extensiones propietarias para operaciones como REPLACE INTO, GROUP_CONCAT y la familia de funciones JSON_*. A partir de la versión 8.0, MySQL soporta expresiones de tabla comunes (CTE) y funciones de ventana. A continuación, se ilustra un ciclo CRUD completo en MySQL:

```
-- CREATE TABLE CREATE TABLE estudiantes (id INT AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,
```

```
nombre VARCHAR(100) NOT NULL, materia VARCHAR(80), salon VARCHAR(20), created_at TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP); -- INSERT INSERT INTO estudiantes (nombre, materia, salon) VALUES ('Ana García', 'Bases de Datos', 's-301'); -- SELECT con JOIN SELECT e.nombre, m.nombre AS materia FROM estudiantes e JOIN materias m ON e.materia_id = m.id WHERE m.nombre = 'Bases de Datos'; -- UPDATE UPDATE estudiantes SET salon = 's-302' WHERE id = 1; -- DELETE DELETE FROM estudiantes WHERE id = 1;
```

CouchDB almacena los datos como documentos JSON independientes, sin esquema predefinido. Cada documento tiene un identificador único (*_id*) y un número de revisión (*_rev*) gestionado automáticamente. El lenguaje de consultas principal utiliza el paradigma MapReduce con funciones JavaScript; la versión 2.0 introdujo el Mango Query Server, que permite hacer consultas mediante documentos JSON similares a MongoDB. Las operaciones se realizan íntegramente mediante peticiones HTTP, como se ilustra a continuación:

```
# CREATE DATABASE PUT http://localhost:5984/estudiantes_db # INSERT PUT http://localhost:5984/estudiantes_db/est001 Body: {"nombre": "Ana García", "materia": "Bases de Datos", "salon": "S-301"} # READ GET http://localhost:5984/estudiantes_db/est001 # UPDATE (requiere _rev) PUT http://localhost:5984/estudiantes_db/est001 Body: {"_rev": "1-abc123", "salon": "S-302"} # DELETE DELETE http://localhost:5984/estudiantes_db/est001?rev=2-def456 # MANGO QUERY POST http://localhost:5984/estudiantes_db/_find Body: {"selector": {"materia": "Bases de Datos"}}
```

Instalación y configuración inicial

MySQL está disponible en los repositorios oficiales de Ubuntu y a través del repositorio APT de Oracle. La instalación en Ubuntu 22.04 LTS se realiza con `sudo apt install -y mysql-server`, seguida del asistente de seguridad `mysql_secure_installation`. El servicio se gestiona con `systemctl`, el puerto por defecto es 3306 y la configuración principal reside en `/etc/mysql/mysql.conf.d/mysqld.cnf`. Para entornos en nube, MySQL está disponible como servicio gestionado en AWS (RDS), Azure (Azure Database for MySQL) y Oracle Cloud (HeatWave). También se puede desplegar mediante Docker: `docker run --name mysql-db -e`

`MYSQL_ROOT_PASSWORD=secreto -p 3306:3306 -d mysql:8.0.`

CouchDB requiere la adición del repositorio oficial de Apache. La instalación en Ubuntu 22.04 LTS incluye la importación de la clave GPG y la adición del repositorio antes de ejecutar `sudo apt install -y couchdb`; durante el proceso se selecciona el modo (*standalone* o *cluster*) y se establece la contraseña del administrador. El servicio escucha en el puerto 5984 y la configuración reside en `/opt/couchdb/etc/local.ini`. CouchDB ofrece la interfaz gráfica Fauxton, accesible desde `http://localhost:5984/_utils`, que permite crear bases de datos, insertar documentos y ejecutar consultas Mango sin herramientas adicionales.

Arquitectura de objetos y gestión de almacenamiento

La jerarquía de objetos en MySQL sigue este orden: instancia → esquema/base de datos → tablas → columnas/índices. Los objetos principales son bases de datos, tablas, índices B-Tree/Hash/Full-text, vistas, procedimientos y funciones almacenadas, disparadores, y usuarios y roles. El almacenamiento de InnoDB utiliza páginas de 16 KB en tablespaces; los archivos `.ibd` residen en `/var/lib/mysql`. El diccionario de datos en MySQL 8.0 es transaccional y se almacena en InnoDB, reemplazando los archivos `.frm` de versiones anteriores.

CouchDB tiene una jerarquía más simple: instancia → bases de datos → documentos → campos. Los componentes principales son bases de datos (archivos `.couch` de solo-append), documentos JSON con `_id` y `_rev`, documentos de diseño (`_design`) con vistas MapReduce y funciones de validación, índices Mango para el lenguaje de consultas JSON, y usuarios gestionados en la base de datos especial `_users`. La administración se realiza mediante las bases de datos del sistema: `_global_changes`, `_replicator` y `_users`.

Control de concurrencia (MVCC)

InnoDB implementa MVCC combinado con bloqueos de fila. Internamente, cada fila almacena los campos ocultos `DB_TRX_ID` (identificador de la última transacción modificadora) y `DB_ROLL_PTR` (puntero al Undo Log). El nivel de aislamiento por defecto es REPEATABLE READ, que utiliza *next-key locks* para prevenir lecturas fantasma (Oracle Corporation, 2023). Los tipos de candados incluyen bloqueos compartidos (S), exclusivos (X), de intención (IS, IX) y de *gap*. El

comando `SHOW ENGINE INNODB STATUS` permite inspeccionar bloqueos activos y detectar *deadlocks*.

CouchDB implementa MVCC mediante *shadow paging* en el archivo B-tree de *solo-append*: las escrituras agregan una nueva versión del documento al final del archivo sin sobrescribir datos existentes, eliminando la necesidad de bloqueos en lecturas (Apache Software Foundation, 2023). No existe el concepto de transacciones multidocumento; cada escritura es atómica a nivel de documento único con semántica ACID. En entornos distribuidos, CouchDB garantiza consistencia eventual: el campo `_rev` actúa como control de versiones optimista y los conflictos de escritura simultánea se gestionan mediante el código de error 409 Conflict.

Seguridad

MySQL implementa un modelo de seguridad basado en usuarios, *hosts* y privilegios. Los componentes claves son autenticación mediante los *plugins* `caching_sha2_password` (recomendado en 8.0), LDAP y Kerberos; autorización granular en el servidor, base de datos, tabla, columna y rutina mediante GRANT/REVOKE; cifrado TLS/SSL para conexiones en tránsito e InnoDB Transparent Data Encryption (TDE) para datos en reposo desde la versión 5.7, y auditoría mediante el *plugin* Enterprise o Percona Audit Log Plugin. El *hardening* básico incluye ejecutar `mysql_secure_installation`, configurar `require_secure_transport=ON` y limitar el *bind-address* a la interfaz necesaria.

En CouchDB 3.x, la seguridad se gestiona a través de la API RESTful con el modo “Admin Party” deshabilitado por defecto. Soporta autenticación básica HTTP, *cookies* de sesión, *tokens* JWT y OAuth 2.0. La autorización se define por base de datos mediante el documento `_security` con *arrays* `admins` y `members`. El cifrado TLS/SSL es nativo para conexiones; el cifrado en reposo se debe implementar en el sistema de ficheros (LUKS). Las funciones `validate_doc_update` en documentos de diseño permiten rechazar escrituras que no cumplan reglas de negocio. El *hardening* incluye configurar `require_valid_user=true` y habilitar TLS en `local.ini`.

Respaldo y recuperación

MySQL ofrece tres mecanismos principales de respaldo. El respaldo lógico mediante `mysqldump` genera archivos SQL portables con DDL + DML, soportando la

opción `--single-transaction` para consistencia *online* con InnoDB. El respaldo físico mediante MySQL Enterprise Backup o Percona XtraBackup (gratuito) copia los archivos de InnoDB en caliente con soporte para respaldos incrementales. Los Binary Logs registran todas las modificaciones y habilitan la recuperación *point-in-time* (PITR) aplicando `mysqlbinlog` sobre los *logs* archivados tras restaurar un *backup full*.

El modelo de *solo-append* de CouchDB simplifica las estrategias de respaldo. La herramienta oficial *couchbackup* (`npm install -g @cloudant/couchbackup`) exporta documentos como JSON a un archivo NDJSON con soporte *full* e incremental. La replicación incremental nativa se puede utilizar como mecanismo de *backup* continuo hacia una instancia destino. También es posible realizar *snapshots* del sistema de ficheros del archivo *.couch* para *backups offline*. La operación de compactación (`POST /{db}/_compact`) reduce el espacio en disco, eliminando revisiones obsoletas y se puede configurar para ejecutarse automáticamente.

Replicación y alta disponibilidad

MySQL implementa replicación asíncrona y semisíncrona nativa desde la versión 3.23. Los modelos disponibles incluyen la replicación maestro-réplica clásica, los GTID (Global Transaction Identifiers, disponibles desde la versión 5.6) que simplifican la configuración y el *failover* automático, e InnoDB Cluster basado en MySQL Group Replication (activo-activo con cuórum), MySQL Router y MySQL Shell, que proporciona *failover* automático y tolerancia a fallos de nodos. También soporta topologías en cascada y *multi-source* para consolidación de datos.

La replicación es una de las características más diferenciadas de CouchDB. Su modelo *multi-master* bidireccional permite que múltiples nodos reciban escrituras simultáneamente y se sincronicen después mediante replicación incremental basada en el *_changes feed*. Esto habilita patrones *offline-first*, donde un dispositivo trabaja sin conexión y sincroniza al recuperar la red. Cuando dos réplicas modifican el mismo documento en forma independiente, CouchDB marca el documento como conflictuado (*_conflicts*) y delega la resolución a la aplicación. En modo clúster, los datos se distribuyen automáticamente entre nodos mediante *hashing*, consistente con soporte para adición y eliminación de nodos en caliente.

Optimización y mantenimiento

MySQL incorpora un optimizador basado en costos (CBO) que evalúa múltiples planes de ejecución. Las estadísticas se almacenan en *information_schema* e InnoDB Statistics y se visualizan con `EXPLAIN` o `EXPLAIN ANALYZE` (desde MySQL 8.0). Las tareas de mantenimiento regulares incluyen `ANALYZE TABLE` (actualizar estadísticas), `OPTIMIZE TABLE` (reorganizar el *tablespace*), `CHECK TABLE` (verificar integridad) y la configuración del parámetro *innodb_buffer_pool_size* (idealmente, 70-80 % de la RAM disponible).

En CouchDB, el rendimiento depende principalmente de los índices de vistas y los índices Mango. Las vistas MapReduce se construyen en forma incremental; la primera consulta puede ser lenta si hay muchos documentos sin indexar. La operación de compactación elimina revisiones obsoletas del archivo de base de datos y de los archivos de vistas. La monitorización se hace por medio del *endpoint* `GET /_stats` (estadísticas del servidor) y `GET /{db}/_design/{ddoc}/_info` (estado de una vista específica).

Migración, exportación e importación de datos

MySQL ofrece `SELECT ... INTO OUTFILE / LOAD DATA INFILE` para transferencia de datos en CSV, `mysqldump` para exportación completa en SQL, y la interfaz gráfica MySQL Workbench, con asistentes para múltiples formatos. Para migraciones complejas, herramientas ETL como Pentaho Data Integration, Apache Spark y AWS Database Migration Service se conectan mediante JDBC.

La naturaleza HTTP de CouchDB facilita la integración con *pipelines* de datos. La herramienta *couchbackup/couchrestore* exporta e importa documentos en formato NDJSON. El *endpoint* `_all_docs` con `include_docs=true` devuelve todos los documentos y es consumible directamente por *scripts* Python o Node.js. Mediante el *_changes feed* es posible construir *pipelines* de *streaming* que consuman cambios en tiempo real e integrarlos con Apache Kafka o Apache Spark.

Tabla comparativa

A renglón seguido, se resumen los aspectos técnicos más relevantes de ambos motores analizados en las secciones anteriores (tabla 1).

Tabla 1
Comparativa técnica entre MySQL 8.x y Apache CouchDB 3.x

Criterio	MySQL 8.x	Apache CouchDB 3.x
Tipo de BD	Relacional (RDBMS)	Documental NoSQL
Modelo de datos	Tablas, filas, columnas, esquema rígido	Documentos JSON, esquema flexible, sin <i>joins</i>
Lenguaje de consultas	SQL estándar (SQL:2023) + extensiones Oracle	MapReduce (JS) + Mango Query (JSON)
Lenguaje de programación	C, C++	Erlang/OTP
Puerto por defecto	3306 (TCP)	5984 (HTTP) / 6984 (HTTPS)
Proceso principal	Mysqld	beam.smp (Erlang)
ACID por transacción	Sí (InnoDB, a nivel multifila)	Sí, como documento único
Consistencia distribuida	Fuerte (por defecto)	Eventual (configurable)
Concurrencia	MVCC + row-level locking + gap locks	MVCC puro (<i>append-only</i> , sin <i>read locks</i>)
Replicación	Maestro-réplica, Group Replication, GTID	<i>Multi-master</i> bidireccional, incremental
Escalabilidad horizontal	InnoDB Cluster, NDB Cluster (limitado)	Nativa, <i>sharding</i> con <i>hashing</i> consistente
Índices	B-Tree, Hash, Full-text, Espacial	B-Tree (vistas), índices Mango
Particionamiento	RANGE, LIST, HASH, KEY (nivel de tabla)	<i>Sharding</i> automático en clúster
Backup	mysqldump, XtraBackup, Binary Log (PITR)	<i>couchbackup</i> , replicación como <i>backup</i>
Interfaz administrativa	MySQL Workbench, consola mysql	Fauxton (web), API REST
Soporte Docker	Sí (imagen oficial mysql:8.0)	Sí (imagen oficial apache/couchdb)
Soporte nubes	AWS RDS, Azure DB, GCP SQL, OCI HeatWave	IBM Cloudant, AWS (manual), Azure (manual)
Licencia	GPL v2 (Community) / Propietaria (<i>Enterprise</i>)	Apache License 2.0
Uso de disco	Moderado; <i>tablespaces</i> estructurados en páginas	Mayor (<i>append-only</i> + versiones); compactación periódica
Casos de uso ideales	ERP, e-commerce, banca, apps web transaccionales	Offline-first, móvil, IoT, CMS, sync multi-región

Fuente: Elaboración propia, basada en documentación oficial y bibliografía académica.

Criterios de selección y casos de uso

MySQL es la elección más adecuada cuando el proyecto requiere:

- Transacciones ACID que involucren múltiples tablas y entidades relacionadas (sistemas bancarios, ERP, plataformas de *e-commerce* con inventario y pedidos).
- Datos con estructura bien definida y estable, con relaciones complejas entre entidades (múltiples JOIN, restricciones de integridad referencial).
- Equipos con experiencia en SQL y ecosistema maduro de herramientas (ORM, *frameworks* de migración).
- Carga de trabajo intensiva en lecturas con réplicas de lectura, o consultas analíticas complejas con GROUP BY, *subqueries* y funciones de ventana.

CouchDB es la elección más adecuada en los siguientes escenarios:

- Aplicaciones *offline-first* para dispositivos móviles o entornos con conectividad intermitente que necesiten sincronizar datos al recuperar la red.
- Sistemas que requieren sincronización multirregión sin un punto central de verdad y donde la consistencia eventual es aceptable.
- Proyectos con esquemas de datos que cambian frecuentemente o documentos con estructuras heterogéneas que no encajan en tablas relacionales.
- Aplicaciones IoT que necesitan ingerir grandes volúmenes de documentos independientes de manera distribuida, sin *joins* complejos.

Investigaciones como la de Pokorny (2013) y Kaur y Rani (2013) demuestran que los sistemas NoSQL no se diseñaron para remplazar a los relacionales, sino para abordar escenarios donde el paradigma relacional impone restricciones de escalabilidad o flexibilidad insuperables. En el estudio de Chickerur et al. (2015) se muestra que CouchDB supera a MySQL en inserción

de documentos a gran escala, mientras que MySQL es más eficiente en consultas complejas con múltiples *joins*. Patil et al. (2020) confirman que las diferencias se estrechan para conjuntos de datos pequeños y se amplían en cargas masivas. Desde la perspectiva del teorema CAP de Brewer (2000), se debe considerar esta diferencia fundamental al evaluar requisitos de SLA y arquitectura del sistema.

CONCLUSIONES

A partir del análisis comparativo desarrollado en este artículo, se establecen las siguientes conclusiones:

- MySQL es el SGBD relacional de referencia para aplicaciones transaccionales. Su arquitectura de tres capas con motores de almacenamiento intercambiables, el motor InnoDB con MVCC y bloqueos de fila, así como el soporte completo de SQL, lo hacen ideal para la mayoría de las aplicaciones empresariales convencionales.
- Apache CouchDB representa una solución NoSQL madura para escenarios distribuidos. Su arquitectura basada en Erlang, el modelo de datos JSON flexible, la replicación *multi-master* bidireccional y la API RESTful universal lo convierten en una herramienta poderosa para aplicaciones *offline-first* y sistemas multirregión.
- Ambos motores implementan MVCC, pero con filosofías distintas: InnoDB combina versiones con bloqueos de *gap* para garantizar consistencia fuerte, mientras que CouchDB usa *append-only* sin bloqueos de lectura, priorizando disponibilidad sobre consistencia instantánea.
- La elección del motor se debe basar en el análisis de la naturaleza de los datos (estructurados vs. semiestructurados), los requisitos de consistencia (ACID estricto vs. eventual), los patrones de acceso, la escala y distribución esperada, y la experiencia del equipo de desarrollo.
- En el mercado laboral colombiano e internacional, ambos conocimientos son valiosos: MySQL domina en sistemas legados, ERP y aplicaciones web tradicionales, mientras que CouchDB y otros motores NoSQL son requeridos en proyectos de IoT, aplicaciones móviles y arquitecturas *cloud-native*.
- Como trabajo futuro se recomienda implementar pruebas de carga con sysbench (MySQL) o YCSB para medir el rendimiento en escenarios reales de alta concurrencia, y explorar la integración con PouchDB para patrones *offline-first* en Progressive Web Apps.

