

Análisis de la demanda sísmica en tanques rectangulares de base fija ante la actualización espectral del AIS 100-24 en zonas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta.

Estefany Natalia Lizarazo Pinto

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Laura Andrea Vargas Carvajal
PhD en Ciencias de la Ingeniería

Codirector

María Alejandra Oliveros Caicedo
MsC en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

*A Dios, por ser mi guía y fortaleza en este camino, y por darme la sabiduría para transformar
cada desafío en crecimiento.*

A mi nonita María Helena, por ser mi luz desde la distancia.

*A mi madre, Liliana Pinto, por su amor inmenso que siempre me sostuvo, por sus consejos que
me guiaron cuando más lo necesité y por ser ese lugar seguro al que siempre podía volver.*

*A mi padre, Felix Lizarazo, por su apoyo incondicional y por creer en mí. Gracias por darme las
herramientas para llegar hasta aquí y alcanzar esta meta.*

*A mis hermanos, Fabián y Matías, por hacerme feliz y por llenarme de momentos alegres
cuando más lo necesitaba.*

*A mis amigos y compañeros de la universidad, por hacer este camino más llevadero,
especialmente a Lorena, Alberto y Felipe, gracias por las risas, por la amistad y por ser de lo
más valioso que me deja esta etapa. A Sergio, por guiarme cuando me sentía perdida.*

*A Ecopetrol, por la experiencia de estos seis meses como practicante. A mis compañeros, en
especial a Fabián, Breiner y Juan José, gracias por la experiencia, los buenos momentos y lo
que me enseñaron.*

*A mi madrina y a la abuelita Bárbara, por su cariño y por siempre estar presentes con sus
oraciones.*

*A la profesora Laura Vargas y María Alejandra por su dedicación, el tiempo que me brindaron
y su apoyo durante este proceso.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios por acompañarme en este camino y por poner en mi vida las oportunidades y personas que hicieron posible llegar hasta aquí; a mis padres, por su amor, su apoyo incondicional y por creer en mí siempre; a mi familia, por su compañía y por estar presente en cada etapa; y a mis amigos, por las risas, la motivación y por hacer más ligero este recorrido.

A todos los docentes, por su formación, por compartir su conocimiento y por dejar bases que hoy valoro profundamente en mi crecimiento profesional.

A la Universidad Industrial de Santander, por facilitarme el acceso a sus bases de datos bibliográficas, lo que me permitió consultar los artículos necesarios y contar con información clave para el desarrollo de este trabajo.

A la profesora Laura Andrea Vargas, directora de este proyecto, por su guía constante, su disposición y por confiar en mí desde el inicio. Gracias profe Laura por brindarme este tema de investigación, por cada reunión, por sus observaciones y aportes, que fueron fundamentales para darle forma a este trabajo de grado. A la profesora María Alejandra Oliveros, por su tiempo, su apoyo y por acompañarme durante este proceso con sus valiosos aportes y orientaciones.

Infinitas gracias a todos por hacer parte de este logro.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1.1 Estado del arte	18
1.2 Planteamiento y justificación del problema	19
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo general	21
1.3.2 Objetivos específicos	21
1.4 Alcances y limitaciones	21
2. Cuerpo del trabajo	24
2.1 Interacción fluido-estructura y modelo simplificado de Housner	24
2.2 Demanda sísmica	26
3. Metodología:	27
3.1 Definición del caso de estudio	27
4. Análisis y Discusión de Resultados	28
4.1 Objetivo 1 – Desarrollo de un script	28
4.2 Objetivo 2 - Estimación de la demanda sísmica	32
4.3 Objetivos 2 y 3 – Cálculo y comparación de la demanda sísmica.	34
5. Conclusiones	45

5.2 Trabajo futuro	47
Referencias Bibliográficas	49
Apéndices.....	51

Lista de Tablas**Pág.**

Tabla 1. Parámetros de entrada y configuraciones geométricas de los tanques analizados.....	33
--	----

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Modelo simplificado de Housner para la interacción fluido–estructura en tanques rectangulares.	25
Figura 2. Diagrama de flujo para la determinación de la demanda sísmica en tanques rectangulares según NSR-10.....	29
Figura 3. Diagrama de flujo para la determinación de la demanda sísmica en tanques rectangulares según AIS 100-24..	30
Figura 4. Esquema de las configuraciones geométricas evaluadas para tanques rectangulares de base fija: esbelta, intermedia y ancha.	33
Figura 5. (a) Comparación espectral y (b) variación porcentual de la aceleración espectral – Arauca.	35
Figura 6. Fuerzas hidrodinámicas impulsiva y convectiva en función de la relación geométrica L/HL – comparación NSR-10 y AIS 100-24, Arauca.	36
Figura 7. (a) Comparación del momento de volcamiento en la base del tanque y (b) comparación del cortante basal hidrodinámico para diferentes configuraciones geométricas según NSR-10 y AIS 100-24 – Arauca.	38
Figura 8. Comparación del momento de volcamiento en la base del tanque para distintas ciudades según NSR-10 y AIS 100-24: (a) geometría ancha, (b) geometría intermedia y (c) geometría esbelta.	40
Figura 9. Comparación del cortante basal hidrodinámico para distintas ciudades según NSR-10 y AIS 100-24: (a) geometría ancha, (b) geometría intermedia y (c) geometría esbelta.....	41

Figura 10. (a) Curvas de nivel del momento basal y (b) curvas de nivel del cortante basal en función de S_{ms} y S_{m1} para las geometrías ancha, intermedia y esbelta..... 43

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Resultados espectrales para la ciudad de Arauca.	51
Apéndice B. Parámetros geométricos e hidrodinámicos de los tanques analizados.	51
Apéndice C. Comparación de la demanda sísmica del fluido entre ciudades y configuraciones geométricas.	55
Apéndice D. Resultados de los escenarios sísmicos evaluados para el análisis de la demanda del fluido.	57
Apéndice E. Evidencia del algoritmo desarrollado en MATLAB.	65

Glosario

- **Aa:** coeficiente de aceleración pico efectiva definido según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. representa la intensidad de la amenaza sísmica de una zona para períodos cortos.
- **Av:** coeficiente de velocidad pico efectiva definido por la NSR-10. se utiliza para caracterizar la respuesta sísmica en períodos más largos.
- **ACI 350.3-20:** norma del American Concrete Institute (ACI, 2020) para el análisis y diseño sísmico de tanques de almacenamiento de concreto.
- **AIS 100-24:** propuesta de actualización del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, que modifica los parámetros para la construcción de los espectros de diseño.
- **Amenaza sísmica:** evaluación de los movimientos potenciales del terreno causados por sismos en un sitio específico, clasificada por la NSR-10 en zonas de amenaza baja, intermedia y alta.
- **Componente convectiva:** parte de la masa del líquido asociada al movimiento de oleaje o *sloshing* dentro del tanque durante un evento sísmico.
- **Componente impulsiva:** parte de la masa del líquido que se mueve solidariamente con el tanque durante la excitación sísmica.
- **Cortante basal (v):** fuerza lateral total calculada en la base del tanque debido a la acción combinada de las presiones impulsiva y convectiva del agua.

- **Demanda sísmica:** magnitud de las fuerzas inducidas por un sismo sobre una estructura, representada mediante aceleraciones espectrales que dependen del sitio de estudio.
- **Espectro de diseño:** gráfica que relaciona los períodos de vibración de una estructura con las aceleraciones máximas del terreno, utilizada para calcular la respuesta dinámica del fluido.
- **Fa:** coeficiente de amplificación que modifica las aceleraciones sísmicas en la zona de períodos cortos, dependiendo de las características y la rigidez del tipo de suelo local.
- **Fv:** coeficiente de amplificación que modifica las aceleraciones sísmicas en la zona de períodos intermedios y largos, dependiendo de las características y la rigidez del tipo de suelo local.
- **Grupo de uso IV:** clasificación establecida en la normativa de la AIS 180-13 (AIS, 2013) asignada a las estructuras esenciales (como los tanques de acueductos) cuya operatividad debe conservarse obligatoriamente después de un sismo.
- **Housner:** modelo analítico desarrollado por George Housner para representar la respuesta dinámica de líquidos contenidos en tanques sometidos a acciones sísmicas.
- **Momento de volcamiento (m):** momento dinámico en la base del tanque provocado por los empujes del agua que actúan a diferentes alturas de los muros.
- **Sd1:** aceleración espectral de diseño para un período de 1 segundo.
- **Sds:** aceleración espectral de diseño para períodos cortos. corresponde al valor de la meseta del espectro de diseño sísmico.

- **Sm1:** aceleración espectral máxima considerada para un período de 1 segundo según la AIS 100-24, ajustada por los efectos del suelo.
- **Sms:** aceleración espectral máxima considerada para períodos cortos según la AIS 100-24, ajustada por los efectos del suelo.
- **Sloshing (oleaje):** oscilación de la superficie libre del líquido dentro de un tanque provocada por una excitación dinámica, como un sismo.
- **Tc:** período natural de vibración de la componente convectiva del líquido.
- **Ti:** período natural de vibración de la componente impulsiva del sistema tanque-líquido.
- **Wc:** peso efectivo asociado a la masa convectiva del líquido.
- **Wi:** peso efectivo asociado a la masa impulsiva del líquido.

Resumen

Título: Análisis de la demanda sísmica en tanques rectangulares de base fija ante la actualización espectral del AIS 100-24 en zonas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta*

Autor: Estefany Natalia Lizarazo Pinto**

Palabras Clave: Tanques hidráulicos, Demanda sísmica, Interacción fluido-estructura, Modelo de Housner, AIS 100-24, NSR-10, Cortante basal, Momento de volcamiento.

Descripción: Esta investigación analiza el impacto de la actualización espectral propuesta en la AIS 100-24 sobre la demanda sísmica de tanques rectangulares de base fija en Colombia. Para ello, se evaluaron configuraciones geométricas definidas a partir de la relación entre la longitud y la altura del líquido, L/H_L (esbelta, intermedia y ancha) y se consideraron ciudades representativas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta. El análisis se desarrolló mediante la implementación en MATLAB del modelo simplificado de Housner, el cual permitió estimar las fuerzas hidrodinámicas, el cortante basal y el momento de volcamiento del fluido y comparar los resultados obtenidos a partir de los espectros de la NSR-10 y la AIS 100-24. Se encontró que la respuesta hidrodinámica del tanque está dominada por la componente impulsiva en todas las configuraciones, siendo esta la principal responsable del cortante y del momento basal, mientras que las geometrías esbeltas generan las mayores solicitaciones, especialmente en el momento de volcamiento. La comparación normativa muestra que la AIS 100-24 puede incrementar la demanda sísmica hidrodinámica, medida mediante el cortante basal y el momento de volcamiento. En Arauca se observaron incrementos cercanos al 22%–24%, mientras que en Mocoa las diferencias estuvieron alrededor del 10%–13%. En contraste, Popayán y Yopal presentaron variaciones mínimas o ligeramente negativas, del orden de $\pm 1\%$. Además, se construyeron curvas de nivel para representar la variación del cortante basal hidrodinámico y del momento de volcamiento en función de los parámetros espectrales $S_{m,s}$ y $S_{m,1}$. En conjunto, los resultados evidencian que la respuesta hidrodinámica del tanque depende de la amenaza sísmica del sitio y de la geometría del tanque, siendo más crítica en configuraciones esbeltas ubicadas en zonas de mayor sismicidad.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Laura Andrea Vargas Carvajal. Codirectora: María Alejandra Oliveros Caicedo.

Abstract

Title: Analysis of seismic demand in fixed base rectangular tanks in the face of the spectral update of AIS 100-24 in low, intermediate and high seismic hazard zones*

Author: Estefany Natalia Lizarazo Pinto**

Key Words: Hydraulic tanks, Seismic demand, Fluid-structure interaction, Housner model, AIS 100-24, NSR-10, Base shear, Overturning moment.

Description: This research analyzes the impact of the spectral update proposed in AIS 100-24 on the seismic demand of fixed-base rectangular tanks in Colombia. To this end, geometric configurations defined based on the relationship between the tank length and the liquid height (slender, intermediate, and wide) were evaluated, and representative cities of low, intermediate, and high seismic hazard were considered. The analysis was carried out through the implementation in MATLAB of the simplified Housner model, which allowed the estimation of hydrodynamic forces, base shear, and overturning moment of the fluid, as well as the comparison of the results obtained from the NSR-10 and AIS 100-24 spectra. It was found that the hydrodynamic response of the tank is dominated by the impulsive component in all configurations, with this component being mainly responsible for the shear and base moment, while slender geometries generate the highest demands, especially in terms of overturning moment. The normative comparison shows that AIS 100-24 may increase the hydrodynamic seismic demand, measured through base shear and overturning moment. In Arauca, increases close to 22%–24% were observed, while in Mocoa the differences were around 10%–13%. In contrast, Popayán and Yopal showed minimal or slightly negative variations, on the order of $\pm 1\%$. In addition, contour plots were developed to represent the variation of hydrodynamic base shear and overturning moment as a function of the spectral parameters S_{m_s} and S_{m_1} . Overall, the results show that the hydrodynamic response of the tank depends on the seismic hazard of the site and the tank geometry, being more critical in slender configurations located in areas of higher seismicity.

* Bachelor's Degree

** Physicomechanical Engineering. Civil Engineering School. Director: Laura Andrea Vargas Carvajal. Codirectora: Maria Alejandra Oliveros Caicedo

Reconocimiento de uso de inteligencia artificial

Durante el desarrollo de este trabajo de grado se empleó la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT (OpenAI, 2026) como apoyo. En particular, se utilizó para mejorar la redacción y claridad de algunos apartados, así como para resolver dudas relacionadas con el código desarrollado en MATLAB.

A modo de ejemplo, se empleó el siguiente prompt: “Necesito ayuda para entender y verificar la sintaxis de una función en MATLAB que estoy usando en mi desarrollo. ¿Puedes explicarme su funcionamiento y confirmar si la estoy aplicando correctamente?”. A partir de esta consulta, la autora analizó, verificó y adaptó las sugerencias recibidas, garantizando que los cálculos, resultados e interpretaciones finales correspondieran a su propio criterio y comprensión del problema.

El uso de ChatGPT fue complementario, orientado a apoyar el proceso de revisión y presentación del trabajo, sin sustituir en ningún momento el trabajo intelectual de la autora. Todas las decisiones metodológicas, cálculos, análisis, interpretaciones y resultados presentados en este documento son de autoría propia, garantizando en todo momento la comprensión, verificación y dominio de los contenidos por parte de la autora.

Introducción

Los tanques rectangulares utilizados en infraestructuras hidráulicas cumplen una función fundamental en los sistemas de almacenamiento de líquidos, por lo que su comportamiento frente a eventos sísmicos representa un aspecto importante dentro de la ingeniería sismorresistente.

Debido a su importancia para la continuidad de los servicios, estas estructuras se consideran de importancia especial. De acuerdo con el numeral 4.1.3 de la AIS 180-13 (AIS, 2013), el factor de importancia sísmica (I) debe corresponder al mayor valor definido en el Capítulo A.2.5, lo que fundamenta su asignación al Grupo de Uso IV. Esto implica que los tanques destinados al almacenamiento de líquidos deben conservar su funcionamiento después de un evento sísmico.

A diferencia de otras estructuras convencionales, los tanques presentan un comportamiento dinámico particular debido a la interacción entre el fluido contenido y las paredes de la estructura. Durante un evento sísmico, el movimiento del líquido genera presiones hidrodinámicas adicionales que pueden incrementar las fuerzas internas, el cortante basal y los momentos de volcamiento. Por esta razón, el análisis sísmico de estas estructuras requiere considerar la interacción fluido-estructura para representar adecuadamente su respuesta dinámica.

En Colombia, el diseño sísmico de estas estructuras se ha realizado tradicionalmente utilizando los parámetros espectrales definidos en la NSR-10. Sin embargo, la propuesta de actualización AIS 100-24 (AIS, 2024) incorpora cambios en la caracterización de la amenaza sísmica nacional, incorporando nuevos parámetros espectrales y el concepto de sismo de máxima capacidad asociado a un período de retorno aproximado de 2.475 años. Estos cambios pueden

generar variaciones en la estimación de la demanda sísmica de estructuras sensibles a la forma del espectro, como los tanques rectangulares de base fija.

En este contexto, resulta relevante estudiar cómo las modificaciones planteadas en la AIS 100-24 pueden influir en la respuesta sísmica de los tanques, particularmente en parámetros como el cortante basal, el momento de volcamiento y las fuerzas hidrodinámicas asociadas a la interacción fluido-estructura. Aunque este trabajo no aborda directamente el diseño del acero de refuerzo ni el detallado estructural, la cuantificación de estas variaciones es un paso fundamental, ya que estas demandas gobiernan directamente la estabilidad global de la estructura, las presiones sobre la cimentación y los espesores mínimos requeridos para los muros. Por esta razón, comparar la NSR-10 con la AIS 100-24 permite establecer el impacto real de la actualización espectral sobre la respuesta hidrodinámica del sistema según su configuración geométrica.

1.1 Estado del arte

El estudio del comportamiento sísmico de tanques destinados al almacenamiento de líquidos ha sido objeto de investigación durante varias décadas debido a la importancia de estas estructuras en sistemas hidráulicos e industriales. Uno de los aportes más relevantes fue desarrollado por Housner (1963), quien propuso un modelo simplificado para representar la interacción fluido-estructura mediante la descomposición del líquido en una masa impulsiva y una masa convectiva. Este planteamiento continúa siendo la base de numerosos procedimientos de diseño adoptados por normas y reglamentos internacionales (p. ej., la ACI 350-20).

Posteriormente, diversos investigadores profundizaron en la comprensión de la respuesta dinámica de los tanques. Chen y Kianoush (2009) estudiaron el comportamiento no lineal del fenómeno de *sloshing*, demostrando que la respuesta del fluido puede amplificarse significativamente cuando la frecuencia del movimiento sísmico se aproxima al período natural convectivo del líquido. Estos resultados evidenciaron la importancia de considerar adecuadamente la componente convectiva en el análisis sísmico de tanques.

Otros estudios se han enfocado en evaluar la influencia de la geometría y las condiciones de apoyo sobre la respuesta estructural. Panchal y Jangid (2011) y Panchal y Soni (2014), analizaron el comportamiento dinámico de tanques rectangulares utilizando el modelo de masas concentradas derivado del método de Housner. Sus investigaciones confirmaron la validez de este enfoque para representar la interacción fluido-estructura y evidenciaron que parámetros geométricos, como la relación entre la altura del líquido y las dimensiones del tanque, influyen significativamente en la magnitud de las fuerzas sísmicas y los momentos de volcamiento.

Con el avance de las herramientas computacionales, investigaciones más recientes han incorporado técnicas numéricas avanzadas para evaluar la respuesta hidrodinámica. Toussi et al.

(2021) emplearon modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para analizar tanques rectangulares sometidos a excitaciones sísmicas oblicuas, observando incrementos importantes en las presiones hidrodinámicas cerca de las esquinas de la estructura. Estos resultados permitieron validar y complementar los métodos simplificados utilizados tradicionalmente en la práctica de ingeniería.

En el contexto nacional, Bautista y Carreño (2018) evaluaron el comportamiento sísmico de tanques con base fija y base aislada bajo condiciones sismogeotécnicas de Bucaramanga. Los autores concluyeron que, debido a la transmisión directa del movimiento del suelo hacia la estructura y al fluido contenido, la estimación adecuada de la demanda sísmica es determinante para garantizar la estabilidad frente al cortante basal y los momentos de volcamiento.

Asimismo, investigaciones recientes desarrolladas por Volikos et al. (2025) en regiones de alta sismicidad han confirmado que la respuesta de los tanques de base fija depende en gran medida de la caracterización de la amenaza sísmica y de los espectros de diseño utilizados en el análisis. Por todo lo anterior, estos estudios destacan que la precisión de los parámetros espectrales influye directamente en las fuerzas impulsivas y convectivas que gobiernan el comportamiento del sistema fluido-estructura.

1.2 Planteamiento y justificación del problema

Los tanques de concreto reforzado que contienen líquidos presentan un comportamiento sísmico particular debido a la interacción fluido-estructura, la cual genera fuerzas impulsivas y convectivas que influyen directamente en el cortante basal y los momentos de volcamiento. La magnitud de estas fuerzas depende, entre otros factores, de la geometría del tanque y de los parámetros espectrales utilizados para representar la amenaza sísmica.

En Colombia, el diseño sísmico de estas estructuras se realiza mediante la NSR-10 (AIS, 2010) y el documento complementario AIS 180-13 (AIS, 2013). Sin embargo, la propuesta de actualización AIS 100-24 (AIS, 2024) introduce modificaciones importantes en la caracterización de la amenaza sísmica y en los parámetros empleados para construir los espectros de diseño. Las ciudades que presentan mayores variaciones incluyen casos representativos de amenaza sísmica baja (Riohacha), intermedia (Arauca, Florencia) y alta (Mocoa, Popayán, Yopal). Estas variaciones pueden generar cambios en la demanda sísmica estimada para estructuras sensibles a la forma espectral, como los tanques rectangulares de base fija según la propuesta AIS 100-24.

A pesar de la importancia de estas estructuras y de los avances en el estudio de la interacción fluido-estructura, no se identifican estudios que evalúen de manera específica el efecto de la transición entre los parámetros espectrales de la NSR-10 y los propuestos en la AIS 100-24 sobre la respuesta sísmica de tanques rectangulares de base fija. En particular, se desconoce cómo estos cambios pueden influir en la estimación del cortante basal y del momento de volcamiento para diferentes relaciones geométricas y niveles de amenaza sísmica.

A partir de lo anterior surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el impacto de la actualización espectral propuesta en el AIS 100-24 sobre la demanda sísmica de tanques rectangulares de base fija en zonas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta? En este contexto, esta investigación propone la implementación del método simplificado de Housner para determinar cómo las modificaciones introducidas en la actualización normativa pueden influir en parámetros como el cortante basal, el momento de volcamiento y las fuerzas hidrodinámicas asociadas al comportamiento sísmico de estas estructuras, considerando diferentes configuraciones geométricas y niveles de amenaza sísmica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar el impacto de la actualización espectral del AIS 100-24 en la demanda sísmica de tanques rectangulares de base fija en zonas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta, mediante el modelo simplificado de Housner.

1.3.2 Objetivos específicos

Desarrollar un script en MATLAB que implemente el modelo simplificado de Housner para la estimación de la demanda sísmica en tanques rectangulares de base fija.

Calcular la demanda sísmica empleando los espectros de diseño establecidos en el reglamento vigente NSR-10 y en el AIS 100-24, en zonas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta.

Comparar la demanda sísmica obtenida a partir de los espectros de diseño del AIS 100-24 y de la NSR-10 para diferentes relaciones geométricas de tanques rectangulares.

1.4 Alcances y limitaciones

El alcance de este trabajo consiste en evaluar y comparar la demanda sísmica de tanques rectangulares de base fija mediante la aplicación del modelo simplificado de Housner (1963), utilizando los espectros de diseño definidos en la NSR-10 (AIS, 2010) y en la propuesta de actualización AIS 100-24 (AIS, 2024). El análisis se centra en determinar cómo los cambios introducidos en la caracterización de la amenaza sísmica afectan parámetros como el cortante basal, el momento de volcamiento y la respuesta hidrodinámica del fluido.

