

Formato de Investigación de Póster Misión Académica Internacional

1. Información General del Proyecto				
Facultad de Ingeniería Civil		Fecha de presentación:		
		DD	MMM	AAAA
Programa: Especialización en Estructuras		06	08	2025
Título del proyecto: –Revisión de los parámetros de diseño estructural en compuertas hidráulicas de grandes obras: análisis comparativo entre las esclusas del Canal de Panamá y las propuestas para el Canal del Dique en Colombia-				
1.1 Director del Proyecto				
Nombres y Apellidos	Número Documento	Nivel de Formación	e-mail	Número Teléfono
Ángel Francisco Daza Pinzón			angel.daza@usantoto.edu.co	3103193060
1.1.1 Codirector del Proyecto				
Nombres y Apellidos	Número Documento	Nivel de Formación	e-mail	Número Teléfono
1.2 Estudiantes Participantes				
Nombres y Apellidos	Número de Documento	Semestre	Correo Electrónico	Número Teléfono
Laura Natalia Ruiz Pidiache	1.057.611.265	2	Laura.ruizp@usantoto.edu.co	322 226 3061
Lina María Vásquez Castillo	1.018.497.870	2	Lina.vasquez@usantoto.edu.co	320 465 2671
1.3 Firmas				

Director 1

Codirector 2

Estudiante 1

Estudiante 2

2. Introducción

Máximo 300 palabras: El resumen debe tener máximo dos párrafos que incluyan de manera abreviada, sencilla e interesante la información necesaria, para que el lector entienda el objetivo, la pertinencia y la calidad del proyecto. Debe incluir una breve introducción, el objetivo, la metodología general que será empleada, los resultados potenciales, la pertinencia y el alcance de la propuesta.

La necesidad de controlar caudales, garantizar la navegabilidad y proteger los ecosistemas en entornos fluviales tropicales ha impulsado el diseño de estructuras hidráulicas como las esclusas con compuertas, cuyo desempeño depende en gran medida de sus características estructurales. En contextos tropicales, este diseño exige criterios rigurosos que aseguren resistencia, estabilidad y durabilidad frente a cargas hidrostáticas, efectos térmicos, corrosión y condiciones geotécnicas complejas. Las esclusas del Canal de Panamá, especialmente tras su ampliación, constituyen una referencia internacional por su sofisticación técnica, con compuertas rodantes capaces de enfrentar grandes esfuerzos hidrostáticos, sismos y ambientes altamente corrosivos. En contraste, el proyecto de restauración del Canal del Dique en Colombia contempla infraestructuras similares, enfrentando desafíos propios de suelos blandos, alta sedimentación y variabilidad hídrica, lo que plantea interrogantes sobre la adaptación de parámetros estructurales en contextos geotécnicamente distintos.

Este proyecto desarrolla una investigación documental y comparativa enfocada en el análisis técnico de los parámetros estructurales empleados en las compuertas del Canal de Panamá (materiales, geometría, sistemas de cierre, cimentaciones y normativas) para contrastarlos con las propuestas del sistema de control hidráulico del Canal del Dique en la costa Caribe Colombiana. El objetivo es identificar principios estructurales transferibles que puedan ser adaptados al contexto colombiano bajo estándares como la norma Colombia NSR-10.

La metodología contempla una revisión normativa y tipológica, junto con un análisis estructural orientado a construir una matriz comparativa como resultado principal. Esta investigación busca aportar al fortalecimiento de la infraestructura fluvial nacional desde

la ingeniería estructural, generando insumos técnicos relevantes para el diseño de compuertas en escenarios tropicales con condiciones geotécnicas desafiantes.

3. Estado del Arte y Análisis de Vigilancia Tecnológica

Este apartado permitirá identificar la información existente sobre el tema de investigación; así como los vacíos conceptuales entre la comunidad científica internacional, permitiendo orientar la propuesta a la resolución de un tema específico. Debe incluir una recopilación de información sobre el problema planteado (principalmente la reciente), soportando teóricamente los objetivos del proyecto; analizando casos similares en los ámbitos regionales, nacionales e internacionales. En caso de que la temática no cuente con información previamente publicada en el tema, deberá soportarse mediante análisis específicos en bases de datos sobre la literatura consultada. También debe incluir un análisis de vigilancia tecnológica de las bases de datos bibliográficas y de patentes que permita identificar las tendencias globales sobre la investigación que se pretende realizar. Recuerde incluir las referencias bibliográficas de toda la información y figuras que emplee.