REFERENCIAS

- Apache Software Foundation (2023). *Apache CouchDB 3.3 documentation*. <https://docs.couchdb.org/en/stable/>.
- Brewer, E. A. (2000). *Towards robust distributed systems* (p. 7). Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC), 7.
- Chickerur, S., Goudar, A., & Kinnerkar, A. (2015). *Comparison of relational database with document-oriented database (MongoDB) for big data applications* (pp. 41-47). 2015 8th International Conference on Advanced Software Engineering & Its Applications.
- Codd, E. F. (1970). A relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM*, 13(6), 377-387. <https://doi.org/10.1145/362384.362685>.
- Date, C. J. (2004). *An introduction to database systems* (8th ed.). Addison-Wesley.
- DB-Engines (2025). *DB-Engines ranking*. <https://db-engines.com/en/ranking>.
- Fowler, M., & Sadalage, P. J. (2013). *NoSQL distilled: A brief guide to the emerging world of polyglot persistence*. Addison-Wesley.
- GeeksforGeeks (2023). *Difference between CouchDB and MySQL*. <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-couchdb-and-mysql/>
- IBM (2024a). *SQL vs. NoSQL databases: What's the difference?* IBM Think. <https://www.ibm.com/think/topics/sql-vs-nosql>.
- IBM (2024b). *What is CouchDB?* IBM Think. <https://www.ibm.com/think/topics/couchdb>.
- Kaur, K., & Rani, R. (2013). *Modeling and querying data in NoSQL databases* (pp. 1-7). 2013 IEEE International Conference on Big Data.
- Lehnardt, J. (2014). *Apache CouchDB: The definitive introduction*. InfoQ. <https://www.infoq.com/articles/apache-couchdb-the-definitive-introduction/>.
- MySQL AB (1995). *MySQL reference manual – History of MySQL*. <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/history.html>.
- Oracle Corporation (2023). *MySQL 8.0 reference manual – InnoDB multi-versioning*. <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.0/en/innodb-multi-versioning.html>.
- Patil, M., Sonsale, A., & Kamble, A. (2020). Performance analysis of NoSQL and relational databases with CouchDB and MySQL for application's data storage. *Applied Sciences*, 10(23), 8524. <https://doi.org/10.3390/app10238524>.
- Pokorny, J. (2013). NoSQL databases: A step to database scalability in web environment. *International Journal of Web Information Systems*, 9(1), 69-82.
- Schwartz, B., Zaitsev, P., & Tkachenko, V. (2012). *High performance MySQL* (3rd ed.). O'Reilly Media.
- Wikipedia (2025a). *Apache CouchDB*. https://en.wikipedia.org/wiki/Apache_CouchDB.
- Wikipedia (2025b). *MySQL*. <https://es.wikipedia.org/wiki/MySQL>.

Examen P (Probability): estructura, estadísticas y experiencias de dos candidatos

Probability (P) Exam: Structure, statistics, and experiences from two candidates

SARA CAMILA OSORIO CANTOR¹ - YESID ESTEBAN CLAVIJO PENAGOS²

1. Magister en Ciencias Actuariales. Matemática.
Universidad escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8372-5909>
sara.osorio@escuelaing.edu.co
2. Magister en Ciencia Actuarial y Finanzas. Matemático.
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7544-5866>
yesid.clavijo@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/02/2026 Aceptado: 19/03/2026

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

El examen internacional P (Probability) (en adelante, “el Examen”) es uno de los exámenes básicos de certificación de la profesión actuarial en el ámbito mundial (Asociación Actuarial Internacional [IAA], 2025) y es conocido en el medio por su dificultad intrínseca (Sociedad de Actuarios [Society of Actuaries, SOA], Examen P de Probabilidad, 2026). Colombia cuenta con actuarios que lo han aprobado, pero no es común encontrar información acerca de la estructura del Examen y las experiencias de quienes lo presentan, al menos en fuentes académicas verificadas.

Los objetivos de este artículo son presentar un abecé del Examen y estadísticas de aprobación de este, así como compartir las experiencias de dos candidatos de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería que lo han aprobado. Las fuentes consultadas son, principalmente, el sitio web de la Sociedad de Actuarios (SOA), el sitio web de la Asociación Actuarial Internacional (IAA) y Actuarial Lookup, un sitio web independiente de estas asociaciones y con estadísticas basadas en datos de libre consulta (Actuarial Lookup®, 2026). Hemos encontrado que, en la ventana de tiempo 2007-2025, la tasa de aprobación del Examen es cercana al 43 % y que es similar en los dos momentos de presentación del examen por parte de los autores (2016 y 2025).

Finalmente, los autores señalan desde su experiencia que, si bien esta no es generalizable, la preparación para aprobar el Examen se aprovecha al estructurar el camino que se debe seguir, estudiando estratégicamente, y que lo que en verdad se evalúa en este no es solo el conocimiento en Probabilidad, sino la capacidad y el modo de trabajo bajo presión de quien lo presenta.

Palabras claves: Examen P, probabilidad, exámenes actuariales, preparación de exámenes SOA.

Abstract

The international Probability (P) exam—from now on referred to as “the Exam” is one of the fundamental certification exams for the actuarial profession worldwide (International Actuarial Association, 2025) and it is known in the field for its difficulty (Society of Actuaries [SOA]– Probability [P] Exam, 2026). While there are actuaries in Colombia who have taken and passed it, information regarding the Exam’s structure and experiences of those who have taken it is not commonly found, at least in verified academic sources.

This article aims to provide an overview of the Exam and its pass rates, as well as to share the experiences of two candidates from Escuela Colombiana de Ingeniería who have taken it and succeeded. Sources include the Society of Actuaries (SOA) and the International Actuarial Association IAA websites, as well as Actuarial Lookup®—a website independent of these associations that provides statistics based on publicly available data (Actuarial Lookup®, 2026). We found that, between 2007 and 2025, the Exam’s pass rate has been approximately 43 %, and it was remarkably similar in the two specific times on which the authors took the exam (2016 and 2025).

From their own experiences—which, by nature, cannot be generalized—the authors note that, when preparing for the Exam, a candidate can take the most of it by structuring a preparation plan and studying strategically; furthermore, they conclude what is being assessed by the Exam is not merely knowledge of probability, but the abilities and working style under pressure.

Keywords: P Exam, probability, actuarial exams, SOA exams preparation.

INTRODUCCIÓN

El examen internacional EXAM P/1 (Probability) es uno de los primeros hitos en el proceso de certificación actuarial en el mundo (Asociación Actuarial Internacional [IAA], 2025). Este examen, en el que se evalúan de manera rigurosa los fundamentos teóricos y aplicados de la Probabilidad, se constituye en un referente académico para la profesión que exige solidez conceptual, capacidad analítica y disciplina en la preparación. Su aprobación no solamente acredita competencias técnicas esenciales en el ámbito actuarial, sino que también refleja un alto nivel de compromiso profesional.

El presente artículo se puede catalogar como de divulgación académica, basado en información documental, estadísticas descriptivas y experiencias de dos candidatos. Tiene como objetivo explícito *establecer una aproximación integral al mencionado examen, abordando su estructura, los principales contenidos evaluados y estadísticas relevantes relacionadas con su presentación, en la ventana de tiempo 2007-2025*.

Así mismo, se incluyen los testimonios de dos profesores de la universidad, autores del artículo, que han aprobado esta prueba y comparten sus experiencias, estrategias de preparación y reflexiones sobre el impacto del examen en su trayectoria académica y profesional. De esta manera, se busca proporcionar información objetiva y valiosa que contribuya a orientar y motivar a futuros candidatos en su proceso de preparación. Es inicialmente a este público al que se dirige el presente trabajo, tanto de la comunidad de estudiantes de ciencias actuariales de la universidad y del país, como del sector empresarial. Al final, se dan unas conclusiones globales sobre el que, a juicio de los autores, es el propósito general de evaluación del examen y sus consideraciones finales.

FUENTES Y PROCEDIMIENTO

Las fuentes consultadas para la recolección de los datos utilizados en este trabajo son Actuarial Lookup® (2026), el texto guía de libre distribución para preparación del Examen por Marcel B. Finan (2020) y el sitio oficial de la Sociedad de Actuarios (SOA, 2026). Gracias a estas consultas, hechas en el primer semestre de 2026, se recabó información disponible sin restricciones y de dos administraciones del Examen, específicamente de mayo de 2016 y septiembre de 2025. Las experiencias

se tomaron a través de una serie de preguntas con respuesta abierta.

ESTRUCTURA DEL EXAMEN

El Examen es una evaluación ampliamente reconocida a escala mundial por los sectores empresarial y académico de la profesión actuarial, como uno de los primeros exámenes de certificación de esta. Consta de 30 preguntas de selección múltiple, con una sola respuesta correcta, el cual se administra vía CBT (*Computer-Based Test*, prueba basada en computador); cada examinando cuenta con tres horas para responder (SOA, Estudiando para el Examen P, 2026).

El Examen ofrece “una evaluación integral de la comprensión del candidato sobre los conceptos de probabilidad y su aplicación en la ciencia actuarial. Los temas incluyen teoría de la probabilidad, variables aleatorias y distribuciones. Los candidatos deben demostrar conocimientos de cálculo, seguros y gestión de riesgos” (SOA, 2026, párr. 1).

Aparte del conocimiento en gestión de riesgos y en seguros mencionado, lo cierto es que el Examen se fundamenta en la teoría de la Probabilidad, disciplina matemática que estudia los fenómenos aleatorios y proporciona herramientas para analizar situaciones de incertidumbre. En el contexto de la formación actuarial, la Probabilidad no solo constituye una asignatura básica, sino el eje sobre el cual se construyen modelos de riesgo utilizados en seguros, finanzas, pensiones y otros campos relacionados con la gestión cuantitativa del riesgo. Forma parte, además, de los *syllabus* internacionales diseñados por la IAA (2025) para la formación del actuario. A continuación, se da una breve descripción de cada uno de los tres ejes centrales de evaluación en el Examen.

1. Aspectos básicos

Desde una perspectiva pedagógica, la probabilidad se puede entender como el lenguaje matemático que permite describir y medir la incertidumbre. Conceptos como experimento aleatorio, espacio muestral y eventos introducen al estudiante en la formalización de situaciones reales, en las que los resultados no se pueden conocer de antemano: fenómenos aleatorios (Blanco, 2010). A partir de allí, se desarrollan herramientas como las reglas de adición y multiplicación, la probabilidad

condicional y el teorema de Bayes, fundamentales para analizar cómo cambian las probabilidades ante la presencia de información adicional. Estos temas, básicos y generalmente iniciales en el estudio de la Probabilidad, constituyen el primer gran componente del Examen.

2. Probabilidad univariada

El segundo componente es el estudio de las variables aleatorias, tanto discretas como continuas. Estas permiten modelar numéricamente los resultados de un fenómeno aleatorio y analizar su comportamiento por medio de funciones de probabilidad o densidad, funciones de distribución acumulada y medidas como la esperanza (valor esperado) y la varianza. Dichas medidas describen el comportamiento promedio de un fenómeno y también su nivel de dispersión o riesgo, aspecto crucial en la práctica actuarial. El Examen enfatiza en el conocimiento de distribuciones de probabilidad ampliamente utilizadas en el sector actuarial, tales como la binomial, Poisson y binomial negativa en el caso discreto, y la uniforme, exponencial y normal en el caso continuo (SOA, 2026). Estas distribuciones constituyen modelos estándar para representar situaciones reales, tales como el número de siniestros en un periodo determinado, el tiempo de espera hasta que ocurra un evento o la variabilidad de ciertos indicadores financieros (Blanco, 2010).

3. Probabilidad multivariada

El tercero y último componente general del Examen consta de Probabilidad multivariada, y se centra en el estudio y la resolución de problemas con variables aleatorias discretas. Igualmente, se evalúan algunos temas particulares, como funciones generadoras de momentos o el teorema central del límite (Finan, 2020).

CARACTERÍSTICAS DE LAS PREGUNTAS

La dificultad de un examen en sí mismo (sin mirar factores externos) depende, seguramente, de muchos factores; en el caso del Examen, esta dificultad radica de manera particular en dos aspectos críticos: el tiempo promedio dado por pregunta (con la subsecuente presión que esto genera) y el lenguaje empleado. Como ejercicio ilustrativo es posible considerar el siguiente, tomado de un examen Exam P/1 de una administración pasada, motivo por el cual se ha seleccionado para ilustrar estos dos aspectos. El ejercicio, así como los demás que se mostrarán en adelante, no tiene permisos de reproducción al encontrarse en un manual de libre distribución y no emplearse para fines comerciales (Finan, 2020).

En este problema se tiene terminología actuarial que es esencial para la solución del Examen: “deducible”, “pago esperado de reclamo”. Una vez que se establece que la incógnita es el valor del deducible y que este, según el rango de valores en que se puede encontrar *a priori*, implica ciertos pagos esperados, se encuentra que el único valor posible para este es $d = 166,67$, luego la respuesta es (C). Los problemas que se plantean en el Examen son de este tipo: situaciones que hacen uso de terminología actuarial, junto a expresiones y palabras ya conocidas (por ejemplo, probabilidad, valor esperado).

Volviendo al Examen desde una perspectiva holística, el tiempo promedio por pregunta es de seis minutos; ¿cuánto tiempo podría perder un examinando ante un ejercicio como el presentado, si no ha desarrollado uno similar anteriormente? ¿Tiene claros el concepto y el significado de “deducible”, por ejemplo? Además, dado que nuestra lengua nativa es la española y el idioma del Examen es inglés, ¿es claro lo que se pregunta?

Problem 6.4.19 ‡

A policy covers a gas furnace for one year. During that year, only one of three problems can occur:

- i) The igniter switch may need to be replaced at a cost of 60. There is a 0.10 probability of this.
- ii) The pilot light may need to be replaced at a cost of 200. There is a 0.05 probability of this.
- iii) The furnace may need to be replaced at a cost of 3000. There is a 0.01 probability of this.

Calculate the deductible that would produce an expected claim payment of 30.

Figura 1. Ejercicio utilizado en materiales de preparación del Examen

Fuente: Finan (2020).

Para efectos comparativos, presentamos ahora un ejemplo de una pregunta que, a juicio de los autores, con gran probabilidad no verá un examinando:

5. Let $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ be a probability space and $A, B \in \mathcal{F}$. Which of the following does not hold?
- (A) $0 \leq P(A) \leq 1$
 - (B) $P(\Omega) = 1$
 - (C) $P(\emptyset) = 0$
 - (D) $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$
 - (E) $P(A \cap B) \leq P(B)$

Figura 2. Ejemplo de pregunta conceptual general

Fuente: Elaboración propia.

Las siguientes son tres razones de por qué se emplea una pregunta de este estilo, reiterando que a juicio de los autores, por supuesto, no tiene muchas probabilidades de que se formule en una administración del Examen:

- Es general, no involucra terminología propiamente actuarial.
- La solución viene prácticamente de memoria, lo cual implica muy poca cantidad de trabajo para resolverla.
- Cada pregunta ha de seleccionarse cuidadosamente, tomando en cuenta la naturaleza actuarial del examen, y revisar que esté enmarcada en el contexto actuarial.

La pregunta quizás parece más de un curso general de Teoría de la Probabilidad, contexto más natural para su formulación. Por cierto, la respuesta correcta es (D) porque la expresión en (D) es cierta solamente en el caso particular en que la intersección de los eventos tiene probabilidad igual a cero; luego, no es válida en general.

Hay, desde luego, otros aspectos que hay que considerar en el “por dentro” del Examen: la proporción aproximada de los temas generales que se van a evaluar, el constatar aquellos temas que, en definitiva, no se evaluarán, etc. Estos ya son más específicos y el lector interesado los puede consultar en <https://www.soa.org/globalassets/assets/files/edu/2026/july/syllabi/2026-07-p-syllabus.pdf>.

CONDICIONES DE ADMINISTRACIÓN Y PRESENTACIÓN

Disposiciones oficiales

En Colombia, tanto en las dos administraciones objeto de este estudio como en la actualidad, se ofrece el Examen al candidato en instalaciones de la empresa

administradora de la logística, Prometric (2026). La calculadora permitida es de la marca Texas Instruments, generalmente TI-30XS MultiView, y el examinando debe llevarla consigo (SOA, Identificación y calculadoras, 2026).

Percepciones de los autores en el día de presentación

Los dos autores concuerdan, de manera general, en que el examinando, previa inscripción en línea hecha con varias semanas de anticipación, llega al sitio del examen, se registra, presenta su documento de identificación y entonces lo requisan y requieren para guardar sus pertenencias en un casillero. Aunque el Examen se desarrolla en un computador, se entregan al examinando hojas de papel, lápiz y borrador. Se entra a una sala con varios computadores, donde hay otras personas presentando exámenes, al parecer, de otras clases; se sienta en su lugar y, en su pantalla, se le presentan un par de preguntas piloto y algunas indicaciones generales. A este punto, ya se hace evidente que el entorno es tan controlado que se puede estar tranquilo para tener toda la concentración que se precise y, por otra parte —aunque suene contradictorio—, sentirse algo incómodo.

CURIOSIDAD # 1

El examinando debe llevar consigo la calculadora, pero no se le permite entrar al sitio de examen con la tapa de esta (SOA, 2026).



Figura 3. Tapas no permitidas

Fuente: Fotografías de calculadora propiedad de uno de los autores.

Este es, *grosso modo*, un “por fuera” y “por dentro” del Examen desde las perspectivas de los autores, pero son perspectivas a fin de cuentas. Es momento ahora

de ver qué dicen, al respecto del Examen, algunas estadísticas de interés.

Análisis descriptivo de las tasas de aprobación

Las estadísticas históricas evidencian que se trata de una evaluación con tasas de aprobación no superiores al 50 %, lo cual puede subrayar la importancia de una preparación estructurada y rigurosa. A renglón seguido, se presenta la tasa de aprobación del Examen en la ventana de tiempo 2007-2025. Se destaca la tasa promedio histórica de aprobación: **43 %** (tabla 1).

Tabla 1
Tasa de aprobación, 2007-2025

Estadístico	Valor
Número de periodos	110
Promedio	0,4300
Mediana	0,4310
Desviación estándar	0,0354
Mínimo	0,3490
Máximo	0,5150
Tasa global ponderada	0,4280

Fuente: Elaboración propia (Solver analysis, Excel), con datos de (Actuarial Lookup, 2026).

A continuación, se presenta gráficamente la Tasa de aprobación vs. Periodo de presentación del Examen (figura 4). En esta figura no se muestra el número total de periodos revisados (110) en el eje X por motivos de espacio, pero se puede apreciar una leve tendencia al alza en la tasa de aprobación, especialmente desde marzo de 2016, fecha en que se superó el nivel de 40 % y no se volvió a un nivel por debajo de este. En cuanto a los años en que los autores presentaron y aprobaron el Examen, en 2016 (fecha de examen del autor 2) la tasa de aprobación fue del 44,4 %, levemente menor que en 2025 (fecha de examen del autor 1; tasa del 45,0 %). Las cifras en los dos periodos son similares: la diferencia entre las tasas de aprobación es de apenas un 0,6 %.

De este modo, el análisis estadístico descriptivo presentado complementa, desde un enfoque cuantitativo, el marco conceptual expuesto antes: con 43 % de tasa histórica de aprobación, no hay que tomarse el Examen a la ligera. Esta tasa permite contextualizar la exigencia

del Examen en cada una de sus administraciones: menos de la mitad de los candidatos logran aprobarlo.

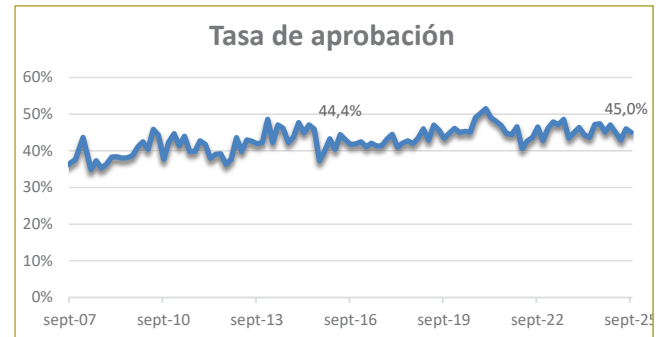


Figura 4. Tasa de aprobación del Examen, 2007-2025

Fuente: Gráfica construida con datos de Actuarial Lookup® (2026).