Con el fin de mantener condiciones uniformes de comparación, se adoptó un perfil de suelo Tipo B para todos los casos evaluados. Este tipo de suelo presenta coeficientes de amplificación iguales a 1 ($F_a = 1.0$ y $F_v = 1.0$), por lo que no introduce efectos adicionales de amplificación

sobre el movimiento sísmico. De esta manera, las diferencias observadas en los resultados pueden atribuirse directamente a las variaciones entre los espectros de diseño de la NSR-10 y la AIS 100-24.

Asimismo, para el análisis sísmico se adoptó un factor de importancia (I) de 1.50, correspondiente a estructuras clasificadas en el Grupo de Uso IV según la AIS 180-13 (AIS, 2013).

Esta decisión se fundamenta en que los tanques destinados al almacenamiento de líquidos deben mantener su operatividad después de un evento sísmico. Tanto el ACI 350.3-20 (ACI, 2020), como la NSR-10 (AIS, 2010) y la propuesta AIS 100-24 (AIS, 2024) asignan el mismo valor para este tipo de estructuras, por lo que se mantuvo constante durante toda la investigación. Esto permite que las diferencias obtenidas en la demanda sísmica se deban exclusivamente a los cambios en los espectros de diseño y no a modificaciones en la importancia de la estructura.

El algoritmo implementado calcula los parámetros sísmicos correspondientes a cada normativa. Para la NSR-10 se emplean (A_a y A_v), que representan la aceleración y la velocidad pico efectiva del sitio. Para la AIS 100-24 se utilizan S_{ms} y S_{m1} , correspondientes a las aceleraciones espectrales para períodos cortos y para un período de 1 segundo, respectivamente. A partir de estos se obtienen (S_{ds} y S_{d1}), que representan las aceleraciones espectrales de diseño.

Dentro de las limitaciones del estudio, el modelo fue desarrollado exclusivamente para tanques rectangulares de base fija apoyados sobre el terreno. Por esta razón, no se consideran tanques elevados ni estructuras enterradas o parcialmente enterradas, en los que la interacción suelo-estructura modifica el comportamiento dinámico del sistema. De igual forma, se asumió que los tanques presentan superficie libre, por lo que no se evaluaron los efectos asociados al impacto del oleaje contra cubiertas o techos rígidos. Adicionalmente, el análisis se realizó utilizando los factores de modificación de respuesta establecidos por el ACI 350.3-20 (ACI, 2020), para tanques

de base fija, manteniendo constantes los valores ($R_i = 2,50$) para la componente impulsiva y ($R_c = 1,00$) para la componente convectiva. tomados de los factores de modificación de respuesta de la Tabla 4.1.1(b) en la norma ACI 350.3-20 (ACI, 2020).

Finalmente, el cálculo del cortante basal y del momento de volcamiento considera únicamente las fuerzas hidrodinámicas generadas por las masas impulsiva y convectiva del fluido. No se incluyeron las fuerzas de inercia asociadas al peso propio de las paredes y de la losa de fondo del tanque, ya que estas dependen de variables propias del diseño estructural, como los espesores y las propiedades de los materiales. Esta decisión permite enfocar el estudio exclusivamente en la influencia de la actualización espectral propuesta por la AIS 100-24 sobre la demanda sísmica de los tanques analizados.

Bajo este enfoque, la respuesta hidrodinámica del fluido se analiza considerando los muros del tanque como rígidos, lo cual implica que no se considera su flexibilidad ni sus deformaciones por flexión. Por otro lado, el periodo asociado a la componente impulsiva depende de la relación entre la masa y la rigidez del sistema. En este caso, como el tanque es muy rígido en comparación con la masa del líquido, el periodo resulta muy pequeño ($<0,2$ s). Por esta razón, el periodo impulsivo se ubica en la zona de periodos cortos del espectro sísmico, donde la aceleración espectral es constante y alcanza su valor máximo. Bajo esta condición, el ACI 350.3-20 (ACI, 2020) permite tomar directamente el coeficiente impulsivo como $C_i = S_{d_s}$, el parámetro S_{d_s} representa la aceleración espectral de diseño en periodos cortos según el Reglamento NSR-10 y el documento AIS 100-24. Este coeficiente define la meseta del espectro sísmico nacional y se determina mediante las variables (A_a y F_a), permitiendo relacionar la metodología del ACI 350.3-20 con la amenaza sísmica local.

2. Cuerpo del trabajo

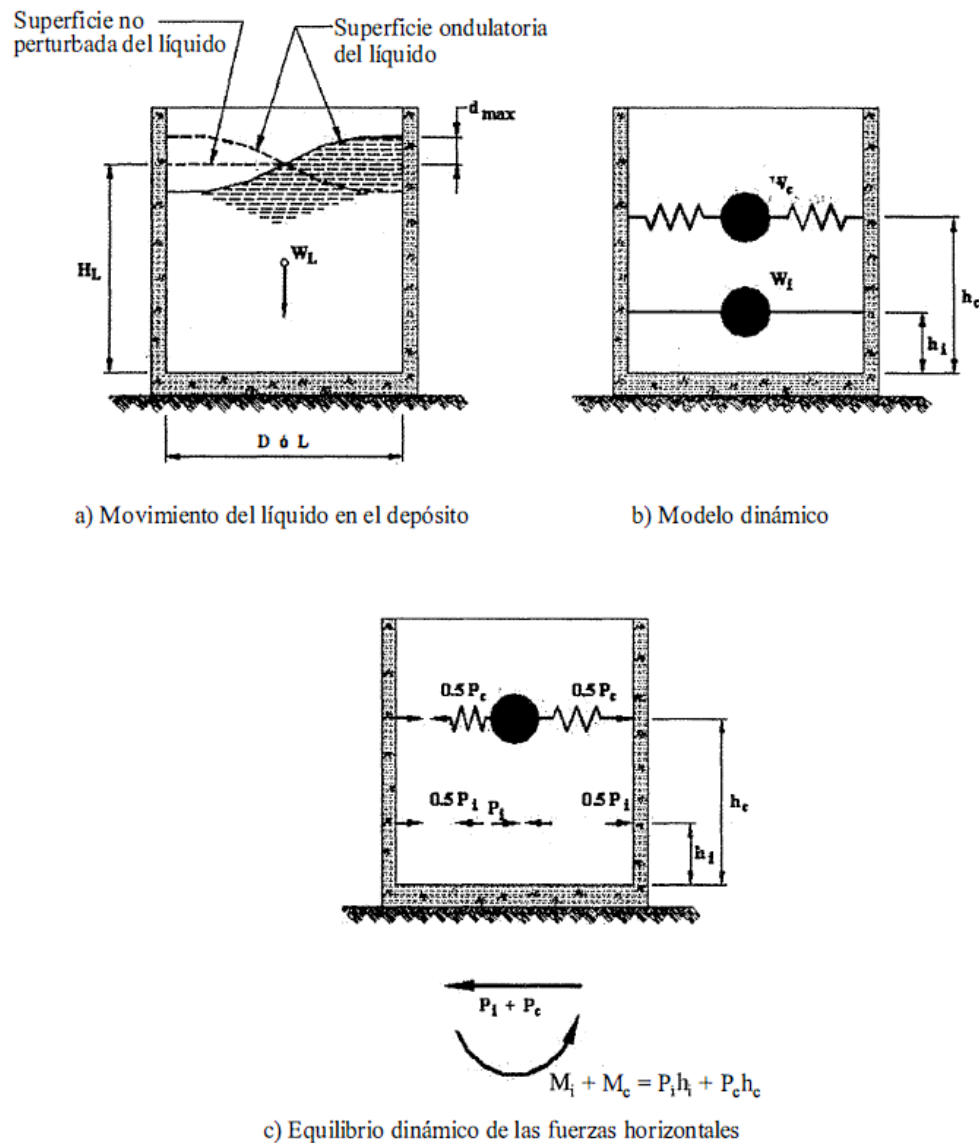
2.1 Interacción fluido-estructura y modelo simplificado de Housner

Cuando un tanque que contiene líquidos es sometido a una acción sísmica, se produce una interacción entre el fluido y la estructura que modifica la respuesta dinámica del sistema. Como consecuencia, el líquido genera presiones hidrodinámicas adicionales sobre las paredes y la base del tanque, que deben considerarse en el análisis sísmico.

Para representar este comportamiento, Housner (1963) propuso un modelo simplificado en el que el líquido se divide en dos masas equivalentes: la componente impulsiva y la componente convectiva. Este modelo se ilustra en la Figura 1. La componente impulsiva corresponde a la porción del líquido que se desplaza solidariamente con las paredes del tanque, mientras que la componente convectiva está asociada al movimiento oscilatorio de la superficie libre del fluido, conocido como *sloshing* u oleaje. Esta idealización permite representar el comportamiento dinámico del sistema mediante un modelo equivalente de masas concentradas, a partir del cual es posible determinar parámetros como las masas impulsiva y convectiva, sus alturas de aplicación, el período convectivo, las fuerzas sísmicas asociadas.

Figura 1.

Modelo simplificado de Housner para la interacción fluido–estructura en tanques rectangulares.



Las fuerzas derivadas de estas componentes se combinan para obtener los principales parámetros de respuesta del sistema, entre ellos el cortante basal y el momento de volcamiento, que constituyen indicadores fundamentales para evaluar la demanda sísmica inducida por el fluido y comparar el efecto de distintos espectros de diseño. Debido a su simplicidad y precisión en aplicaciones de ingeniería, este modelo ha sido ampliamente adoptado en documentos técnicos y

normas para el análisis sísmico de tanques rectangulares de base fija, como el ACI 350.3-20 (ACI, 2020).

2.2 Demanda sísmica

La respuesta sísmica de un tanque rectangular de base fija depende tanto de las características dinámicas del fluido almacenado como de la demanda sísmica definida para el sitio de estudio. Esta demanda se representa mediante espectros de diseño, que relacionan la aceleración sísmica esperada con el período de vibración de un sistema.

En Colombia, el análisis y diseño sismorresistente de las estructuras se ha desarrollado tradicionalmente bajo los lineamientos establecidos por la NSR-10 (AIS, 2010). Esta normativa define la amenaza sísmica del territorio nacional y proporciona los parámetros necesarios para la construcción de los espectros de diseño empleados en la estimación de la demanda sísmica. La NSR-10 determina dicha demanda a partir de parámetros como la aceleración pico efectiva y la velocidad pico efectiva, complementados con factores de amplificación asociados a las condiciones locales del suelo (F_a y F_v). Con estos parámetros se construyen los espectros de diseño utilizados en el análisis estructural de edificaciones e infraestructura. Para el caso evaluado, la comparación entre los espectros definidos por la NSR-10 y la propuesta AIS 100-24 se presenta en la Figura 4, con el fin de evaluar su efecto en la respuesta hidrodinámica del fluido.

La propuesta AIS 100-24 (AIS, 2024) plantea una actualización de la caracterización de la amenaza sísmica nacional, incorporando nuevos estudios de amenaza, modificaciones en los parámetros espectrales y una representación más detallada de la respuesta sísmica del terreno.

Asimismo, introduce el concepto de sismo de máxima capacidad, asociado a períodos de retorno superiores a los considerados tradicionalmente en el sismo de diseño de la NSR-10, (el cual se asocia a 475 años), mientras que en la propuesta AIS 100-24 estos eventos se definen

estrictamente para un período de retorno de 2.475 años. La propuesta AIS 100-24 utiliza parámetros espectrales como S_{m_s} y S_{m_1} , a partir de los cuales se obtienen las aceleraciones espectrales de diseño S_{d_s} y S_{d_1} .

3. Metodología:

3.1 Definición del caso de estudio

El estudio considera tres configuraciones geométricas representativas: tanque esbelto, tanque de geometría intermedia y tanque ancho. Estas configuraciones se definieron a partir de la relación entre la longitud del tanque (L) y la altura del líquido (H_L), la cual constituye un parámetro adimensional que gobierna el comportamiento hidrodinámico del fluido.

Este criterio es consistente con el enfoque del ACI 350.3-20, en el cual la geometría del tanque condiciona la participación relativa de las masas impulsiva y convectiva dentro del modelo hidrodinámico. En particular, el código utiliza la relación (L/H_L), como parámetro geométrico, a partir de la cual se modifican el comportamiento dinámico del fluido y la distribución de las fuerzas hidrodinámicas. Con base en este comportamiento, y con fines de análisis comparativo dentro de esta investigación, se adoptan los siguientes rangos de clasificación:

Tanques esbeltos: $L/H_L < 1.5$

Tanques de geometría intermedia: $1.5 \leq L/H_L \leq 2.5$

Tanques anchos: $L/H_L > 2.5$

Asimismo, se evaluaron diferentes ciudades con niveles de amenaza sísmica distintos: Riohacha, localizada en zona de amenaza sísmica baja, Arauca y Florencia, localizadas en zona de amenaza sísmica intermedia, y Mocoa, Popayán y Yopal, en zona de amenaza sísmica alta. Esta selección permite determinar si las variaciones entre los espectros definidos en la NSR-10 y la AIS

100-24 generan cambios significativos en la demanda sísmica del fluido para distintas condiciones de amenaza sísmica del país.

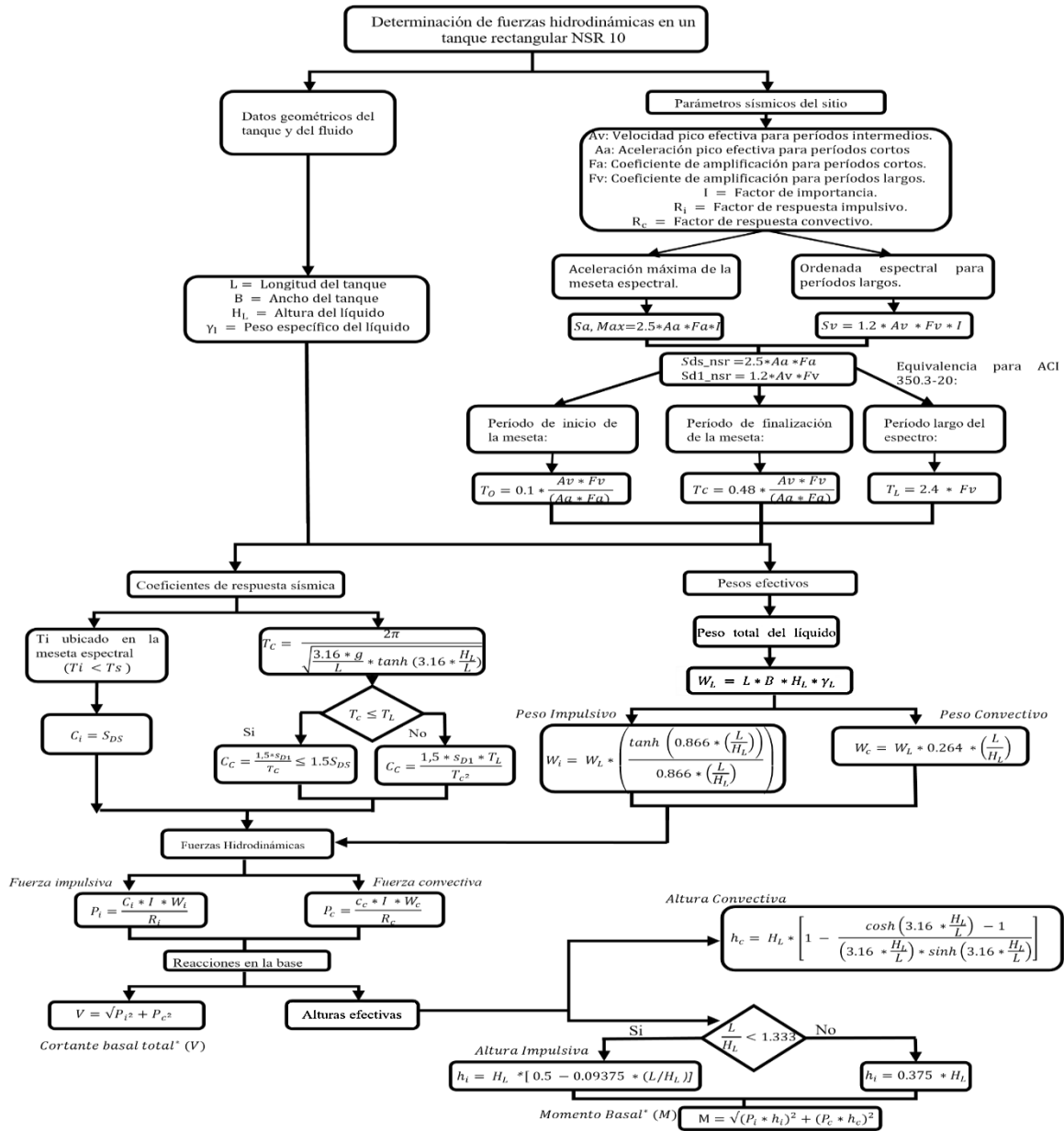
4. Análisis y Discusión de Resultados

4.1 Objetivo 1 – Desarrollo de un script

La modelación de la interacción fluido-estructura se realizó mediante el modelo hidrodinámico propuesto por Housner (1963) e incorporado en el ACI 350.3-20 (ACI, 2020) para tanques de almacenamiento de líquidos. A partir de la aplicación de MATLAB R2026a (MathWorks, 2026), se desarrolló un script que permitió automatizar el cálculo de la respuesta sísmica del fluido para diferentes configuraciones geométricas de tanques rectangulares y distintos escenarios de amenaza sísmica. Las figuras 2 y 3 presentan los diagramas de flujo implementados para estimar la demanda sísmica de tanques rectangulares de base fija mediante el método de Housner, a partir del AIS 100-24 y la NSR-10, respectivamente. La evidencia del algoritmo desarrollado en MATLAB se presenta en el Apéndice E.

Figura 2.

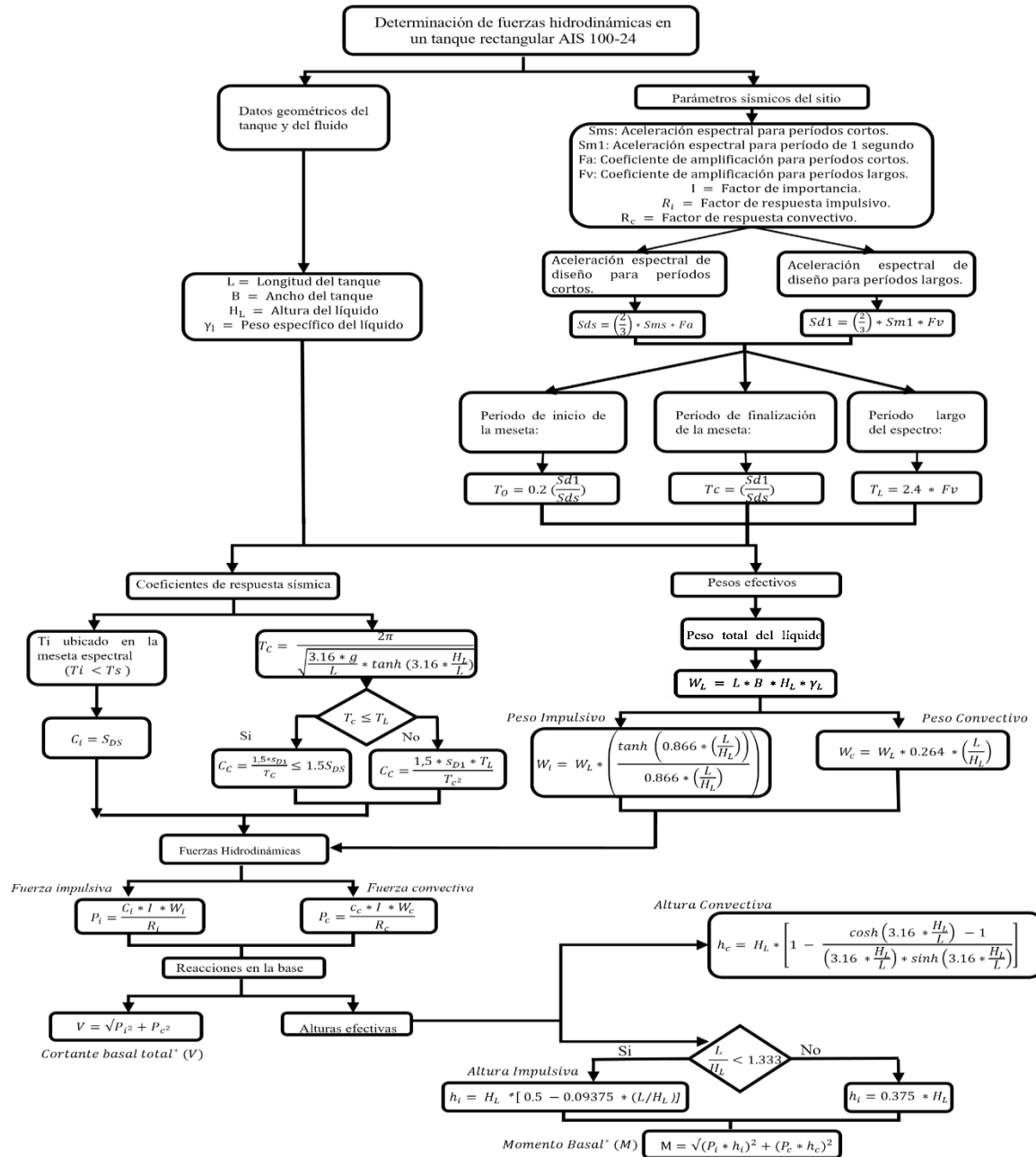
Diagrama de flujo para la determinación de la demanda sísmica en tanques rectangulares según NSR-10.



Nota. Elaboración propia con base en el procedimiento hidrodinámico del ACI 350.3-20 y los parámetros espectrales de la NSR 10.

Figura 3.

Diagrama de flujo para la determinación de la demanda sísmica en tanques rectangulares según AIS 100-24.



Nota. Elaboración propia con base en el procedimiento hidrodinámico del ACI 350.3-20 y los parámetros espectrales de la AIS 100-24.

El procedimiento descrito en el ACI 350.3-20 utiliza como parámetros de entrada las aceleraciones espectrales de diseño S_{d_s} y S_{d_1} , asociadas a periodos cortos y a un periodo de 1 segundo, respectivamente.

Sin embargo, la normativa vigente NSR-10 proporciona los parámetros A_a y A_v , junto con los factores de amplificación del suelo F_a y F_v , a partir de los cuales se construye el espectro de diseño.

Por esta razón, fue necesario establecer una equivalencia entre las ordenadas del espectro en ambos enfoques, manteniendo la forma de la demanda sísmica en cada rango de periodos. En el modelo del ACI 350.3-20, el cual adopta los parámetros de la formulación del ASCE 7 (ASCE, 2017) para la definición de la amenaza, la aceleración espectral en la meseta del espectro (incorporando de forma directa el factor de importancia del tanque) se expresa como:

$$S_a = S_{d_s} \cdot I \quad (1)$$

donde S_{d_s} representa la aceleración espectral de diseño para periodos cortos y I el factor de importancia. Por su parte, la NSR-10 define la aceleración máxima de la meseta espectral como:

$$S_a = 2.5 \cdot A_a \cdot F_a \cdot I \quad (2)$$

Al comparar ambas expresiones, se igualan las ordenadas espectrales correspondientes a la meseta, obteniendo:

$$S_{d_s} = 2.5 \cdot A_a \cdot F_a \quad (3)$$

De forma similar, para la rama de periodos largos, la NSR-10 establece que la aceleración espectral se define como:

$$S_a = \frac{S_v}{T} \quad (4)$$

Donde:

$$S_v = 1.2 \cdot A_v \cdot F_v \cdot I \quad (5)$$

Mientras que en el ACI 350.3-20 se emplea la expresión:

$$S_a = \frac{(S_{d1} \cdot I)}{T} \quad (6)$$

Al igualar ambas formulaciones, se obtiene la relación:

$$S_{d1} = 1.2 \cdot A_v \cdot F_v \quad (7)$$

Estas relaciones permiten aplicar el modelo hidrodinámico para ambos enfoques (NSR 10 / AIS 100-24) y comparar los resultados sin perder la interpretación de la demanda sísmica.