El diseño estructural de compuertas hidráulicas, concebidas como barreras móviles para regular, interrumpir o redirigir el flujo de agua, ha sido objeto de amplio estudio en la ingeniería hidráulica y civil, debido a su papel estratégico en la gestión de recursos hídricos y en la operación de grandes obras de infraestructura. Estas estructuras no solo cumplen una función técnica de control del caudal, sino que también se consideran elementos clave para la navegabilidad fluvial, la prevención de inundaciones, la operación de sistemas de riego, la generación de energía hidroeléctrica y la protección de comunidades ribereñas. En consecuencia, la literatura especializada ha abordado las compuertas desde múltiples perspectivas: su tipología estructural, su comportamiento hidráulico, la elección de materiales, los sistemas de operación y los criterios normativos aplicados en cada contexto (GUPC. 2010) En el ámbito internacional, el caso de las esclusas del Canal de Panamá constituye uno de los referentes más emblemáticos y exigentes en términos de diseño estructural. Las compuertas rodantes utilizadas en este sistema se destacan por su escala monumental, diseñada para resistir presiones hidrostáticas elevadas, cargas dinámicas asociadas a la operación de embarcaciones de

gran calado, solicitudes sísmicas y la fuerte agresividad ambiental propia de las regiones tropicales costeras. (Calvo Gobbetti, L. E, 2013)

El proceso de diseño de estas compuertas ha implicado la integración de análisis estructurales avanzados con modelos hidráulicos a escala reducida, validando los resultados mediante ensayos físicos y numéricos. Además, el proyecto de ampliación del Canal, documentado en la Revista Iberoamericana del Agua (2017), constituye un ejemplo de coherencia metodológica, en el que la interacción entre modelos computacionales y pruebas experimentales permitió garantizar un comportamiento seguro y eficiente de las nuevas estructuras. Este enfoque interdisciplinario ha sido señalado como un referente de buenas prácticas para proyectos de gran magnitud, pues demuestra cómo la innovación tecnológica puede aplicarse al rediseño de obras centenarias con estándares contemporáneos de seguridad y sostenibilidad.

En contraste con este referente de gran escala, los desarrollos latinoamericanos presentan características y desafíos propios. El proyecto de restauración del Canal del Dique en Colombia (CAR, 2020) plantea la implementación de compuertas de acero pretensado, específicamente adaptadas a condiciones fluviales tropicales marcadas por la presencia de suelos blandos, altas tasas de sedimentación y variabilidad climática. A diferencia de Panamá, donde el diseño estructural se concentra en cargas de navegación y resistencia sísmica, en el Canal del Dique los retos se relacionan con cimentaciones en terrenos de baja capacidad portante y con la necesidad de garantizar un funcionamiento confiable en un entorno de alta vulnerabilidad ambiental y social. Este contraste evidencia cómo las soluciones estructurales deben ser contextualizadas y adaptadas a las particularidades locales, evitando la simple transferencia de criterios internacionales. (Sergi Ametller, 2019)

A nivel nacional, los aportes de la Universidad Javeriana resultan significativos. La investigación de Córdoba Romero (2012) desarrolló un protocolo de operación hidráulica



para compuertas en sistemas de alcantarillado urbano, explorando el comportamiento de compuertas deslizantes verticales en redes de drenaje. Este estudio resaltó la necesidad de analizar tanto el flujo local (cercano a la compuerta) como el comportamiento global del sistema, destacando la importancia de considerar los efectos transitorios del agua, como las ondas de presión y las fluctuaciones de caudal, en el dimensionamiento y operación de estos dispositivos. Aunque a menor escala que los proyectos de navegación, este tipo de investigaciones aporta criterios técnicos relevantes, especialmente para el diseño de compuertas en entornos urbanos, donde el control del caudal tiene un impacto directo en la reducción de riesgos de inundación y en la eficiencia de los sistemas de saneamiento. En el ámbito académico, los trabajos recientes de Orjuela Ruiz y Correa Perdomo (2024) se enfocaron en compuertas planas deslizantes aplicadas a laboratorios hidráulicos. Aunque estos modelos corresponden a ensayos a pequeña escala, su valor radica en la posibilidad de experimentar con tipologías básicas bajo condiciones controladas, lo que permite validar hipótesis teóricas y probar herramientas de simulación numérica antes de su aplicación en prototipos reales. De manera complementaria, Quispe Arce (2018) estudió las clapetas en sistemas de captación en Ecuador y Perú, mientras que Amaya Cueva (2016) profundizó en compuertas radiales y de rodillos, incorporando análisis mediante elementos finitos y comparaciones con normativas técnicas como la NBR 8883 en Brasil y la NSR-10 en Colombia. Estos aportes reflejan una tendencia académica hacia la incorporación de herramientas de simulación computacional, lo cual fortalece la capacidad predictiva del diseño estructural y reduce los riesgos asociados a la experimentación directa en obras de gran magnitud.