EXPERIENCIAS COMPARADAS DE PREPARACIÓN Y PRESENTACIÓN

En la sección anterior se han descrito las generalidades, aspectos específicos y estadísticas en torno al Examen. Es momento ahora de presentar nuestras concepciones y nuestras observaciones como examinandos que, habiendo aprobado el examen en dos momentos diferentes —con casi una década de diferencia—, podemos ofrecer nuevas perspectivas sobre este que, de seguro, ningún manual puede brindar o que, en caso de hacerlo, puede sonar a más bien una serie de consejos lejanos.

Seguramente, hay muchas formas en que esto se puede hacer, pero hemos optado por la siguiente: las preguntas se han formulado de común acuerdo entre los autores, con el fin de permitir una libre respuesta de cada uno, soportada en su experiencia particular. Las organizamos en las siguientes categorías:

1. Motivación para presentar el Examen.
2. Observaciones acerca de preconcepciones comunes en torno al Examen.
3. Conclusiones generales y recomendaciones para posibles examinandos.

Aclaremos que todas las afirmaciones presentadas en esta sección son nuestras percepciones sobre cada tema en particular, observaciones que, desde la experiencia, no necesariamente son válidas para cada candidato o en cada administración del Examen.

1. ¿Qué lo motivó a presentar el Examen?

AUTOR 1

“Inicialmente, quisiera comentar que mientras cursaba una asignatura de la maestría en la universidad, tuve la oportunidad de tomar una electiva como preparación para el Examen. En esta asignatura se realizó un repaso de todos los temas incluidos en el *syllabus* y, adicionalmente, se resolvían ejercicios cronometrados que simulaban las condiciones de una prueba real. Fue en ese contexto donde surgió mi interés por presentarlo. En ese momento, supe de un programa de becas para su presentación, pero para obtener una de ellas se necesitaba aprobar un simulacro diseñado por la organización emisora de las becas. Motivada por aprovechar esta oportunidad y por el reto de enfrentar un examen diferente de cualquiera que hubiera presentado antes, decidí inscribirme en el programa.

Considero importante destacar que las condiciones de seguridad para presentarlo son bastante estrictas y muy distintas de las que normalmente se experimentan en evaluaciones académicas tradicionales. Esto puede generar intimidación o incluso aumentar el nivel de estrés. No obstante, también es importante señalar que uno de los aspectos que más distinguen este examen es el proceso de preparación. Tener la posibilidad de hacer un repaso detallado de todos los temas, acostumbrarse al tiempo promedio para resolver cada pregunta e incluso aprender a utilizar la calculadora de manera eficiente son habilidades que requieren práctica constante y que, en muchos casos, toman varios meses de preparación”.

AUTOR 2

“Para mí, el examen fue una experiencia interesante. En primer lugar, porque fue diferente a todo a lo que estaba acostumbrado hasta ese momento: exámenes matemáticos con tiempo de sobra para cada pregunta, sin presión más que la aprobación en sí, gratuitos, etc. El hecho de que el Examen fuese también en un lugar lejos de mi entorno cercano y tan vigilado por todas partes hizo que mi experiencia fuese un poco extraña, quizá incluso algo intimidatoria si uno se deja afectar por esas cosas. Así que, además de haberlo aprobado, siento que gané experiencia en

el manejo de la presión en entornos diferentes a los que eran usuales para mí hasta ese momento.

En segundo lugar, quise retarme a mí mismo, saber cómo mis conocimientos de Probabilidad podrían traducirse o no en la aprobación de este examen que, ya entonces, contaba con esa aura de dificultad que siempre se le ha dado (cabe mencionar que, a ese momento (2016 – 1), me encontraba cursando mi maestría en Actuaría). “¿Será así de difícil como dicen? Miremos”, pensé.

También, lo presenté porque intuí que, si lograba aprobarlo, podría a futuro presentar una propuesta de un curso, podría ayudar de algún modo a otros que quisieran prepararse para presentarlo. Y ¡vaya que sí he podido hacerlo!

Y finalmente, lo quise presentar porque sabía que me serviría para el futuro en lo laboral. Tratándose de una certificación reconocida, avalada y con prestigio internacional, vale la pena tenerla: es tan válida si el día de mañana trabajas en el sector aquí en Colombia como si lo haces en Estados Unidos, en Inglaterra, en la India, en Japón. Así como hay exámenes que validan tu conocimiento del idioma inglés a nivel internacional, exámenes como el Examen son válidos en todo el mundo como hitos de certificación de la profesión actuarial”.

2. Observaciones acerca de preconcepciones comunes en torno al Examen

- ¿Qué opinan acerca de la percepción en el sector actuarial de que “El Examen es difícil”?

AUTOR 1

“No considero que el examen sea particularmente difícil. Sin embargo, creo que existen varios factores que pueden influir en el momento de presentarlo y que no siempre resultan favorables para el candidato. Como mencioné anteriormente, la preparación es fundamental: aunque los temas evaluados no son especialmente complejos, sí abarcan un amplio contenido que difícilmente puede repasarse con profundidad en una sola semana, por ejemplo.

Adicionalmente, las condiciones de presentación (como el tiempo limitado para resolver las preguntas y las estrictas medidas de seguridad del lugar donde

se realiza la prueba) también pueden representar un desafío. Todos estos elementos pueden llegar a influir en el desempeño y, en consecuencia, en los resultados obtenidos”.

AUTOR 2

“Sin duda lo es. Pero no por la profundidad del contenido matemático necesario, que está al alcance de prácticamente todo profesional, sino por la conjunción de variables a tener en cuenta: velocidad en la escritura; gestión correcta de las 3 horas de examen, que pasan rápido; manejo de la presión; etc. Pienso que este examen es difícil porque no siempre se logra manejar estas variables con la misma eficiencia, si no eficacia. Por ejemplo: Si sueles quedarte demasiado tiempo pensando en una pregunta particular (y esto no es poco común entre nosotros los matemáticos), tienes pocas probabilidades de aprobar. No tienes tiempo de particularizar: si esta pregunta te hace pensar, debes pasar a la siguiente y volver a esta al final, si queda tiempo. Si quedan 10 segundos, marca una respuesta al azar.

Finalmente, creo que la dificultad del Examen también la sugiere esa misma “aura de dificultad” que se le ha puesto, ese entorno de Examen, esos portales en Internet, etc. También ahí comienza la labor: desmitificarlo y pensarlo como posible, como accesible, como más que probable si estudias bien... En resumen, el examen intrínsecamente es más o menos difícil en la medida en que estés mejor o menos preparado (Como suele suceder con exámenes académicos)”.

- Se dice en el medio actuarial que, para aprobarlo, hay que estudiar con, al menos, tres meses de anticipación. ¿Qué opinan?

AUTOR 1

“Estoy de acuerdo en que estudiar con al menos tres meses de anticipación puede ser una buena estrategia. No obstante, también considero que es posible prepararse en menos tiempo, siempre y cuando los temas estén muy claros, se hayan visto recientemente o se tenga la posibilidad de estudiar de forma constante casi todos los días de la semana.

Sin embargo, en el caso de alguien que vio estos temas hace mucho tiempo, no tiene claro por dón-

de comenzar o no puede dedicar mucho tiempo al estudio durante la semana, tres meses me parece un periodo razonable. Este tiempo permite realizar una cantidad suficiente de ejercicios y hacer un repaso adecuado de la teoría necesaria para enfrentar el examen con mayor seguridad”.

AUTOR 2

“Esto depende mucho de cada estudiante, pero sí, estoy de acuerdo. Es un tiempo prudencial para *retomar* los temas y realizar suficiente cantidad de ejercicios, de modo que los del Examen sean ya muy parecidos a los que ya realizaste antes. Esto no se logra, en mi opinión, a menos que uno no se dedique a otra cosa, con menos de un par de meses de estudio constante, 5-6 días por semana.

En más de una ocasión he conocido colegas o amigos actuarios de colegas que han reprobado el Examen porque comenzaron a estudiar con 15, 20 ó 40 días de anticipación. No querrás hacer eso si, además de haber estudiado 100 o más horas, has pagado USD \$275 (en 2026) por el derecho a presentarlo (Sociedad de Actuarios americana – Examen P de Probabilidad, 2026).

Notarás que enfatice la palabra *retomar*: si es la primera vez que ves los conceptos o han pasado años desde que los viste y los has olvidado, no creo que 3 meses sean suficientes”.

- ¿Qué opinión, desde su experiencia de Examen y profesional, les merece la afirmación “el Examen te da una mejor hoja de vida”?

AUTOR 1

“No necesariamente. En gran medida depende del tipo de puesto al que se aspire. En Colombia existen empresas que valoran considerablemente las certificaciones de la SOA, mientras que otras no les dan tanta relevancia. Sin embargo, si los cargos a los que deseas postularte requieren o valoran este tipo de certificaciones, contar con ellas puede fortalecer tu hoja de vida y mejorar tus oportunidades profesionales”.

AUTOR 2

“Sí, en el sentido de que, *Ceteris Paribus*, se te verá con mejores ojos frente a un candidato al mismo

puesto de trabajo que no cuente con el examen en su currículo. Sin embargo, debes evaluar detenidamente si te conviene comenzar con el camino de presentar exámenes: aunque sabemos que, en el sector actuarial, aprobar exámenes equivale a obtener certificación completa en la temática de interés, cada examen es demandante, tanto en tiempo como en dinero y, por ende, sin recompensa aparente en el corto plazo –más allá de la simple satisfacción que brinda el aprendizaje continuo. Una colega actuarial comentaba que presentó dos exámenes y decidió detenerse: no le vio más valor agregado al seguir en ello, aunque podría haberlo hecho. Es decisión de cada uno. Los exámenes *per se* no tienen más valor que el que cada uno considere que tiene para su carrera empresarial o docente. Por eso, muchos colegas en el sector los presentan y muchos otros no. Es que, si la única motivación de presentarlos es mejorar el currículo, creo que hay muchas otras formas, menos costosas en tiempo y dinero, y puede que menos estresantes, para hacerlo”.

- En el sector, hay opiniones divididas en cuanto a si aprobarlo te da o no mejor comprensión del negocio y, en general, del mundo actuarial.

AUTOR 1

“Desde mi perspectiva, Sara Osorio, la respuesta es ‘no’. Si bien el examen P garantiza una base sólida en probabilidad, sus planteamientos suelen ser teóricos y no se acercan a los desafíos prácticos que se enfrentan en el día a día de una empresa. Considero que la comprensión real del negocio y del mundo actuarial se adquiere a través de la experiencia directa; haber aprobado el examen no marca, por sí solo, una diferencia significativa en el criterio profesional que se desarrolla trabajando”.

AUTOR 2

“Se trata de un examen fundamentalmente teórico, si bien la terminología empleada es actuarial. Te brinda algunas concepciones o palabras nuevas de utilidad en el medio, pero la opinión de algunos colegas y la mía es que el negocio lo llegas a conocer realmente en la empresa. El Examen no te garantiza comprensión del negocio, pero su preparación contribuye a tu

formación actuarial de base, lo cual te dará mejores herramientas para abordar problemas cuando te encuentres en la empresa”.

- Diversas fuentes, por ejemplo, la Sociedad de Actuarios americana – Estudiando para el Examen P (2026), sugieren que el Examen es el primero que debería presentar un actuario en formación que desee comenzar a certificarse vía exámenes internacionales.

AUTOR 1

“No existe una regla fija; no hay, de hecho, no hay una ‘ruta oficial’, sólo hay sugerencias. Considero que la elección depende de la afinidad técnica de cada candidato. Para quienes tienen mayor cercanía con las matemáticas financieras, el examen FM (Financial Mathematics) puede ser una puerta de entrada más natural. Sin embargo, el Examen P posee una curva de dificultad equilibrada que lo convierte en un excelente punto de partida. Presentarlo como primer examen permite al actuario en formación familiarizarse con la logística de los exámenes internacionales, ganar confianza en el entorno de evaluación y, sobre todo, validar su método de estudio antes de enfrentar niveles de mayor complejidad”.

AUTOR 2

“Muchos consideran que sí, otros dicen que es mejor comenzar por el examen FM (Matemática Financiera) ... no hay un consenso oficial, pero, en mi opinión, cualquiera de los dos constituye un buen comienzo -si bien puede ser mejor idea comenzar por el Examen si tienes más afinidad con los conceptos teóricos que con las aplicaciones financieras, por ejemplo, si eres estudiante de últimos semestres de la Universidad y no has trabajado en empresa. En otros casos, por ejemplo, si ya trabajas en un banco o en una compañía de seguros, así sea como practicante, puede ser mejor idea comenzar con el FM. En resumen, la decisión depende de tu formación previa y afinidad temática. También se sugiere que el primer examen a presentar para certificación sea uno de entre esos dos, el FM y el Examen, eso sí” (Sociedad de Actuarios americana – Examen P de Probabilidad, 2026), (Asociación Actuarial Internacional, 2025).

- Varios de los que lo han presentado afirmaron que fue necesario desarrollar cientos de ejercicios de práctica. En línea con esto, algunos de ellos afirmaban: “sin ellos, no creo que lo hubiera logrado”.

AUTOR 1

“En mi caso, el volumen de ejercicios fue clave. Aunque recomiendo organizar una lista de problemas por niveles de dificultad para interiorizar la metodología de resolución, eso es solo el primer paso. La verdadera diferencia se marca en la velocidad: para ganar la agilidad que exige el examen, es indispensable haber resuelto cientos de ejercicios de diversos estilos. Es una combinación de entender el ‘cómo’ y mecanizar el ‘cuándo’ para no perder tiempo valioso”.

AUTOR 2

“De acuerdo. El examen, como se mencionó anteriormente, (pienso que) debe llegar a ser ‘tan sólo una lista más’ de ejercicios; por supuesto que siempre hay alguna pregunta nueva, sorprendente, inesperada. Pero que sea la excepción: si la mayoría de preguntas no te son familiares a primera vista, posiblemente no estás preparado. También es importante realizar simulacros de examen, sobre todo para simular la presión del tiempo”.

Con disensión en algunas de nuestras respuestas, lo cierto es que los autores coincidimos en, por lo menos, reconocer que el Examen no se aprueba sin una preparación adecuada, metódica, estratégica.

CURIOSIDAD # 2

Al candidato se le permite ingresar con el anillo de boda o de compromiso. Es el único tipo de joya permitido (Sociedad de Actuarios americana – información del día del examen, 2026).

3. Conclusiones generales y recomendaciones para posibles examinandos

- ¿Valió la pena todo el proceso (decisión inicial, estudio, inscripción, presentación) y habría valido la pena en caso de no haberlo aprobado?

AUTOR 1

Sin duda alguna, valió la pena. Fue una oportunidad que decidí aprovechar para desafiar mis propios límites. Incluso en un escenario de no haber aprobado, el valor del proceso permanecería intacto, ya que los meses de preparación me permitieron fortalecer una disciplina que es vital en nuestra carrera.

AUTOR 2

Valió la pena, dado que tuve desde un principio la idea de que no me quedaría solamente con el Aprobado/Reprobado, sino que -a partir de ello- generaría nuevas enseñanzas y las compartiría. Mismo si no lo hubiera aprobado; sólo que, en este caso, habría comenzado a canalizar esfuerzos hacia nuevos temas más productivos o, cuando menos, satisfactorios.

- ¿Qué sugiere, en términos generales, para preparar adecuadamente el Examen?

AUTOR 1

Preparar este examen requiere, ante todo, determinación. Inscribirse sin una convicción real suele llevar a una preparación deficiente. Mi consejo es *estructurar el camino*: definir un plan de estudio claro, organizar los horarios y tener metas tangibles de ejercicios por resolver.

AUTOR 2

En general, sugiero *estudiar estratégicamente*. Esto combina una serie de actividades de estudio entre las cuales podemos citar: -Proveerse de un manual, gratuito o no, pero reconocido, porque estos manuales son diseñados específicamente para preparar el Examen. - Estudiar no menos de una hora ni más de tres horas continuas diarias; Estudiar todos (o casi todos) los días de la semana, 5 o 6 de estos; hacer, al menos, 5 simulacros de examen, replicando en lo posible todas las condiciones reales del mismo; estudiar en pareja o grupo sólo si todos los miembros del mismo están en la misma sintonía de estudio, de otro modo, es mejor estudiar solo (!) porque el estudio para un examen como éste te exige optimizar tu tiempo.

Como dice ella, si no tienes la convicción real, pienso que es mejor que no te inscribas.

- ¿Qué evalúa *realmente* este examen?

AUTOR 1

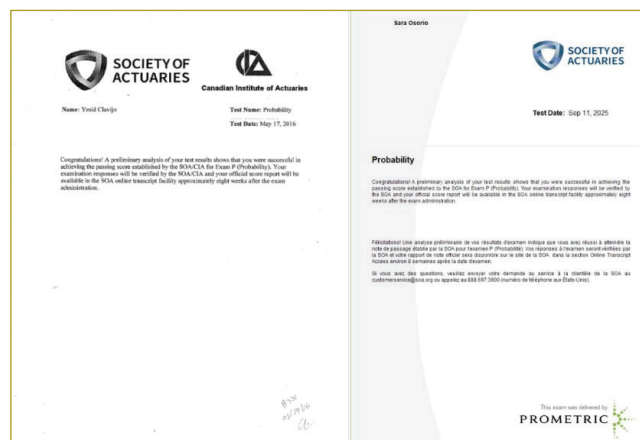
Más allá del conocimiento, veo este examen como una verdadera autoevaluación personal. Te obliga a medir qué tanta disciplina y orden puedes mantener por tu cuenta, pero, sobre todo, pone a prueba cómo respondes cuando estás bajo presión en un entorno que no controlas.

AUTOR 2

Pienso que lo que realmente evalúa el Examen es tu capacidad de trabajo bajo presión; tu tenacidad para acumular la cantidad de horas de estudio necesarias; tu velocidad y precisión. Evalúa si tienes habilidades que resultan necesarias y útiles en el mundo actuarial.

CURIOSIDAD # 3

Figura 5. El laurel de la victoria: certificado preliminar de aprobación del Examen, dado justo al terminar de responderlo; coincide con el reporte oficial de aprobación, otorgado dos meses después, en más del 99,9 % de los casos (Sociedad de Actuarios. Resultados instantáneos y retroalimentación del desempeño, 2026). Victoria anticipada



Fuente: Elaboración propia, con información dada por Prometric (2026) a los examinandos, una vez terminado el Examen.

CONSIDERACIONES FINALES

Limitaciones y conclusiones

Dado el carácter descriptivo y divulgativo del presente trabajo, así como por incorporar testimonios sobre experiencias personales, el mismo no constituye una guía

objetiva de estudio para el Examen ni sus resultados son generalizables a cada examinando del mismo. También y como posible trabajo futuro, sería interesante incorporar estudios comparativos con más candidatos aprobados y de candidatos reprobados. Finalmente, dado que las reglas de presentación del Examen han sido prácticamente las mismas desde 2016 a la fecha (Sociedad de Actuarios americana – Examen P de Probabilidad, 2026), el trabajo presente puede, no obstante, servir de apoyo complementario en la formación del actuario con miras a presentarlo y aprobarlo.