4.2 Objetivo 2 - Estimación de la demanda sísmica

Para dar cumplimiento al segundo objetivo específico, se definieron los datos de entrada necesarios para estimar la demanda sísmica del fluido en tanques rectangulares de base fija, considerando las condiciones normativas y geométricas empleadas en el análisis. Tabla 1 resume los parámetros del modelo y las configuraciones geométricas evaluadas, definidas a partir de la relación L/H_L como esbelta, intermedia y ancha. Estos datos constituyen la base para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas, el cortante basal y el momento de volcamiento mediante el modelo simplificado de Housner. Adicionalmente, la Figura 4 presenta un esquema de los tanques analizados con sus dimensiones, con el fin de visualizar las configuraciones geométricas empleadas en el estudio.

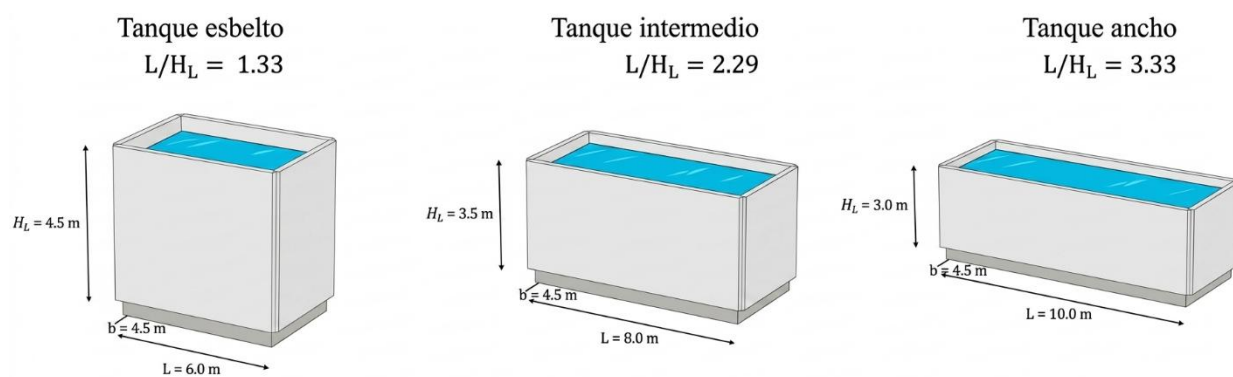
Tabla 1.

Parámetros de entrada y configuraciones geométricas de los tanques analizados.

Parámetro	Valor
Factor de importancia (I)	1.50
Tipo de suelo	B
Fa	1.0
Fv	1.0
Ri	2.25
Rc	1.00
Ancho del tanque, B (m)	4.5
Esbelta $L/H_L = 1.33$	$L=6.0$ $H_L=4.5$
Intermedia $L/H_L = 2.29$	$L=8.0$ $H_L=3.5$
Ancha $L/H_L = 3.33$	$L=10.0$ $H_L=3.0$

Figura 4.

Esquema de las configuraciones geométricas evaluadas para tanques rectangulares de base fija: esbelta, intermedia y ancha.



Nota. Las dimensiones se presentan en metros. El ancho de los tanques se mantuvo constante en

$B = 4.5$ m para las tres configuraciones evaluadas.

Las configuraciones geométricas se definieron a partir de variaciones en la altura del fluido y la longitud del tanque, siguiendo enfoques reportados en la literatura para tanques rectangulares. Estudios numéricos han demostrado que la respuesta sísmica depende de estas variables, evidenciando incrementos en presiones hidrodinámicas, desplazamientos y fuerzas internas al variar la geometría del sistema (Ashrafzadeh et al., 2025).

En este contexto, la relación entre la altura del fluido y la longitud del tanque condiciona el comportamiento dinámico del sistema, al influir en la participación de las componentes impulsiva y convectiva del fluido, ampliamente descritas en la literatura clásica. De esta manera, distintas relaciones geométricas permiten interpretar variaciones en la respuesta estructural e hidrodinámica del tanque. Para distintas relaciones geométricas, la respuesta puede estar dominada por la componente impulsiva o convectiva, lo que se ha asociado en la literatura con configuraciones equivalentes a tanques más anchos o esbeltos (Panchal y Soni, 2014).

Con base en este criterio, se seleccionaron configuraciones representativas que permitieran analizar diferentes relaciones geométricas, de acuerdo con la relación L/H_L (tanque esbelto, intermedio y ancho). Para aislar el efecto de esta relación, se mantuvo constante el ancho del tanque en 4.5 m (Orihuela y Sánchez, 2016), de manera que los cambios en la respuesta sísmica se debieran únicamente a la variación de la altura del fluido y la longitud. Además, se consideró una geometría intermedia para representar el comportamiento de transición entre configuraciones extremas, teniendo en cuenta que la respuesta del sistema varía de forma continua con la relación entre la altura del fluido y las dimensiones en planta (Ashrafzadeh et al., 2025).

4.3 Objetivos 2 y 3 – Cálculo y comparación de la demanda sísmica.

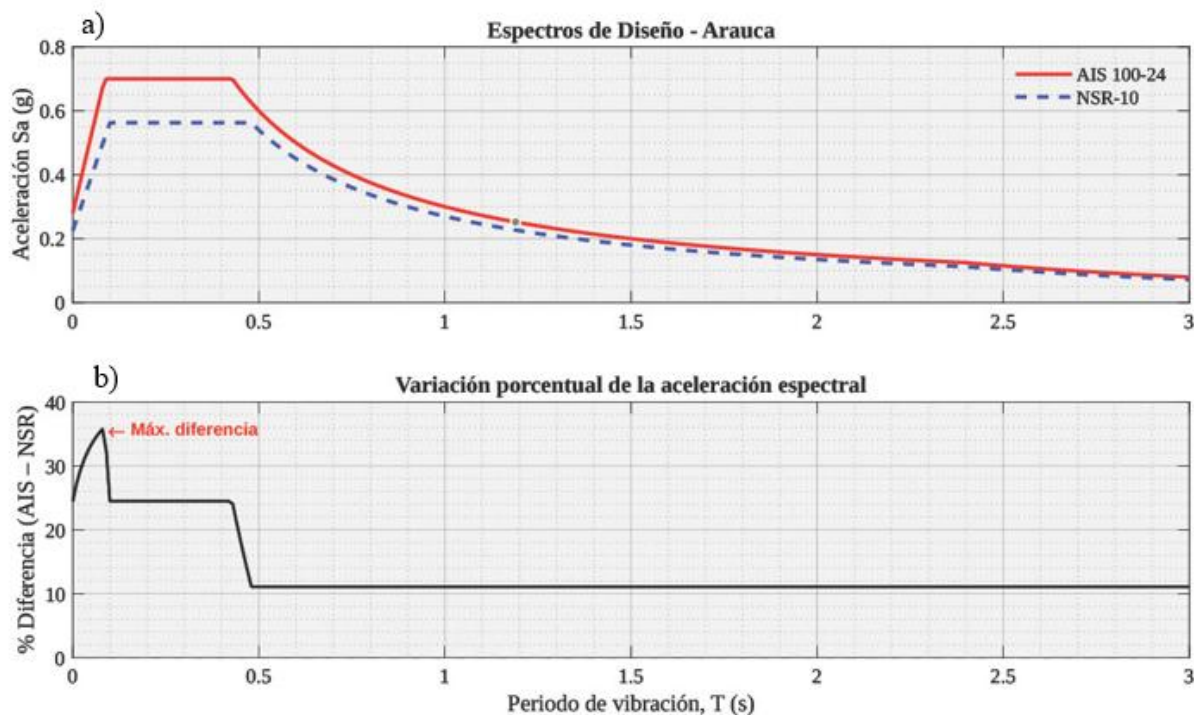
En esta sección se presentan los resultados asociados al cálculo y comparación de la demanda sísmica del fluido, conforme a los objetivos 2 y 3. Para ello, se emplearon los espectros

de diseño de la NSR-10 y la AIS 100-24 en ciudades representativas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta. Para comparar ambas normativas, se mantuvo constante el modelo hidrodinámico de cálculo y se modificaron únicamente los parámetros espectrales de entrada. De esta forma, las diferencias obtenidas en la respuesta del fluido se asocian directamente con los espectros de diseño de la NSR-10 y la AIS 100-24.

Como punto de análisis inicial se seleccionó la ciudad de Arauca, debido a que presentó una de las mayores diferencias entre ambos espectros. La Figura 5 presenta la comparación espectral entre ambas normativas y la variación porcentual de la aceleración espectral para esta ciudad.

Figura 5.

(a) Comparación espectral y (b) variación porcentual de la aceleración espectral – Arauca.



A partir de la Figura 5, se observa que la normativa AIS 100-24 genera valores de aceleración espectral superiores a los establecidos por la NSR-10 en la mayor parte del rango de

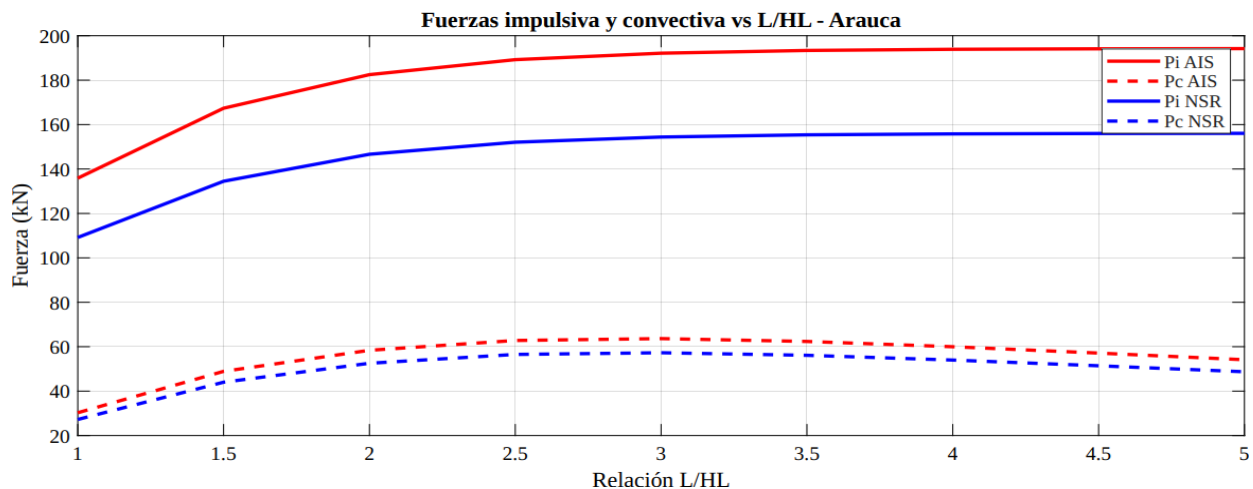
periodos analizados. Esta diferencia es más evidente en periodos cortos, donde se alcanza una variación máxima de 35.76%.

A medida que el periodo de vibración aumenta, la diferencia entre ambos espectros disminuye progresivamente, evidenciándose una convergencia en periodos mayores a 0.5 s, donde la respuesta resulta más similar entre ambas normativas. Los valores espectrales detallados utilizados para la comparación de Arauca se presentan en el Apéndice A.

A partir de esta comparación espectral, se estimaron las fuerzas hidrodinámicas impulsiva y convectiva para diferentes relaciones geométricas L/H_L en Arauca. La Figura 6 presenta su variación y permite observar cómo las diferencias entre la NSR-10 y la AIS 100-24 se reflejan en la demanda hidrodinámica.

Figura 6.

Fuerzas hidrodinámicas impulsiva y convectiva en función de la relación geométrica L/H_L – comparación NSR-10 y AIS 100-24, Arauca.



A partir de la figura 6, se observa que la fuerza impulsiva domina la respuesta del tanque en todo el rango de L/H_L . Esta aumenta desde aproximadamente 140 kN hasta valores cercanos a

190 kN y luego tiende a estabilizarse. En cambio, la fuerza convectiva aumenta hasta un valor máximo en relaciones intermedias ($L/H_L \approx 2.5 - 3$) y luego disminuye, evidenciando que su efecto depende de la geometría del tanque.

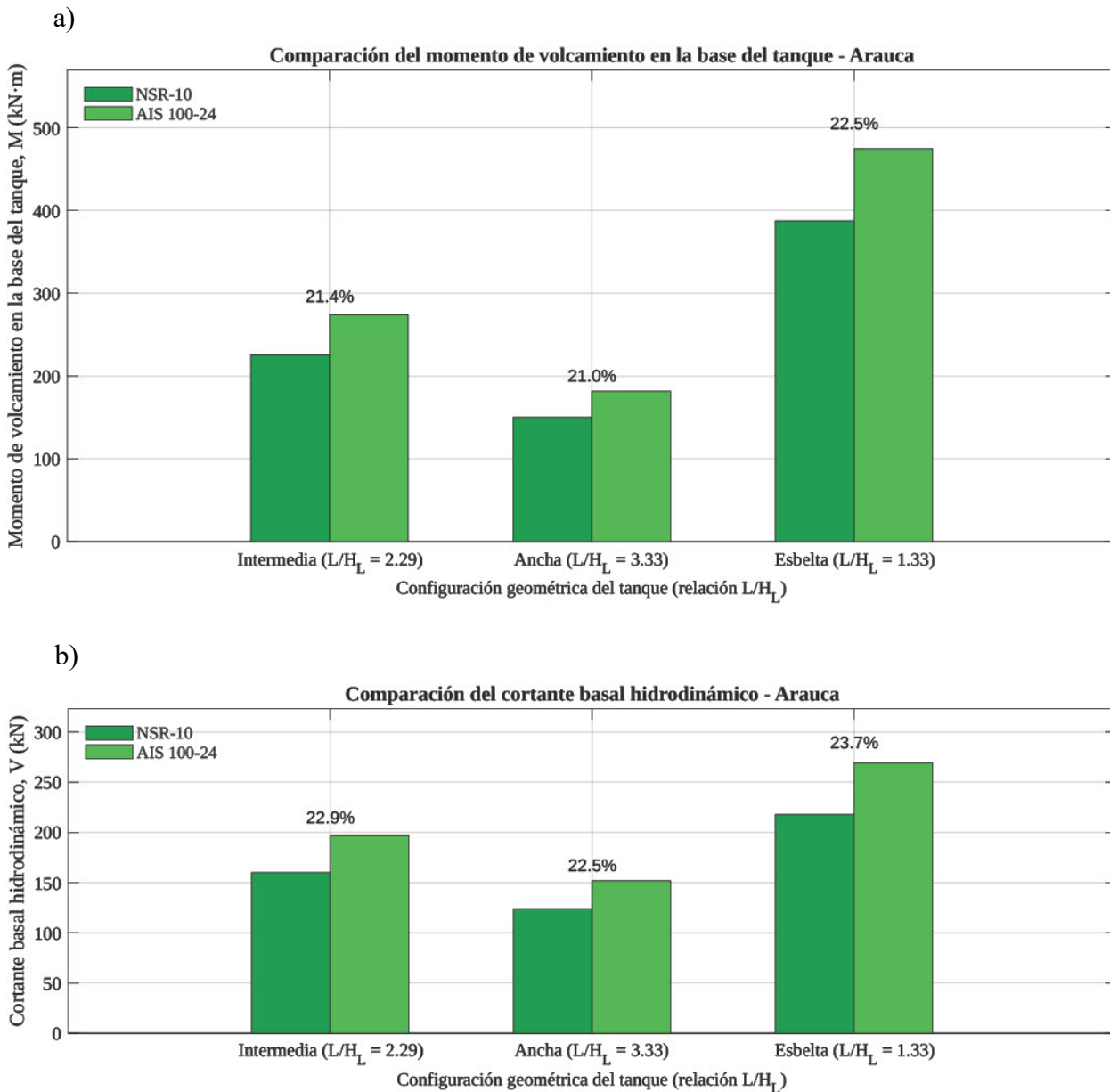
Este comportamiento es consistente con la formulación hidrodinámica empleada, en la cual la componente impulsiva representa la porción del fluido que se mueve solidariamente con las paredes del tanque, mientras que la componente convectiva está asociada al movimiento oscilatorio de la superficie libre. Además, los valores obtenidos con la AIS 100-24 son mayores que los de la NSR-10, manteniendo la misma tendencia observada en la comparación espectral.

Estos resultados indican que la componente impulsiva controla principalmente la demanda sísmica del fluido, con mayor incidencia en el cortante basal y en el momento de volcamiento.

Con estas fuerzas se calcularon el momento de volcamiento y el cortante basal hidrodinámico para las tres configuraciones geométricas evaluadas en la ciudad de Arauca. La Figura 7 presenta la comparación de estos parámetros entre la NSR-10 y la AIS 100-24, considerando la geometría intermedia ($L/H_L = 2.29$), la geometría ancha ($L/H_L = 3.33$) y la geometría esbelta ($L/H_L = 1.33$).

Figura 7.

(a) Comparación del momento de volcamiento en la base del tanque y (b) comparación del cortante basal hidrodinámico para diferentes configuraciones geométricas según NSR-10 y AIS 100-24 – Arauca.



A partir de la Figura 7, se observa que el momento de volcamiento en la base del tanque y el cortante basal hidrodinámico aumentan cuando la configuración geométrica pasa de ancha a esbelta. Este efecto es más notorio en el momento de volcamiento, ya que depende de la altura de aplicación de las fuerzas hidrodinámicas. Para la NSR-10, el momento aumenta de 150.01 kN·m en la geometría ancha a 387.35 kN·m en la geometría esbelta; con la AIS 100-24 alcanza 474.57 kN·m en esta última configuración.

La AIS 100-24 genera valores superiores a los obtenidos con la NSR-10 en las tres geometrías evaluadas. Los incrementos del momento de volcamiento varían entre 21.0% y 22.5%, mientras que para el cortante basal hidrodinámico se encuentran entre 22.5% y 23.7%. Esto evidencia que, para Arauca, la actualización espectral incrementa de forma consistente la demanda sísmica hidrodinámica.

En conjunto, la geometría tiene mayor influencia sobre el momento de volcamiento que sobre el cortante basal, debido a la altura efectiva de aplicación de las fuerzas hidrodinámicas. Los datos geométricos e hidrodinámicos que respaldan estos resultados se presentan en el Apéndice B.

Con el fin de ampliar la comparación normativa a diferentes condiciones de amenaza sísmica, se evaluaron el momento de volcamiento en la base del tanque y el cortante basal hidrodinámico en distintas ciudades para cada configuración geométrica. Las Figuras 8 y 9 presentan esta comparación entre la NSR-10 y la AIS 100-24 para las geometrías ancha, intermedia y esbelta, respectivamente.

Figura 8.

Comparación del momento de volcamiento en la base del tanque para distintas ciudades según NSR-10 y AIS 100-24: (a) geometría ancha, (b) geometría intermedia y (c) geometría esbelta.

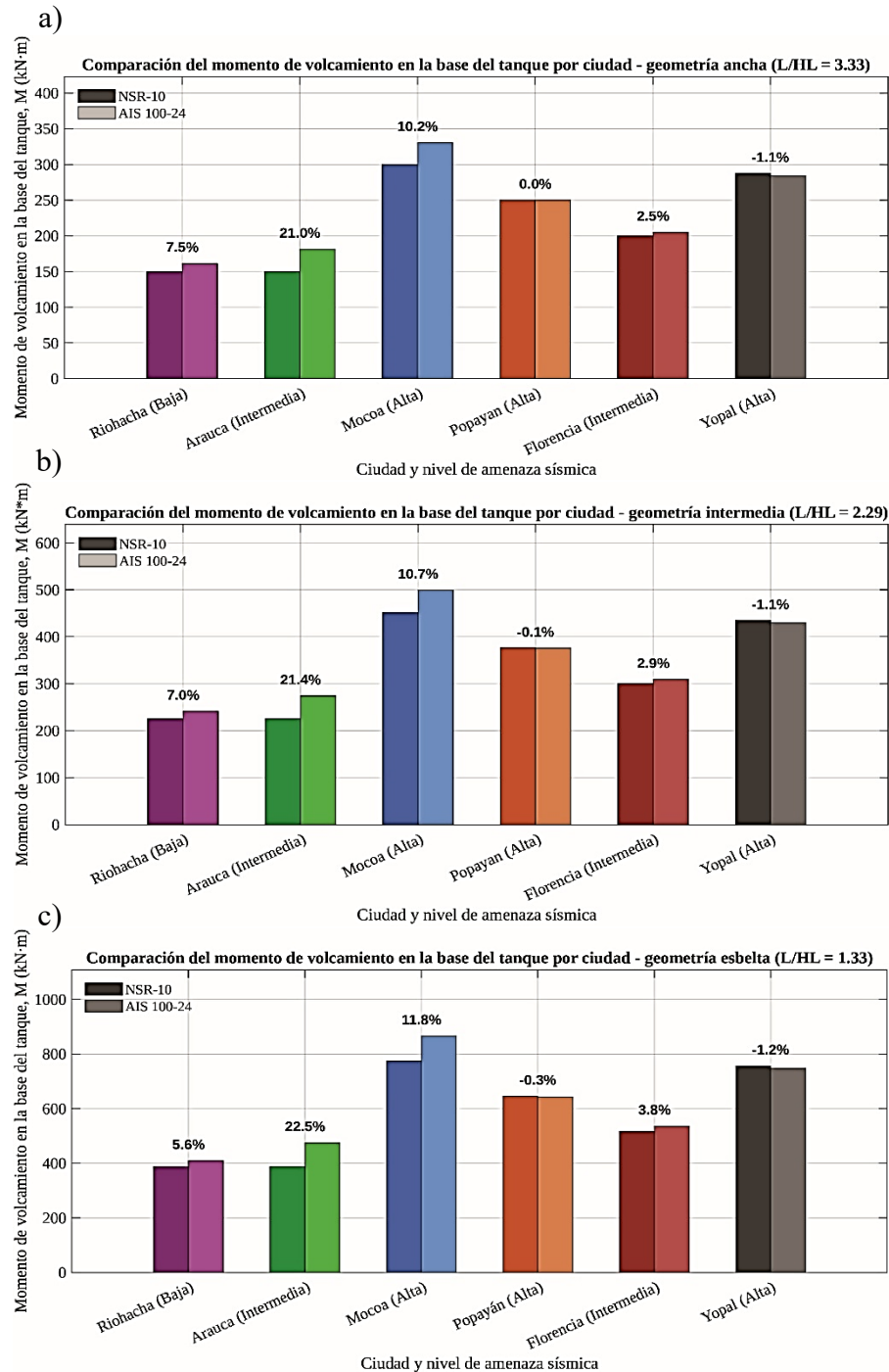
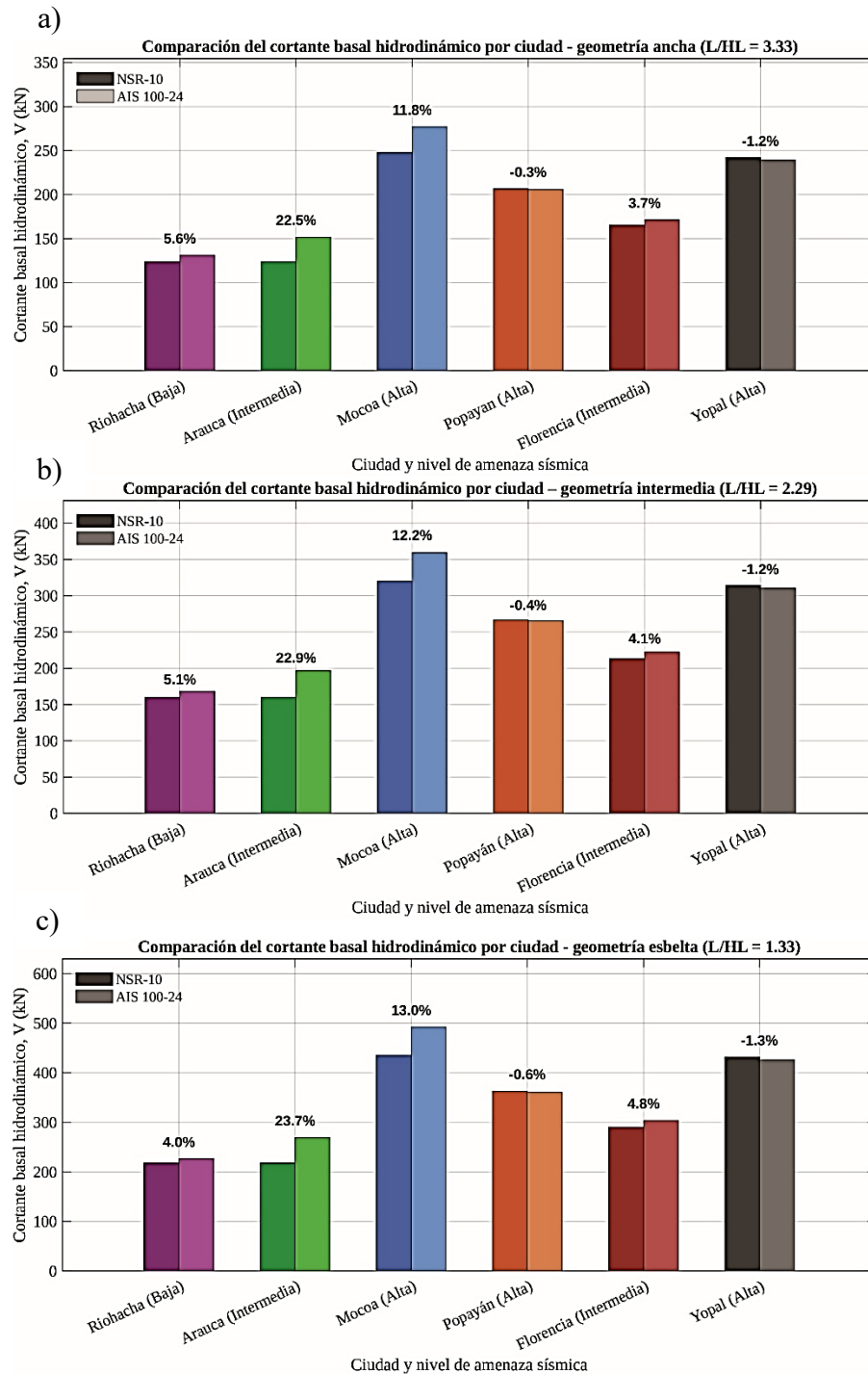


Figura 9.