Desde una perspectiva de vigilancia tecnológica, se observa una tendencia creciente hacia la automatización y digitalización de los sistemas de control hidráulico. Empresas como Capta Hydro han desarrollado compuertas inteligentes con sistemas modulares que integran sensores, telemetría y algoritmos de control, permitiendo la operación remota, la

detección de atascos y la regulación automática de caudales en tiempo real. Estas innovaciones, aunque aún en etapas de implementación limitada, representan un cambio de paradigma en la gestión de infraestructura hidráulica, orientado a la eficiencia operativa, la reducción de costos de mantenimiento y la capacidad de respuesta ante eventos extremos. No obstante, la literatura revisada también evidencia que, en regiones tropicales, como Colombia, todavía existen vacíos en la aplicación sistemática de estas tecnologías, especialmente en lo relacionado con la resistencia estructural de los materiales frente a condiciones ambientales agresivas y con la integración de sistemas inteligentes en proyectos de gran escala fluvial.

Finalmente, al realizar un balance de los hallazgos reportados en las referencias consultadas, se identifican avances significativos en tres dimensiones: (1) el diseño estructural orientado a la resistencia y durabilidad, ejemplificado por el Canal de Panamá; (2) la adaptación local de soluciones en entornos de alta complejidad geotécnica, como en el Canal del Dique; y (3) el desarrollo académico de tipologías experimentales y herramientas computacionales que permiten validar diseños de manera más precisa. Sin embargo, persisten vacíos en la transferencia de criterios estructurales entre proyectos de gran escala internacional y los desarrollos fluviales en Colombia, así como en la incorporación sistemática de compuertas inteligentes en entornos tropicales.

En conclusión, el estado del arte evidencia la necesidad de continuar fortaleciendo la investigación aplicada al diseño y operación de compuertas hidráulicas, con énfasis en la adaptación de parámetros estructurales a normativas vigentes, condiciones geotécnicas diferenciadas y desafíos ambientales emergentes. La matriz comparativa que se plantea en el presente proyecto permitirá sintetizar los criterios técnicos clave y orientar futuras decisiones en infraestructura hidráulica nacional, contribuyendo no solo al fortalecimiento de la ingeniería estructural en el país, sino también a la resiliencia y sostenibilidad de las comunidades que dependen de estos sistemas de control hídrico.

4. Planteamiento del Problema de Investigación

El problema que quiere resolverse con el desarrollo del proyecto de investigación debe plantearse de manera concreta. Debe incluir la descripción breve de antecedentes de la temática que se va a desarrollar; así como explicar claramente como el desarrollo del proyecto aportará a la resolución del problema o generará el conocimiento necesario que permita una ventaja competitiva a futuro. Enfocado hacia los problemas en los que se puede aportar con una solución, a partir de lo visto y realizado en los seminarios y laboratorios en Panamá.

El diseño estructural de compuertas hidráulicas está estrechamente ligado al propósito funcional de las obras que las integran. Mientras el Canal de Panamá responde a una necesidad estratégica internacional como conexión interoceánica, con esclusas diseñadas para soportar cargas severas y tránsito marítimo constante, el Canal del Dique en Colombia cumple funciones ambientales, agropecuarias y sociales clave a nivel regional. Esta ruta fluvial de 113 km conecta el río Magdalena con la Bahía de Cartagena, abasteciendo acueductos, irrigando ciénagas y soportando actividades económicas de poblaciones ribereñas. No obstante, la falta de regulación efectiva del caudal y el ingreso de sedimentos ha generado graves impactos ecológicos y estructurales, incluyendo eventos críticos como la emergencia de 2010 causada por el fenómeno de La Niña.

Para mitigar estos problemas, el proyecto de restauración del Canal del Dique contempla la construcción de un sistema de esclusas con compuertas hidráulicas, orientado a recuperar la navegabilidad y estabilidad ambiental de la región. Considerando que ambos sistemas hidráulicos operan en contextos geotécnicos, climáticos e hidrodinámicos distintos, surge la necesidad de revisar los criterios estructurales aplicables a cada caso. El análisis técnico de tipologías, materiales, cimentaciones y normativas puede revelar qué parámetros de diseño son transferibles y cuáles requieren una adaptación específica al entorno colombiano.

En este marco, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿En qué medida los parámetros de diseño estructural utilizados en las compuertas hidráulicas del Canal de Panamá pueden ser contextualizados y aplicados técnicamente al Canal del Dique, considerando las diferencias geotécnicas, hidrodinámicas y normativas entre ambos sistemas?