La aprobación del examen EXAM P/1 (Probability), uno de los exámenes *básicos* de formación y certificación actuarial, se puede ver como un hecho derivado de la disciplina consistente y estratégica por parte de quien lo prepara, el cual espera obtener esta aprobación y en consecuencia trabaja conscientemente para maximizar su probabilidad de lograrla y así poder continuar, con motivación y disciplina, en el camino de su formación actuarial con reconocimiento internacional.

REFERENCIAS

- Actuarial Lookup (2026). *Exams / SOA / P*. <https://www.actuarial-lookup.com/exams/p>
- Blanco, L. *Probabilidad*, editorial Universidad Nacional de Colombia, 2da Ed., 2010,
- Finan, M. *A Probability Course for the Actuaries - A Preparation for Exam P/1*, Department of Mathematics, Arkansas Tech University, 2020,
- International Actuarial Association (2026). https://actuaries.org/app/uploads/2025/06/20250525_EducationSyllabus_Final.pdf
- PROMETRIC (2026). *Why Prometric / Assessment Development*. <https://www.prometric.com/assessment-development>
- Society of Actuaries (2026). *Probability (P) Exam*. <https://www.soa.org/education/exam-req/edu-exam-p-detail/>
- Society of Actuaries (2026). *Identification and Calculators*. <https://www.soa.org/education/exam-req/exam-day-info/edu-id-calculators/>
- Society of Actuaries (2026). *Studying for the Exam P*. <https://www.soa.org/globalassets/assets/files/edu/2026/july/syllabi/2026-07-p-syllabus.pdf>
- Society of Actuaries (2026). *Exam day information*. <https://www.soa.org/education/exam-req/exam-day-info/edu-procedures-for-exam-day/#checking-in>
- Society of Actuaries (2026). *Instant Results and Performance Feedback*. <https://www.soa.org/education/exam-req/exam-day-info/edu-grades-exams/>

NOTA: Todas las páginas web se han consultado por última vez en agosto de 2026, verificándose que la información consignada en el trabajo y referenciada en estas páginas sigue vigente y actualizada.



Jornada de Estudio de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas



Con el apoyo de:



Escuela de
Ciencias Aplicadas
e Ingeniería



Invitan:



Las PCH's claves para la transición energética



Second International small hydro meeting

Sección **ESPECIAL**



Decisions that make a hydropower project successful

Decisiones que hacen que un proyecto hidroeléctrico sea exitoso

BERNHARD PELIKAN

PhD. Researcher and university lecturer.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8976-8349>
pelikan@boku.ac.at

Recibido: 11/04/2026 Aceptado: 5/05/2026
Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Abstract

Hydropower design is an interdisciplinary task which needs both the understanding of natural mechanisms and technical expertise. The initial investment in a hydropower plant is reasonably high. Once the project is complete, the options of modification are relatively poor – consequently a set of decisions has to be managed very carefully and with high responsibility. It makes complete sense to invest some time and money in detailed analysis, particularly of the natural mechanism, which is always a unique task. Engineering has to act with nature and not against it. Unfortunately, hydrological data, including bed load transport, are in many projects the weak point. Significant efforts have to be made to close this gap and to design hydropower plants that can run smoothly for hundreds of years.

Keywords: hydropower, hydropower plant design, technical-economic optimization, bed load transport.

Resumen

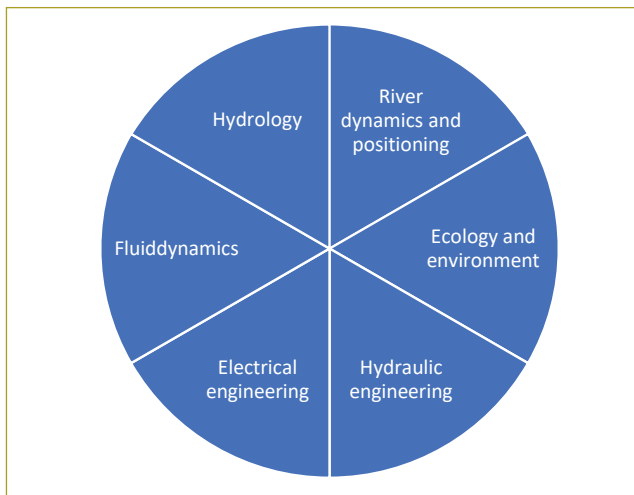
El diseño de una planta hidroeléctrica es una tarea interdisciplinaria que requiere entender tanto los mecanismos naturales como un profundo conocimiento técnico. La inversión inicial de cualquier proyecto hidroeléctrico es considerablemente alta. Al completar el proyecto, las posibilidades de modificarlo son virtualmente nulas, por lo tanto, se deben tomar decisiones que requieren una gestión cuidadosa y que conllevan una gran responsabilidad. Es evidente que se requiere invertir tiempo y dinero para realizar análisis detallados, en especial de los mecanismos naturales, los cuales son extremadamente peculiares para cada caso. La ingeniería debe estar en línea con la naturaleza y no en contra de ella. Desafortunadamente, los datos hidrológicos, incluyendo transporte de carga de fondo, son los puntos más débiles en la mayoría de los proyectos. Se deben realizar esfuerzos suficientes para cerrar la brecha y diseñar plantas hidroeléctricas que funcionen sin novedades por cientos de años.

Palabras claves: energía hidroeléctrica, diseño de centrales hidroeléctricas, optimización técnico-económica, transporte de sedimentos.

INTRODUCTION

The design and engineering of a hydropower plant is a quite complex exercise and needs expertise in various disciplines. Few of those are crucial regarding the overall quality of the project. Due the fact that hydropower is harnessing a natural resource the engineer has to fully understand the natural processes. The water cycle and the dynamics in the river remain completely individual and a general rule is impossible. The better the knowledge about the river and its flow the higher the chances to develop a successful project. The following graph gives an overview of competences necessary.

Figure 1
Competences necessary (own design)



Of course, there are many more topics addressing the engineering of a hydropower plant in later stages of design like connection to the grid, used materials, accessibility and several operational aspects not to be discussed in this article. All of them are very important as well. This article will concentrate on very early decisions, not to be revised later on and therefore essential for all the future of a plant.

What makes a Hydropower project successful?

Building and operating a hydropower plant is a business that needs significant investment, particularly in an early stage. Success is the core of any business and different kind of business need individual criteria to measure the overall success.

In terms of hydropower the focus can be laid on five criteria:

- Economic viability.
- Operational reliability.
- Minimised maintenance.
- Long lifetime.
- Public acceptance.

Economic viability means that the project meets the targets of a critical cost-benefit analysis considering the investment, the expected income and the lifespan of the plant respectively of its components. As the real minimum request the technical lifespan should be higher than the payback period of the plant.

Operational reliability means that the components of the plant fulfil more or less perfectly the functions the components are built or installed for. To give an example – The water intake of a plant should divert a certain amount of water from the river. And this function must be guaranteed for the entire lifetime of the plant. If the intake is blocked by gravel or logs during a flood event or if sand or bedload material in general is getting into the headwater channel or pipeline, this guarantee will fail.

Of course, in case the operation of the plant is running smoothly, the maintenance necessary will be at the minimum. That does not mean, that zero maintenance is possible or recommended. Even a well-designed and perfectly operating plant needs continuous maintenance and control in order to identify upcoming problems as soon as possible. Similar to human health, early identification of problems will ease the repair work necessary.

Hydropower is definitely not a short-termed business. The initial investment is rather high and the plant will reach the most profitable period approximately after 10 – 15 years. The real lifetime is much longer; 50 – 70 years can easily be reached if the plant is operated carefully. In case the concept of the plant is very good, components of the plant like a turbine or a pipeline can be replaced and prolong the lifetime further on.

A non-technical criterion of success is the public acceptance. It is not a simple task to reach this target and the process starts very early with the planning and the construction. Interaction with the local population and inclusion of local workforce are important steps to create a psychological “ownership” among the population. The direct supply of electricity to households or local companies will strengthen this feeling during the entire

lifetime of the plant. Maintenance and repair work can be done by local companies.

The following chapters will deal with selected specific topics to be addressed during the design process. It is by far not a complete list and in all cases we talk about optimisation, which is finally one of the secrets of success.

IDENTIFICATION OF THE MOST ATTRACTIVE RIVER REACH

When starting with the idea of a hydropower project it is highly recommended to firstly get a clear picture of the river to be used. The research includes a longitudinal section and the calculation of the size of the catchment respectively sub-catchments both based on available maps or GPS data.

The second critical information needed is the hydrology of the river. In best case there is a gauging station available providing data series. This best case remains in the great majority of projects a wish of the engineer. Usually he has to find other methods to at least estimate the flow conditions. Although hydrological data are the crucial point in hydropower design this topic will not be subject of this article.

In this stage precise hydrological data are not yet necessary, because they do not have an impact on the identification of the most attractive river reach.

Having the information about topography and hydrology it is possible to create a “Longitudinal section energy” shown in the following picture.

As it is described in the legend, the input data are elevation, catchment area and specific discharge, a very

useful unit in $\text{l.s}/\text{km}^2$. Particularly when hydrological data are not available, this value allows the comparison with other observed catchments with similar character in terms of altitude, size and precipitation. As a first approximation and only allowed for smaller catchments this value can be assumed constant. The specific discharge relates the size of the catchment with the mean flow.

The result is the energy potential in kW/km (red line), calculated river reach by river reach. In the specific example there are several reaches offering potential of different attractivity. Between $\text{km } 17 - 18,7$, $12,2 - 13,5$, $10 - 11,4$ and $0 - 2,9$. The best seems to be between $12,2 - 13,5$.

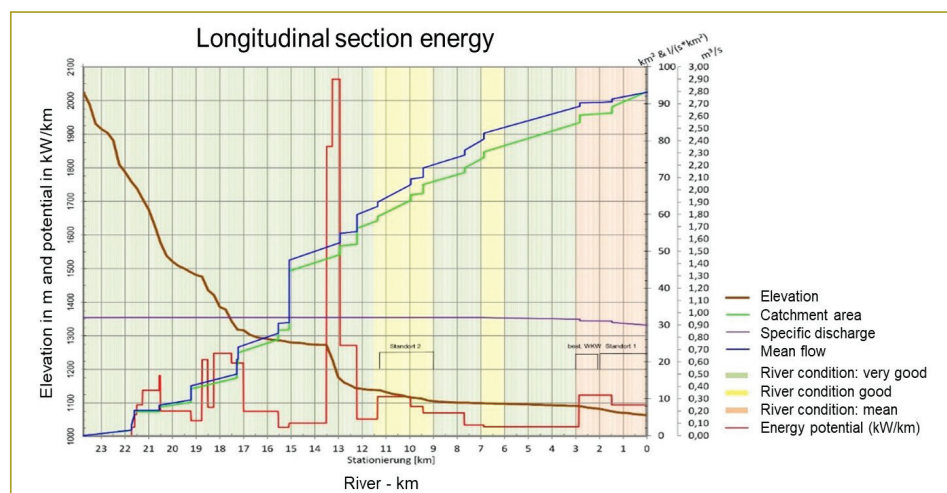
But the theoretically best solution cannot be realised due to environmental restrictions. A waterfall with a head of approximately 100m is located in the potential diversion reach and environmentally protected. The colours – light green, light yellow and light red – indicate the environmental river condition.

Finally, only two positions remain, because there is already an existing plant between $\text{km } 2,1 - 3$. Further calculations and research work have to address additional parameters like the existence of electrical lines or access conditions and will find out, which position has to be preferred.

SELECTION OF RATED DISCHARGE

Assumed the procedure described in the previous chapter ended up in the decision for one of the two options, the next decision is again crucial regarding the success of the project: the selection of the rated discharge. In

Figure 2
Longitudinal section
energy (own design)



a first preliminary project the rated discharge can be estimated by taking the rule of thumbs: 1 – 1,2 mean flow. In several cases this estimation will be quite ok but a serious and understandable engineering must be based on an optimisation process.

A precondition of the optimisation are reliable hydrological data in a daily resolution and a period of some years at least. Depending on the institution operating the gauging station, it is recommended to check the validity of the rating curve used by individual control measures. The investment for the installation of a gauge is negligible compared with the investment of the plant.

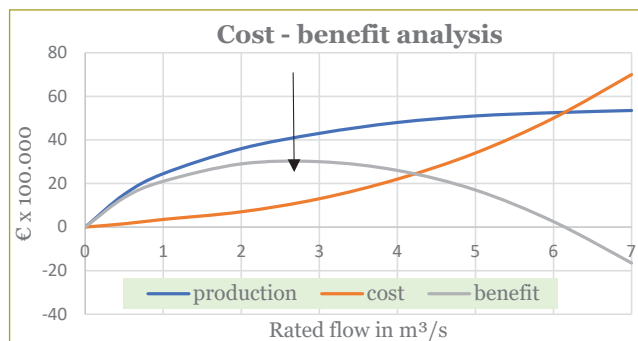
The optimisation is well known as “Cost-benefit analysis” and requires the definition of a remarkable number of alternatives to be compared. The selection of these alternatives can most easily be done by using different percentages of the mean flow.

An experienced strategy is the use of 90%, 100%, 110%, 120% and 130% of mean flow. Of course, such an optimisation creates detailed work particularly regarding the cost. It is necessary to perform at least a preliminary design for several solutions, calculating the bills of quantity and collecting offers from different suppliers of turbines, pipes etc.

Assumed the good hydrological data are available, the calculation of the annual electricity production is relatively simple. The basis of the calculation should be the daily values of the hydrograph. Using mean values – for example monthly mean values – will significantly overestimate the production because very wet or very dry periods got hidden.

The following picture shows the final result of the procedure. The production (blue line) is – according to the shape of a flow duration curve – a degressive function. The cost (red line) is usually slightly progres-

Figure 3
Cost benefit analysis (own design)



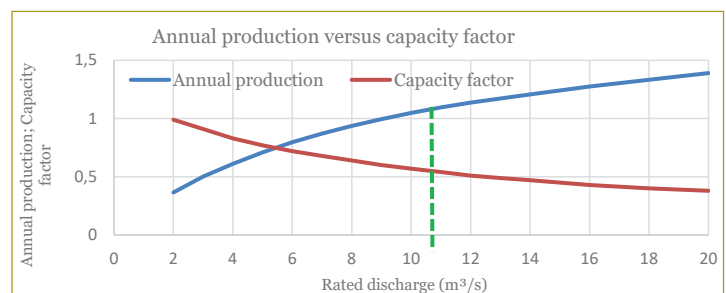
sive because the increase of the rated flow will activate additional topics to be included in the design. An example is the cost of pipes.

The grey line is the difference curve and shows a clear maximum at around 2,6m³/s – the recommended rated flow.

Of course, the picture simplifies the process, because the period of amortisation and interest rates have to be included and any change will change the result as well. Additionally, the value of the electricity produced may significantly influence the result.

Another hot topic related to the rated discharge is the capacity factor. It is defined as: real annual electricity production / theoretical maximum annual electricity production. A high capacity factor is not indicating the quality of a project. Experienced based values vary between 45 and 60%. Higher values indicate an incomplete exploitation of the existing hydropower potential.

Figure 4
Annual production versus capacity factor (own design)



SURFACE WATER INTAKE

The water intake is one of the most critical elements of a hydropower plant. The technical request is the division between clean water to be used in the plant and other material like sand, gravel or floating debris transported by the river. All that solid material will cause problems within the water conveyance structure. The very best solution is to keep the solid material in the natural river and to fully block any entrance.

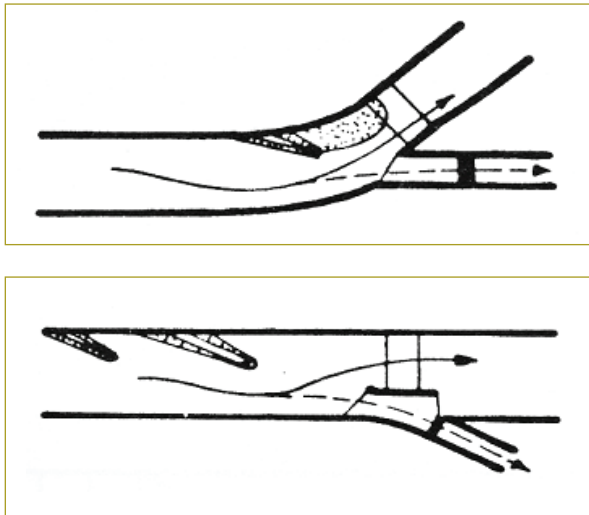
The very beginning of the solution is not the construction itself but the position in the river. The following picture shows clearly the behaviour of the river in a bend. Bedload is always moving at the inner side of the bend. That means any intake should be positioned at the outer side of the bend.

Figure 5
Bend at river Ybbs/Austria (own picture)



The following drawing shows good solutions – either in a bend of the river or in a straight river reach. In both cases groins will be helpful in order to intensify the river morphological mechanism.

Figure 6
Positioning of water intake (Radler, 1981)



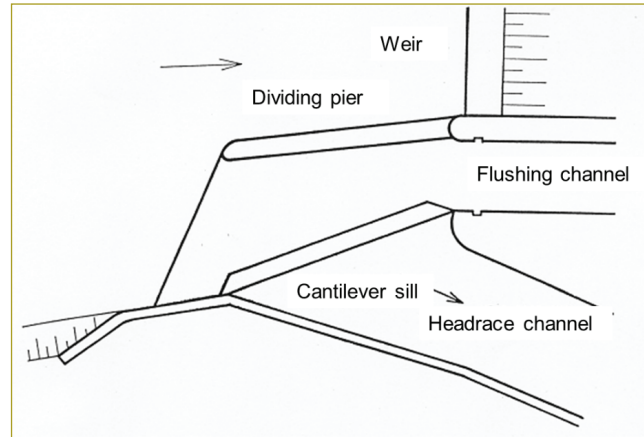
The two groins in the second picture simulate an artificial bend of the river and initiates the morphological reaction.

Usually any free surface intake is related to a weir, increasing the water level at the intake. The increase of the water level will slow down the flow velocity and consequently initiate the sedimentation of bedload material. The backwater area will be filled up very soon and an effective flushing gate is essential for the effective

operation of a plant. Otherwise bedload will enter the water conveyance structure and mechanical digging out will become a never ending and costly story.

The following drawing shows a very good solution on how to keep bedload in the river.

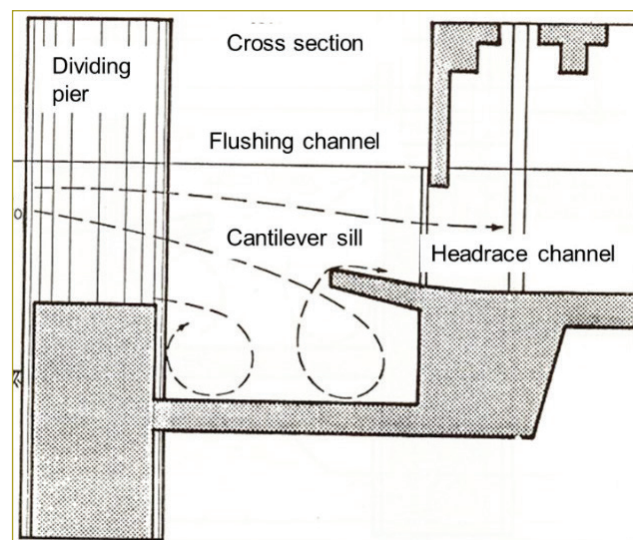
Figure 7
Intake with cantilever sill (Radler, 1981)



The function of the flushing channel is essential because the bedload must not remain in front of the intake but must be flushed as soon as possible. Depending on the recent bedload transport in the river the opening of the flushing gate can be adjusted.