Comparación del cortante basal hidrodinámico para distintas ciudades según NSR-10 y AIS

100-24: (a) geometría ancha, (b) geometría intermedia y (c) geometría esbelta.



A partir de las figuras 8 y 9, se observa que el cortante basal y el momento de volcamiento varían en función de la ciudad y la geometría del tanque. Los mayores valores se presentan en Mocoa y Yopal, mientras que Riohacha registra los menores, evidenciando la influencia de la demanda sísmica del sitio. Los valores numéricos completos de la comparación entre ciudades y geometrías se presentan en el Apéndice C.

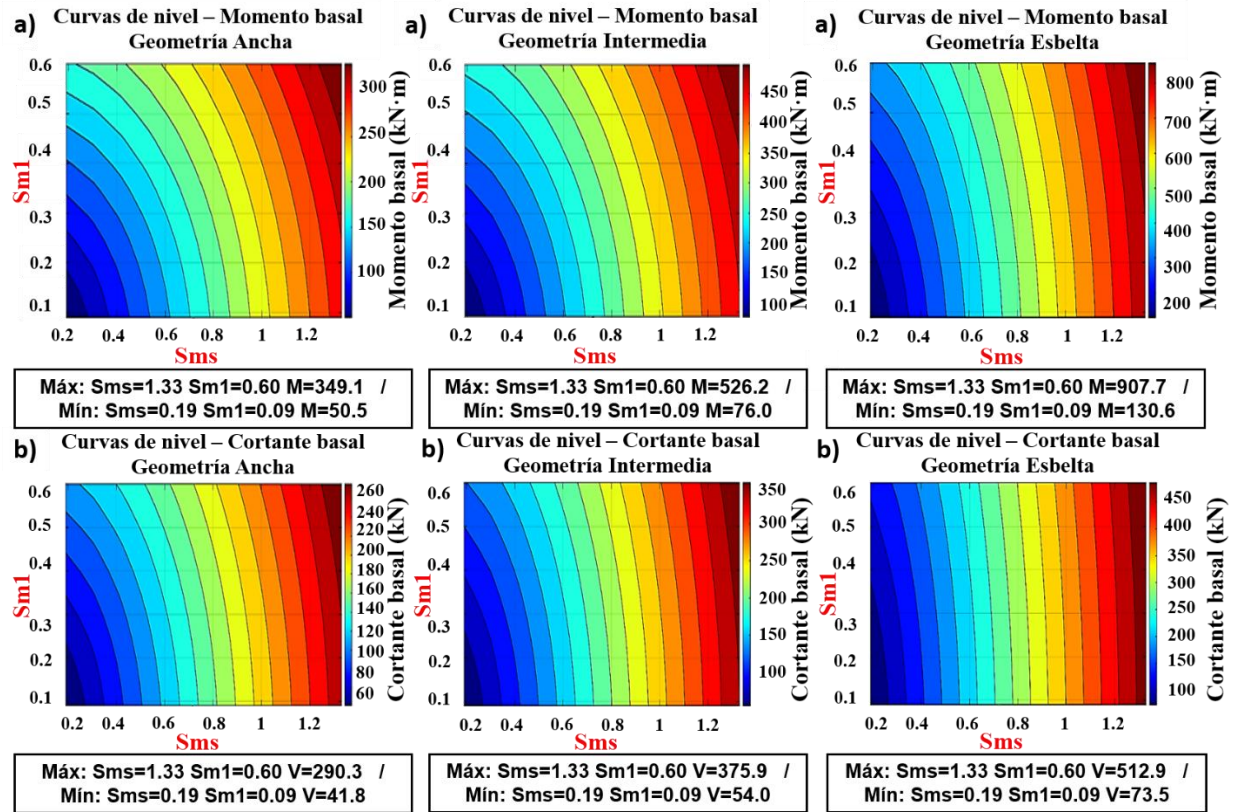
En cuanto a la geometría, las configuraciones esbeltas desarrollan las mayores solicitaciones, seguidas de la intermedia y la ancha. Es más notorio en el momento basal, mientras que el cortante tiene una menor sensibilidad a la forma del tanque.

La comparación normativa indica que la AIS 100-24 muestra una tendencia de valores mayores que la NSR-10 en ciudades con mayor demanda sísmica, con incrementos que varían entre aproximadamente 10% y 24%, como en los casos de Arauca y Mocoa. Sin embargo, en ciudades con menor diferencia en la amenaza sísmica, como Popayán y Yopal, las variaciones son mínimas o incluso ligeramente negativas, del orden de $\pm 1\%$, lo que indica que el efecto normativo depende directamente de las condiciones sísmicas del sitio.

Posteriormente, se elaboraron curvas de nivel para representar la variación del cortante y momento basal en función de S_{ms} y S_{m1} para las geometrías ancha, intermedia y esbelta. La Figura 10 permite visualizar la respuesta del fluido ante distintas combinaciones de amenaza sísmica y geometría.

Figura 10.

(a) Curvas de nivel del momento basal y (b) curvas de nivel del cortante basal en función de S_{ms} y S_{m1} para las geometrías ancha, intermedia y esbelta.



A partir de las curvas de nivel presentadas en la Figura 10, se observa que tanto el cortante como el momento basal aumentan de manera continua con los parámetros sísmicos S_{ms} y S_{m1} , evidenciando una relación directa entre la amenaza sísmica del sitio y la respuesta del fluido. Las zonas de mayor sollicitación se concentran en valores altos de ambos parámetros, mientras que los menores valores se ubican en la parte inferior. Los resultados numéricos completos asociados a estas curvas de nivel se presentan en el Apéndice D.

La forma de las isolíneas muestra que la respuesta no es lineal, sino que depende de la interacción entre S_{ms} y S_{m1} , lo que indica que ambos parámetros influyen simultáneamente en el comportamiento del sistema y no pueden evaluarse de forma independiente.

Al comparar las geometrías, se observa que la configuración esbelta genera los mayores valores tanto de cortante como de momento, seguida de la intermedia y la ancha. Sin embargo, la geometría influye más en el momento basal, mientras que el cortante está más asociado a la intensidad de la demanda sísmica.

En términos cuantitativos, para la geometría intermedia ($L/H_L = 2.29$) el cortante basal (considerando solo las fuerzas hidrodinámicas) varía entre 54 kN y 375.94 kN, mientras que el momento basal alcanza valores entre 76.00 kN·m y 526.21 kN·m, correspondientes a combinaciones extremas de $S_{ms} = 0.190, 1.330$ y $S_{m1} = 0.090, 0.600$. En términos prácticos, estas gráficas pueden utilizarse como una herramienta de apoyo en el diseño, ya que permiten estimar de forma rápida el cortante y el momento basal para una combinación específica de amenaza sísmica y geometría, sin necesidad de realizar cálculos adicionales, lo que facilita el análisis en etapas preliminares.

5. Conclusiones

Este trabajo analizó el impacto de la actualización espectral propuesta en la AIS 100-24 sobre la demanda sísmica de tanques rectangulares de base fija, considerando zonas de amenaza sísmica baja, intermedia y alta. Para ello, se implementó el modelo simplificado de Housner mediante un algoritmo en MATLAB, con el cual se calcularon las fuerzas hidrodinámicas impulsiva y convectiva, el cortante basal, el momento de volcamiento para diferentes configuraciones geométricas y condiciones sísmicas.

Las principales conclusiones obtenidas a partir del estudio son: El algoritmo desarrollado integró el cálculo de los parámetros hidrodinámicos, la construcción de los espectros de diseño y la comparación de resultados para cada escenario. Esta herramienta facilitó el procesamiento sistemático de los casos evaluados y puede adaptarse posteriormente a otras geometrías, ciudades o condiciones normativas.

Los resultados muestran que la demanda sísmica del fluido está fuertemente influenciada por los parámetros espectrales del sitio. En la comparación espectral realizada para Arauca, la AIS 100-24 presentó una aceleración máxima de 0.7000 g frente a 0.5625 g de la NSR-10, lo que representa un incremento del 24.44%. Adicionalmente, la diferencia espectral máxima alcanzó 35.76% en $T = 0.08$ s, evidenciando que las mayores variaciones entre normativas se concentran en el rango de periodos cortos.

La componente impulsiva fue dominante en todas las configuraciones geométricas analizadas, siendo la principal responsable de los valores de cortante basal y momento de volcamiento. Esto se debe a que dicha componente está asociada a la porción del fluido que se mueve solidariamente con las paredes del tanque y responde principalmente en periodos cortos, donde se presentaron las mayores diferencias entre los espectros de la NSR-10 y la AIS 100-24.

Para la ciudad de Arauca, los incrementos de cortante basal asociados a la AIS 100-24 fueron de 22.5% en la geometría ancha, 22.9% en la intermedia y 23.7% en la esbelta, lo que confirma la relación directa entre el aumento espectral y la respuesta hidrodinámica del fluido.

La geometría del tanque tuvo una influencia importante en la respuesta sísmica, especialmente en el momento de volcamiento. Para Arauca bajo la AIS 100-24, la geometría ancha presentó un momento basal de $181.51 \text{ kN}\cdot\text{m}$, la intermedia alcanzó $274.04 \text{ kN}\cdot\text{m}$ y la esbelta llegó a $474.57 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Esto indica que la configuración esbelta desarrolló un momento aproximadamente 2.6 veces mayor que la geometría ancha, debido a la mayor altura efectiva de aplicación de las fuerzas hidrodinámicas. En contraste, el cortante basal mostró una menor sensibilidad frente a la geometría, estando más asociado a la demanda sísmica del sitio y a la masa total del fluido.

La comparación entre normativas evidencia que el efecto de la AIS 100-24 no es uniforme en todas las ciudades, sino que depende de la variación de los parámetros espectrales de cada sitio. En Arauca se observaron incrementos cercanos al 22%–24% en cortante y momento basal, mientras que en Mocoa las diferencias estuvieron alrededor del 12%–13% en cortante y del 10%–12% en momento. En contraste, ciudades como Popayán y Yopal presentaron variaciones mínimas o ligeramente negativas, del orden de $\pm 1\%$, lo que demuestra que la actualización normativa puede aumentar, mantener o reducir la demanda sísmica dependiendo de la amenaza sísmica local.

Las curvas de nivel construidas en función de los parámetros espectrales S_{ms} y S_{m1} permitieron representar de manera conjunta la variación del cortante basal y del momento de volcamiento de las configuraciones ancha, intermedia y esbelta. Los resultados muestran que la respuesta aumenta con las condiciones de amenaza sísmica representadas por estos parámetros y con la esbeltez del tanque. Para la geometría ancha, el cortante basal varió entre 41.77 kN y 290.31 kN , y el momento basal entre $50.49 \text{ kN}\cdot\text{m}$ y $349.08 \text{ kN}\cdot\text{m}$; mientras que para la geometría esbelta

estos valores alcanzaron 512.87 kN y 907.73 kN·m, respectivamente. Esto confirma que las curvas de nivel constituyen una herramienta útil para estimar de forma rápida la demanda sísmica en etapas preliminares de análisis, sin necesidad de repetir todo el procedimiento de cálculo.

Finalmente, los resultados obtenidos muestran que la actualización espectral de la AIS 100-24 puede modificar la demanda sísmica de tanques rectangulares de base fija, especialmente en configuraciones esbeltas y en ciudades con mayor variación espectral. Sin embargo, el alcance del estudio se limita a la respuesta hidrodinámica del fluido, sin incluir el diseño estructural del refuerzo ni las fuerzas de inercia asociadas a las paredes y la losa de fondo. Como proyección, se recomienda adaptar el algoritmo a otras condiciones de apoyo, perfiles de suelo y componentes estructurales del tanque, con el fin de ampliar su aplicación en estudios posteriores.

5.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro, se recomienda adaptar el algoritmo desarrollado para evaluar tanques de geometría circular, utilizando las formulaciones correspondientes establecidas en el ACI 350.3-20. Esto permitiría analizar si las diferencias observadas entre la NSR-10 y la AIS 100-24 presentan un comportamiento similar en estructuras con una distribución distinta de presiones hidrodinámicas. También sería de interés estudiar tanques con otras condiciones de apoyo, como estructuras elevadas, enterradas o parcialmente enterradas, incorporando los efectos de interacción suelo-estructura y los factores de respuesta correspondientes a cada configuración.

Por otra parte, se recomienda ampliar el análisis considerando diferentes perfiles de suelo. La evaluación de suelos tipo A, C, D o E permitiría estudiar cómo los factores de amplificación modifican la demanda sísmica y cómo estos efectos interactúan con los cambios espectrales propuestos en la AIS 100-24. Finalmente, una extensión de este trabajo consiste en incorporar las fuerzas de inercia asociadas al peso propio de la estructura, de manera que se estimen las fuerzas

totales de diseño como base para futuras etapas de dimensionamiento y diseño del refuerzo estructural de los tanques.

Referencias Bibliográficas

- ACI. (2020). American Concrete Institute Committee 350. *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures (ACI 350.3-20) and commentary (350.3R-20)*. Environmental Engineering Concrete Structures, Farmington Hills, MI.
- AIS. (2010). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Bogotá, Colombia.
- AIS. (2013). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Recomendaciones para requisitos sísmicos de estructuras diferentes de edificaciones (AIS 180-13)*. Bogotá, Colombia.
- AIS. (2024). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Propuesta de Actualización del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (AIS 100-24)*. Bogotá, Colombia.
- ASCE. (2017). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16). American Society of Civil Engineers.
- Ashrafzadeh, F., & Razavi, M., & Tariverdilo, S. (2025). Seismic Performance of Rectangular RC Water Storage Tanks Using a Coupled Finite Difference–Finite Element Method (FDM–FEM): Effect of Wall Flexibility. *Engineering Structures*, 337, 120513.
- Bautista-Rodríguez, J. E., & Carreño-Remolina, L. A. (2018). Desempeño de aisladores de base en tanques de agua elevados sometidos a acciones sísmicas [Trabajo de grado de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio UIS.
- Chen, J. Z., & Kianoush, M. R. (2009). Generalized SDOF system for seismic analysis of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering Structures*, 31(10), 2426-2435.

- Ghaemmaghami, A. R., & Kianoush, M. R. (2010). Effect of Wall Flexibility on Dynamic Response of Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks under Horizontal and Vertical Ground Motions. *Journal of Structural Engineering*, 136(4), 441-451.
- Housner, G. W. (1963). The Dynamic Behavior of Water Tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 381-387.
- MathWorks. (2026). MATLAB (R2026a). Natick, Massachusetts, USA.
- OpenAI. (2026). ChatGPT. <https://chat.openai.com>
- Orihuela-Canchari, J., & Sánchez-Arévalo, N. A. (2016). Diseño estructural de tanques rectangulares y sus aplicaciones. *Revista Ingenium*, 1(2), 11-23.
- Panchal, V. R., & Jangid, R. S. (2011). Seismic Response of Liquid Storage Steel Tanks with Variable Frequency Pendulum Isolator. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(6), 1041-1055.
- Panchal, V. R., & Soni, D. P. (2014). Seismic Behaviour of Isolated Fluid Storage Tanks: A-state-of-the-art Review. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4), 1097-1104.
- Toussi, I. B., Kianoush, R., & Mohammadian, A. (2021). Numerical and Experimental Investigation of Rectangular Liquid-Containing Structures under Seismic Excitation. *Infrastructures*, 6(1), Artículo 1.
- Volikos, K., Konstandakopoulou, F., Asteris, P., & Hatzigeorgiou, G. (2025). Recent advancements in seismic analysis and design of liquid storage tanks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 198, 109309.

Apéndices

Apéndice A. Resultados espectrales para la ciudad de Arauca.

Se presentan los resultados utilizados para la comparación espectral entre la NSR-10 y la AIS 100-24 en la ciudad de Arauca. La Tabla A1 resume la aceleración máxima, el periodo crítico y la diferencia espectral máxima entre ambas normativas, mientras que la Tabla A2 presenta los parámetros espectrales S_{ds} y S_{d1} empleados en el análisis. Estos valores complementan la comparación presentada en la Figura 5 del documento principal.

Tabla A1.

Comparación de la respuesta espectral para la ciudad de Arauca.

Parámetro	NSR-10	AIS 100-24	Resultado
Aceleración máxima, S_a (g)	0.5625	0.7000	Incremento del 24.44%
Período crítico, T_c (s)	0.480	0.429	Reducción de 0.051 s
Diferencia espectral máxima	—	—	35.76% en $T = 0.08$ s

Tabla A2.

Parámetros espectrales para la ciudad de Arauca.

Parámetro	NSR-10	AIS 100-24
S_{ds}	0.3750	0.4667
S_{d1}	0.1800	0.2000

Apéndice B. Parámetros geométricos e hidrodinámicos de los tanques analizados.

Se presentan los datos geométricos y los parámetros hidrodinámicos obtenidos para las configuraciones intermedia, ancha y esbelta. Las Tablas B1, B3 y B5 muestran la verificación

geométrica y del borde libre frente al oleaje, mientras que las Tablas B2, B4 y B6 presentan las masas impulsiva y convectiva, las alturas de aplicación, los coeficientes sísmicos, las fuerzas hidrodinámicas, el cortante basal y el momento de volcamiento calculados con la NSR-10 y la AIS 100-24. Esta información complementa los resultados presentados en la Figura 7, donde se compara el momento de volcamiento en la base del tanque y el cortante basal hidrodinámico para las tres configuraciones geométricas. En todos los casos, la altura máxima de oleaje fue inferior al borde libre disponible.

Tabla B1.

Verificación geométrica del tanque – geometría intermedia.

Parámetro	Valor
Geometría evaluada	Intermedia
Longitud del tanque, L (m)	8.00
Altura del líquido, H_L (m)	3.50
Relación (L/H_L)	2.29
Altura máxima de ola (AIS) (m)	0.374
Altura máxima de ola (NSR) (m)	0.336
Borde libre disponible, FB (m)	0.875
Verificación AIS	Condición adecuada ($H > d_{max}$)
Verificación NSR	Condición adecuada ($H > d_{max}$)

Tabla B2.

Parámetros de la respuesta sísmica del fluido – geometría intermedia.

Parámetro – geometría intermedia	NSR-10	AIS 100-24
WL (kN)	1236.06	
Wi (kN)	601.06	
Wc (kN)	657.50	

hi (m)	1.31	
hc (m)	1.98	
Tc (s)	3.40	
Ci	0.3750	0.4667
Cc	0.0561	0.0623
Pi (kN)	150.27	187.00
Pc (kN)	55.30	61.44
V (kN)	160.12	196.83
M (kN·m)	225.69	274.04

Tabla B3.

Verificación geométrica del tanque – geometría ancha.

Parámetro	Valor
Geometría evaluada	Ancha
Longitud del tanque, L (m)	10.00
Altura del líquido, HL (m)	3.00
Relación (L/H_L)	3.33
Altura máxima de ola (AIS) (m)	0.313
Altura máxima de ola (NSR) (m)	0.282
Borde libre disponible, FB (m)	0.750
Verificación AIS	Condición adecuada ($H > d_{max}$)
Verificación NSR	Condición adecuada ($H > d_{max}$)

Tabla B4.

Parámetros de la respuesta sísmica del fluido – geometría ancha.

Parámetro – geometría ancha	NSR-10	AIS 100-24
WL (kN)	1324.35	
Wi (kN)	455.94	
Wc (kN)	861.11	
hi (m)	1.12	
hc (m)	1.60	
Tc (s)	4.15	
Ci	0.3750	0.4667

Cc	0.0376	0.0418
Pi (kN)	113.98	141.85
Pc (kN)	48.56	53.96
V (kN)	123.90	151.76
M (kN·m)	150.01	181.51

Tabla B5.

Verificación geométrica del tanque – geometría esbelta.

Parámetro	Valor
Geometría evaluada	Esbelta
Longitud del tanque, L (m)	6.00
Altura del líquido, HL (m)	4.50
Relación L/H_L	1.33
Altura máxima de ola (AIS) (m)	0.417
Altura máxima de ola (NSR) (m)	0.375
Borde libre disponible, FB (m)	1.125
Verificación AIS	Condición adecuada ($H > d_{max}$)
Verificación NSR	Condición adecuada ($H > d_{max}$)

Tabla B6.

Parámetros de la respuesta sísmica del fluido – geometría esbelta.