El diseño estructural de compuertas es un componente crítico en proyectos de infraestructura fluvial a gran escala, ya que estas estructuras deben responder eficientemente a condiciones particulares, garantizando seguridad, durabilidad y funcionalidad. Las esclusas del Canal de Panamá representan un referente técnico internacional, especialmente tras su ampliación, que incorporó compuertas rodantes de alta complejidad estructural, capaces de resistir presiones hidrostáticas significativas, cargas sísmicas y ambientes corrosivos.

Por su parte, el Canal del Dique requiere soluciones estructurales adaptadas a suelos blandos, alta sedimentación y condiciones tropicales agresivas. Sin embargo, aún no se dispone de un cuerpo técnico normativo detallado que oriente el diseño estructural de compuertas en este contexto. Esta situación plantea un desafío técnico: identificar y adaptar los parámetros estructurales más pertinentes, evitando la aplicación de soluciones no contextualizadas o sobredimensionadas que comprometan la eficiencia técnica, el costo y la sostenibilidad del proyecto.

En consecuencia, este estudio propone una revisión técnica comparativa entre ambos sistemas, con el fin de identificar principios estructurales transferibles, establecer criterios de adaptación local y generar recomendaciones concretas para el diseño de las estructuras hidráulicas proyectadas en el Caribe colombiano.

5. Justificación de la Propuesta e Identificación y Descripción del Conocimiento que Generará la misión académica internacional

Explicar claramente la originalidad, relevancia y pertinencia de la misión (teniendo en cuenta la información previamente plasmada); e identificar y describir en función de los resultados que generará teniendo en cuenta el estado del arte y el planteamiento del problema.

El diseño estructural de compuertas hidráulicas en sistemas fluviales tropicales constituye un desafío multidisciplinario que exige un análisis integral de variables hidráulicas, geotécnicas, estructurales y ambientales. En escenarios complejos como el del Canal del Dique en Colombia, esta complejidad se ve intensificada por la presencia de suelos de baja capacidad portante, alta variabilidad estacional de los caudales, procesos de sedimentación intensiva y condiciones climáticas tropicales agresivas. En este contexto, la adecuada selección de criterios estructurales no solo es un requisito técnico, sino un factor determinante para garantizar la seguridad operativa, la funcionalidad hidráulica y la sostenibilidad a largo plazo de la infraestructura.

Desde su ampliación en 2016, el Canal de Panamá se ha consolidado como un referente técnico internacional en el diseño de compuertas hidráulicas, gracias a la incorporación de sistemas rodantes de alta complejidad estructural, desarrollados con tecnologías avanzadas y validados mediante simulaciones rigurosas para condiciones extremas, como altas presiones hidrostáticas, sismos y ambientes corrosivos. Esta experiencia representa un precedente valioso para proyectos de infraestructura fluvial a gran escala; sin embargo, su aplicación en otros contextos requiere una adaptación cuidadosa a las condiciones locales, tanto geotécnicas como normativas. En el caso colombiano, existe un vacío técnico evidente: no se cuenta con una guía estructural específica para el diseño de compuertas en sistemas fluviales tropicales, lo cual puede derivar en soluciones sobredimensionadas, ineficientes o inadecuadas frente a las particularidades del entorno. La misión académica internacional desarrollada en Panamá aportó conocimientos claves sobre comportamiento estructural de compuertas en ambientes tropicales, aplicación normativa en infraestructura hidráulica, análisis comparativo y simulación tipológica.

Estos aprendizajes fortalecen la capacidad crítica del investigador para revisar experiencias internacionales y evaluarlas frente al contexto colombiano.

Como resultado principal, esta investigación generará una matriz comparativa estructural entre las compuertas del Canal de Panamá y las proyectadas para el Canal del Dique, sustentada en criterios técnicos verificables. Este insumo contribuirá al fortalecimiento del diseño estructural hidráulico nacional, promoviendo una transferencia tecnológica contextualizada, sostenible y fundamentada.

En el caso colombiano, no existe aún un modelo estructural específico ni una guía técnica detallada para el diseño de compuertas hidráulicas a gran escala en entornos fluviales como el del Canal del Dique. Esta carencia técnica puede derivar en la aplicación de diseños inadecuados, costosos o poco eficientes si no se consideran las particularidades del entorno local. En este sentido, un **análisis comparativo entre las compuertas del Canal de Panamá y las proyectadas para el Canal del Dique** permitirá identificar **parámetros estructurales transferibles, adaptaciones requeridas y vacíos normativos** relevantes.