The innovation is a cantilever sill instead of a traditional sill. It strengthens the function significantly.

Figure 8
Intake with cantilever sill (Radler, 1981)



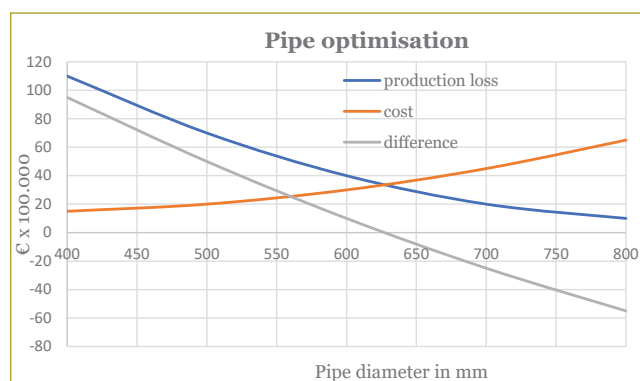
As already mentioned, the defence of the bedload is only one part of the whole concept. The drawing above shows the positions of a trash rack, a skimming wall and an intake gate, protecting the water way against floating debris, which is not welcome in the channel as well.

DIMENSIONING OF A PIPELINE

A pipeline and/or a penstock is an essential part of a high head plant. A rough estimation allocates around 50% of the total cost to it. Therefore, it is important to take the best possible solution and to invest some time in the optimisation process. Equal to the optimisation of the rated flow, the optimisation is a cost-benefit analysis. The input is on the one hand side the cost of the pipe and on the other hand side the variation of electricity production due to variable head loss.

The calculation of the production loss is again based on hydrological data and should be done for “mean” years but for dry and wet years as well. The results will vary. The calculation of the cost is a bit trickier, because different pipe material will cause different cost resulting in different pipe dimension.

Figure 9
Pipe optimisation (own design)



As the final result the graph above indicates a pipe dimension of maximum 625mm. If a larger diameter is selected the cost will not be compensated by the revenues due to higher production. The process may become even more difficult if different pipe dimensions should be used. Such a decision is recommended. The higher pressure in the lower part of the pipeline usually asks for smaller diameter reducing the cost. Using even more than two different pipe diameters within one

pipeline is a clever decision because during transport the pipes can be telescoped. This approach is also called “nesting”.

DESIGN AND DIMENSIONING OF A HEADRACE CHANNEL

In some projects the waterway includes a headrace channel. The design and the dimensioning have to meet more restrictions than the dimensioning of a pipeline. The economical optimisation is only a first step of the engineering. The following criteria should be respected:

- Little head losses.
- No sedimentation.
- No erosion (max flow velocity, stabilisation of the banks).
- Ecological function.

Ad 1

Head loss is in many topics the key factor. Regarding an open channel the optimisation is equal to a pipeline. Input factors are the cost of construction and the head loss.

Ad 2

Despite optimised solutions at the water intake it may happen, that little grainsize sand or even smaller particles will enter the channel. Particles of this size may not cause any problems at the turbine depending on its type and size. The potential problem can be found in the sedimentation in the channel due to very low flow velocity. Sedimentation will further on reduce the size of the cross section and increase the flow velocity. A specific equilibrium is the final situation. Consequently, a minimum flow velocity has to be defined in order to avoid sedimentation. Sedimentation will not occur in low flow periods because there will be practically no bedload transport in the natural river.

Ad 3

High flow velocities will usually not be the preferred solution following the results of the technical optimisation. Nevertheless, it must be said, that higher velocities need additional measures to stabilise the bed and the embankment resistant against erosion mechanism. Those measures will cause additional cost. Concluding—

the maximum flow velocity will decide upon technically necessary stabilisation measures.

Ad 4

Since approximately 20 years even an artificial channel, being part of a hydropower plant is seen as animal and plant habitat. This view of the authority causes additional claims that must be considered.

Some of the essential design elements are:

- **Structured embankments:** Instead of smooth concrete troughs, flattened banks are created with deadwood, rough riprap or fascines. These elements create retreat spaces.
- **Habitat diversity:** The installation of groynes, sturgeon stones or small gravel islands creates different flow velocities and water depths in the canal.
- **Vegetation:** Companion vegetation will serve as habitat for specialised species of birds and will shade the water course.

Some of the ecological criteria contradict the technical objectives. The designer has to find a compromise and bring together the different goals.

The following picture is a quite good example to meet several targets mentioned above.

Figure 10

Headrace channel in Austria (own picture)



SUMMARY

The successful design of a hydropower project depends primarily on long lasting engineering experience. Technical knowledge and competence including interdisciplinary cooperation are the preconditions. Any hydropower project is very individual and cannot be designed following general rules.

REFERENCES

Radler, S. (1981). Symposium on project design and installation of small hydropower plants. Vienna.

Sección **ESPECIAL**



Diagnóstico de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH)

Diagnosis of small hydropower plants (SHP)

RAMIRO ORTIZ FLÓREZ

PhD. en Evaluación de Recursos Energéticos Renovables. Ingeniero Electricista.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2498-9496>

ramiro.ortiz@correounivalle.edu.co

Recibido: 12/04/2026 Aceptado: 8/05/2026

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presentan metodologías para el diagnóstico de PCH, con un aporte importante, basado en la experiencia del autor al hacer el diagnóstico de 16 proyectos con una capacidad nominal en placa de 45,9 MW, los cuales han operado en un rango entre 50 y 115 años. Esta experiencia podrá contribuir a quien esté interesado en extender la vida útil de su PCH.

Palabras claves: pequeña central hidroeléctrica, diagnóstico, rehabilitación, modernización.

Abstract

This article presents methodologies for the assessment of small hydropower plants (SHP), with a significant contribution based on the author's experience in diagnosing 16 projects with a combined nameplate capacity of 45.9 MW whose operational life ranges between 50 and 115 years. This experience may provide valuable guidance to those interested in extending the service life of their SHP.

Keywords: small hydropower plant, assessment, rehabilitation, modernization.

INTRODUCCIÓN

Desde el momento de la aplicación comercial de la energía eléctrica (EE), a finales del siglo XIX, no ha dejado de ser un factor determinante para la economía y el desarrollo. Si bien se sabe que la EE se utilizó en principio para los sistemas de alumbrado público de las principales ciudades, en remplazo de los faroles de petróleo y gas, después se convirtió en la fuerza motriz que necesitaban la industria y el comercio, y a la vez se constituyó en una herramienta necesaria para el confort de los hogares.

Las primeras centrales de generación de energía eléctrica (GE) eran, por lo regular, hidráulicas de bajas potencias con generadores de corriente continua, ubicadas cerca de los centros de consumo debido al escaso desarrollo del transporte de la EE y destinadas para los alumbrados públicos. Posteriormente, a mediados de la primera mitad del siglo XX, el desarrollo de la GE en corriente alterna permitió aumentar la potencia y la capacidad de transmisión, lo cual llevó a que una gran mayoría de los municipios tuvieran una pequeña central hidroeléctrica (PCH), construida con recursos económicos propios y parte de la ingeniería de diseño y construcción regional.

Este esquema hizo que la prestación del servicio de energía eléctrica fuera dispersa y estuviera a cargo de entidades oficiales, de los órdenes regional y nacional, con distintos niveles de especialización y de participación en la capacidad de generación, transformación y transporte de energía. Sin embargo, la demanda creciente de EE se tuvo que atender con proyectos de mayor capacidad financiados por el Estado, los cuales fortalecieron los sistemas electroenergéticos regionales, los que luego se interconectaron en un sistema nacional. Dicho esquema, que se desarrolló como un monopolio estatal, permitió hacer una planeación integral y una operación conjunta de las empresas regionales, en las que se promovió la construcción de grandes centrales hidroeléctricas, dejando de lado los pequeños aprovechamientos hidroenergéticos.

No obstante, esto dio lugar a ineficiencias, que en conjunto con el alto nivel de endeudamiento pusieron las finanzas del sector eléctrico en condiciones precarias, las cuales se acentuaron en la década de los ochenta y produjeron una delicada situación de insolvencia en la mayoría de las empresas del sector eléctrico.

Lo anterior condujo a que el Estado implementara la “Estrategia de reestructuración del sector eléctrico” en el año 1991, por medio de la cual le abrió las puertas al sector privado para la inversión en nuevos proyectos de generación eléctrica; así, el Estado se convirtió en garante de la prestación del servicio público, y para esto creó entidades encargadas de la regulación, control, inspección y vigilancia.

Esta alternativa de mercado, que incentiva a la par nuevas GE, también permite que los proyectos se modernicen, en especial las PCH que han cumplido su vida útil, sobre todo cuando su tecnología ya es obsoleta y sus componentes se han deteriorado; por este motivo, su ineficiencia reduce su confiabilidad y disponibilidad, al tiempo que incrementa los costos de operación y mantenimiento, lo que afecta directamente sus ingresos económicos.

Por esto se requiere hacer un diagnóstico, en el que se determine la condición de estado del sistema, aplicando diferentes metodologías que fundamenten la decisión de rehabilitar estas pequeñas centrales hidroeléctricas, modernizarlas o repotenciarlas, con el fin de que recuperen su eficiencia y continúen operando en condiciones similares a las originales durante varias décadas.

En este artículo se presentan metodologías para el diagnóstico de PCH, con un aporte importante, basado en la experiencia del autor al hacer el diagnóstico de 16 proyectos con una capacidad nominal en placa de 45,9 MW, los cuales han operado en un rango entre 50 y 115 años. Esta experiencia le servirá a quien esté interesado en extender la vida útil de su PCH.

METODOLOGÍA

Cuando la gerencia observa que hay daños recurrentes en la PCH que producen un aumento en los costos directos e indirectos por actividades de **administración, operación y mantenimiento** (AOM), y además no dispone de información histórica de su mantenimiento, debe tomar la decisión de hacer un diagnóstico que permita evaluar el estado de la planta y los planes de acción que se han de seguir.

El resultado de este diagnóstico es determinar la condición de estado de la PCH y las acciones que hay que implementar para garantizar la operación segura, con un factor de planta que valide la inversión que se debe hacer en la PCH. Finalmente, el diagnóstico pro-

pone acciones para extender la vida útil, bien sea por rehabilitación, modernización o repotenciación, tales como las siguientes:

- **Rehabilitación.** Retorna la eficiencia y la capacidad de la PCH a sus condiciones iniciales de funcionamiento, gracias a adecuaciones en sus obras civiles o a la renovación de equipos electromecánicos en mal estado, con la misma tecnología o similar.
- **Modernización.** Consiste en la instalación de tecnologías que transmiten a otros centros de control sus procesos internos y externos, gracias a dispositivos y equipos de medición y control interconectados; esto incluye la medición de variables hidráulicas, mecánicas y eléctricas, además del estado visual de la planta. En el marco de la modernización es posible instalar o sustituir equipo hidráulico y electromecánico con equipo de control para operación remota, sin que esto signifique un aumento por potencia de la planta.
- **Repotenciación.** Está condicionada por la disponibilidad de captar un mayor caudal del recurso hidroenergético para incrementar su potencia; esto implica, aparte de nuevos permisos, su rediseño y la adquisición de equipos electromecánicos modernos de mayor potencia, con instrumentación para operación y medición remota.

La clave para tomar la decisión técnico-económica que permita extender la vida útil de la PCH, bien sea por rehabilitación, modernización o repotenciación, se basa en una evaluación integral. Para esto se requiere un diagnóstico que integre información de tipo normativo, técnico, ambiental y financiero, seguido de históricos de datos, y posteriormente de pruebas o ensayos a las estructuras civiles y los equipos electromecánicos. La propuesta final de elección de cualquiera de estas opciones está condicionada a permisos que le den viabilidad financiera a la inversión.

En una **pequeña central hidroeléctrica**, el diagnóstico parte de una información básica, que luego fundamenta la aplicación de metodologías para la evaluación de obras civiles o equipo electromecánico, que son las que al final precisan la alternativa seleccionada. En todo caso, el diagnóstico comienza con una información básica.

Información normativa, técnica, ambiental y financiera

Esta es una información base para el diagnóstico, que empieza con la fecha de puesta en operación de la planta, la cual es fundamental para conocer su estado en los marcos regulatorio, contable, técnico y económico, al igual que para hacer un balance de su ciclo de vida económico.

En el diagnóstico, el marco regulatorio indica la vigencia de las licencias ambientales y del alquiler de terrenos (si es el caso); en materia contable, es preciso determinar si el bien ya está depreciado, ejercicio que se encuentra muy ligado a la vida útil de sus componentes, dado que en una PCH es común que los terrenos adquieran un mayor valor en el tiempo; hay que tomar en cuenta que la vida útil de los componentes de una **pequeña central hidroeléctrica** son diferentes. La vida útil de los componentes para las obras civiles (en particular, para la captación) es mayor que la de los componentes para el equipo electromecánico.

El envejecimiento de los equipos de la PCH conlleva salidas no programadas, que reducen su disponibilidad e incrementan las pérdidas en la producción de energía e ingresos; esto significa costos por AOM que se tienden a incrementar, al tiempo que la eficiencia y el factor de la planta disminuyen.

El análisis de la información base permite identificar la pendiente decreciente de los ingresos provenientes por la generación y la pendiente creciente de los costos por AOM. El resultado del diagnóstico en esta etapa determinará el momento en que estas se crucen. Un diagnóstico conservador indicará que en este momento la PCH se ha depreciado, por cuanto la vida económica coincidió con la vida útil. No obstante, la vida económica es más corta que la vida de servicio técnico, es decir, que ningún componente de la PCH se debe reemplazar antes de su depreciación.

En esta primera fase se visualiza la necesidad de avanzar en el diagnóstico y se infiere el impacto de aumentar la vida útil de la **pequeña central hidroeléctrica**. El siguiente paso es identificar en los archivos de la planta datos históricos que, en caso de estar disponibles, es pertinente —en la medida de lo posible— reconstruirlos.

Históricos de datos

El diagnóstico de la **pequeña central hidroeléctrica** requiere conocer la información básica necesaria para

valorar detalladamente la alternativa que se debe seguir. Para esto es pertinente identificar la calidad o la consistencia de la PCH, así como identificar la información que no se encuentra disponible y es importante para proceder a reconstruirla.

Con este propósito, se debe considerar la siguiente información general:

- Datos de la planta (potencia, caída y caudal nominal).
- Número de unidades (potencia y caudal nominal por unidad).
- Fecha de inicio de operación.
- Plano general de la planta, con cotas georreferenciadas, trazado del canal con obras anexas, trazado de la tubería de presión, perfil de la tubería de presión y planos de las obras civiles.
- Planos eléctricos, así como de protección y control de la planta.
- Datos técnicos de los equipos hidromecánicos (compuertas, válvulas, tuberías de conducción y presión).
- Datos de la turbina: tipo, potencia, velocidad, sobrevelocidad, momento de inercia, caída neta (nominal), caudal (nominal) y cota del eje.
- Datos del generador: tipo, potencia, voltaje, corriente, velocidad, sobrevelocidad y factor de potencia.

Para complementar la información general, es pertinente conocer los siguientes datos:

- Área de la cuenca.
- Histograma del caudal concesionado en bocatoma y su permanencia.
- Curva de frecuencias y de probabilidades en bocatoma.
- Caudal máximo y su periodo de ocurrencia.
- Caudal ecológico según la legislación ambiental.
- Granulometría y calidad del agua.
- Altura desde bocatoma hasta el eje de turbina.
- Altura desde el tanque de carga hasta el eje de turbina.
- Altura nominal estática y dinámica desde el tanque de carga hasta el eje de turbina.

Además de la información base, es indispensable conocer la siguiente información histórica de la planta:

- Curva de probabilidad de caudales en bocatoma.
- Histórico de caudales en el canal.
- Generación histórica diaria por hidrogrupo.

- Histórico y causa de las contingencias.
- Estado de la cuenca aguas arriba por reforestación o deterioro.
- Riesgo de amenaza sísmica.

Pruebas y ensayos a las estructuras civiles y equipos electromecánicos

Con base en la información previa, se debe hacer un programa de evaluación que defina los componentes que se van a inspeccionar, seguido por las pruebas y ensayos que requieran las obras civiles y los equipos electromecánicos.

A partir de la fecha de entrada en operación comercial de la PCH, se puede visualizar su vida útil o, en su defecto, la vida remanente para cada una de las obras civiles y el equipo electromecánico. De acuerdo con autores y organizaciones, la vida útil de la PCH en su conjunto debe estar en un rango entre 50 y 100 años; sin embargo, las obras civiles y el equipo electromecánico tienen periodos diferentes, por lo que se presume que se pueden rehabilitar, modernizar o repotenciar. De acuerdo con la Regional SimaPro Centre Switzerland, en su documento *Life Cycle Inventories of Hydroelectric Power Generation* (2012), la vida útil de las obras y los equipos de una PCH debe estar en un rango, tal como se indica a continuación (figura 1).

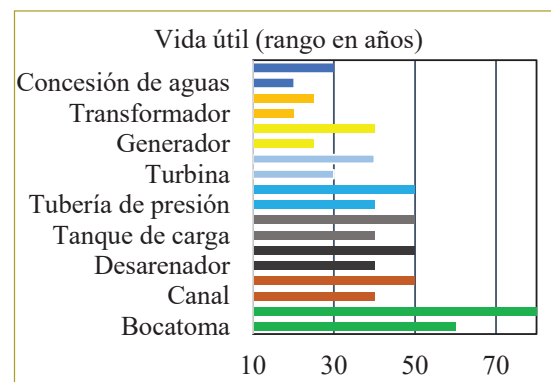


Figura 1. Tiempo de concesión de aguas, vida útil de las obras civiles y equipos electromecánicos.

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de Regional SimaPro Centre Switzerland.

Aparte de la vida útil de los equipos y las obras civiles, es importante considerar la duración de la concesión de aguas para PCH, que generalmente se otorga por un plazo de 20 a 30 años, pero puede llegar hasta los 50 años.

Esta información (figura 1), a partir de la fecha de entrada en operación comercial, es básica para determinar la vida remanente de cada uno de ellos, pero esto depende de cómo haya sido su mantenimiento, del envejecimiento producido por el uso de los equipos y de la fatiga que estos presentan. No obstante, se pueden presentar causas externas que reducen el factor de planta, la eficiencia y su vida útil, tales como el cambio en el régimen hidrológico por efecto del cambio climático, el aumento de la granulometría y pH del recurso energético, inestabilidad en las paredes del canal y operación de la planta fuera del rango técnico.

Un factor relevante para considerar se basa en que la bocatoma se diseña según el caudal máximo que se presenta en un determinado periodo de retorno, el cual en su momento no previó los efectos del cambio climático; por tal motivo, su vida útil será menor en cuanto se estén presentando caudales que superen su diseño en estabilidad.