Parámetro – geometría esbelta	NSR-10	AIS 100-24
WL (kN)	1191.91	
Wi (kN)	845.72	
Wc (kN)	412.28	
hi (m)	1.69	
hc (m)	2.93	
Tc (s)	2.79	
Ci	0.375	0.4667
Cc	0.0833	0.0926
Pi (kN)	211.43	263.11

Pc (kN)	51.54	57.26
V (kN)	217.62	269.27
M (kN·m)	387.35	474.57

Apéndice C. Comparación de la demanda sísmica del fluido entre ciudades y configuraciones geométricas.

En este apéndice se presentan los resultados de la comparación de la demanda sísmica del fluido en tanques rectangulares de base fija para diferentes ciudades representativas de distintas condiciones de amenaza sísmica en Colombia. Las Tablas C1 a C3 muestran los valores de cortante basal, momento de volcamiento y variación porcentual obtenidos con la NSR-10 y la AIS 100-24 para las configuraciones geométricas ancha, intermedia y esbelta. Esta información complementa las Figuras 8 y 9 del documento principal.

Tabla C1.

Comparación de la demanda sísmica entre ciudades – geometría ancha.

Comparación De Resultados Entre Ciudades (Ancha)						
Ciudad	V_NSR	V_AIS	ΔV	M_NSR	M_AIS	ΔM
	[kN]	[kN]	(%)	[kN·m]	[kN·m]	(%)
Riohacha	123.9	130.87	5.6	150.01	161.23	7.5
Arauca	123.9	151.76	22.5	150.01	181.51	21
Mocoa	247.8	276.97	11.8	300.03	330.74	10.2
Popayán	206.5	205.82	-0.3	250.02	250.08	0
Florencia	165.2	171.37	3.7	200.02	205.05	2.5
Yopal	241.91	239.05	-1.2	287.42	284.37	-1.1

Tabla C2.

Comparación de la demanda sísmica entre ciudades – geometría intermedia.

Comparación De Resultados Entre Ciudades (Intermedia)						
Ciudad	V_NSR	V_AIS	ΔV	M_NSR	M_AIS	ΔM
	[kN]	[kN]	(%)	[kN·m]	[kN·m]	(%)
Riohacha	160.12	168.23	5.1	225.69	241.38	7
Arauca	160.12	196.83	22.9	225.69	274.04	21.4
Mocoa	320.23	359.38	12.2	451.37	499.56	10.7
Popayán	266.86	265.7	-0.4	376.14	375.85	-0.1
Florencia	213.49	222.23	4.1	300.91	309.53	2.9
Yopal	314.35	310.52	-1.2	434.77	430	-1.1

Tabla C3.

Comparación de la demanda sísmica entre ciudades – geometría esbelta.

Comparación De Resultados Entre Ciudades (Esbelta)						
Ciudad	V_NSR	V_AIS	ΔV	M_NSR	M_AIS	ΔM
	[kN]	[kN]	(%)	[kN·m]	[kN·m]	(%)
Riohacha	217.62	226.4	4	387.35	409	5.6
Arauca	217.62	269.27	23.7	387.35	474.57	22.5
Mocoa	435.24	492.04	13	774.69	866.1	11.8
Popayán	362.7	360.42	-0.6	645.58	643.41	-0.3
Florencia	290.16	303.95	4.8	516.46	535.86	3.8
Yopal	431.5	425.97	-1.3	756.54	747.58	-1.2

Apéndice D. Resultados de los escenarios sísmicos evaluados para el análisis de la demanda del fluido.

Se presentan los resultados de cortante basal y momento de volcamiento del fluido obtenidos para diferentes combinaciones de los parámetros espectrales S_{ms} y S_{m1} . Estos valores permiten observar cómo varía la respuesta sísmica del tanque ante distintas condiciones de amenaza representadas por dichos parámetros y para cada configuración geométrica. Las Tablas D1, D3 y D5 presentan los resultados completos para las geometrías ancha, intermedia y esbelta, mientras que las Tablas D2, D4 y D6 resumen los valores máximos y mínimos de respuesta. Esta información complementa la Figura 10 del documento principal.

Tabla D1.

Resultados de cortante y momento basal para la geometría ancha en diferentes escenarios sísmicos.

Geometría Ancha			
Sms	Sm1	Cortante basal [kN]	Momento basal [kN·m]
0.19	0.09	41.766	50.492
0.19	0.141	63.693	74.001
0.19	0.192	86.236	98.761
0.19	0.243	109.01	124.02
0.19	0.294	131.9	149.54
0.19	0.345	154.85	175.19
0.19	0.396	177.84	200.93
0.19	0.447	200.86	226.72
0.19	0.498	223.89	252.56
0.19	0.549	246.94	278.42
0.19	0.6	270	304.31
0.304	0.09	46.103	59.404
0.304	0.141	66.618	80.347
0.304	0.192	88.418	103.6
0.304	0.243	110.75	127.91
0.304	0.294	133.34	152.78
0.304	0.345	156.08	177.96
0.304	0.396	178.91	203.35
0.304	0.447	201.81	228.87
0.304	0.498	224.74	254.49

0.304	0.549	247.71	280.18
0.304	0.6	270.7	305.91
0.418	0.09	51.719	70.29
0.418	0.141	70.621	88.698
0.418	0.192	91.472	110.2
0.418	0.243	113.2	133.32
0.418	0.294	135.38	157.33
0.418	0.345	157.83	181.89
0.418	0.396	180.44	206.79
0.418	0.447	203.16	231.94
0.418	0.498	225.96	257.25
0.418	0.549	248.82	282.68
0.418	0.6	271.71	308.21
0.532	0.09	58.245	82.371
0.532	0.141	75.531	98.548
0.532	0.192	95.314	118.28
0.532	0.243	116.33	140.06
0.532	0.294	138.01	163.08
0.532	0.345	160.09	186.89
0.532	0.396	182.42	211.2
0.532	0.447	204.92	235.88
0.532	0.498	227.54	260.81
0.532	0.549	250.25	285.93
0.532	0.6	273.03	311.19
0.646	0.09	65.41	95.193
0.646	0.141	81.184	109.49
0.646	0.192	99.853	127.54
0.646	0.243	120.07	147.97
0.646	0.294	141.18	169.92
0.646	0.345	162.83	192.88
0.646	0.396	184.83	216.53
0.646	0.447	207.07	240.66
0.646	0.498	229.48	265.14
0.646	0.549	252.02	289.88
0.646	0.6	274.65	314.83
0.76	0.09	73.025	108.49
0.76	0.141	87.436	121.23
0.76	0.192	105	137.75
0.76	0.243	124.39	156.85
0.76	0.294	144.87	177.71
0.76	0.345	166.04	199.78
0.76	0.396	187.66	222.7
0.76	0.447	209.6	246.22
0.76	0.498	231.77	270.2
0.76	0.549	254.1	294.52
0.76	0.6	276.56	319.1
0.874	0.09	80.964	122.12
0.874	0.141	94.168	133.56
0.874	0.192	110.67	148.72
0.874	0.243	129.21	166.57
0.874	0.294	149.03	186.34
0.874	0.345	169.68	207.49
0.874	0.396	190.89	229.64
0.874	0.447	212.5	252.52

0.874	0.498	234.39	275.95
0.874	0.549	256.5	299.8
0.874	0.6	278.76	323.98
0.988	0.09	89.14	135.97
0.988	0.141	101.28	146.33
0.988	0.192	116.78	160.28
0.988	0.243	134.48	176.97
0.988	0.294	153.62	195.7
0.988	0.345	173.73	215.94
0.988	0.396	194.5	237.3
0.988	0.447	215.75	259.5
0.988	0.498	237.34	282.35
0.988	0.549	259.19	305.71
0.988	0.6	281.25	329.45
1.102	0.09	97.493	149.98
1.102	0.141	108.71	159.44
1.102	0.192	123.28	172.33
1.102	0.243	140.16	187.95
1.102	0.294	158.61	205.68
1.102	0.345	178.16	225.02
1.102	0.396	198.47	245.59
1.102	0.447	219.33	267.11
1.102	0.498	240.6	289.36
1.102	0.549	262.18	312.19
1.102	0.6	284	335.48
1.216	0.09	105.98	164.11
1.216	0.141	116.38	172.8
1.216	0.192	130.09	184.76
1.216	0.243	146.19	199.41
1.216	0.294	163.97	216.2
1.216	0.345	182.94	234.68
1.216	0.396	202.77	254.47
1.216	0.447	223.23	275.29
1.216	0.498	244.16	296.93
1.216	0.549	265.46	319.22
1.216	0.6	287.03	342.03
1.33	0.09	114.58	178.34
1.33	0.141	124.26	186.36
1.33	0.192	137.19	197.5
1.33	0.243	152.54	211.27
1.33	0.294	169.65	227.19
1.33	0.345	188.05	244.84
1.33	0.396	207.39	263.87
1.33	0.447	227.44	284
1.33	0.498	248.02	305.02
1.33	0.549	269	326.76
1.33	0.6	290.31	349.08

Tabla D2.

Valores mínimos y máximos de la demanda sísmica para la geometría ancha.

Sms	Sm1	Cortante basal [kN]	Momento basal [kN·m]
-----	-----	------------------------	-------------------------

0.190	0.090	41.766	50.492
1.330	0.600	290.31	349.08

Tabla D3.

Resultados de cortante y momento basal para la geometría intermedia en diferentes escenarios sísmicos.

Geometría intermedia			
Sms	Sm1	Cortante basal [kN]	Momento basal [kN·m]
0.19	0.09	54	75.996
0.19	0.141	83.276	112.69
0.19	0.192	113.18	151.05
0.19	0.243	143.31	190.08
0.19	0.294	173.55	229.43
0.19	0.345	203.86	268.97
0.19	0.396	234.21	308.62
0.19	0.447	264.58	348.34
0.19	0.498	294.96	388.11
0.19	0.549	325.36	427.92
0.19	0.6	355.77	467.76
0.304	0.09	58.396	87.867
0.304	0.141	86.192	121.01
0.304	0.192	115.34	157.36
0.304	0.243	145.02	195.13
0.304	0.294	174.97	233.63
0.304	0.345	205.07	272.56
0.304	0.396	235.26	311.75
0.304	0.447	265.51	351.12
0.304	0.498	295.8	390.61
0.304	0.549	326.12	430.19
0.304	0.6	356.47	469.83
0.418	0.09	64.206	102.59
0.418	0.141	90.229	132.09
0.418	0.192	118.39	166.03
0.418	0.243	147.46	202.19
0.418	0.294	177	239.56
0.418	0.345	206.8	277.66
0.418	0.396	236.77	316.22
0.418	0.447	266.85	355.09
0.418	0.498	297	394.18
0.418	0.549	327.21	433.43
0.418	0.6	357.46	472.81
0.532	0.09	71.084	119.11
0.532	0.141	95.246	145.3
0.532	0.192	122.25	176.72
0.532	0.243	150.58	211.05
0.532	0.294	179.6	247.09
0.532	0.345	209.04	284.18
0.532	0.396	238.72	321.96
0.532	0.447	268.58	360.21
0.532	0.498	298.56	398.8
0.532	0.549	328.63	437.64

0.532	0.6	358.76	476.66
0.646	0.09	78.75	136.78
0.646	0.141	101.1	160.1
0.646	0.192	126.86	189.08
0.646	0.243	154.35	221.51
0.646	0.294	182.77	256.07
0.646	0.345	211.77	292.03
0.646	0.396	241.12	328.91
0.646	0.447	270.71	366.43
0.646	0.498	300.48	404.43
0.646	0.549	330.37	442.78
0.646	0.6	360.36	481.38
0.76	0.09	86.997	155.21
0.76	0.141	107.64	176.11
0.76	0.192	132.14	202.81
0.76	0.243	158.71	233.34
0.76	0.294	186.48	266.37
0.76	0.345	214.97	301.1
0.76	0.396	243.94	336.99
0.76	0.447	273.23	373.7
0.76	0.498	302.75	411.03
0.76	0.549	332.44	448.81
0.76	0.6	362.25	486.94
0.874	0.09	95.674	174.16
0.874	0.141	114.77	193.01
0.874	0.192	138.01	217.65
0.874	0.243	163.63	246.34
0.874	0.294	190.68	277.84
0.874	0.345	218.62	311.29
0.874	0.396	247.16	346.12
0.874	0.447	276.11	381.96
0.874	0.498	305.35	418.55
0.874	0.549	334.81	455.71
0.874	0.6	364.43	493.31
0.988	0.09	104.67	193.47
0.988	0.141	122.38	210.6
0.988	0.192	144.39	233.39
0.988	0.243	169.05	260.35
0.988	0.294	195.35	290.33
0.988	0.345	222.71	322.49
0.988	0.396	250.79	356.23
0.988	0.447	279.36	391.14
0.988	0.498	308.29	426.95
0.988	0.549	337.49	463.43
0.988	0.6	366.9	500.45
1.102	0.09	113.92	213.04
1.102	0.141	130.37	228.71
1.102	0.192	151.23	249.86
1.102	0.243	174.93	275.21
1.102	0.294	200.46	303.73
1.102	0.345	227.2	334.6
1.102	0.396	254.78	367.23
1.102	0.447	282.95	401.19
1.102	0.498	311.55	436.17

1.102	0.549	340.48	471.94
1.102	0.6	369.64	508.34
1.216	0.09	123.36	232.82
1.216	0.141	138.7	247.24
1.216	0.192	158.46	266.92
1.216	0.243	181.22	290.79
1.216	0.294	205.97	317.91
1.216	0.345	232.08	347.52
1.216	0.396	259.14	379.04
1.216	0.447	286.88	412.03
1.216	0.498	315.13	446.16
1.216	0.549	343.75	481.19
1.216	0.6	372.66	516.94
1.33	0.09	132.95	252.74
1.33	0.141	147.29	266.09
1.33	0.192	166.04	284.46
1.33	0.243	187.87	306.98
1.33	0.294	211.85	332.78
1.33	0.345	237.32	361.18
1.33	0.396	263.84	391.6
1.33	0.447	291.14	423.61
1.33	0.498	319	456.87
1.33	0.549	347.31	491.14
1.33	0.6	375.94	526.21

Tabla D4.

Valores mínimos y máximos de la demanda sísmica para la geometría intermedia.

Sms	Sm1	Cortante basal [kN]	Momento basal [kN·m]
0.190	0.090	54	75.996
1.330	0.600	375.94	526.21

Tabla D5.

Resultados de cortante y momento basal para la geometría esbelta en diferentes escenarios sísmicos.

Geometría esbelta			
Sms	Sm1	Cortante basal [kN]	Momento basal [kN·m]
0.19	0.09	73.454	130.58
0.19	0.141	115.55	199.27
0.19	0.192	158.05	269.86
0.19	0.243	200.7	341.17
0.19	0.294	243.42	412.82
0.19	0.345	286.18	484.68
0.19	0.396	328.97	556.65
0.19	0.447	371.76	628.69
0.19	0.498	414.57	700.8
0.19	0.549	457.39	772.94
0.19	0.6	500.21	845.11
0.304	0.09	76.32	143.96
0.304	0.141	117.39	208.28

0.304	0.192	159.41	276.58
0.304	0.243	201.77	346.51
0.304	0.294	244.3	417.25
0.304	0.345	286.93	488.45
0.304	0.396	329.62	559.94
0.304	0.447	372.34	631.61
0.304	0.498	415.09	703.41
0.304	0.549	457.86	775.31
0.304	0.6	500.64	847.28
0.418	0.09	80.271	161.31
0.418	0.141	120	220.63
0.418	0.192	161.33	286
0.418	0.243	203.3	354.07
0.418	0.294	245.57	423.55
0.418	0.345	288.01	493.84
0.418	0.396	330.55	564.65
0.418	0.447	373.17	635.79
0.418	0.498	415.83	707.17
0.418	0.549	458.53	778.72
0.418	0.6	501.26	850.4
0.532	0.09	85.157	181.5
0.532	0.141	123.32	235.8
0.532	0.192	163.82	297.85
0.532	0.243	205.28	363.71
0.532	0.294	247.21	431.64
0.532	0.345	289.41	500.8
0.532	0.396	331.77	570.74
0.532	0.447	374.25	641.21
0.532	0.498	416.81	712.04
0.532	0.549	459.41	783.15
0.532	0.6	502.06	854.46
0.646	0.09	90.827	203.68
0.646	0.141	127.3	253.26
0.646	0.192	166.84	311.86
0.646	0.243	207.69	375.27
0.646	0.294	249.22	441.43
0.646	0.345	291.13	509.26
0.646	0.396	333.28	578.18
0.646	0.447	375.58	647.83
0.646	0.498	418	718.02
0.646	0.549	460.5	788.58
0.646	0.6	503.06	859.44
0.76	0.09	97.144	227.26
0.76	0.141	131.88	272.59
0.76	0.192	170.36	327.75
0.76	0.243	210.53	388.58
0.76	0.294	251.59	452.79
0.76	0.345	293.16	519.14
0.76	0.396	335.05	586.9
0.76	0.447	377.16	655.63
0.76	0.498	419.42	725.06
0.76	0.549	461.79	795
0.76	0.6	504.24	865.33
0.874	0.09	103.99	251.87

0.874	0.141	137	293.42
0.874	0.192	174.35	345.27
0.874	0.243	213.78	403.46
0.874	0.294	254.31	465.63
0.874	0.345	295.5	530.37
0.874	0.396	337.1	596.86
0.874	0.447	378.98	664.56
0.874	0.498	421.06	733.14
0.874	0.549	463.27	802.38
0.874	0.6	505.6	872.12
0.988	0.09	111.27	277.21
0.988	0.141	142.61	315.44
0.988	0.192	178.79	364.17
0.988	0.243	217.41	419.75
0.988	0.294	257.37	479.81
0.988	0.345	298.14	542.87
0.988	0.396	339.42	607.99
0.988	0.447	381.04	674.58
0.988	0.498	422.91	742.23
0.988	0.549	464.96	810.69
0.988	0.6	507.15	879.77
1.102	0.09	118.9	303.12
1.102	0.141	148.64	338.43
1.102	0.192	183.63	384.25
1.102	0.243	221.41	437.29
1.102	0.294	260.76	495.23
1.102	0.345	301.07	556.54
1.102	0.396	341.99	620.23
1.102	0.447	383.34	685.63
1.102	0.498	424.98	752.29
1.102	0.549	466.85	819.91
1.102	0.6	508.87	888.27
1.216	0.09	126.81	329.45
1.216	0.141	155.04	362.2
1.216	0.192	188.86	405.35
1.216	0.243	225.76	455.94
1.216	0.294	264.46	511.77
1.216	0.345	304.28	571.31
1.216	0.396	344.83	633.51
1.216	0.447	385.87	697.67
1.216	0.498	427.27	763.28
1.216	0.549	468.93	830.01
1.216	0.6	510.78	897.6
1.33	0.09	134.97	356.11
1.33	0.141	161.78	386.61
1.33	0.192	194.43	427.3
1.33	0.243	230.44	475.56
1.33	0.294	268.47	529.33
1.33	0.345	307.77	587.09
1.33	0.396	347.91	647.78
1.33	0.447	388.63	710.65
1.33	0.498	429.76	775.16
1.33	0.549	471.2	840.95
1.33	0.6	512.87	907.73

Tabla D6.

Valores mínimos y máximos de la demanda sísmica para la geometría esbelta.

Sms	Sm1	Cortante basal [kN]	Momento basal [kN·m]
0.190	0.090	73.454	130.58
1.330	0.600	512.87	907.73

Apéndice E. Evidencia del algoritmo desarrollado en MATLAB.

Se presentan capturas del algoritmo desarrollado en MATLAB R2026a para la estimación de la demanda sísmica del fluido en tanques rectangulares de base fija. Las imágenes muestran la estructura general del código, la definición de los parámetros de entrada, la construcción de los espectros de diseño, la aplicación del modelo hidrodinámico de Housner y la generación de resultados asociados al cortante basal, momento de volcamiento, fuerzas hidrodinámicas y curvas de nivel.

Figura E1.

Estructura general del algoritmo.

```

%%=====
% ANÁLISIS DE LA DEMANDA SÍSMICA EN TANQUES RECTANGULARES
% Comparación Normativa: NSR-10 vs. AIS 100-24
% Proyecto de Grado - Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas - Ingeniería civil
%=====
clear; clc; close all;

%% CONFIGURACIÓN ESTÉTICA AUTOMÁTICA DE LA GRÁFICA
set(groot, 'DefaultAxesFontSize', 12); % Tamaño de letra legible
set(groot, 'DefaultAxesFontName', 'Times New Roman'); % Fuente académica
set(groot, 'DefaultAxesXColor', [0 0 0]); % Eje X en negro puro
set(groot, 'DefaultAxesYColor', [0 0 0]); % Eje Y en negro puro
set(groot, 'DefaultTextColor', [0 0 0]); % Todo el texto en negro
set(groot, 'DefaultAxesTitleFontWeight', 'bold'); % Títulos en negrita
set(groot, 'DefaultAxesLabelFontSizeMultiplier', 1.1); % Ejes un poco más grandes
set(groot, 'DefaultFigureColor', 'w'); % Fondo de ventana blanco
mapa_colores = containers.Map;
mapa_colores('Riohacha') = [0.5 0 0.5]; % morado
mapa_colores('Arauca') = [0 0.6 0]; % verde
mapa_colores('Mocoa') = [0 0.4 0.8]; % azul
mapa_colores('Popayán') = [0.8 0.3 0]; % naranja
mapa_colores('Florenia') = [0.6 0 0]; % rojo
mapa_colores('Yopal') = [0.2 0.2 0.2]; % gris

% NOTA:
% El análisis se presenta para una ciudad representativa seleccionada.
% No obstante, el script está estructurado de manera general, permitiendo reproducir el
% procedimiento para cualquier ciudad de la base de datos
% sin necesidad de realizar ajustes adicionales en el modelo.
%% 1. ENTRADA DE DATOS
ciudad_buscada = 'Arauca';
I = 1.50; % Coeficiente de Importancia (Grupo IV)
Fa = 1.0; Fv = 1.0; % Parámetros de Suelo (Tipo B)
%% 2. BASE DE DATOS (AIS 100-24 vs NSR-10)
Nombres = {'Arauca', 'Armenia', 'Barranquilla', 'Bogotá D. C.', 'Bucaramanga', 'Cali',
'Cartagena', 'Cúcuta', 'Florenia', 'Ibagué', 'Leticia', 'Manizales', 'Medellín', 'Mitú',
'Mocoa', 'Monteria', 'Neiva', 'Pasto', 'Pereira', 'Popayán', 'Puerto Carreño', 'Puerto
Inírida', 'Quibdó', 'Riohacha', 'San Andrés, Isla', 'Santa Marta', 'San José del Guaviare',
'Sincelejo', 'Tunja', 'Valledupar', 'Villavicencio', 'Yopal'};
sms_ais = [0.7, 0.96, 0.38, 0.58, 0.93, 1.01, 0.38, 1.31, 0.79, 0.78, 0.19, 0.86, 0.61,
0.19, 1.28, 0.4, 0.85, 1.02, 0.94, 0.93, 0.19, 0.19, 1.33, 0.58, 0.38, 0.58, 0.19, 0.4,
0.65, 0.38, 1.17, 1.11];
sml_ais = [0.3, 0.46, 0.18, 0.36, 0.45, 0.46, 0.18, 0.54, 0.34, 0.3, 0.09, 0.44, 0.34, 0.09,
0.54, 0.18, 0.41, 0.48, 0.46, 0.46, 0.09, 0.09, 0.6, 0.32, 0.18, 0.2, 0.09, 0.18, 0.3, 0.18,
0.48, 0.45];
aa_nsr = [0.15, 0.25, 0.10, 0.15, 0.25, 0.25, 0.10, 0.35, 0.20, 0.20, 0.05, 0.25, 0.15,
0.05, 0.30, 0.10, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.05, 0.05, 0.35, 0.15, 0.10, 0.15, 0.05, 0.10,
0.15, 0.10, 0.35, 0.30];
av_nsr = [0.15, 0.25, 0.10, 0.20, 0.25, 0.25, 0.10, 0.30, 0.20, 0.20, 0.05, 0.25, 0.20,
0.05, 0.30, 0.15, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.05, 0.05, 0.35, 0.15, 0.10, 0.15, 0.05, 0.15,
0.20, 0.15, 0.30, 0.25];
db = containers.Map(Nombres, 1: length(Nombres));
idx = db(ciudad_buscada);
Sms = sms_ais(idx); Sml = sml_ais(idx);
Sds = (2/3)*Sms*Fa; Sdl = (2/3)*Sml*Fv;
Aa = aa_nsr(idx); Av = av_nsr(idx);

%% PARÁMETROS ESPECTRALES NSR-10
% Aa: Aceleración pico efectiva para periodos cortos.
% Definida por la NSR-10 según la amenaza sísmica de la ciudad.
% Av: Velocidad pico efectiva para periodos intermedios.
% Definida por la NSR-10 según la amenaza sísmica de la ciudad.
% Fa: Coeficiente de amplificación para periodos cortos.
% Fv: Coeficiente de amplificación para periodos largos.