Además del diseño estructural y los criterios normativos, el proceso constructivo juega un papel determinante en la viabilidad técnica de las compuertas hidráulicas. En el caso del Canal de Panamá, se emplearon procesos constructivos altamente especializados que incluyeron prefabricación en Europa, transporte marítimo en plataformas sumergibles y montaje con grúas de alta capacidad, todo dentro de un entorno controlado. En contraste, el Canal del Dique requiere soluciones adaptadas a las condiciones logísticas locales, con limitaciones en maquinaria pesada, acceso fluvial y suelos de baja capacidad portante. Por tanto, este estudio también busca identificar y comparar métodos constructivos adecuados, tiempos estimados de ejecución, requerimientos técnicos locales y procesos de ensamblaje

estructural, con el fin de garantizar que la solución estructural propuesta sea viable no solo en el diseño, sino también en su ejecución real y sostenible en Colombia.

Justamente, este proyecto busca **contribuir al fortalecimiento técnico del diseño estructural hidráulico en Colombia**, a través de una revisión de experiencias internacionales y su evaluación frente al contexto nacional. Los resultados de esta investigación podrán ser utilizados como **insumo técnico básico para la etapa preliminar en fases de diseño, formulación o supervisión**, y promoverán una **transferencia tecnológica contextualizada**, sostenible y fundamentada en criterios de ingeniería estructural verificables.

6. Objetivos

Cada objetivo debe estar enlazado con una sección en la metodología, las cuales a su vez estarán vinculadas con una(s) actividades específicas, y un(os) producto(s) específico(s) esperado(s). Los objetivos específicos deberán estar enumerados.

Objetivo general:

Desarrollar una investigación documental y técnica que permita comparar los parámetros de diseño estructural de las compuertas hidráulicas utilizadas en las esclusas del Canal de Panamá con los propuestos para el Canal del Dique, con el fin de construir una matriz comparativa que identifique criterios estructurales transferibles y adaptables al contexto geotécnico, normativo y ambiental colombiano.

Objetivos específicos

- Analizar los parámetros estructurales utilizados en compuertas hidráulicas de gran escala en el Canal de Panamá y los previstos para el Canal del Dique, considerando variables como geometría, materiales, sistemas de cierre y condiciones de cimentación.

- Comparar las normativas estructurales aplicables en ambos proyectos (como la NSR-10 y AASHTO), evaluando coincidencias, divergencias y su aplicabilidad en entornos tropicales colombianos.
- Sintetizar los hallazgos técnicos en una matriz estructural comparativa que consolide criterios verificables y transferibles, como insumo para procesos de diseño, formulación, evaluación o supervisión de proyectos de infraestructura hidráulica en el ámbito nacional.

7. Métodos (visitas técnicas a laboratorios, talleres, seminarios)

Esta sección es de gran importancia pues debe dejar perfectamente claras las actividades que se llevarán a cabo para obtener las respuestas planteadas en los objetivos. Para esto, describa de manera específica y organizada los métodos detallados de cómo se alcanzarán cada uno de los objetivos planteados. Indique los procesos para recolectar la información, la organización, sistematización de los datos y el análisis de los mismos. Especifique los materiales o equipos que va a emplear (con referencias en lo posible). Especifique también las técnicas analíticas que va a usar y como va a obtener resultados cuantificables, las pruebas estadísticas que empleará para dar el nivel de confianza requerido para responder con certeza cada uno de los objetivos específicos. Cada sección de materiales y métodos debe explicar de manera detallada que objetivo u objetivos pretende cubrir y los procedimientos detallados con los que lo logrará. En caso de usar metodologías de referencia, recuerde citar los autores originales; así como explicar con sus propias palabras los procesos que involucra dicha metodología.

Para alcanzar los objetivos planteados, se utilizará una metodología investigativa documental, comparativa y normativa, basada en las experiencias adquiridas durante las visitas técnicas, seminarios y laboratorios de la misión académica internacional, con el propósito de construir una matriz estructural comparativa entre las compuertas hidráulicas del Canal de Panamá y las proyectadas para el Canal del Dique. Para ello, se emplearán métodos organizados por objetivo específico:

Objetivo 1: Analizar los parámetros estructurales de compuertas hidráulicas en ambos canales

Actividades:

- Revisión bibliográfica sistemática en bases de datos académicas como ScienceDirect, Dialnet, Scielo y repositorios institucionales de universidades (Javeriana, UNIMINUTO, UTP, UPS).
- Recopilación de información técnica sobre geometría, materiales, tipologías estructurales, sistemas de cierre y cimentaciones.
- Consulta y extracción de datos en documentos normativos como NBR 8883, guías técnicas de CAR, y publicaciones de Capta Hydro.

Técnicas:

- Matriz de vaciado bibliográfico.
- Clasificación estructural por tipología y función.
- Identificación de patrones estructurales repetitivos y su relación con el contexto de operación.

Objetivo 2: Comparar las normativas estructurales (NSR-10, AASHTO)

Actividades:

- Análisis de contenido técnico de normativas aplicadas en obras hidráulicas estadounidenses y colombianas.
- Identificación de coeficientes de carga, exigencias geotécnicas, criterios de diseño sísmico y disposiciones constructivas.