Una vez que se tiene un dato aproximado de la vida útil de los componentes de la PCH, se verifica la disponibilidad de la información indicada como “histórico de datos”, y ante la ausencia de parte de esta información el diagnóstico indicará su necesidad de reconstruirla para proceder con cualquiera que sea la alternativa futura de la planta. Sin embargo, es probable que haya que actualizar y digitalizar los planos de las estructuras civiles y eléctricas de la PCH con instrumentos de medida más precisos, con sistemas georreferenciados.

Así mismo, es usual desconocer la eficiencia del proceso de transformación de energía, por lo que es necesario cuantificar las pérdidas en la tubería de presión, en la turbina y en el generador. Esta información permitirá determinar la potencia hidráulica a la entrada de la turbina, la potencia mecánica entregada por la turbina y la potencia eléctrica activa generada. Para establecer tales pérdidas se deben instalar instrumentos de medida que permitan conocer los siguientes parámetros: caudal, caída, par motor en el eje de la turbina, velocidad mecánica y potencia eléctrica activa. Gracias a esta medida es posible identificar acciones directas, bien sea en tubería, turbina o generador.

Adicionalmente, se debe actualizar el estudio geológico en las zonas donde se ubican las obras civiles de las PCH para conocer el estado actual del terreno, acción que requiere hacer exploraciones de campo con

sus respectivos análisis de laboratorio, para corroborar la estabilidad actual de las obras y los riesgos que estas tienen. Además, se requiere hacer su modelación en *software* especializado para diferentes condiciones de flujo, con el fin de verificar las láminas de flujo, velocidades, esfuerzo cortante en diferentes condiciones de caudal y periodos de retorno, todo esto complementado con la verificación de las dimensiones.

Una vez que se disponga de esta información, un grupo de expertos inspecciona los equipos de control, protección y medida, además de que identifica los lugares que requieren un análisis más detallado, con toma de muestras o pruebas, que pueden ser las siguientes:

- Toma de muestra del caudal para verificar granulometría y pH.
- Toma de muestra de concreto en las obras civiles donde hay hierro a la vista o fisuras.
- Toma de muestra de la tubería de presión.
- Hacer prueba de vibraciones, calidad de aceite de lubricación y refrigeración, pruebas de vacío y cortocircuito en el equipo electromecánico.

Gracias a la información recopilada en el diagnóstico se puede cuantificar la energía anual media histórica generada en bornes de la planta, valor que se puede comparar con el estándar de generación de PCH similares, que en su defecto mínimo es de 0,7. A partir de este valor se deben identificar las causas, que se originan en indisponibilidades de la planta o, en su defecto, en ineficiencia de sus equipos.

La eficiencia se ha valorado previamente con una de las pruebas ya mencionadas; sin embargo, la indisponibilidad está asociada a diferentes factores, como los siguientes:

- Cambio en la hidrología por aumento de caudales máximos y mínimos durante periodos secos, rangos que afectan la generación.
- Cambio en la granulometría y el pH del caudal que afecta las turbinas.
- Deterioro de las obras civiles por inestabilidad del terreno o filtración.
- Paradas de emergencia recurrentes que afectan la tubería de presión por golpe de ariete.
- Generación de energía en niveles muy bajos que deterioran las turbinas por cavitación.

- Sistema de control para arranque y parada manuales.
- Descargas atmosféricas que desconectan la planta.
- Paradas no programadas por deterioro de equipos auxiliares.

Al final, el estudio diagnóstico presenta un análisis de las causas de la eficiencia y de las indisponibilidades que permite hacer un análisis técnico económico que valide su rehabilitación o modernización. Si este diagnóstico está orientado a visualizar la repotenciación, su resultado le indica las capacidades del recurso, de sus obras hidráulicas y de su equipo electromecánico, complementado con los permisos técnicos y ambientales requeridos.

RESULTADOS

El análisis de las indisponibilidades y sus causas es un tema relevante dentro del estudio diagnóstico, dado que permite comparar la capacidad de generación de la PCH respecto al comportamiento real, información que ayuda a focalizar los esfuerzos en las principales fuentes de indisponibilidad. Como ejemplo se presenta la experiencia en el diagnóstico de 16 proyectos con una capacidad nominal en placa de 45,9 MW, los cuales han operado en un rango entre 50 y 115 años (tabla 1), que podrá contribuir a reducir los fallos de una PCH.

Como se describió previamente, se toma la información de la fecha en que la planta se puso en operación comercial, y según las plantas analizadas se hallaron los siguientes años y potencias (tabla 1).

Al comparar la información de la tabla 1 con la de la figura 1, se advierte que la obra que todavía tiene vida es la bocatoma; sin embargo, los efectos del cambio climático, efectos erosivos y uso del agua han podido afectar seriamente su estructura. En el diagnóstico de estas PCH, el autor puede citar todas las bocatomas que estaban averiadas o definitivamente ausentes. Así mismo, se observó que el desarenador, el tanque de carga y los aliviaderos tenían procesos importantes de abrasión, con compuertas gravemente afectadas, operadas aun con mando manual.

Igualmente, se nota que el canal se construyó en tierra o mampostería, motivo por el cual presenta inestabilidad por filtración en sus paredes que causan desprendimiento de su talud. La tubería de presión en algunas de estas PCH ha presentado fugas o ha colap-

Tabla 1
Años de operación de PCH y su potencia instalada

PCH	Años de operación	Potencia instalada (kW)
1	53	360
2	53	24.000
3	58	1.420
4	59	5.400
5	60	1.440
6	64	2.480
7	64	604
8	66	600
9	70	600
10	70	600
11	70	700
12	73	4.320
13	85	900
14	92	450
15	115	1.000
16	115	1.000

sado, debido a inestabilidad en sus anclajes y a causa de fatiga del material; además, la válvula principal es obsoleta y de operación manual.

En términos generales, la obsolescencia que presentan estas obras civiles impacta de manera directa en las horas de funcionamiento de la planta, debido a que hay que remover y reparar recurrentemente el canal, por lo que se requiere parar el funcionamiento de la planta cuando empieza a llover. En el diagnóstico también se encontró que el cambio en la granulometría y el pH del caudal le ha causado a la turbina desgaste por abrasión y erosión, motivo por el cual se propone efectuar estudios de la calidad del agua y de estabilidad geológica de las obras civiles de la PCH, aparte de la toma de muestras de concreto y del material de la tubería, con el propósito de conocer su estado actual y valorar la vida remanente.

La información histórica que se recopiló gracias al diagnóstico da cuenta de que la turbina, el generador y el transformador se han reparado cuando han presentado fallas, pero sin un previo análisis de la causa raíz; sus reparaciones en forma individual conducen a una operación empírica, que reduce la potencia entregada, bien sea en la turbina o en el generador, de modo tal que el ajuste de potencia se hace con la potencia menor. Esto significa ineficiencia en la producción y cavitación

en los equipos, efectos que producen vibración y afectan los cojinetes, por lo que hay que reparar de nuevo el equipo; no obstante, en esta reparación se deberá considerar una propuesta de rediseño de rodete y de cambio en el aislamiento del generador.

En las PCH se encontró que la regulación de excitación del generador es por resistencias, la regulación de caudal es oleohidráulica, el sincroscopio generalmente es de lámparas y el interruptor principal es de resortes, todos operados en forma manual, procesos que para el arranque y la parada dependen de la habilidad del operador; esto hace que la sincronización del sistema no sea del todo precisa y conlleve corrientes elevadas, que afectan mecánicamente al hidrogroppo y electromagnéticamente al generador.

Así mismo, la parada de emergencia es más compleja por el tiempo que requiere el operador para hacer esta maniobra, debido a que los sistemas de regulación de excitación, caudal y cierre de la válvula principal son manuales. Durante este tiempo se presenta sobrevelocidad en la máquina, la cual el operador atenúa al colocar un tablón de madera en el volante de inercia que actúa como freno, maniobra que es usual en turbinas Francis. El diagnóstico en esta condición propone la actualización de los sistemas de excitación y regulación de caudal, a la par de la instalación de equipos de medida y automatización que modernicen el arranque y la parada del hidrogroppo.

Como el control de la planta es manual, se puede observar la ausencia de medidores de caudal —y particularmente de manómetros— que den cuenta de la caída neta estática y dinámica, a partir de los cuales se infiere la potencia hidráulica que llega a cada turbina. De igual manera, cuando el manómetro del tubo de aspiración está fuera de funcionamiento o ausente en las turbinas de reacción, no se puede valorar el nivel de cavitación que tiene la turbina, en particular cuando opera a bajas potencias. En esta condición, el diagnóstico no puede determinar la potencia hidráulica e inferir la potencia mínima de operación de la turbina, por lo que se recomienda la instalación de los equipos de medida, preferiblemente modernos, que permitan hacerle el seguimiento a la cavitación, ya que este fenómeno conlleva vibración en los equipos, la cual deteriora el rodete de turbina y los cojinetes del hidrogroppo. Esto último origina indisponibilidad en la planta, la cual no

es visible si no se tiene operativo el manómetro en el tubo de aspiración y el seguimiento de su medida.

Para establecer la eficiencia del proceso de transformación de energía en la PCH se requiere determinar las pérdidas de potencia hidráulica, mecánica y electromagnéticas (figura 2); esto exige la instalación de instrumentos de medida de los siguientes parámetros: caudal, caída, par motor en el eje de la turbina, velocidad mecánica y potencia eléctrica. El resultado de esta medida identifica acciones directas, bien sea en tubería, turbina o generador; sin embargo, para esta prueba se requieren instrumentación especializada y profesionales capacitados.

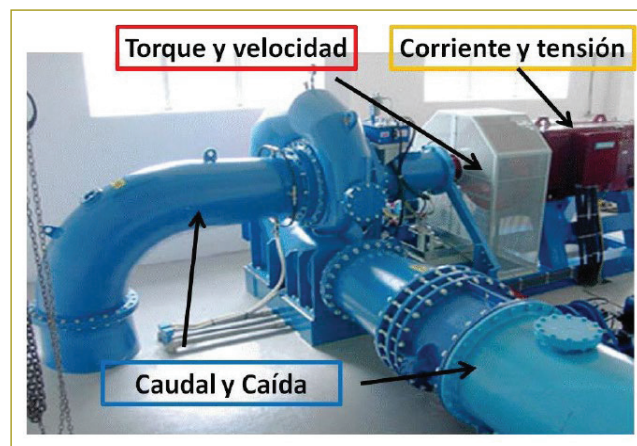


Figura 2. Variables de monitoreo en una PCH.

Fuente: Elaboración propia.

En términos generales, el resultado del diagnóstico de estas pequeñas centrales hidroeléctricas cuantificó que la eficiencia es de 0,5, en promedio, y que el factor de planta no superó el 0,4. El análisis de eficiencia, según información disponible, se origina en la obsolescencia de la tubería y el equipo hidroeléctrico, así como en el bajo factor de planta; esto tiene varias causales: deterioro de canales, caudales elevados, descargas atmosféricas, daños no previstos en la tubería y el equipo hidroeléctrico, entre otras.

CONCLUSIONES

Un número muy importante de centros de investigación han elaborado metodologías y procedimientos analíticos y experimentales que, por medio de sus resultados, son precisos al momento de extender la vida de una

PCH o de sus componentes; sin embargo, hacer el diagnóstico general de la planta es el primer paso para implementar acciones que renueven la planta y extiendan su vida útil. La aplicación de estas metodologías a las PCH trae beneficios ambientales y energéticos, que en consideración del autor tendrían un mayor impacto si la regulación energética y ambiental estimulara el uso eficiente del recurso. Esto podría significar el ajuste de la normativa a una regulación en función de la potencia total entregada por el recurso energético, tasándolo en forma similar a la capacidad energética que tienen los combustibles fósiles. Tal vez este sería el camino para promover la rehabilitación, modernización o repotenciación de las PCH.

Un aspecto que hay que tener en cuenta en una pequeña central hidroeléctrica cuyo diagnóstico revela buenas prácticas en mantenimiento es que este puede proponer su repotenciación, basado en el rediseño del rodete de la turbina o en el rediseño electromagnético del generador.

Para construir una PCH se exigen permisos sociales, de conexión y medioambientales, entre otros; una vez que se han obtenido, se procede a obtener los recursos financieros para su construcción y la venta de la energía en mercado a largo plazo. Todos tienen compromisos económicos sujetos a varios riesgos, como técnicos,

hidrológicos, del mercado y de la TRM, que hacen complejo el cierre financiero; en cambio, los riesgos por rehabilitar, modernizar o repotenciar una PCH son menores, lo cual garantiza el cierre financiero.

Las actividades multidisciplinarias que debe hacer el diagnóstico exige profesionales expertos en cada uno de los temas tratados.

Es probable que una recomendación del diagnóstico sea corregir el montaje del hidrogroppo, en razón de que en varias PCH se observan codos de 90° a la entrada de la turbina.

La gerencia de la PCH desempeña un papel muy importante a la hora de implementar las acciones propuestas en el diagnóstico.

REFERENCIAS

- De la Pedraja Tomán, R. (1985). *Historia de la energía en Colombia, 1537-1930*. El Áncora Editores. ISBN 8489209561, 9788489209565.
- De la Pedraja Tomán, R. (1993). *Petróleo, electricidad, carbón y política en Colombia*. El Áncora Editores. ISBN 958-9012-77-9. <https://esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/flury-2012-hydroelectric-power-generation.pdf>.
- <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/operation-and-maintenance-strategies-for-hydropower>.
- JICA (2013). The Project for Construction and Rehabilitation of Small Hydropower Plants in Rattanakiri Province. https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12111852_01.pdf.

Sección **ESPECIAL**



Modernización de centrales hidroeléctricas y almacenamiento por bombeo: estrategias para fortalecer la estabilidad y la resiliencia de los sistemas eléctricos en la transición energética

Modernization of hydroelectric power plants and pumped-storage hydropower to strengthen stability and resilience of the electric grid in energy transition

CARLOS ALBERTO SGRO¹ - CARLOS EDUARDO JARA AMPUDIA²

1. Ingeniero Civil - Universidad Católica Andres Bello de Caracas, Venezuela
Especialización en Gerencia de la Construcción en la Universidad Metropolitana de Caracas, Venezuela
Organización de Grandes Obras, Construcción de Ferrocarriles, Carreteras y Aeropuertos; Universidad degli Studi di Firenze Italia. Programa de Organización Industrial y Ambiental. AOTS Osaka Japón
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9927-6191>
carlos.sgro@andritz.com
2. Ingeniero Industrial - Universidad Católica de Colombia. Master Business Administration (MBA) - Bellevue University - NE, USA. Certificaciones: PMP y SCRUM MASTER
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5723-0224>
carlos.jara@andritz.com

Recibido: 12/04/2026 Aceptado: 08/05/2026

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La transición energética mundial exige sistemas eléctricos cada vez más flexibles, resilientes y capaces de integrar altos niveles de generación renovable variable. En este contexto, la energía hidroeléctrica continúa desempeñando un papel estratégico como tecnología de respaldo para garantizar la estabilidad de la red eléctrica. En América Latina, donde más del 50 % de las centrales hidroeléctricas han superado su vida útil de diseño, la modernización de los activos existentes representa una oportunidad de mejora técnica, económica y ambiental para incrementar la confiabilidad del sistema, sin requerir grandes desarrollos de infraestructura.

En este artículo se analizan el papel de la modernización hidroeléctrica (*repowering*), la rehabilitación de centrales existentes y el almacenamiento por bombeo (*pumped storage hydropower*, PSH) como soluciones fundamentales para fortalecer la seguridad energética, aumentar la eficiencia operacional y facilitar la integración masiva de energías renovables.

Así mismo, se exponen experiencias internacionales desarrolladas por Andritz Hydro y se analizan las perspectivas para América Latina y el Caribe dentro del nuevo escenario energético mundial.

Palabras claves: hidroelectricidad, almacenamiento por bombeo, energías renovables, *repowering*, flexibilidad Energética.

Abstract

The global energy transition requires power systems that are increasingly flexible, resilient, and capable of integrating high levels of variable renewable generation. In this context, hydropower continues to play a strategic role as a backup technology to ensure the stability of the power grid. In Latin America, where more than 50% of hydropower plants have exceeded their design life, the modernization of existing assets represents a technical, economic, and environmental opportunity to increase system reliability without requiring major infrastructure developments.

This article provides an overview of the role of hydropower repowering, the rehabilitation of existing plants, and pumped-storage hydropower (PSH) as key solutions for strengthening energy security, increasing operational efficiency, and facilitating the large-scale integration of renewable energy. It also highlights international projects carried out by Andritz Hydro and analyzes the prospects for Latin America within the new global energy landscape.

Keywords: hydropower, pumped-storage, renewable energy, repowering, energy flexibility.

INTRODUCCIÓN

La transformación del sector energético está impulsada por la creciente incorporación de fuentes renovables, como las energías solar y eólica. Aunque estas tecnologías reducen significativamente las emisiones de carbono, su naturaleza intermitente plantea nuevos desafíos para la estabilidad y confiabilidad de los sistemas eléctricos.

En este escenario, la energía hidroeléctrica evoluciona de ser únicamente una fuente de generación a convertirse en el principal elemento de flexibilidad de la red eléctrica. Su capacidad de respuesta rápida, regulación de frecuencia, almacenamiento energético y soporte de potencia convierte a las centrales hidroeléctricas modernas en un componente indispensable para garantizar un suministro continuo de energía.

América Latina y el Caribe en su conjunto enfrenta un desafío adicional: gran parte de su infraestructura hidroeléctrica se construyó hace ya varias décadas y actualmente presenta signos de envejecimiento. En varios estudios se indica que más del 50 % de las centrales de la región requieren procesos de rehabilitación o modernización para mantener su competitividad y confiabilidad operativa.

En este contexto, Andritz Hydro promueve soluciones integrales, orientadas a extender la vida útil de los activos hidroeléctricos, incrementar su eficiencia y desarrollar tecnologías de almacenamiento energético que permitan afrontar con éxito los desafíos de la transición energética.

REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA (ESTADO DEL ARTE)

La Agencia Internacional de Energía (IEA), la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Organización Latinoamericana de Energía (Olade) coinciden en que la energía hidroeléctrica continuará siendo el principal soporte para la estabilidad de los sistemas eléctricos durante las próximas décadas.

En investigaciones recientes se demuestra lo siguiente:

- Más de 60 GW de capacidad hidroeléctrica en América Latina y el Caribe requieren inversiones de modernización.
- Retrasar estos procesos podría duplicar los costos de rehabilitación durante la próxima década.

- La modernización permite extender la vida útil de una central entre 25 y 30 años.
- Las mejoras hidráulicas pueden recuperar entre un 5 % y un 15 % de la capacidad perdida.
- Los proyectos de rehabilitación presentan retornos de inversión a plazos que oscilan entre tres y siete años, dependiendo del alcance tecnológico.

En forma paralela, el almacenamiento por bombeo (PSH) se consolida como la tecnología de almacenamiento energético de mayor capacidad instalada en el mundo, gracias a su elevada eficiencia, larga vida útil y capacidad para proporcionar servicios auxiliares a la red.

Varios organismos internacionales proyectan que el cumplimiento de los objetivos globales de energías renovables para 2030 será prácticamente imposible sin un crecimiento acelerado del almacenamiento hidroeléctrico por bombeo.