```

Figura E2.

Definición de parámetros de entrada y base de datos normativa.

```
% A diferencia del enfoque AIS/ACI, la NSR-10 no define directamente Sds y Sd1,
% sino que construye el espectro a partir de Aa y Av.
% Aceleración máxima de la meseta espectral:
% Sa_max = 2.5·Aa·Fa·I
% Ordenada base de la rama de periodos largos:
% Sv = 1.2·Av·Fv·I
% Equivalencia de ordenadas espectrales para aplicar el modelo
% hidrodinámico de Housner con parámetros NSR-10:
% Meseta espectral:
% Sds_nsr = 2.5·Aa·Fa
% Rama de periodos largos:
% Sd1_nsr = 1.2·Av·Fv
% Estas relaciones se obtienen al igualar las expresiones de la
% aceleración espectral utilizadas por la NSR-10 y por el ACI 350.3-20,
% conservando la representación física de cada región del espectro.
% Período de inicio de la meseta:
% T0 = 0.1·(Av·Fv)/(Aa·Fa)
% Período de finalización de la meseta:
% Tc = 0.48·(Av·Fv)/(Aa·Fa)
% Período largo del espectro:
% TL = 2.4·Fv
%% PARÁMETROS ESPECTRALES AIS 100-24:
% Sms: Aceleración espectral para periodos cortos.
% Sml: Aceleración espectral para periodo de 1 segundo.
% Sds: Aceleración espectral de diseño para periodos cortos.
% Sds = (2/3)·Sms·Fa
% Sd1: Aceleración espectral de diseño para periodos largos.
% Sd1 = (2/3)·Sml·Fv
% Período de inicio de la meseta:
% T0 = 0.2·(Sd1/Sds)
% Período de finalización de la meseta:
% Tc = Sd1/Sds
% Período largo del espectro:
% TL = 2.4·Fv

%% 3. CÁLCULO DE ESPECTROS:
TL = 2.4 * Fv;
Tc_ais = Sd1 / Sds;
T0_ais = 0.2 * Tc_ais;
Tc_nsr = 0.48 * (Av * Fv) / (Aa * Fa);
T0_nsr = 0.1 * (Av * Fv) / (Aa * Fa);
T = 0:0.01:6;
Sa_ais = zeros(size(T)); Sa_nsr = zeros(size(T));
for i = 1:length(T)
    Ti = T(i);
    % AIS 100-24:
    if Ti < T0_ais, Sa_ais(i) = Sds * I * (0.4 + 0.6 * (Ti/T0_ais));
    elseif Ti <= Tc_ais, Sa_ais(i) = Sds * I;
    elseif Ti <= TL, Sa_ais(i) = (Sd1 * I) / Ti;
    else, Sa_ais(i) = (Sd1 * TL * I) / (Ti^2);
    end
    % NSR-10:
    if Ti < T0_nsr, Sa_nsr(i) = 2.5 * Aa * Fa * I * (0.4 + 0.6 * (Ti/T0_nsr));
    elseif Ti <= Tc_nsr, Sa_nsr(i) = 2.5 * Aa * Fa * I;
    elseif Ti <= TL, Sa_nsr(i) = (1.2 * Av * Fv * I) / Ti;
    else, Sa_nsr(i) = (1.2 * Av * Fv * TL * I) / (Ti^2);
    end
end

%% 4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS ESPECTRALES:
% Comparación de la demanda espectral:
% Se compara la respuesta espectral obtenida con la AIS 100-24 y la NSR-10,
% cuantificando el cambio porcentual y tomando como referencia la NSR-10.
```



```

dif_porcentual = ((Sa_ais - Sa_nsr) ./ max(Sa_nsr, 1e-6)) * 100;
[max_dif, idx_max] = max(abs(dif_porcentual));
T_critico = T(idx_max);
Sa_meseta_ais = Sds * I;
Sa_meseta_nsr = 2.5 * Aa * Fa * I;
delta_acel = ((Sa_meseta_ais - Sa_meseta_nsr) / Sa_meseta_nsr) * 100;

%% 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS ESPECTRALES
fprintf('\n===== \n');
fprintf(' ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESPUESTA ESPECTRAL \n');
fprintf('===== \n');
fprintf('ciudad: %s | Suelo: B | Importancia: %.2f \n', ciudad_buscada, I);
fprintf('----- \n');

% ITEM 1: ACELERACIÓN MÁXIMA
if abs(delta_acel) < 0.01
txt_acel = 'La aceleración pico efectiva no presenta variaciones.';
elseif delta_acel < 0
txt_acel = sprintf('Se cuantifica una disminución del %.2f%% en las ordenadas de
aceleración.', abs(delta_acel));
else
txt_acel = sprintf('Se cuantifica un incremento del %.2f%% en las ordenadas de aceleración.',
delta_acel);
end
fprintf('1. COMPARACIÓN DE ACELERACIÓN MÁXIMA (Sa max): \n');
fprintf(' - NSR-10: %.4f g | AIS 100-24: %.4f g \n', Sa_meseta_nsr, Sa_meseta_ais);
fprintf(' > CONCLUSIÓN: %s \n', txt_acel);

% ITEM 2: RANGO DE MESETA (Tc)
diff_Tc = Tc_ais - Tc_nsr;
if abs(diff_Tc) < 0.001
txt_Tc = 'El límite de la meseta espectral permanece invariante.';
elseif diff_Tc > 0
txt_Tc = sprintf('El periodo corto (Tc) experimenta una traslación de %.3f s.', diff_Tc);
else
txt_Tc = sprintf('El periodo corto (Tc) experimenta una contracción de %.3f s.',
abs(diff_Tc));
end
fprintf('\n2. DINÁMICA DEL PERIODO CRÍTICO (Tc): \n');
fprintf(' - Tc NSR-10: %.3f s | Tc AIS 100-24: %.3f s \n', Tc_nsr, Tc_ais);
fprintf(' > CONCLUSIÓN: %s \n', txt_Tc);

% ITEM 3: DISCREPANCIA RELATIVA
if T_critico <= max(Tc_ais, Tc_nsr)
txt_disc = 'La mayor divergencia se localiza en el rango de estructuras de alta rigidez.';
else
txt_disc = 'La mayor divergencia se localiza en el rango de periodos intermedios.';
end
fprintf('\n3. EVALUACIÓN DE DISCREPANCIA NORMATIVA: \n');
fprintf(' - Diferencia máxima del %.2f%% en T = %.2f s \n', max_dif, T_critico);
fprintf(' > CONCLUSIÓN: %s \n', txt_disc);

% --- INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS ESPECTRALES ---
fprintf('\n----- \n');
fprintf(' SÍNTESIS DEL COMPORTAMIENTO ESPECTRAL: \n');
fprintf('----- \n');

% Interpretación del cambio de demanda
if delta_acel > 0
estado_pico = 'un incremento en la demanda sísmica';
elseif delta_acel < 0
estado_pico = 'una reducción en la demanda sísmica';
else

```


Figura E3.

Cálculo, comparación y generación de los espectros de diseño para la NSR-10 y la AIS 100-24.

```

estado_pico = 'ninguna variación en la demanda sísmica';
end
fprintf('* La diferencia máxima puntual entre ambos espectros no supera el %.2f%%,\n',
max_dif);
fprintf(' registrándose para un periodo de vibración de T = %.2f s.\n', T_critico);

% Interpretación de la meseta espectral
if delta_acel < 0
estado_meseta = 'una reducción de la demanda sísmica en la meseta espectral';
elseif delta_acel > 0
estado_meseta = 'un incremento de la demanda sísmica en la meseta espectral';
else
estado_meseta = 'una demanda sísmica equivalente en la meseta espectral';
end
fprintf('* En el rango de la meseta espectral, la actualización supone %s\n', estado_meseta);
fprintf(' del %.2f%% respecto a la normativa NSR-10.\n', abs(delta_acel));
fprintf('* Para periodos superiores a 0.5 s, se evidencia una convergencia elástica\n');
fprintf(' entre ambos modelos, unificando los criterios de análisis estructural.\n');
fprintf('=====\n');

%% 6. GENERACIÓN DE GRÁFICAS:
hFig = figure(1); clf(hFig);
set(hFig, 'Name', 'Análisis Espectral');
color_gris = [0.94, 0.94, 0.94];
% Subplot Espectros
subplot(2,1,1);
plot(T, Sa_ais, 'r', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'AIS 100-24'); hold on;
plot(T, Sa_nsr, 'b', 'LineWidth', 2, 'LineStyle', '--', 'DisplayName', 'NSR-10');
grid on; grid minor;
set(gca, 'Color', color_gris);
ylabel('Aceleración Sa (g)'); title(['Espectros de Diseño - ', ciudad_buscada]);
legend('show', 'TextColor', 'black', 'Color', 'none', 'EdgeColor', 'none', 'Location',
'northeast');
xlim([0 3]);
% Subplot Diferencia
subplot(2,1,2);
plot(T, dif_porcentual, 'k', 'LineWidth', 1.5); hold on;
yline(0, '--', 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
grid on; grid minor;
set(gca, 'Color', color_gris);
xlabel('Periodo de vibración, T (s)');
ylabel('% Diferencia (AIS - NSR)');
title('Variación porcentual de la aceleración espectral');
xlim([0 3]);
text(T_critico, dif_porcentual(idx_max), ' \leftarrow Máx. diferencia', ...
'Color', 'r', 'FontWeight', 'bold');

%% 7. RESULTADOS CALCULADOS:
fprintf('\n=====\n');
fprintf('RESULTADOS ESPECTRALES\n');
fprintf('Ciudad: %s\n', ciudad_buscada);
% ===== AIS =====
fprintf('Sds (AIS 100-24): %.4f\n', Sds);
fprintf('Sd1 (AIS 100-24): %.4f\n', Sd1);
% ===== NSR =====
Sds_nsr = 2.5 * Aa * Fa;
Sd1_nsr = 1.2 * Av * Fv;
fprintf('Sds (NSR-10): %.4f\n', Sds_nsr);
fprintf('Sd1 (NSR-10): %.4f\n', Sd1_nsr);
fprintf('=====\n');

```

```

%% =====
% MÓDULO 2 - DEMANDA SÍSMICA DEL FLUIDO EN TANQUES RECTANGULARES
% ACI 350.3-20 - Modelo Hidrodinámico
% Nota:
% Este módulo utiliza los parámetros espectrales obtenidos en el análisis
% previo tanto para la AIS 100-24 (Sds, Sd1) como para la NSR-10
% (Sds_nsr, Sd1_nsr), con el fin de aplicar el modelo hidrodinámico
% de Housner y comparar la respuesta del fluido para ambas normativas.
% =====
% Nota:
% Los parámetros espectrales Sds y Sd1 se obtienen a partir de los valores
% Sms y Sml del AIS 100-24, siguiendo el esquema espectral
% adoptado por ACI 350.3-20 y ASCE/SEI 7.
% Para el caso de la NSR-10, los parámetros Sds_nsr y
% Sd1_nsr se determinan a partir de la equivalencia entre las ordenadas del
% espectro, utilizando las expresiones:
% Sds_nsr = 2.5·Aa·Fa
% Sd1_nsr = 1.2·Av·Fv
% Esta correspondencia permite aplicar de forma consistente el modelo
% hidrodinámico de Housner y comparar los resultados entre normativas.
%% PARÁMETROS SÍSMICOS:
% Sds: Aceleración espectral de diseño para periodos cortos.
% En el caso de la AIS 100-24, se calcula a partir de Sms (Art. A.2.2.3),
% usando el esquema espectral común adoptado por el
% ACI 350.3-20 (Ec. 9.4.1d) y ASCE/SEI 7.
% Para la NSR-10, este parámetro no se define directamente,
% por lo que se emplea una equivalencia basada en la meseta del espectro:
% Sds_nsr = 2.5·Aa·Fa
% Sds -> viene del espectro (AIS)
% Sds_nsr -> valor equivalente para NSR (uso en Housner)
% Sd1: Aceleración espectral de diseño a 1 s.
% En la AIS 100-24, se calcula a partir de Sml (Art. A.2.2.3),
% usando el esquema espectral común adoptado por el
% ACI 350.3-20 (Ec. 9.4.1e) y ASCE/SEI 7.
% Para la NSR-10, se define mediante equivalencia con la rama de
% periodos largos del espectro:
% Sd1_nsr = 1.2·Av·Fv
% Sd1 -> viene del espectro (AIS)
% Sd1_nsr -> valor equivalente para NSR (uso en Housner)
% TL: Período largo del espectro de diseño
% Definido según AIS 100-24 (Art. A.2.2.4) como:
% TL = 2.4·Fv
% Para suelo tipo B: Fv = 1.0 → TL = 2.4 s
TL = 2.4 * Fv; % Período largo del espectro de diseño
% I: Factor de importancia
% Categoría de Riesgo IV - Tanques de agua
% ACI 350.3-20, Tabla 4.1.1a y Tabla A.2.5-1 AIS 100 24
% Se mantiene igual para ambas normativas
I = 1.50; % Factor de importancia (Grupo IV)
% Ri: Factor de modificación de respuesta impulsiva
% ACI 350.3-20, Tabla 4.1.1b
% Tanques rectangular de base fija, apoyado sobre el terreno.
Ri = 2.25; % Factor de respuesta impulsivo
% Rc: Factor de modificación de respuesta convectiva
% ACI 350.3-20, Tabla 4.1.1b
Rc = 1.00; % Factor de respuesta convectivo;
%% DEFINICIÓN DE GEOMETRÍAS
geom = struct('nombre', {'Intermedia', 'Ancha', 'Esbelta'}, ...
'L', {8.0, 10.0, 6.0}, ...
'HL', {3.5, 3.0, 4.5});

%% ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE GEOMETRÍA
Resultados = table();

```

```

for i = 1:length(geom)
fprintf('\n===== \n');
fprintf(' GEOMETRÍA: %s\n', geom(i).nombre);
fprintf('===== \n');
L = geom(i).L;
HL = geom(i).HL;
B = 4.5; % Ancho del tanque fijado como parámetro constante del estudio.
% Esta elección permite comparar las distintas configuraciones del tanque,
% con el fin de darle enfoque al efecto de la relación L/HL, sin introducir
% variaciones adicionales por cambios en el ancho.
% Este valor se adopta tomando como referencia un caso de estudio reportado
% en la literatura para tanques rectangulares de concreto
% (Orihuela y Sánchez, 2016).
gammaL = 9.81; % Peso específico del líquido (kN/m3)
g = 9.81; % Gravedad (m/s2)
%% --- BORDE LIBRE ---
FB_factor = 0.25; % Borde libre adoptado para la verificación del oleaje.
% Se asume un valor equivalente al 25 % de la altura del líquido,
% con el fin de evaluar si el sloshing calculado puede ser
% contenido sin afectar el funcionamiento del tanque.
H = HL * (1 + FB_factor); % Altura total del muro del tanque
FB_disp = H - HL; % Borde libre disponible

%% 3. PESO TOTAL DEL LÍQUIDO
% Peso total del líquido almacenado en el tanque.
% Calculado a partir del volumen del líquido y el peso específico,
% conforme a las definiciones empleadas en el modelo hidrodinámico
% del ACI 350.3-20 (Capítulo 9).
WL = L * B * HL * gammaL;

%% 4. PESOS EQUIVALENTES DEL FLUIDO (ACI 350.3-20, Ec. 9.2.1)
Wi = WL * tanh(0.866*(L/HL)) / (0.866*(L/HL));
Wc = WL * 0.264 * (L/HL) * tanh(3.16*(HL/L));

%% 5. ALTURAS DE APLICACIÓN (ACI 350.3-20, Sección 9.2.2 - EBP)
% Altura del componente impulsivo hi
% ACI 350.3-20, Ec. (9.2.2a) y (9.2.2b)
if (L/HL) >= 1.333
hi = 0.375 * HL; % Ec. (9.2.2b)
else
hi = HL * (0.5 - 0.09375*(L/HL)); % Ec. (9.2.2a)
end
% Altura del componente convectivo hc
% ACI 350.3-20, Ec. (9.2.2c)
hc = HL * ( 1 - (cosh(3.16*(HL/L)) - 1) / ...
(3.16*(HL/L)*sinh(3.16*(HL/L))) );
%% 6. PERÍODO CONVECTIVO (ACI 350.3-20, Ec. 9.2.4 e-f)
Tc = 2*pi / sqrt( (3.16*g/L) * tanh(3.16*(HL/L)) );

%% 7. COEFICIENTES SÍSMICOS (ACI 350.3-20, (9.4.1a))
%% ===== AIS =====
% --- COEFICIENTE IMPULSIVO ---
% Para tanques rígidos, el periodo impulsivo es muy corto debido al alta
% rigidez del sistema. En consecuencia, el comportamiento se ubica dentro
% de la región de periodos cortos del espectro de diseño.
% Según ACI 350.3-20, se adopta directamente:
Ci_ais = Sds;
% --- COEFICIENTE CONVECTIVO ---
if Tc <= TL
Cc_ais = 1.5 * Sd1 / Tc;
else
Cc_ais = 1.5 * Sd1 * TL / (Tc^2);
end

```


Figura E4.

Fuerzas hidrodinámicas y verificación de oleaje del tanque.

```

% límite normativo
Cc_ais = min(Cc_ais, 1.5 * Sds);
%% ===== NSR =====
% --- COEFICIENTE IMPULSIVO ---
Ci_nsr = Sds_nsr;
% --- COEFICIENTE CONVECTIVO ---
if Tc <= TL
Cc_nsr = 1.5 * Sd1_nsr / Tc;
else
Cc_nsr = 1.5 * Sd1_nsr * TL / (Tc^2);
end
% límite normativo
Cc_nsr = min(Cc_nsr, 1.5 * Sds_nsr);
%% 8. FUERZAS SÍSMICAS DEL FLUIDO (ACI 350.3-20, Ec. 4.1.1)
% ===== AIS =====
Pi_ais = (Ci_ais * I * Wi) / Ri;
Pc_ais = (Cc_ais * I * Wc) / Rc;
% ===== NSR =====
Pi_nsr = (Ci_nsr * I * Wi) / Ri;
Pc_nsr = (Cc_nsr * I * Wc) / Rc;

%% 9. RESULTADOS FINALES DEL TANQUE
% Combinación de las componentes impulsiva (Pi) y convectiva (Pc)
% según ACI 350.3-20, Art. 4.1.2 y 4.1.3.
% La norma establece que estas componentes no se suman directamente,
% sino que se combinan mediante el método SRSS para obtener
% la demanda sísmica total.
% ===== AIS =====
V_ais = sqrt(Pi_ais^2 + Pc_ais^2); % Cortante basal del fluido
M_ais = sqrt((Pi_ais*hi)^2 + (Pc_ais*hc)^2); % Momento basal del fluido
% ===== NSR =====
V_nsr = sqrt(Pi_nsr^2 + Pc_nsr^2); % Cortante basal del fluido
M_nsr = sqrt((Pi_nsr*hi)^2 + (Pc_nsr*hc)^2); % Momento basal del fluido

%% 10. ANÁLISIS DE BORDE LIBRE Y OLEAJE
% Altura máxima de oleaje (sloshing)
% ACI 350.3-20, Capítulo 7 - Ec. (7.1a)
% Expresión simplificada y conservadora definida por el código
dmax_ais = (L/2) * Cc_ais * I;
dmax_nsr = (L/2) * Cc_nsr * I;

% Verificación geométrica con borde libre definido por diseño
% ===== VERIFICACIÓN AIS =====
if FB_disp > dmax_ais
estado_ais = 'CONDICIÓN ADECUADA (H > dmax): EL OLEAJE ES CONTENIDO';
else
estado_ais = 'CONDICIÓN CRÍTICA: EL OLEAJE ALCANZA EL BORDE';
end
% ===== VERIFICACIÓN NSR =====
if FB_disp > dmax_nsr
estado_nsr = 'CONDICIÓN ADECUADA (H > dmax): EL OLEAJE ES CONTENIDO';
else
estado_nsr = 'CONDICIÓN CRÍTICA: EL OLEAJE ALCANZA EL BORDE';
end

%% --- VERIFICACIÓN GEOMÉTRICA DEL TANQUE ---
fprintf('\n--- VERIFICACIÓN GEOMÉTRICA DEL TANQUE ---\n');
fprintf('Geometría evaluada = %s\n', geom(i).nombre);
fprintf('Longitud del tanque L = %.2f m\n', L);
fprintf('Altura del líquido HL = %.2f m\n', HL);
fprintf('Relación L/HL = %.2f\n', L/HL);
fprintf('Altura máxima de ola dmax (AIS) = %.3f m\n', dmax_ais);
fprintf('Altura máxima de ola dmax (NSR) = %.3f m\n', dmax_nsr);