Técnicas:

- Cuadro comparativo de correspondencia normativa.
- Aplicación de metodología analítica normativa adaptada de Vargas et al. (2018), donde se cruzan variables técnicas entre contextos.

Instrumentos:

- Manual NSR-10 (2010).
- Guías AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

Objetivo 3: Sintetizar los resultados en una matriz estructural comparativa

Actividades:

- Integración de fichas técnicas, criterios normativos y condiciones geotécnicas.
- Construcción de matriz estructural de doble entrada que relacione parámetros clave con observaciones técnicas específicas.

Técnicas:

- Sistematización mediante matriz estructurada en Excel o LaTeX.
- Aplicación de criterios de elegibilidad técnica (adaptabilidad, relevancia estructural, contexto geotécnico).

Procesamiento de datos:

- Clasificación de fuentes por nivel de confiabilidad.
- Asignación de ponderación cualitativa a cada parámetro según su viabilidad técnica.

Componentes de la Misión Académica Internacional . Durante la estancia académica en Panama, se realizaron:

- Visitas técnicas a laboratorios hidráulicos en entornos fluviales tropicales.
- Observación directa de modelos de compuertas y estructuras de control de caudal.

- Participación en seminarios sobre normativa latinoamericana, análisis de tipologías estructurales y comportamiento de materiales en sistemas hidráulicos tropicales.
- Intercambio académico con investigadores locales sobre soluciones estructurales en ambientes sedimentarios complejos.

Estos componentes fortalecieron la capacidad crítica del investigador y sirvieron como base para el análisis técnico contextualizado.

8. Aplicación en Colombia

El estudiante debe elegir un proyecto o técnica desarrollada expuesta en las palestras y/o los laboratorios visitados y establecer un análisis comparativo con Colombia y su aplicación en el contexto de la Ingeniería civil en el país.

Durante las visitas técnicas realizadas en Panamá se analizó el funcionamiento de compuertas hidráulicas tipo clapeta con accionamiento automatizado, empleadas en sistemas de regulación hídrica en zonas urbanas de clima tropical. Estas compuertas, articuladas sobre un eje inferior, permiten controlar el caudal mediante apertura parcial o total, operadas por actuadores eléctricos conectados a sensores de nivel que, a su vez, se integran en sistemas de telemetría en tiempo real. Esta tecnología ofrece ventajas operativas notables: facilita un control dosificado del flujo, mejora la capacidad de respuesta frente a variaciones súbitas de caudal y reduce el riesgo de fallas por presión diferencial excesiva.

En el contexto colombiano, esta tipología de compuerta presenta un alto potencial de aplicación en el Canal del Dique, particularmente en zonas de derivación secundaria, estructuras de alivio y puntos de transición hidráulica donde los procesos de sedimentación y variabilidad hidrológica son críticos. Su diseño articulado y automatizado permitiría un manejo más eficiente de los caudales, minimizando la acumulación de sedimentos y mejorando la estabilidad de las márgenes fluviales. Además, al estar vinculadas a sistemas de telemetría, estas compuertas podrían integrarse en esquemas de

gestión integral del recurso hídrico, favoreciendo la toma de decisiones en tiempo real ante crecientes, sequías o eventos climáticos extremos.

La adaptación de esta tecnología en Colombia requiere, sin embargo, un análisis detallado de las condiciones geotécnicas y ambientales locales. Factores como los suelos blandos de baja capacidad portante, la alta humedad, la presencia de macrófitas y la agresividad corrosiva del entorno tropical obligan a reforzar la selección de materiales (aceros estructurales con recubrimientos especiales, sistemas de protección catódica y sellos resistentes al desgaste abrasivo) y a diseñar cimentaciones profundas con protección contra socavación. Asimismo, su implementación debe alinearse con el marco normativo vigente en el país, particularmente con la NSR-10, los lineamientos de AASHTO para estructuras hidráulicas y las disposiciones ambientales establecidas por la ANLA.

Desde la perspectiva de impacto, la aplicación de compuertas tipo clapeta en el Canal del Dique contribuiría de manera directa a:

- Reducir los riesgos de inundación en comunidades ribereñas mediante un control más preciso de los caudales.
- Mejorar los procesos de restauración ecológica al disminuir la entrada masiva de sedimentos en las ciénagas.
- Optimizar las labores de operación y mantenimiento, al contar con sistemas automatizados de control y monitoreo remoto.
- Favorecer la sostenibilidad del proyecto, al integrar soluciones tecnológicas que combinan eficiencia estructural, reducción de costos de operación y mayor resiliencia frente al cambio climático.