METODOLOGÍA

El presente artículo corresponde a una investigación documental de carácter descriptivo y técnico. La información se recopiló a partir de la presentación técnica desarrollada por especialistas de Andritz Hydro durante el encuentro denominado “Sostenibilidad, innovación e hidroelectricidad”, celebrado en Ecuador, complementada con las referencias técnicas citadas en dicha presentación, provenientes del BID, IEA, IHA, Olade y experiencias internacionales de proyectos hidroeléctricos.

Posteriormente, se hizo un análisis comparativo entre las tecnologías de modernización hidroeléctrica, repotenciación y almacenamiento por bombeo, evaluando aspectos relacionados con confiabilidad operativa, disponibilidad, eficiencia energética, beneficios económicos, impacto ambiental y contribución a la estabilidad del sistema eléctrico.

Finalmente, se consolidaron las principales tendencias tecnológicas y estratégicas para el contexto latinoamericano.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La modernización de centrales hidroeléctricas se puede ver como un ancla para la red eléctrica, porque estas respaldan la variabilidad de las energías intermitentes, como

la eólica y la solar durante los horarios del día, brindando estabilidad y confiabilidad al sistema eléctrico. Algunos de sus beneficios técnicos y económicos son:

Beneficios técnicos

- Mayor confiabilidad al reducir el número de paradas no programadas, mayor flexibilidad operativa y adaptación a nuevas condiciones de caudal o demanda, y optimización de la eficiencia hidráulica mediante la modificación del perfil hidráulico del rodete y otros componentes del sistema de regulación.

Beneficios económicos

- La inversión en infraestructura civil es mínima comparada con el desarrollo de nuevas centrales, al poder aprovechar la infraestructura existente.
- El tiempo de montaje se reduce considerablemente al requerir cambiarse solo algunos componentes del sistema de generación y poder integrarlos a los equipos actuales, siempre que cuenten con la capacidad requerida.
- Poca interferencia con los elementos naturales al aprovechar la infraestructura existente.

La experiencia internacional presentada por Andritz demuestra resultados altamente positivos en proyectos desarrollados en Colombia, Chile, Venezuela, México, Camerún, Francia, Filipinas y Australia, donde las intervenciones permitieron extender la vida útil de las instalaciones hasta por 50 años e incrementar la capacidad instalada mediante mejoras tecnológicas.

Especial relevancia adquiere el caso colombiano del proyecto hidroeléctrico del Guavio, donde la moder-

nización permitió aumentar la potencia máxima por unidad de 250 MW a 270 MW, además de mejorar la eficiencia de generación cercana al 92 %, constituyéndose en un referente regional de repotenciación hidroeléctrica. En total, se adicionaron 100 MW en esta central.

Por otra parte, el almacenamiento por bombeo emerge como la solución tecnológica más sólida para responder a la creciente penetración de energías renovables variables. Así lo ha reconocido el Ministerio de Minas y Energía al incluir este almacenamiento en el catálogo tecnológico colombiano.

Comparado con tecnologías basadas en baterías, el PSH ofrece:

- Mayor capacidad de almacenamiento.
- Vida útil superior a 80 años.
- Menores costos de operación durante su ciclo de vida.
- Alta eficiencia energética.
- Aporte de inercia mecánica para estabilización de la red.
- Servicios auxiliares indispensables para la operación de sistemas eléctricos modernos.

Estas características posicionan el almacenamiento por bombeo como un componente esencial para los sistemas energéticos del futuro.

Andritz Hydro ha desarrollado más de 300 unidades de almacenamiento por bombeo en varias partes del mundo, acumulando cerca de 30.000 MW instalados y más de nueve décadas de experiencia en esta tecnología, consolidándose como uno de los principales referentes internacionales del sector.



Figura 1.
Repotenciación hecha por Andritz. Central hidroeléctrica del Guavio, 2025.

CONCLUSIONES

La transición energética requiere mucho más que incrementar la capacidad instalada de generación renovable; demanda sistemas eléctricos capaces de operar con altos niveles de flexibilidad, estabilidad y confiabilidad.

La modernización de las centrales hidroeléctricas constituye una estrategia altamente rentable para extender la vida útil de los activos existentes, incrementar su eficiencia y fortalecer la seguridad energética de América Latina y el Caribe.

La topografía andina y sus recursos hídricos hacen de Colombia en particular y de América Latina en general unos escenarios potenciales para la implementación de estas tecnologías.

De igual manera, el almacenamiento por bombeo representa actualmente la tecnología de almacenamiento de gran escala con mayor madurez tecnológica y mejores perspectivas para respaldar la integración masiva de energías renovables.

Las soluciones desarrolladas por Andritz Hydro demuestran que la innovación tecnológica, combinada con la experiencia en ingeniería hidroeléctrica, constituye un elemento fundamental para acelerar la descarbonización de los sistemas eléctricos, sin comprometer su estabilidad.

La evolución hacia sistemas híbridos que integren energía hidroeléctrica, solar, eólica y almacenamiento por bombeo será uno de los principales ejes de desarrollo energético durante las próximas décadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por la divulgación de conocimiento técnico y la promoción de espacios académicos orientados al fortalecimiento de la ingeniería hidroeléctrica. Así mismo, se reconoce el aporte de las instituciones organizadoras por fomentar el intercambio de experiencias y mejores prácticas para el desarrollo sostenible del sector energético.

REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo (s.f.). *El rol histórico de la hidroelectricidad en América Latina y el Caribe y sus desafíos claves*. BID.
- International Energy Agency (2024). *Renewables 2023 – Analysis and Forecast to 2028*. IEA.
- International Hydropower Association (2025). *Hydropower Outlook 2025*. IHA.
- Jara, C. (2026). *Energía estable en un mundo cambiante: la hidroeléctrica como ancla de la red* [conferencia]. Encuentro "Sostenibilidad, innovación e hidroelectricidad". Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.
- Ministerio de Minas y Energía (2025). *Catálogo Tecnológico Colombiano. Tecnologías de generación y almacenamiento de energía*. UPME.
- Nogueira, M., y Alarcón, A. (2019). *Impacto de las paradas en la generación hidroeléctrica de Brasil*. BID.
- Organización Latinoamericana de Energía (2025). *Almacenamiento por bombeo en América Latina*. Olade.

Sección **ESPECIAL**



Demanda de energía para la cocción de alimentos de un usuario rural

Energy demand of a rural user for cooking food

RAMIRO ORTIZ FLÓREZ¹ - JONH CAMILO BOTINA² - CÉSAR ANDRÉS VARGAS CERÓN³ - DANIELA ARBOLEDA RODRÍGUEZ⁴ - JUAN CAMILO CARDONA VELÁSQUEZ⁵

1. PhD. en Evaluación de Recursos Energéticos Renovables. Ingeniero Electricista.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2498-9496>
ramiro.ortiz@correounivalle.edu.co
2. Ingeniero Electricista.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8467-1634>
jonh.botina@correounivalle.edu.co
3. Ingeniero Electricista.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8512-4214>
cesar.andres.vargas@correounivalle.edu.co
4. Ingeniero Electricista.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1952-5949>
arboleda.daniela@gmail.com
5. Ingeniero Electricista.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3359-9560>
juan.cardona.velasquez@correounivalle.edu.co

Recibido: 15/04/2026 Aceptado: 10/05/2026

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La evaluación de la demanda en condiciones rurales debe integrar todos los requerimientos energéticos de los usuarios para satisfacer sus demandas, incluida la preparación de alimentos. Por este motivo, es pertinente disponer de cifras que integren la cocción y que permitan cuantificar su demanda por potencia y por energía (Hernández, 2018; Villamizar, 2023).

En la bibliografía basada en la ingeniería de alimentos se encuentran soluciones para este problema con un número importante de variables que hacen más compleja la solución. Sin embargo, dicho inconveniente lo han abordado en forma práctica reconocidos investigadores a escala mundial, quienes han propuesto en términos generales seguir una metodología experimental para determinar cuantitativamente el consumo de energía, ya sea mediante la estufa, el recipiente o el alimento. Esta evaluación se hizo para unas condiciones rurales tropicales, en las que los resultados mostraron que del menú de energéticos la aplicación del biogás para cocción es una solución técnica, económica, ambiental y social, que atiende plenamente esta demanda.

Palabras claves: demanda de energía, cocción de alimentos, consumo energético, energía rural.

Abstract

Demand assessment under rural conditions should integrate all of the users' energy requirements to meet their needs, including food preparation. For this reason, it is relevant to have figures that incorporate cooking and make it possible to quantify demand in terms of both power and energy (Hernández, 2018; Villamizar, 2023).

Food engineering literature contains solutions to this problem involving a significant number of variables that make analyses more complex. However, this issue has been addressed in practical terms by internationally recognized researchers, who have proposed following an experimental methodology to quantitatively determine energy consumption, whether based on the stove, the container, or the food. This assessment was conducted under tropical rural conditions. The results showed that, among the available energy options, the use of biogas for cooking is a technical, economic, environmental, and social solution that fully meets this demand.

Keywords: energy demand, food preparation, energy consumption, rural energy.

INTRODUCCIÓN

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) dan cuenta de la importancia de disponer de energéticos accesibles y no contaminantes que apalanquen la reducción de la pobreza y la igualdad de género. Los ODS reconocen que se presenta una gran demanda de energía en la cocción de alimentos, la cual se basa, en el sector rural, en combustibles de uso ineficiente y altamente contaminantes (CIAC), siendo la leña el más utilizado, seguido del carbón vegetal (“ODS 7. Energía asequible y no contaminante”. Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015). Estos energéticos se podrían remplazar por gas natural o energía eléctrica, pero se presenta una restricción de cobertura a raíz de su distribución por redes, que no es una limitante para la energía eléctrica en cuanto a que su generación puede ser local.

Según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), el acceso a gas combustible en las zonas rurales es restringido, lo que obliga al uso de la leña en cocción o, en su defecto, el carbón, energéticos que requieren un tiempo importante para su recolección y que tienen un gran impacto en la salud, además de que degradan el entorno ambiental. De acuerdo con la UPME, en Colombia se consumen anualmente cerca de 5,1 millones de toneladas de leña a nivel rural en cocción (1,38 millones de hogares), las cuales generan cerca de 7,9 millones de toneladas de CO₂ (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2015).

Para reducir el impacto de estos energéticos en los bosques de Colombia, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) promovió en el año 2017 el “Huerto Leñero”, un área sembrada de árboles maderables aptos para leña, los cuales, mediante un manejo por el sistema de corte y rebrote, se pueden aprovechar para la cocción de los alimentos, con base en las siguientes cifras:

- Una familia promedio de cinco personas requiere un banco de leña de 222 árboles, aproximadamente, en un área máxima estimada de 500 metros cuadrados.
- Un árbol a los tres o cuatro años produce en promedio 40 kg de leña seca; 90 árboles, que se aprovechan anualmente, producen 3.600 kg, que representan más del 80 % de lo requerido por la familia, lo cual disminuye las necesidades de extracción del bosque natural.

La iniciativa del “Huerto Leñero” redujo la cantidad de árboles al promover el uso de estufas de leña

ecoeficientes; sin embargo, se puede mitigar aún más el impacto en los bosques con la utilización del biogás, alternativa que el DNP no consideró.

En la naturaleza, el biogás es el resultado de la descomposición de un material orgánico por parte de microorganismos en un ambiente libre de oxígeno (fermentación anaeróbica), proceso que se puede generar en forma natural o en un ambiente controlado (biodigestor). Este último se da en forma continua, y produce como salida el biogás y un efluente (biofertilizante). No obstante, el biogás, al ser una mezcla constituida por metano (50-70 % del volumen), es de cuidado, en razón de que en un horizonte temporal de 20 años tendría 86 veces más índice potencial de calentamiento global (*global warming potential*, GWP) que el CO₂. Por tal motivo, el biogás, una vez lavado, se debería quemar en un equipo de combustión para generar energía térmica o energía eléctrica.

En este escenario de una economía circular, el biogás como energético es una buena opción para zonas rurales con un potencial de biomasa residual y desarrollos agrícolas o pecuarios, pues les da una segunda oportunidad a los residuos, solucionando problemas ambientales y generando energía limpia de origen renovable. A continuación, se presentan algunas cifras de biogás según su origen (tabla 1) (Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe [RedBioLAC], 2023).

Tabla 1
Cifras de biogás según su origen energético

Origen	Kg de excreta por día/ animal	Biogás/día/m ³
Vacas	15,0	0,600
Terneros	4,0	0,160
Caballos	15,0	0,600
Niños	0,2	0,014
Adultos	0,4	0,028
Carneros	2,0	0,100
Cerdos	1,5	0,100
Gallinas	0,15	0,009

En una evaluación integral hay que considerar los impactos colaterales de estos energéticos en el medio ambiente, que se pueden cuantificar por la huella hídrica y la de carbono; a la par, su acceso puede ser limitado por el costo de su capacidad energética, aspectos que

se deben considerar dentro de su caracterización. Los datos promedio de la capacidad energética, la huella hídrica, la huella de carbono y el costo de los energéticos más representativos para cocción se presentan en la tabla siguiente (tabla 2).

En esta tabla se muestra que los energéticos biológicos, si bien tienen una menor capacidad energética frente a los fósiles y una huella de carbono baja, el costo por kWh es muy superior a los referentes no renovables. Sin embargo, el proceso de producción del biogás, que energéticamente es equivalente a la madera, hace que sea neutro (sin huella de carbón) y que su precio probablemente sea cero (no se incluye el renglón de administración, operación y mantenimiento [AOM]) (RedBioLAC, 2023). Esto le da una oportunidad energética muy importante al biogás (en la tabla 2, la energía eléctrica no tiene cifras, dado que está sujeta al energético primario con la cual se produce).

LA ESTUFA PARA COCCIÓN

Independientemente de la técnica culinaria, la cocción se inicia con una fuente de calor, en la que intervienen el energético, la estufa, el recipiente y los alimentos. En

el proceso de cocción (figura 1), el recipiente ubicado sobre la fuente de calor recibe esta energía y la conduce por sus paredes, sin que el material se mueva. A este se le llama conducción, y será más eficiente si el material es acero o aluminio. En el evento de que dentro del recipiente se encuentre un fluido, el calor se traslada a través de este por convección, proceso que suele llevar a que el agua cambie de estado y una parte de ella se evapore. No obstante, el calor suministrado desde la fuente de calor también se transmite por el espacio sin necesitar un material o un fluido, a través de una transmisión por radiación (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2010).

Durante el proceso, la cantidad de calor que se transfiere depende de varios factores, como la relación entre las áreas de la fuente de calor y el recipiente, el material del recipiente o la periferia del recipiente, factores que definen la eficiencia en la cocción de los alimentos; no obstante, para valorar la eficiencia es pertinente unificar los procedimientos de cocción, ya que estos varían notablemente de una persona a otra, así como también los elementos utilizados en este proceso, en particular en una condición rural. Hay varios procedimientos empleados internacionalmente para el cálculo

Tabla 2
Energéticos y sus indicadores ambientales y económicos por kWh

Energético	Capacidad energética (kWh/kg)	Huella hídrica (kg/kWh)	Huella de carbono (ton/kWh)	Costo (\$/kWh)
Leña	5,23-5,46	1,1-2,3	0,81-0,93	451,24
Carbón vegetal	8,72	1,1-2,3	0,57-0,96	598,85
Biogás	5,56-6,94	1,1-2,3		0,0
GLP	14,01	1,3-2,5	1,25-7,75	114,23
Gas natural	15,75	0,4-0,8	1,48	118,33
Energía eléctrica				700,00

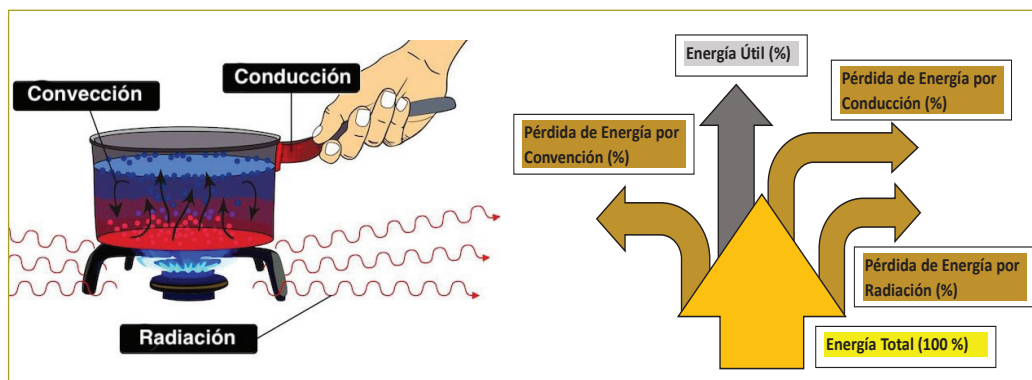


Figura 1
Transferencia de calor durante la cocción

de la eficiencia, dados por la Food Service Technology Center-CLASP, que se fundamentan sobre todo en la medición de la energía utilizada en una estufa para el calentamiento de una determinada masa de agua entre dos temperaturas.

Siguiendo este propósito, se determinó analítica y experimentalmente, para unas condiciones locales (ciudad de Cali, Valle del Cauca), el calor necesario para que una fracción de masa (1.000 g) llegue a la temperatura de ebullición local (98 °C) a partir de una temperatura media de 28 °C (gradiente 70 °C).

Se hizo una valoración de un proceso de ebullición con energía eléctrica para recipientes de diferentes pesos y materiales, teniendo en cuenta que se requiere una energía de 0,081 kWh para 1,0 kg de agua, en un gradiente de 70 °C (tabla 3). El resultado valida que, dependiendo del peso y el material del recipiente, se requiere una mayor energía, que conduce a una reducción en la eficiencia.

Vale la pena señalar que los recipientes de barro son comunes en condiciones rurales, pero al mismo tiempo son ineficientes, aspecto que exige una mayor cantidad de energético.

Tabla 3

Ebullición de 1,0 kg de agua en un gradiente de 70 °C con energía eléctrica para recipientes de diferentes materiales y pesos

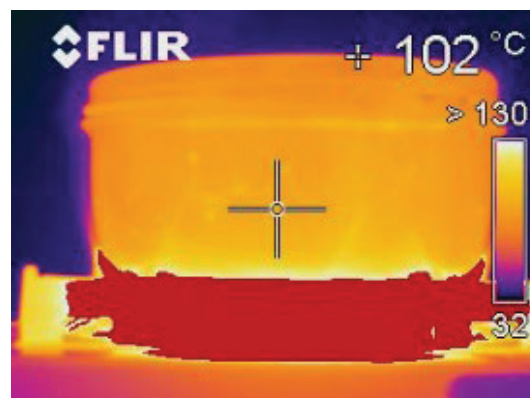
Peso del recipiente (g)	Material	Energía consumida (kWh)	Eficiencia
137,5	Aluminio	0,174	46,8 %
602,6	Aluminio	0,176	46,3 %
1665,0	Arcilla	0,415	19,6 %

Figura 2

Pérdidas de energía al momento de hervir 1,0 kg de agua



a) Estufa eléctrica.



b) Estufa de GLP.

Así mismo, se realizó una prueba similar con diferentes energéticos para igual masa de agua y gradiente de temperatura, utilizando el mismo recipiente de aluminio. El resultado corresponde a la eficiencia experimental obtenida de cada energético, según la estufa (tabla 4).