```

```

fprintf('Borde libre disponible FB = %.3f m\n', FB_disp);

% ===== VERIFICACIÓN AIS =====
if FB_disp > dmax_ais
fprintf('Resultado AIS: CONDICIÓN ADECUADA (H > dmax): EL OLEAJE ES CONTENIDO\n');
else
fprintf('Resultado AIS: CONDICIÓN CRÍTICA (H ≤ dmax): EL OLEAJE ALCANZA EL BORDE\n');
end

% ===== VERIFICACIÓN NSR =====
if FB_disp > dmax_nsr
fprintf('Resultado NSR: CONDICIÓN ADECUADA (H > dmax): EL OLEAJE ES CONTENIDO\n');
else
fprintf('Resultado NSR: CONDICIÓN CRÍTICA (H ≤ dmax): EL OLEAJE ALCANZA EL BORDE\n');
end

%% --- RESULTADOS DEL TANQUE ---
ratio_Pi_ais = Pi_ais / V_ais * 100;
ratio_Pc_ais = Pc_ais / V_ais * 100;
ratio_Pi_nsr = Pi_nsr / V_nsr * 100;
ratio_Pc_nsr = Pc_nsr / V_nsr * 100;

fprintf('\n=====');
fprintf(' DEMANDA SÍSMICA DEL FLUIDO - TANQUE RECTANGULAR\n');
fprintf(' ACI 350.3-20\n');
fprintf('=====');
% Pesos hidrodinámicos
fprintf('Peso total del líquido WL = %.2f kN\n', WL);
fprintf('Peso impulsivo Wi = %.2f kN\n', Wi);
fprintf('Peso convectivo Wc = %.2f kN\n', Wc);
% Parámetros geométricos de aplicación
fprintf('Altura impulsiva hi = %.2f m\n', hi);
fprintf('Altura convectiva hc = %.2f m\n', hc);
fprintf('Período convectivo Tc = %.2f s\n', Tc);

% =====
% RESULTADOS - AIS 100-24
% =====
fprintf('\n--- RESULTADOS AIS 100-24 ---\n');
% Coeficientes sísmicos
fprintf('Coeficiente impulsivo (Ci_AIS) = %.4f\n', Ci_ais);
fprintf('Coeficiente convectivo (Cc_AIS) = %.4f\n', Cc_ais);
% Fuerzas hidrodinámicas
fprintf('Fuerza impulsiva (Pi_AIS) = %.2f kN (%.1f%%)\n', Pi_ais, ratio_Pi_ais);
fprintf('Fuerza convectiva (Pc_AIS) = %.2f kN (%.1f%%)\n', Pc_ais, ratio_Pc_ais);
% Resultados finales
fprintf('Cortante basal (V_AIS) = %.2f kN\n', V_ais);
fprintf('Momento basal (M_AIS) = %.2f kN·m\n', M_ais);

% =====
% RESULTADOS - NSR-10
% =====
fprintf('\n--- RESULTADOS NSR-10 ---\n');
% Coeficientes sísmicos
fprintf('Coeficiente impulsivo (Ci_NSR) = %.4f\n', Ci_nsr);
fprintf('Coeficiente convectivo (Cc_NSR) = %.4f\n', Cc_nsr);
% Fuerzas hidrodinámicas
fprintf('Fuerza impulsiva (Pi_NSR) = %.2f kN (%.1f%%)\n', Pi_nsr, ratio_Pi_nsr);
fprintf('Fuerza convectiva (Pc_NSR) = %.2f kN (%.1f%%)\n', Pc_nsr, ratio_Pc_nsr);
% Resultados finales
fprintf('Cortante basal (V_NSR) = %.2f kN\n', V_nsr);
fprintf('Momento basal (M_NSR) = %.2f kN·m\n', M_nsr);
fprintf('=====');

```

```

%% --- CONCLUSIONES AUTOMÁTICAS DEL ANÁLISIS POR GEOMETRÍA ---
fprintf('\n--- CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ---\n');

% Clasificación geométrica conforme a ACI 350.3-20
if L/HL >= 2.5
fprintf('* La configuración analizada corresponde a un tanque de geometría ANCHA.\n');
elseif L/HL >= 1.5
fprintf('* La configuración analizada corresponde a un tanque de geometría INTERMEDIA.\n');
else
fprintf('* La configuración analizada corresponde a un tanque de geometría ESBELTA.\n');
end

% Interpretación de la respuesta dinámica
fprintf('* Tanto en la NSR-10 como en la AIS 100-24, la respuesta sísmica del fluido se encuentra dominada por la componente impulsiva,\n');
fprintf(' asociada a la región de periodos cortos del espectro de diseño.\n');
if L/HL < 1.5
fprintf('* No obstante, la geometría esbelta incrementa las alturas efectivas de aplicación\n');
fprintf(' de las masas hidrodinámicas, lo que genera un aumento significativo del momento\n');
fprintf(' basal de volcamiento y una condición estructural más exigente.\n');
elseif L/HL < 2.5
fprintf('* En este rango geométrico se evidencia una participación convectiva no despreciable,\n');
fprintf(' coherente con una respuesta hidrodinámica mixta del sistema.\n');
end
fprintf('* Tanto el cortante basal como el momento de volcamiento están controlados por la demanda\n');
fprintf(' sísmica del sitio, la cual varía en función de la normativa empleada (NSR-10 vs AIS 100-24).\n');

% Verificación en estado de servicio
% Nota:
% La verificación del borde libre se interpreta como una evaluación del comportamiento funcional del tanque frente al oleaje sísmico.
if FB_disp > dmax_ais
fprintf('* La verificación geométrica indica que la altura máxima de oleaje es\n');
fprintf(' inferior al borde libre disponible, garantizando un comportamiento adecuado\n');
fprintf(' frente al fenómeno de sloshing.\n');
fprintf('* Esta condición se mantiene de forma consistente independientemente de la\n');
fprintf(' normativa empleada, al estar asociada al comportamiento convectivo del fluido.\n');
else
fprintf('* La verificación en estado de servicio evidencia que el oleaje supera el borde libre,\n');
fprintf(' identificándose una condición crítica en la contención del fluido.\n');
fprintf('* Este resultado es independiente de la normativa, ya que depende directamente\n');
fprintf(' de la respuesta dinámica del fluido.\n');
end

% === GUARDAR RESULTADOS DE CADA GEOMETRÍA ===
% Columnas: [L, HL, V_nsr, M_nsr, V_ais, M_ais]
resumen_datos(i,:) = [L, HL, V_nsr, M_nsr, V_ais, M_ais];
end

%% =====
% TABLA COMPARATIVA FINAL DE RESPUESTAS POR GEOMETRÍA
% =====
Geometria = {geom.nombre}';
L_val = resumen_datos(:,1);
HL_val = resumen_datos(:,2);
Relacion_LHL = L_val ./ HL_val;
V_nsr = resumen_datos(:,3);

```


Figura E5.

Cálculo de fuerzas hidrodinámicas, cortante basal, momento de volcamiento, oleaje y tabla principal de resultados.

```

M_nsr = resumen_datos(:,4);
V_ais = resumen_datos(:,5);
M_ais = resumen_datos(:,6);

% === DIFERENCIA PORCENTUAL ===
delta_V = (V_ais - V_nsr)/V_nsr * 100;
delta_M = (M_ais - M_nsr)/M_nsr * 100;
delta_V = round(delta_V,1);
delta_M = round(delta_M,1);

% === TABLA PRINCIPAL ===
Tabla_Principal = table(Geometria, Relacion_LHL, V_nsr, V_ais, delta_V, ...
M_nsr, M_ais, delta_M, 'VariableNames',{'Geometria','L_HL', 'V_NSR','V_AIS','Delta_V (%)',
'M_NSR','M_AIS','Delta_M (%)'});
fprintf('\n===== \n');
fprintf(' TABLA PRINCIPAL - EFECTO DE LA GEOMETRÍA DEL TANQUE \n');
fprintf(' PARÁMETROS GOBERNANTES DE LA DEMANDA SÍSMICA (ACI 350.3-20) \n');
fprintf('===== \n');
disp(Tabla_Principal);

%% =====
% FIGURA - MOMENTO DE VOLCAMIENTO POR GEOMETRÍA
% =====
Geometria = {geom.nombre}';
M_nsr = resumen_datos(:,4);
M_ais = resumen_datos(:,6);
figure(2); clf;
set(gcf,'Color','w'); hold on;
color_base = mapa_colores(ciudad_buscada);
color_nsr = color_base;
color_ais = color_base + 0.3*(1 - color_base);
for i = 1:length(M_nsr)
h_nsr = bar(i-0.15, M_nsr(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_nsr, 'EdgeColor','k');
h_ais = bar(i+0.15, M_ais(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_ais, 'EdgeColor','k');
end

% Porcentaje de variación
delta_M = (M_ais - M_nsr)/M_nsr * 100;
for i = 1:length(M_nsr)
text(i, M_ais(i)*1.04, sprintf('%.1f%%', delta_M(i)), ...
'HorizontalAlignment','center', ...
'VerticalAlignment','bottom', ...
'FontSize',11);
end
grid on;
xlim([0 length(Geometria)+1]);

% Etiquetas del eje X con la relación geométrica utilizada
labels_geom = {
'Intermedia (L/H_L = 2.29)'
'Ancha (L/H_L = 3.33)'
'Esbelta (L/H_L = 1.33)'
};
set(gca,'XTick',1:length(labels_geom), ...
'XTickLabel', labels_geom, ...
'TickLabelInterpreter','tex');
xlabel('Configuración geométrica del tanque (relación L/H_L)');
ylabel('Momento de volcamiento en la base del tanque, M (kN·m)');
title(['Comparación del momento de volcamiento en la base del tanque - ', ciudad_buscada]);
legend([h_nsr h_ais], {'NSR-10','AIS 100-24'}, ...
'Location','northwest', ...

```

```

'Box','off');
ylim([0 max(M_ais)*1.20]);
box on;

%% =====
% FIGURA - CORTANTE BASAL HIDRODINÁMICO POR GEOMETRÍA
% =====
Geometria = {geom.nombre};
V_nsr = resumen_datos(:,3);
V_ais = resumen_datos(:,5);
figure(3); clf;
set(gcf,'Color','w'); hold on;
color_base = mapa_colores(ciudad_buscada);
color_nsr = color_base;
color_ais = color_base + 0.3*(1 - color_base);
for i = 1:length(V_nsr)
    h_nsr = bar(i-0.15, V_nsr(i), 0.3, ...
        'FaceColor', color_nsr, 'EdgeColor','k');
    h_ais = bar(i+0.15, V_ais(i), 0.3, ...
        'FaceColor', color_ais, 'EdgeColor','k');
end

% Porcentaje de variación
delta_V = (V_ais - V_nsr)./V_nsr * 100;
for i = 1:length(V_nsr)
    text(i, V_ais(i)*1.04, sprintf('%.1f%%', delta_V(i)), ...
        'HorizontalAlignment','center', ...
        'VerticalAlignment','bottom', ...
        'FontSize',11);
end
grid on;
xlim([0 length(Geometria)+1]);

% Etiquetas del eje X con la relación geométrica utilizada
labels_geom = {
    'Intermedia (L/H_L = 2.29)'
    'Ancha (L/H_L = 3.33)'
    'Esbelta (L/H_L = 1.33)'
};
set(gca,'XTick',1:length(labels_geom), ...
    'XTickLabel', labels_geom, ...
    'TickLabelInterpreter','tex');
xlabel('Configuración geométrica del tanque (relación L/H_L)');
ylabel('Cortante basal hidrodinámico, V (kN)');
title(['Comparación del cortante basal hidrodinámico - ', ciudad_buscada]);
legend([h_nsr h_ais], {'NSR-10','AIS 100-24'}, ...
    'Location','northwest', ...
    'Box','off');
ylim([0 max(V_ais)*1.20]);
box on;

%% =====
% ANÁLISIS PARAMÉTRICO - RELACIÓN L/HL
% =====
rel = 1:0.5:5; % rango
Pi_ais_vec = zeros(size(rel));
Pc_ais_vec = zeros(size(rel));
Pi_nsr_vec = zeros(size(rel));
Pc_nsr_vec = zeros(size(rel));
for j = 1:length(rel)
    HL = 3.5; % Altura fija
    L = rel(j) * HL; % cambiar L según la relación
    B = 4.5;

```



```

% Peso del fluido
WL = L * B * HL * gammaL;

% Masas
Wi = WL * tanh(0.866*(L/HL)) / (0.866*(L/HL));
Wc = WL * 0.264 * (L/HL) * tanh(3.16*(HL/L));

% Periodo convectivo
Tc = 2*pi / sqrt((3.16*g/L) * tanh(3.16*(HL/L)));

% ===== AIS =====
if Tc <= TL
Cc_ais_temp = 1.5 * Sd1 / Tc;
else
Cc_ais_temp = 1.5 * Sd1 * TL / (Tc^2);
end
Cc_ais_temp = min(Cc_ais_temp, 1.5 * Sds);
Ci_ais_temp = Sds;
Pi_ais_vec(j) = (Ci_ais_temp * I * Wi) / Ri;
Pc_ais_vec(j) = (Cc_ais_temp * I * Wc) / Rc;

% ===== NSR =====
if Tc <= TL
Cc_nsr_temp = 1.5 * Sd1_nsr / Tc;
else
Cc_nsr_temp = 1.5 * Sd1_nsr * TL / (Tc^2);
end
Cc_nsr_temp = min(Cc_nsr_temp, 1.5 * Sds_nsr);
Ci_nsr_temp = Sds_nsr;
Pi_nsr_vec(j) = (Ci_nsr_temp * I * Wi) / Ri;
Pc_nsr_vec(j) = (Cc_nsr_temp * I * Wc) / Rc;
End

% Gráfica de fuerzas impulsiva y convectiva
figure(4);
plot(rel, Pi_ais_vec, 'r-', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(rel, Pc_ais_vec, 'r--', 'LineWidth', 2);
plot(rel, Pi_nsr_vec, 'b-', 'LineWidth', 2);
plot(rel, Pc_nsr_vec, 'b--', 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Relación L/HL');
ylabel('Fuerza (kN)');
title(['Fuerzas impulsiva y convectiva vs L/HL - ', ciudad_buscada]);
legend off
legend('Pi AIS', 'Pc AIS', 'Pi NSR', 'Pc NSR');

%% =====
% INTERPRETACIÓN - MOMENTO BASAL
% =====
[M_max_nsr, idx_max_nsr] = max(M_nsr);
[M_min_nsr, idx_min_nsr] = min(M_nsr);
[M_max_ais, idx_max_ais] = max(M_ais);
[M_min_ais, idx_min_ais] = min(M_ais);

%% =====
% INTERPRETACIÓN - CORTANTE BASAL
% =====
[V_max_nsr, idxV_max_nsr] = max(V_nsr);
[V_min_nsr, idxV_min_nsr] = min(V_nsr);
[V_max_ais, idxV_max_ais] = max(V_ais);
[V_min_ais, idxV_min_ais] = min(V_ais);
fprintf('\n=====');

```

Figura E6.

Comparación de resultados entre ciudades.

```

fprintf(' INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS - GEOMETRÍA\n');
fprintf('=====\\n');

% --- NSR ---
fprintf('* En la NSR-10, la geometría que desarrolla el MAYOR momento basal es: %s.\\n',
Geometria{idx_max_nsr});
fprintf(' Valor máximo de M = %.2f kN.m.\\n', M_max_nsr);
fprintf('* En la NSR-10, la geometría con MENOR demanda de momento basal es: %s.\\n',
Geometria{idx_min_nsr});
fprintf(' Valor mínimo de M = %.2f kN.m.\\n', M_min_nsr);

% --- AIS ---
fprintf('* En la AIS 100-24, la geometría que desarrolla el MAYOR momento basal es: %s.\\n',
Geometria{idx_max_ais});
fprintf(' Valor máximo de M = %.2f kN.m.\\n', M_max_ais);
fprintf('* En la AIS 100-24, la geometría con MENOR demanda de momento basal es: %s.\\n',
Geometria{idx_min_ais});
fprintf(' Valor mínimo de M = %.2f kN.m.\\n', M_min_ais);
fprintf('* Lo anterior confirma que la geometría del tanque constituye un parámetro\\n');
fprintf(' determinante en la demanda sísmica, siendo el momento basal el\\n');
fprintf(' parámetro gobernante en la respuesta del fluido.\\n');
fprintf('=====\\n');
fprintf('\\n=====\\n');
fprintf(' INTERPRETACIÓN AUTOMÁTICA DE RESULTADOS - CORTANTE BASAL\\n');
fprintf('=====\\n');

% --- NSR ---
fprintf('* En la NSR-10, el mayor cortante basal del fluido se presenta en la geometría:
%s,\\n', Geometria{idxV_max_nsr});
fprintf(' con un valor de V = %.2f kN.\\n', V_max_nsr);
fprintf('* En la NSR-10, el menor cortante basal corresponde a la geometría: %s,\\n',
Geometria{idxV_min_nsr});
fprintf(' con un valor de V = %.2f kN.\\n', V_min_nsr);

% --- AIS ---
fprintf('* En la AIS 100-24, el mayor cortante basal del fluido se presenta en la geometría:
%s,\\n', Geometria{idxV_max_ais});
fprintf(' con un valor de V = %.2f kN.\\n', V_max_ais);
fprintf('* En la AIS 100-24, el menor cortante basal corresponde a la geometría: %s,\\n',
Geometria{idxV_min_ais});
fprintf(' con un valor de V = %.2f kN.\\n', V_min_ais);
fprintf('* Se observa que el cortante basal presenta variaciones moderadas entre\\n');
fprintf(' las diferentes configuraciones geométricas, lo que indica que este\\n');
fprintf(' parámetro depende principalmente de la demanda sísmica del sitio\\n');
fprintf(' y de la masa total del fluido.\\n');
fprintf('=====\\n');

%% =====
% COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE CIUDADES
% =====
gammaL = 9.81;
g = 9.81;
ciudades = {'Riohacha', 'Arauca', 'Mocoa', 'Popayán', 'Florencia', 'Yopal'};
V_nsr_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
V_ais_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
M_nsr_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
M_ais_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
for c = 1:length(ciudades)
ciudad_buscada = ciudades{c};

% === RECARGAR PARÁMETROS DE LA CIUDAD ===
idx = db(ciudad_buscada);
Sms = sms_ais(idx);

```

```

Sml = sml_ais(idx);
Sds = (2/3)*Sms*Fa;
Sdl = (2/3)*Sml*Fv;
Aa = aa_nsr(idx);
Av = av_nsr(idx);
Sds_nsr = 2.5 * Aa * Fa;
Sdl_nsr = 1.2 * Av * Fv;

% === GEOMETRIA (Intermedia) ===
L = 8.0;
HL = 3.5;
B = 4.5;

% --- PESO ---
WL = L * B * HL * gammaL;

% --- MASAS ---
Wi = WL * tanh(0.866*(L/HL)) / (0.866*(L/HL));
Wc = WL * 0.264 * (L/HL) * tanh(3.16*(HL/L));

% --- ALTURAS DE APLICACIÓN ---
if (L/HL) >= 1.333
    hi = 0.375 * HL;
else
    hi = HL * (0.5 - 0.09375*(L/HL));
end
hc = HL * (1 - (cosh(3.16*(HL/L)) - 1) / ...
    (3.16*(HL/L)*sinh(3.16*(HL/L))));

% --- PERIODO ---
Tc = 2*pi / sqrt((3.16*g/L) * tanh(3.16*(HL/L)));

% --- AIS ---
if Tc <= TL
    Cc_ais = 1.5 * Sdl / Tc;
else
    Cc_ais = 1.5 * Sdl * TL / (Tc^2);
end
Cc_ais = min(Cc_ais, 1.5 * Sds);
Ci_ais = Sds;
Pi_ais = (Ci_ais * I * Wi) / Ri;
Pc_ais = (Cc_ais * I * Wc) / Rc;
V_ais_ciudad(c) = sqrt(Pi_ais^2 + Pc_ais^2);
M_ais_ciudad(c) = sqrt((Pi_ais*hi)^2 + (Pc_ais*hc)^2);

% --- NSR ---
if Tc <= TL
    Cc_nsr = 1.5 * Sdl_nsr / Tc;
else
    Cc_nsr = 1.5 * Sdl_nsr * TL / (Tc^2);
end
Cc_nsr = min(Cc_nsr, 1.5 * Sds_nsr);
Ci_nsr = Sds_nsr;
Pi_nsr = (Ci_nsr * I * Wi) / Ri;
Pc_nsr = (Cc_nsr * I * Wc) / Rc;
V_nsr_ciudad(c) = sqrt(Pi_nsr^2 + Pc_nsr^2);
M_nsr_ciudad(c) = sqrt((Pi_nsr*hi)^2 + (Pc_nsr*hc)^2);
end

% === DIFERENCIA PORCENTUAL ===
delta_V_ciudad = (V_ais_ciudad - V_nsr_ciudad)./V_nsr_ciudad * 100;
delta_V_ciudad = round(delta_V_ciudad,1);
delta_M_ciudad = (M_ais_ciudad - M_nsr_ciudad)./M_nsr_ciudad * 100;

```

```

delta_M_ciudad = round(delta_M_ciudad,1);

% === TABLA ===
Tabla_Ciudades = table(ciudades', V_nsr_ciudad, V_ais_ciudad, delta_V_ciudad, ...
M_nsr_ciudad, M_ais_ciudad, delta_M_ciudad, ...
'VariableNames',{'Ciudad','V_NSR','V_AIS','Delta_V','M_NSR','M_AIS','Delta_M'});
fprintf('\n===== \n');
fprintf(' COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE CIUDADES (Intermedia) \n');
fprintf('===== \n');
disp(Tabla_Ciudades);
figure(5); clf;
set(gcf,'Color','w');
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[2 2 30 16]);
hold on;
colores_base = [
0.5 0 0.5; % Morado (Riohacha)
0 0.6 0; % Verde (Arauca)
0 0.4 0.8; % Azul (Mocoa)
0.8 0.3 0; % Naranja (Popayán)
0.6 0 0; % Rojo (Florencia)
0.2 0.2 0.2 % Gris (Yopal)
];
labels_ciudades = {
'Riohacha (Baja)'
'Arauca (Intermedia)'
'Mocoa (Alta)'
'Popayán (Alta)'
'Florencia (Intermedia)'
'Yopal (Alta)'
};
for i = 1:length(ciudades)
color_base = colores_base(i,:);
color_oscuero = color_base;
color_claro = color_base + 0.3*(1 - color_base);
x = i;
h_nsr = bar(x - 0.15, V_nsr_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_oscuero, 'EdgeColor','k');
h_ais = bar(x + 0.15, V_ais_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_claro, 'EdgeColor','k');
y_text = max(V_nsr_ciudad(i), V_ais_ciudad(i))*1.04;
text(x, y_text, sprintf('%.1f%%', delta_V_ciudad(i)), ...
'HorizontalAlignment','center', ...
'VerticalAlignment','bottom', ...
'FontSize',12, ...
'FontWeight','bold', ...
'Clipping','off');
end
grid on;
xlim([0 length(ciudades)+1]);
ylim([0 max([V_nsr_ciudad; V_ais_ciudad])*1.20]);
set(gca,'XTick',1:length(ciudades), ...
'XTickLabel', labels_ciudades, ...
'TickLabelInterpreter','tex', ...
'FontSize',13, ...
'FontName','Times New Roman');
xtickangle(25);
xlabel('Ciudad y nivel de amenaza sísmica');
ylabel('Cortante basal hidrodinámico, V (kN)');
title('Comparación del cortante basal hidrodinámico por ciudad - geometría intermedia (L/H_L
= 2.29)');
legend([h_nsr h_ais], {'NSR-10','AIS 100-24'}, ...
'Location','northwest', ...
'Box','off', ...