En síntesis, la experiencia observada en Panamá constituye un insumo valioso para el diseño de soluciones adaptadas al Canal del Dique. La incorporación de compuertas clapeta automatizadas no implica una réplica directa de los modelos internacionales, sino una transferencia tecnológica contextualizada, en la que se ajustan los parámetros

estructurales, operativos y normativos a las condiciones particulares de la región Caribe colombiana. Esto refuerza el propósito del proyecto de generar infraestructura hidráulica no solo funcional, sino también de adaptación, sostenible y coherente con las necesidades del país.

9. Resultados Esperados

Detallar los resultados directos, medibles y cuantificables que se obtendrán con el desarrollo del proyecto, y como se relacionan estos con cada uno de los objetivos planteados. Indique para cada uno las características del nuevo conocimiento generado, la fecha tentativa en la que el resultado o el producto será finalizado, así como un indicador claramente definido que permita evidenciar el cumplimiento de dicho objetivo y producto (debe estar detallado en la metodología). Algunos ejemplos de indicadores pueden ser el número de publicaciones indexadas, pruebas realizadas, ponencias, pruebas de laboratorio, ejecución de encuestas, experimentos, etc. Todos los objetivos específicos deben tener por lo menos un resultado o producto con un indicador verificable.

Resultado 1 – Objetivo 1 (Parámetros estructurales)

Se generará una ficha técnica estructural comparativa en la que se sistematicen y contrasten los parámetros de diseño de las compuertas hidráulicas del Canal de Panamá y del Canal del Dique.

- Variables analizadas: tipología de compuerta, dimensiones, materiales, sistemas de cierre, mecanismos de operación y cimentaciones.
- Producto esperado: ficha técnica en tabla comparativa.
- Indicador de cumplimiento: entrega de al menos una ficha técnica estructural consolidada, con información verificable en documentos técnicos y bibliográficos revisados.

Resultado 2 – Objetivo 2 (Normativas comparadas)

Se desarrollará una tabla de correspondencia normativa que contraste los criterios de la NSR-10 con los de AASHTO y AISC en relación con el diseño de compuertas.

- Variables analizadas: combinaciones de carga, criterios sísmicos, cargas hidrostáticas, fatiga estructural, durabilidad y acciones ambientales.
- Producto esperado: tabla comparativa normativa.
- Indicador de cumplimiento: elaboración de una tabla con al menos 10 criterios técnicos comparados, sustentada en revisión documental de códigos y guías normativas.

Resultado 3 – Objetivo 3 (Matriz estructural comparativa)

Se elaborará una matriz estructural de doble entrada que integre los hallazgos de los objetivos 1 y 2, permitiendo evaluar de forma cruzada los parámetros técnicos y normativos.

- Variables analizadas: tipología, materiales, cimentación, accionamiento, sistemas de sellado, durabilidad y condiciones ambientales.
- Producto esperado: matriz estructural comparativa como herramienta metodológica de análisis.
- Indicador de cumplimiento: entrega de una matriz consolidada validada con al menos siete parámetros clave, útil para orientar decisiones de diseño y supervisión en infraestructura hidráulica.

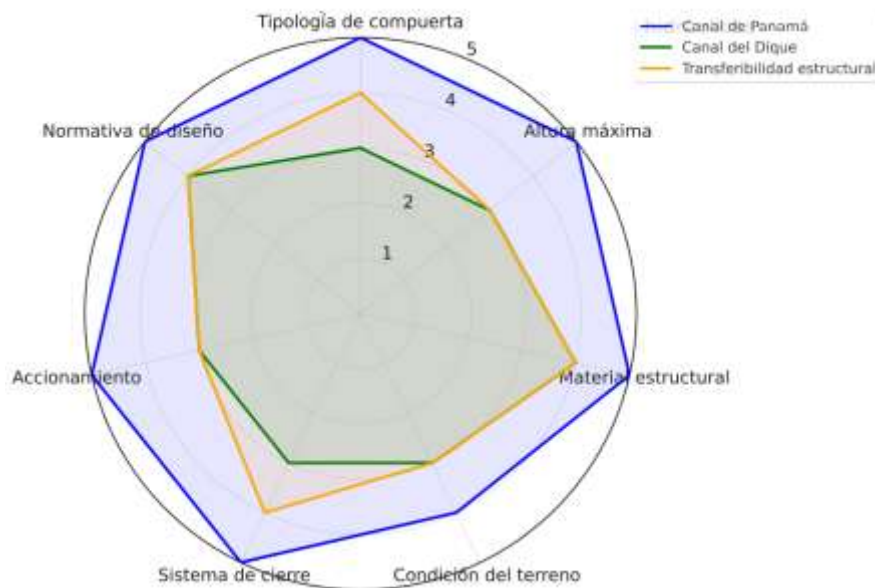
Resultado 4 – Impacto esperado (síntesis de los tres objetivos)

La aplicación de los resultados permitirá proponer un modelo de transferencia tecnológica contextualizada que adapte experiencias internacionales al entorno colombiano.