En razón de que los datos experimentales difieren de la información de otros autores, se optó por validar la información con una cámara térmica. Las fotografías dan cuenta de que en la estufa de gas hay una pérdida importante de energía al medio ambiente (figura 2), lo que corrobora los datos experimentales.

Tabla 4

Ebullición de 1,0 kg de agua en un gradiente de 70 °C de agua con diferentes energéticos para un recipiente de aluminio de diferentes pesos

Energético	Peso del recipiente (g)	Energía consumida (KWh)	Eficiencia
Energía eléctrica	137,5	0,174	46,8 %
Gas natural	137,5	0,455	18,4 %
GLP	137,5	0,219	38,3 %

CONSUMO ENERGÉTICO PARA LA COCCIÓN DE ALIMENTOS DE UNA FAMILIA RURAL

Para hacer una aproximación a las formas de cocción de los alimentos de mayor demanda en un contexto rural, se consideraron experimentalmente los siguientes alimentos: agua para infusión o potabilización del agua, agua de panela, chocolate, huevo (frito y cocido), trucha, res, pollo (frito), lengua, sobrebarriga, arroz, fríjoles, lentejas, pasta, papa, yuca, tostada de plátano y sopa de verduras.

La cocción se realizó con tres energéticos: energía eléctrica, GLP y gas domiciliario, en dos estufas adquiridas en un centro comercial popular (eléctrica y GLP). Así se hizo una aproximación al proceder de una comunidad rural al momento de conseguir sus utensilios de cocina y una de gas natural en condiciones domiciliarias (esta última como una referencia de la eficiencia por cocción). Los recipientes para la preparación corresponden a los requeridos según la técnica de cocción (recipiente de pared gruesa para el arroz, olla de presión, entre otros), adquiridos de igual manera.

Durante las pruebas se midieron el consumo del energético (con instrumentación eléctrica, báscula electrónica para el GLP, contador de m³ de gas), el tiempo y la temperatura. Cabe anotar que la preparación final del alimento fue una variable subjetiva, según criterio de quien hacía el experimento.

La información del consumo se llevó a las unidades de energía dada en kWh por 100 g de alimento (tabla 5); es claro que, para tener esta magnitud, basados en la obtenida experimentalmente para el gas natural y el GLP, se procedió a tener un equivalente, de acuerdo con el energético empleado (m³ de gas natural, g de GLP). Las cifras indicadas para el biogás, el carbón y la leña se obtienen de la relación entre la capacidad energética de cada uno de ellos con la del GLP, complementado con la eficiencia de las estufas.

La cocción de los alimentos y los momentos en que esta se consume están relacionados con la comunidad y con su identidad cultural; esto define la técnica culinaria con la que preparan sus alimentos. En un escenario rural, se hizo una aproximación a una familia en la que el consumo calórico de una persona oscila entre las 2.000 y 3.000 kilocalorías; esto corresponde a

Tabla 5
Consumo energético para la preparación de diferentes alimentos con diferentes energéticos

Alimento	EE	Gas natural	Gas GLP	Biogás	Carbón	Leña
Agua	0,015	0,036	0,019	0,036	0,034	0,060
Agua de panela	0,020	0,042	0,027	0,042	0,045	0,079
Chocolate	0,054	0,166	0,072	0,166	0,120	0,212
Huevo frito	0,063	0,150	0,084	0,150	0,140	0,248
Huevo cocido	0,010	0,022	0,013	0,022	0,021	0,037
Trucha	0,175	0,413	0,233	0,413	0,388	0,686
Res	0,086	0,192	0,114	0,192	0,191	0,337
Lengua	0,00005	0,0001	0,00006	0,00011	0,00011	0,00019
Sobrebarriga	0,00003	0,0001	0,00004	0,00008	0,00007	0,00013
Pollo	0,099	0,220	0,131	0,220	0,219	0,387
Arroz	0,049	0,116	0,065	0,116	0,109	0,193
Pasta	0,050	0,119	0,067	0,119	0,112	0,197
Fríjoles	0,027	0,064	0,036	0,064	0,060	0,106
Lentejas	0,017	0,039	0,022	0,039	0,037	0,065
Papa	0,033	0,078	0,044	0,078	0,073	0,130
Yuca	0,010	0,022	0,013	0,022	0,021	0,037
Tostada de plátano	0,623	1,468	0,827	1,468	1,377	2,437
Sopa de verduras	0,052	0,123	0,069	0,123	0,115	0,203

un consumo de alimentos que puede tener las características indicadas a renglón seguido (tabla 6) (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar [ICBF], 2020).

El consumo de energía para preparar los alimentos según la dieta nutricional para una persona que labora en un ambiente rural (tabla 6), según el momento de la ingesta, corresponde al indicado a continuación (tabla 7).

Tabla 6

Dieta nutricional según la ingesta de alimentos para una persona que labora en un ambiente rural

Ingesta de alimentos	Nombre	Cantidad (g)	Kcal/Cantidad
Agua potable		3700	0
Desayuno	Chocolate	240	185
	Tostada de plátano	100	252
	Huevo frito	55	118
	Total	395	555
Media mañana	Huevo cocido	50	78
	Panela	240	11
	Total	290	89
Almuerzo	Arroz	80	101
	Fríjoles	200	276
	Res	100	150
	Papa	180	157
	Panela	240	192
	Sopa de verduras	100	42
	Total	900	918
Media tarde	Tostada de plátano	100	252
	Café	200	2
	Total	300	254
Comida	Arroz	80	101
	Lentejas	200	232
	Pollo	100	120
	Café	200	2
	Total	580	455
Total		6.165	2.271

Tabla 7
Energía requerida según la dieta nutricional para una persona que labora en un ambiente rural según el momento de la ingesta

Ingesta de alimentos	EE (kWh)	Gas natural (m³)	Gas GLP (kg)	Biogás (m³)	Carbón (kg)	Leña (kg)
Agua potable	0,564	0,11	0,053	0,20	0,37	1,25
Desayuno	0,788	0,17	0,08	0,30	0,52	1,74
Media mañana	0,053	0,01	0,005	0,02	0,04	0,12
Almuerzo	0,387	0,08	0,04	0,14	0,26	0,86
Media tarde	0,653	0,13	0,06	0,24	0,43	1,45
Comida	0,202	0,04	0,02	0,07	0,13	0,45
Total	2,65	0,54	0,26	0,97	1,76	5,86

Así mismo, el consumo de energía según la dieta nutricional para una persona que labora en un ambiente rural tiene un costo, según el energético y el momento de la ingesta del alimento, que corresponde al indicado en la tabla siguiente.

Tabla 8
Costo de energéticos requeridos según la dieta nutricional para una persona que labora en un ambiente rural según el momento de la ingesta (unidades en pesos colombianos de marzo 2024)

Ingesta de alimentos	EE	Gas Natural	Gas GLP	Biogás	Carbón	Leña
Agua potable	395	289	99	0	9.696	7.372
Desayuno	551	424	145	0	13.537	10.292
Media mañana	37	24	10	0	916	697
Almuerzo	271	192	71	0	6.646	5.053
Media tarde	457	335	120	0	11.226	8.535
Comida	141	101	37	0	3.470	2.639
Total	1.853	1.364	480	0,00	45.492	34.587

CONCLUSIONES

El resultado de la investigación de evaluar la demanda de energía para preparación de alimentos en una condición de ausencia de información condujo a la realización experimental para determinar cifras que cuantifican su demanda por potencia y por energía, de acuerdo con el energético, la estufa, el recipiente y el alimento. Esta solución la propusieron y llevaron a cabo reconocidas

instituciones y respetados investigadores en el ámbito internacional.

Las cifras del análisis experimental permiten identificar los requerimientos de la potencia de los equipos y la energía necesaria para atender la demanda, datos que, según el horario de consumo de la ingesta de alimentos, permiten construir el perfil de demanda.

Este análisis ha sido extenso, dado que en los referentes bibliográficos no había cifras precisas que permitieran evaluar el perfil de demanda para una comunidad rural; esto implicó adquirir los alimentos y los elementos para preparación con diferentes energéticos, además de los instrumentos de medida de peso, volumen, temperatura, entre otros.

Los resultados de la presente investigación permiten organizar soluciones energéticas en forma integral con enfoque multipropósito: atender todas las demandas de energía y causar el menor impacto ambiental en un entorno de economía circular.

Para futuras investigaciones, los resultados obtenidos son pilares para justificar el aumento de la potencia en proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas o la aplicación de bioenergéticos para atender la demanda rural.

REFERENCIAS

- Hernández, M. F. (2018). Índice de pobreza energética multidimensional por regiones para Colombia, ipem_rc 2013. *Economía Coyuntural. Revista de temas de coyuntura y perspectivas*. [online], 3(3), 35-72. ISSN 2415-0622.
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (2023). *Plato saludable de la familia colombiana*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SNA/guias-alimentarias-basadas-en-alimentos.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas (2023). *ODS 7. Energía asequible y no contaminante*. <https://www.pactomundial.org/ods/7-energia-asequible-y-no-contaminante/>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2023). *Estado del arte y novedades de la bioenergía en Colombia*. <https://www.fao.org/4/as419s/as419s.pdf>.
- Red de Biodigestores para Latinoamérica y el Caribe (2023). *Estado actual de la biodigestión en América Latina y el Caribe*. <https://redbiolac.org/publicaciones-1>.
- Unidad de Planeación Minero Energética (2023). *Plan Nacional de Sustitución de Leña*. [https://www1.upme.gov.co/sipg/Paginas/Plan-nacional-sustitucion-le %C3 %B1a.aspx](https://www1.upme.gov.co/sipg/Paginas/Plan-nacional-sustitucion-le%C3%B1a.aspx)
- United States Environmental Protection Agency – EPA (20 de junio de 2023). Test Results of Cook Stove Performance. <https://pciaonline.org/files/Test-Results-Cookstove-Performance.pdf>.
- Villamizar, J. (2023). *Índice de pobreza energética en Colombia* [tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional, Universidad de los Andes.

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Alcance y política

La *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* tiene como propósito principal ser un canal de divulgación del conocimiento técnico y científico que contribuya al desarrollo del país. Buscamos publicar trabajos de alta calidad editorial y rigor académico, que aporten a la discusión y avance de todas las áreas de la ingeniería, con un enfoque crítico, propositivo e interdisciplinario.

En nuestra publicación se priorizan tres tipos de contribuciones que fortalecen su visibilidad y proyección en comunidades científicas nacionales e internacionales:

- **Artículo de investigación científica y tecnológica.** En esta clase de manuscritos se presentan, en forma detallada, resultados originales, derivados de proyectos de investigación. Se estructura habitualmente en cuatro secciones: introducción, metodología, resultados y conclusiones. En la introducción se plantea el problema, se contextualiza su importancia, se formulan los objetivos y se incluye una revisión del estado del arte. En la metodología se exponen el diseño del estudio, las técnicas empleadas y los criterios de validez. Los resultados muestran los hallazgos de manera clara, apoyados con frecuencia en tablas o figuras. Finalmente, en las conclusiones se interpretan los datos obtenidos y se discute su impacto, además de que se pueden incluir recomendaciones para futuras investigaciones. El contenido de estos artículos debe fundamentarse en información verificable, respetar principios éticos y estar correctamente referenciado. Su extensión aproximada va de 5.000 a 8.000 palabras.
- **Artículo de reflexión.** Es un documento que surge de un proceso investigativo o académico, en el cual el autor desarrolla un análisis crítico, interpretativo o propositivo sobre un tema en particular. Por medio de una postura argumentada, sustentada en fuentes teóricas y experiencias, se construye una visión personal pero rigurosa sobre el objeto de estudio. La estructura del artículo incluye una introducción clara, un desarrollo temático con enfoque reflexivo y una conclusión que sintetiza los aportes, reafirma la posición del autor y plantea posibles líneas de indagación. Su extensión sugerida está entre 3.000 y 6.000 palabras.
- **Artículo de revisión.** En este tipo de artículos se analizan sistemáticamente los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, con el propósito de identificar avances, debates, tendencias y vacíos en un campo particular de la ciencia o la tecnología. No se trata de una simple recopilación de fuentes, sino de una integración crítica que permita proponer nuevas perspectivas o rutas investigativas. Su estructura incluye introducción, criterios y métodos de búsqueda, análisis temático, discusión y conclusiones. Se exige una revisión bibliográfica exhaustiva y bien documentada, con una extensión entre 6.000 y 10.000 palabras.

Además de estas tres tipologías principales, la revista contempla otras formas de contribución académica, tales como las siguientes:

- **Artículo corto.** Comunica resultados preliminares o parciales de investigaciones en curso que, por su relevancia o novedad, requieren una difusión temprana. Es un documento breve (entre 2.000 y 3.000 palabras), de redacción precisa y estructura básica: introducción, metodología resumida, resultados y conclusiones iniciales.

- **Reporte de caso.** Presenta el análisis detallado de una situación, experiencia técnica o intervención metodológica particular, con el fin de compartir lecciones aprendidas y reflexiones aplicables a contextos similares. Es común en áreas aplicadas, como la ingeniería, la salud, la educación o la gestión pública. Incluye descripción del caso, análisis crítico y discusión de sus implicaciones.
- **Revisión de tema.** A diferencia de un artículo de revisión sistemática, en esta clase de textos se ofrece una mirada crítica y estructurada sobre un tema específico, sin pretender abarcar toda la bibliografía disponible. Se busca ordenar el conocimiento existente, resaltar perspectivas relevantes, identificar puntos de controversia y señalar rutas posibles de desarrollo. Se recomienda una estructura que incluya introducción, desarrollo temático y conclusiones.

La revista enfoca su labor editorial en la publicación de artículos de investigación, reflexión y revisión, por considerarlos los más relevantes para fortalecer el conocimiento en el campo de la ingeniería. Es una publicación de acceso abierto, con periodicidad cuatrimestral, y solo recibe manuscritos originales e inéditos.

Todos los textos enviados pasan por una evaluación rigurosa, hecha por pares académicos y por el Comité Editorial, con el objetivo de garantizar su calidad, pertinencia y contribución al desarrollo científico y tecnológico. Los artículos se deben ajustar a las normas de citación y referencias del *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association (APA)* (7ª ed.).

En el marco de esta nueva etapa editorial, los artículos se deben enviar exclusivamente a través de la plataforma Open Journal Systems (OJS), a la cual se puede acceder desde el sitio web oficial de la revista:

<https://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Para completar el proceso de envío, el autor o autora debe:

- Registrarse como usuario en la plataforma OJS.
- Diligenciar la información completa del manuscrito y los autores.
- Adjuntar el archivo del artículo en formato editable, conforme a las normas de presentación de la revista.
- Aceptar la declaración de originalidad y cesión de derechos.
- Verificar que todas las secciones del envío estén completas antes de finalizar el proceso.

Así mismo, el manuscrito debe tener las siguientes normas de presentación:

- Un máximo de 20 páginas, en formato Word, escrito a una columna, interlineado de 1.5, con fuente Georgia de 11 puntos.
- Las citas y referencias deben seguir las normas y lineamientos que aparecen en el *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association (APA)* (7ª ed.).
- Las gráficas y tablas deben ser editables. Se recomienda anexar los archivos originales y nombrarlos de manera clara (por ejemplo: Figura_1.xlsx, Tabla_2.docx), indicando el número correspondiente en el texto.

Para más información o consultas editoriales, se puede comunicar al correo monica.suarez@escuelaing.edu.co.

Scope and Policies

The main goal of *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* is to be a means to divulge technical and scientific knowledge which contributes to the development of the country. We seek to publish high-quality rigorous works which help discuss and advance in different fields of engineering with a critical, proactive, and interdisciplinary approach.

Our journal prioritizes three types of contributions to strengthen its visibility and projection in national and international scientific communities:

- **Scientific and technological research article.** This type of paper shows, in detail, original results derived from research projects. It is usually structured in four sections: introduction, methodology, results, and conclusions. The introduction states the problem, justifies its importance, sets up the objectives, and includes a literature review. The methodology shows the study design, the tools and techniques used, and validity criteria. The results show their findings in a straightforward way, usually supported tables, charts, and figures. Finally, the conclusions interpret the data obtained, discuss their impact, and may include suggestions for future research. This type of article must be grounded on verifiable information, respect ethical principles, and be appropriately cited and quoted. Their length oscillates between 5,000 and 8,000 words.
- **Reflection article.** This is a document resulting from a research or academic process in which the author develops a critical, interpretive, or propositional analysis on a particular topic. Through an argued stance, supported by theoretical sources and experiences, the author constructs a personal yet rigorous perspective on the subject. The article's structure includes a clear introduction, a thematic development with a reflective approach, and a conclusion that synthesizes key contributions, reaffirms the author's position, and suggests potential lines of inquiry. The suggested length is between 3,000 and 6,000 words.
- **Review article.** This type systematically compiles and analyzes published or unpublished research findings to identify advances, debates, trends, and gaps in a specific field of science or technology. It is not merely a compilation of sources but a critical integration that proposes new perspectives or research directions. Its structure includes an introduction, search criteria and methods, thematic analysis, discussion, and conclusions. A thorough and well-documented literature review is required, with a length between 6,000 and 10,000 words.

In addition to these three main types, the journal considers other forms of academic contributions, such as:

- **Short article.** Presents preliminary or partial results from ongoing research that, due to their relevance or novelty, require early dissemination. It is a concise document (2,000–3,000 words) with

precise writing and a basic structure: introduction, summarized methodology, results, and initial conclusions.

- **Case report.** It provides a detailed analysis of a specific situation, technical experience, or methodological intervention to share lessons learned and reflections applicable to similar contexts. Common in applied fields such as engineering, health, education, or public management. It includes a case description, critical analysis, and discussion of implications.
- **Topic review.** Unlike a systematic review article, this type offers a critical and structured examination of a specific topic without attempting to cover all available literature. It aims to organize existing knowledge, highlight relevant perspectives, identify points of controversy, and suggest development paths. The recommended structure includes an introduction, thematic development, and conclusions.

The journal focuses its editorial efforts on publishing research, reflection, and review articles, as they are considered the most relevant for advancing knowledge in the field of engineering. It is an open-access publication with a quarterly frequency and only accepts original, unpublished manuscripts.

All submitted texts undergo a rigorous peer-review process by academic peers and the Editorial Committee to ensure quality, relevance, and contribution to scientific and technological development. All articles must adhere to the citation and reference guidelines of APA style (7th edition).

As part of this new editorial phase, article submissions must be made exclusively through the Open Journal Systems (OJS) platform, accessible via the journal's official website:

<https://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

To complete the submission process, authors must:

- Register as a user on the OJS platform.
- Complete all manuscript and author information.
- Attach the article file in an editable format, following the journal's submission guidelines.
- Accept the originality statement and copyright transfer.
- Verify that all submission sections are complete before finalizing the process.

Manuscript formatting guidelines:

- The document must not exceed 20 pages, in Word format, single-column, 1.5 line spacing, with 11-point Georgia font.
- Citations and references must follow APA style (7th edition).
- Graphs and tables must be editable. Original files should be attached and clearly labeled (e.g., Figure_1.xlsx, Table_2.docx), with corresponding numbering in the text.
- For further information or editorial inquiries, please contact: monica.suarez@escuelaing.edu.co