- Producto esperado: documento de síntesis con recomendaciones técnicas para el Canal del Dique.

- Indicador de cumplimiento: incorporación de las conclusiones en el informe final y su validación como insumo para procesos de diseño y formulación en proyectos de infraestructura fluvial.

Gráfico 1 comparativo Compuertas Hidráulicas



10. Conclusiones

Conclusión 1 – Objetivo 1 (Parámetros estructurales)

El análisis de los parámetros estructurales permitió identificar que, mientras las compuertas rodantes del Canal de Panamá fueron diseñadas para responder a altas presiones hidrostáticas, cargas sísmicas severas y condiciones marinas altamente corrosivas, las compuertas proyectadas para el Canal del Dique se orientan a un control fluvial y ambiental en un entorno de suelos blandos, alta sedimentación y caudales variables. Esta diferencia confirma que no es viable una transferencia directa de tipologías, pero sí la adopción de principios estructurales como la redundancia en los sistemas de accionamiento, la protección anticorrosiva especializada y la implementación de cimentaciones profundas con disipadores de energía hidráulica.

Conclusión 2 – Objetivo 2 (Normativas comparadas)

La comparación normativa entre la NSR-10 y las especificaciones internacionales (AASHTO y AISC) evidenció que, aunque la normativa colombiana constituye la base legal para el diseño estructural, no ofrece suficiente detalle técnico para estructuras hidráulicas de gran escala. AASHTO, en cambio, desarrolla criterios más específicos en aspectos como presiones hidrostáticas, cargas combinadas, fatiga estructural y durabilidad frente a ambientes agresivos. Se concluye que la integración de ambas normativas resulta indispensable: la NSR-10 como marco regulador nacional y AASHTO/AISC como sustento técnico especializado para el diseño de compuertas en contextos tropicales.

Conclusión 3 – Objetivo 3 (Matriz comparativa estructural)

La matriz estructural comparativa elaborada como producto de esta investigación permitió consolidar los hallazgos técnicos en un instrumento claro y sistemático, integrando variables como tipología, geometría, materiales, cimentación, accionamiento, sellado y durabilidad. Este recurso constituye una herramienta metodológica para orientar decisiones de diseño y supervisión en proyectos nacionales, asegurando que las soluciones propuestas para el Canal del Dique sean estructuralmente viables, normativamente consistentes y adaptadas a su entorno geotécnico y ambiental.

Conclusión 4 – Relevancia e impacto del proyecto (síntesis de los tres objetivos)

En conjunto, el estudio confirma que la experiencia internacional, representada por el Canal de Panamá, aporta insumos valiosos para fortalecer el diseño de compuertas hidráulicas en Colombia, siempre que se realice un proceso de adaptación técnica y normativa. El proyecto demuestra que es posible generar soluciones estructurales seguras,

sostenibles y contextualizadas, contribuyendo al fortalecimiento de la infraestructura hidráulica nacional y ofreciendo un modelo de transferencia tecnológica aplicable a futuros desarrollos fluviales en el país.

11. Referencias

Mínimo de 3 referencias y máximo de 5 referencias.

Calvo Gobbetti, L. E. (2013). Design of the filling and emptying system of the new Panama Canal locks. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1(1), 28–38. <https://doi.org/10.1080/23249676.2013.827899>

GUPC. 2010a. tModelación numérica para el diseño del sistema de llenado/vaciado de los complejos de esclusas del Canal de Panamá – informe final, G00/CICDSR-H0002 – PC, abril. <https://docslib.org/doc/1804822/rolling-gates-for-the-panama-canal-pianc-wg-173-by>

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2020). Guía de trabajo seguro para la operación de compuertas en los canales del sistema hidráulico de manejo ambiental y control de inundaciones (GHU-PN-22-GI-07, versión 3). (G. d. SST, Ed.) Obtenido de https://luppe.car.gov.co/files/mod_documentos/documentos/GHU-PN-22-GI-07/GHU-PN-22-GI-07_V3_Guia%20Trabajo%20Seguro%20Operacion%20Compuertas%20Hidraulicas copia controlada.pdf

Sergi Ametller. (2019) [Construcción del tercer juego de esclusas del Canal de Panamá](#). *Ribagua* 6:1, pages 16-33.

Agencia Nacional de Infraestructura. (10 de MARZO de 2023). ANI. Obtenido de ANI: <https://www.ani.gov.co/canal-del-dique/cronologia.html>