```



```

'FontSize',12);
box on;
figure(6); clf;
set(gcf,'Color','w');
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[2 2 30 16]);
hold on;
colores_base = [
0.5 0 0.5;      % Riohacha
0 0.6 0;        % Arauca
0 0.4 0.8;      % Mocoa
0.8 0.3 0;      % Popayan
0.6 0 0;        % Florencia
0.2 0.2 0.2     % Yopal
];
labels_ciudades = {
'Riohacha (Baja)'
'Arauca (Intermedia)'
'Mocoa (Alta)'
'Popayan (Alta)'
'Florencia (Intermedia)'
'Yopal (Alta)'
};
ymax = max([M_nsr_ciudad; M_ais_ciudad]);
y_offset = 0.04*ymax;
for i = 1:length(labels_ciudades)
color_base = colores_base(i,:);
color_oscuero = color_base;
color_claro = color_base + 0.3*(1 - color_base);
x = i;
bar(x - 0.15, M_nsr_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_oscuero, ...
'EdgeColor','k');
bar(x + 0.15, M_ais_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_claro, ...
'EdgeColor','k');
y_text = max(M_nsr_ciudad(i), M_ais_ciudad(i)) + y_offset;
text(x, y_text, sprintf('%.1f%%', delta_M_ciudad(i)), ...
'HorizontalAlignment','center', ...
'VerticalAlignment','bottom', ...
'FontSize',12, ...
'FontWeight','bold', ...
'Clipping','off');
end
grid on;
xlim([0 length(labels_ciudades)+1]);
ylim([0 ymax*1.28]);
set(gca,'XTick',1:length(labels_ciudades), ...
'XTickLabel', labels_ciudades, ...
'TickLabelInterpreter','tex', ...
'FontSize',13, ...
'FontName','Times New Roman');
xtickangle(25);
xlabel('Ciudad y nivel de amenaza sísmica');
ylabel('Momento de volcamiento en la base del tanque, M (kN*m)');
title('Comparación del momento de volcamiento en la base del tanque por ciudad - geometría
intermedia (L/HL = 2.29)');
h_nsr = bar(nan, nan, 0.3, ...
'FaceColor',[0.25 0.25 0.25], ...
'EdgeColor','k');
h_ais = bar(nan, nan, 0.3, ...
'FaceColor',[0.75 0.75 0.75], ...
'EdgeColor','k');
legend([h_nsr h_ais], {'NSR-10','AIS 100-24'}, ...

```

```

'Location','northwest', ...
'Box','off', ...
'FontSize',12);
box on;

%% =====
% COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE CIUDADES
% =====
gammaL = 9.81;
g = 9.81;
ciudades = {'Riohacha','Arauca','Mocoa','Popayán','Florencia','Yopal'};
V_nsr_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
V_ais_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
M_nsr_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
M_ais_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
for c = 1:length(ciudades)
    ciudad_buscada = ciudades{c};

    % === PARÁMETROS DE LA CIUDAD ===
    idx = db(ciudad_buscada);
    Sms = sms_ais(idx);
    Sml = sml_ais(idx);
    Sds = (2/3)*Sms*Fa;
    Sdl = (2/3)*Sml*Fv;
    Aa = aa_nsr(idx);
    Av = av_nsr(idx);
    Sds_nsr = 2.5 * Aa * Fa;
    Sdl_nsr = 1.2 * Av * Fv;

    % === GEOMETRIA (Ancha) ===
    L = 10.0;
    HL = 3.0;
    B = 4.5;

    % --- PESO ---
    WL = L * B * HL * gammaL;

    % --- MASAS ---
    Wi = WL * tanh(0.866*(L/HL)) / (0.866*(L/HL));
    Wc = WL * 0.264 * (L/HL) * tanh(3.16*(HL/L));

    % --- ALTURAS DE APLICACIÓN ---
    if (L/HL) >= 1.333
        hi = 0.375 * HL;
    else
        hi = HL * (0.5 - 0.09375*(L/HL));
    end
    hc = HL * (1 - (cosh(3.16*(HL/L)) - 1) / ...
        (3.16*(HL/L)*sinh(3.16*(HL/L))));

    % --- PERIODO ---
    Tc = 2*pi / sqrt((3.16*g/L) * tanh(3.16*(HL/L)));

    % --- AIS ---
    if Tc <= TL
        Cc_ais = 1.5 * Sdl / Tc;
    else
        Cc_ais = 1.5 * Sdl * TL / (Tc^2);
    end
    Cc_ais = min(Cc_ais, 1.5 * Sds);
    Ci_ais = Sds;
    Pi_ais = (Ci_ais * I * Wi) / Ri;
    Pc_ais = (Cc_ais * I * Wc) / Rc;

    % =====
    'EdgeColor','k');
    y_text = max(V_nsr_ciudad(i), V_ais_ciudad(i)) + y_offset;

```

```

text(x, y_text, sprintf('%.1f%%', delta_V_ciudad(i)), ...
'HorizontalAlignment','center', ...
'VerticalAlignment','bottom', ...
'FontSize',12, ...
'FontWeight','bold', ...
'Clipping','off');
end
grid on;
xlim([0 length(labels_ciudades)+1]);
ylim([0 ymax*1.28]);
set(gca,'XTick',1:length(labels_ciudades), ...
'XTickLabel', labels_ciudades, ...
'TickLabelInterpreter','tex', ...
'FontSize',13, ...
'FontName','Times New Roman');
xtickangle(25);
xlabel('Ciudad y nivel de amenaza sísmica');
ylabel('Cortante basal hidrodinámico, V (kN)');
title('Comparación del cortante basal hidrodinámico por ciudad - geometría ancha (L/HL =
3.33)');
h_nsr = bar(nan, nan, 0.3, ...
'FaceColor',[0.25 0.25 0.25], ...
'EdgeColor','k');
h_ais = bar(nan, nan, 0.3, ...
'FaceColor',[0.75 0.75 0.75], ...
'EdgeColor','k');
legend([h_nsr h_ais], {'NSR-10','AIS 100-24'}, ...
'Location','northwest', ...
'Box','off', ...
'FontSize',12);
box on;
figure(8); clf;
set(gcf,'Color','w');
set(gcf,'Units','centimeters','Position',[2 2 30 16]);
hold on;
colores_base = [
0.5 0 0.5;      % Riohacha
0 0.6 0;        % Arauca
0 0.4 0.8;      % Mocoa
0.8 0.3 0;      % Popayan
0.6 0 0;        % Florencia
0.2 0.2 0.2    % Yopal
];
labels_ciudades = {
'Riohacha (Baja)'
'Arauca (Intermedia)'
'Mocoa (Alta)'
'Popayan (Alta)'
'Florencia (Intermedia)'
'Yopal (Alta)'
};
ymax = max([M_nsr_ciudad; M_ais_ciudad]);
y_offset = 0.04*ymax;
for i = 1:length(labels_ciudades)
color_base = colores_base(i,:);
color_oscuero = color_base;
color_claro = color_base + 0.3*(1 - color_base);
x = i;
bar(x - 0.15, M_nsr_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_oscuero, ...
'EdgeColor','k');
bar(x + 0.15, M_ais_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_claro, ...

```

```

'EdgeColor','k');
y_text = max(M_nsr_ciudad(i), M_ais_ciudad(i)) + y_offset;
text(x, y_text, sprintf('%.1f%%', delta_M_ciudad(i)), ...
'HorizontalAlignment','center', ...
'VerticalAlignment','bottom', ...
'FontSize',12, ...
'FontWeight','bold', ...
'Clipping','off');
end
grid on;
xlim([0 length(labels_ciudades)+1]);
ylim([0 ymax*1.28]);
set(gca,'XTick',1:length(labels_ciudades), ...
'XTickLabel', labels_ciudades, ...
'TickLabelInterpreter','tex', ...
'FontSize',13, ...
'FontName','Times New Roman');
xtickangle(25);
xlabel('Ciudad y nivel de amenaza sísmica');
ylabel('Momento de volcamiento en la base del tanque, M (kN.m)');
title('Comparación del momento de volcamiento en la base del tanque por ciudad - geometría
ancha (L/HL = 3.33)');
h_nsr = bar(nan, nan, 0.3, ...
'FaceColor',[0.25 0.25 0.25], ...
'EdgeColor','k');
h_ais = bar(nan, nan, 0.3, ...
'FaceColor',[0.75 0.75 0.75], ...
'EdgeColor','k');
legend([h_nsr h_ais], {'NSR-10','AIS 100-24'}, ...
'Location','northwest', ...
'Box','off', ...
'FontSize',12);
box on;

%% =====
% COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE CIUDADES
% =====
gammaL = 9.81;
g = 9.81;
ciudades = {'Riohacha','Arauca','Mocoa','Popayán','Florencia','Yopal'};
V_nsr_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
V_ais_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
M_nsr_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
M_ais_ciudad = zeros(length(ciudades),1);
for c = 1:length(ciudades)
ciudad_buscada = ciudades{c};

% === PARÁMETROS DE LA CIUDAD ===
idx = db(ciudad_buscada);
Sms = sms_ais(idx);
Sml = sml_ais(idx);
Sds = (2/3)*Sms*Fa;
Sdl = (2/3)*Sml*Fv;
Aa = aa_nsr(idx);
Av = av_nsr(idx);
Sds_nsr = 2.5 * Aa * Fa;
Sdl_nsr = 1.2 * Av * Fv;

% === GEOMETRIA (Esbelta) ===
L = 6.0;
HL = 4.5;
B = 4.5;

```



```

% --- PESO ---
WL = L * B * HL * gammaL;

% --- MASAS ---
Wi = WL * tanh(0.866*(L/HL)) / (0.866*(L/HL));
Wc = WL * 0.264 * (L/HL) * tanh(3.16*(HL/L));

% --- ALTURAS DE APLICACIÓN ---
if (L/HL) >= 1.333
    hi = 0.375 * HL;
else
    hi = HL * (0.5 - 0.09375*(L/HL));
end
hc = HL * (1 - (cosh(3.16*(HL/L)) - 1) / ...
    (3.16*(HL/L)*sinh(3.16*(HL/L))));

% --- PERIODO ---
Tc = 2*pi / sqrt((3.16*g/L) * tanh(3.16*(HL/L)));

% --- AIS ---
if Tc <= TL
    Cc_ais = 1.5 * Sd1 / Tc;
else
    Cc_ais = 1.5 * Sd1 * TL / (Tc^2);
end
Cc_ais = min(Cc_ais, 1.5 * Sds);
Ci_ais = Sds;
Pi_ais = (Ci_ais * I * Wi) / Ri;
Pc_ais = (Cc_ais * I * Wc) / Rc;
V_ais_ciudad(c) = sqrt(Pi_ais^2 + Pc_ais^2);
M_ais_ciudad(c) = sqrt((Pi_ais*hi)^2 + (Pc_ais*hc)^2);

% --- NSR ---
if Tc <= TL
    Cc_nsr = 1.5 * Sd1_nsr / Tc;
else
    Cc_nsr = 1.5 * Sd1_nsr * TL / (Tc^2);
end
Cc_nsr = min(Cc_nsr, 1.5 * Sds_nsr);
Ci_nsr = Sds_nsr;
Pi_nsr = (Ci_nsr * I * Wi) / Ri;
Pc_nsr = (Cc_nsr * I * Wc) / Rc;
V_nsr_ciudad(c) = sqrt(Pi_nsr^2 + Pc_nsr^2);
M_nsr_ciudad(c) = sqrt((Pi_nsr*hi)^2 + (Pc_nsr*hc)^2);
End

% === DIFERENCIA PORCENTUAL ===
delta_V_ciudad = (V_ais_ciudad - V_nsr_ciudad)./V_nsr_ciudad * 100;
delta_V_ciudad = round(delta_V_ciudad,1);
delta_M_ciudad = (M_ais_ciudad - M_nsr_ciudad)./M_nsr_ciudad * 100;
delta_M_ciudad = round(delta_M_ciudad,1);

% === TABLA ===
Tabla_Ciudades = table(ciudades', V_nsr_ciudad, V_ais_ciudad, delta_V_ciudad, ...
    M_nsr_ciudad, M_ais_ciudad, delta_M_ciudad, ...
    'VariableNames',{'Ciudad','V_NSR','V_AIS','Delta_V','M_NSR','M_AIS','Delta_M'});
fprintf('\n===== \n');
fprintf(' COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE CIUDADES (Esbelta) \n');
fprintf('===== \n');
disp(Tabla_Ciudades);
figure(9); clf;
set(gcf, 'Color', 'w');
set(gcf, 'Units', 'centimeters', 'Position', [2 2 30 16]);

```

```

hold on;
colores_base = [
0.5 0 0.5;      % Riohacha
0 0.6 0;        % Arauca
0 0.4 0.8;      % Mocoa
0.8 0.3 0;      % Popayán
0.6 0 0;        % Florencia
0.2 0.2 0.2     % Yopal
];
labels_ciudades = {
'Riohacha (Baja)'
'Arauca (Intermedia)'
'Mocoa (Alta)'
'Popayán (Alta)'
'Florencia (Intermedia)'
'Yopal (Alta)'
};
ymax = max([V_nsr_ciudad; V_ais_ciudad]);
y_offset = 0.04*ymax;
for i = 1:length(labels_ciudades)
color_base = colores_base(i,:);
color_oscuero = color_base;
color_claro = color_base + 0.3*(1 - color_base);
x = i;
h_nsr = bar(x - 0.15, V_nsr_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_oscuero, ...
'EdgeColor', 'k');
h_ais = bar(x + 0.15, V_ais_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_claro, ...
'EdgeColor', 'k');
y_text = max(V_nsr_ciudad(i), V_ais_ciudad(i)) + y_offset;
text(x, y_text, sprintf('%.1f%%', delta_V_ciudad(i)), ...
'HorizontalAlignment', 'center', ...
'VerticalAlignment', 'bottom', ...
'FontSize', 12, ...
'FontWeight', 'bold', ...
'Clipping', 'off');
end
grid on;
xlim([0 length(labels_ciudades)+1]);
ylim([0 ymax*1.28]);
set(gca, 'XTick', 1:length(labels_ciudades), ...
'XTickLabel', labels_ciudades, ...
'TickLabelInterpreter', 'tex', ...
'FontSize', 13, ...
'FontName', 'Times New Roman');
xtickangle(25);
xlabel('Ciudad y nivel de amenaza sísmica');
ylabel('Cortante basal hidrodinámico, V (kN)');
title('Comparación del cortante basal hidrodinámico por ciudad - geometría esbelta (L/HL = 1.33)');
legend([h_nsr h_ais], {'NSR-10', 'AIS 100-24'}, ...
'Location', 'northwest', ...
'Box', 'off', ...
'FontSize', 12);
box on;
figure(10); clf;
set(gcf, 'Color', 'w');
set(gcf, 'Units', 'centimeters', 'Position', [2 2 30 16]);
hold on;
colores_base = [
0.5 0 0.5;      % Riohacha
0 0.6 0;        % Arauca

```

Figura E7.

Generación de gráficas comparativas y curvas de nivel para el análisis de resultados.

```

0 0.4 0.8;      % Mocoa
0.8 0.3 0;      % Popayán
0.6 0 0;        % Florencia
0.2 0.2 0.2     % Yopal
];
labels_ciudades = {
'RiohaCha (Baja)'
'Arauca (Intermedia)'
'Mocoa (Alta)'
'Popayán (Alta)'
'Florencia (Intermedia)'
'Yopal (Alta)'
};
ymax = max([M_nsr_ciudad; M_ais_ciudad]);
y_offset = 0.04*ymax;
for i = 1:length(labels_ciudades)
color_base = colores_base(i,:);
color_oscuro = color_base;
color_claro = color_base + 0.3*(1 - color_base);
x = i;
h_nsr = bar(x - 0.15, M_nsr_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_oscuro, ...
'EdgeColor','k');
h_ais = bar(x + 0.15, M_ais_ciudad(i), 0.3, ...
'FaceColor', color_claro, ...
'EdgeColor','k');
y_text = max(M_nsr_ciudad(i), M_ais_ciudad(i)) + y_offset;
text(x, y_text, sprintf('%0.1f%%', delta_M_ciudad(i)), ...
'HorizontalAlignment','center', ...
'VerticalAlignment','bottom', ...
'FontSize',12, ...
'FontWeight','bold', ...
'Clipping','off');
end
grid on;
xlim([0 length(labels_ciudades)+1]);
ylim([0 ymax*1.28]);
set(gca,'XTick',1:length(labels_ciudades), ...
'XTickLabel', labels_ciudades, ...
'TickLabelInterpreter','tex', ...
'FontSize',13, ...
'FontName','Times New Roman');
xtickangle(25);
xlabel('Ciudad y nivel de amenaza sísmica');
ylabel('Momento de volcamiento en la base del tanque, M (kN·m)');
title('Comparación del momento de volcamiento en la base del tanque por ciudad - geometría
esbelta (L/HL = 1.33)');
legend([h_nsr h_ais], {'NSR-10','AIS 100-24'}, ...
'Location','northwest', ...
'Box','off', ...
'FontSize',12);
box on;

%% =====
% EVALUACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS (Sms y Sml) - AIS 100-24 GEOMETRIA INTERMEDIA
% =====
i_geom = 1;
nombre_geom = geom(i_geom).nombre;
Sms_escenarios = [0.19 0.304 0.418 0.532 0.646 ...
0.76 0.874 0.988 1.102 1.216 1.33];
Sml_escenarios = [0.09 0.141 0.192 0.243 0.294 ...
0.345 0.396 0.447 0.498 0.549 0.60];
V_escenarios = zeros(length(Sms_escenarios),length(Sml_escenarios));

```

```

M_escenarios = zeros(length(Sms_escenarios),length(Sml_escenarios));
clear Wi Wc hi hc Tc
L = geom(i_geom).L;
HL = geom(i_geom).HL;
B = 4.5;
gammaL = 9.81;
g_const = 9.81;
WL = L * B * HL * gammaL;
Wi = WL * tanh(0.866*(L/HL)) / (0.866*(L/HL));
Wc = WL * 0.264 * (L/HL) * tanh(3.16*(HL/L));
% alturas
if (L/HL) >= 1.333
hi = 0.375 * HL;
else
hi = HL * (0.5 - 0.09375*(L/HL));
end
hc = HL * (1 - (cosh(3.16*(HL/L)) - 1) / ...

(3.16*(HL/L)*sinh(3.16*(HL/L))));
% periodo convectivo
Tc = 2*pi / sqrt((3.16*g_const/L) * tanh(3.16*(HL/L)));
for i = 1:length(Sms_escenarios)
for j = 1:length(Sml_escenarios)
Sms = Sms_escenarios(i);
Sml = Sml_escenarios(j);
Sds = (2/3)*Sms*Fa;
Sdl = (2/3)*Sml*Fv;
Ci = Sds;
if Tc <= TL
Cc = 1.5*Sdl/Tc;
else
Cc = 1.5*Sdl*TL/(Tc^2);
end
Cc = min(Cc,1.5*Sds);
Pi = (Ci*I*Wi)/Ri;
Pc = (Cc*I*Wc)/Rc;
V_escenarios(i,j) = sqrt(Pi^2 + Pc^2);
M_escenarios(i,j) = sqrt((Pi*hi)^2 + (Pc*hc)^2);
end
end
[SMS,SM1] = meshgrid(Sms_escenarios,Sml_escenarios);

% GRÁFICAS DE CURVAS DE NIVEL
%% ===== CORTANTE =====
figure(10 + 2*i_geom - 1); clf;
set(gcf,'Color','w');
contourf(SMS, SM1, V_escenarios', 15); hold on;
contour(SMS, SM1, V_escenarios', 15, 'k');
colormap(jet)
colorbar
xlabel('Sms')
ylabel('Sml')
title(['Curvas de nivel - Cortante basal - Geometría ', nombre_geom], ...
'FontWeight','bold')
grid on
axis tight

% ===== MAX Y MIN =====
[Vmax, idxMax] = max(V_escenarios(:));
[Vmin, idxMin] = min(V_escenarios(:));
Sms_max = SMS(idxMax);
Sml_max = SM1(idxMax);
Sms_min = SMS(idxMin);

```

```

Sml_min = Sml(idxMin);
txtV = sprintf(['Máx: Sms=%.2f Sml=%.2f V=%.1f | ', ...
'Min: Sms=%.2f Sml=%.2f V=%.1f'], ...
Sms_max, Sml_max, Vmax, ...
Sms_min, Sml_min, Vmin);
annotation('textbox',[0.15 0.02 0.7 0.05], ...
'String',txtV, ...
'FontSize',10,'FontWeight','bold', ...
'EdgeColor','k', ...
'BackgroundColor','w', ...
'HorizontalAlignment','center');
cb = colorbar;
ylabel(cb,'Cortante basal (kN)');

%% ===== MOMENTO =====
figure(10 + 2*i_geom); clf;
set(gcf,'Color','w');
contourf(SMS, Sml, M_escenarios', 15); hold on;
contour(SMS, Sml, M_escenarios', 15, 'k');
colormap(jet)
colorbar
xlabel('Sms')
ylabel('Sml')
title(['Curvas de nivel - Momento basal - Geometría ', nombre_geom], ...
'FontWeight','bold')
grid on
axis tight
cb = colorbar;
ylabel(cb,'Momento basal (kN·m)')

% ===== MAX Y MIN =====
[Mmax, idxMax] = max(M_escenarios(:));
[Mmin, idxMin] = min(M_escenarios(:));
Sms_max = SMS(idxMax);
Sml_max = Sml(idxMax);
Sms_min = SMS(idxMin);
Sml_min = Sml(idxMin);
txtM = sprintf(['Máx: Sms=%.2f Sml=%.2f M=%.1f | ', ...
'Min: Sms=%.2f Sml=%.2f M=%.1f'], ...
Sms_max, Sml_max, Mmax, ...
Sms_min, Sml_min, Mmin);
annotation('textbox',[0.15 0.02 0.7 0.05], ...
'String',txtM, ...
'FontSize',10,'FontWeight','bold', ...
'EdgeColor','k', ...
'BackgroundColor','w', ...
'HorizontalAlignment','center');

% =====
% TABLA DE RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS SÍSMICOS
% =====
Tabla_Escenarios = table( ...
SMS(:), ...
Sml(:), ...
V_escenarios(:), ...
M_escenarios(:), ...
'VariableNames', ...
{'Sms','Sml','Cortante_basal_kN','Momento_basal_kNm'});
disp(' ');
disp('=====');
disp([' RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS SÍSMICOS - GEOMETRÍA ', upper(nombre_geom)]);
disp('=====');
disp(Tabla_Escenarios);

```



```

fprintf('\n=====');
fprintf('RESUMEN DE RESULTADOS - %s\n', upper(nombre_geom));
fprintf('=====');
fprintf('\nCORTANTE MÁXIMO:\n');
fprintf('V = %.2f kN\n', Vmax);
fprintf('Sms = %.3f | Sml = %.3f\n', ...
SMS(idxMax), SML(idxMax));
fprintf('\nCORTANTE MÍNIMO:\n');
fprintf('V = %.2f kN\n', Vmin);
fprintf('Sms = %.3f | Sml = %.3f\n', ...
SMS(idxMin), SML(idxMin));
fprintf('\nMOMENTO MÁXIMO:\n');
fprintf('M = %.2f kN·m\n', Mmax);
fprintf('Sms = %.3f | Sml = %.3f\n', ...
SMS(idxMax), SML(idxMax));
fprintf('\nMOMENTO MÍNIMO:\n');
fprintf('M = %.2f kN·m\n', Mmin);
fprintf('Sms = %.3f | Sml = %.3f\n', ...
SMS(idxMin), SML(idxMin));

%% =====
% EVALUACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS (Sms y Sml) - AIS 100-24 GEOMETRIA ANCHA
% =====
i_geom = 2;
nombre_geom = geom(i_geom).nombre;
Sms_escenarios = [0.19 0.304 0.418 0.532 0.646 ...
0.76 0.874 0.988 1.102 1.216 1.33];
Sml_escenarios = [0.09 0.141 0.192 0.243 0.294 ...
0.345 0.396 0.447 0.498 0.549 0.60];
V_escenarios = zeros(length(Sms_escenarios),length(Sml_escenarios));
M_escenarios = zeros(length(Sms_escenarios),length(Sml_escenarios));
L = geom(i_geom).L;
HL = geom(i_geom).HL;
B = 4.5;
gammaL = 9.81;
g_const = 9.81;
WL = L * B * HL * gammaL;
Wi = WL * tanh(0.866*(L/HL)) / (0.866*(L/HL));
Wc = WL * 0.264 * (L/HL) * tanh(3.16*(HL/L));

% alturas
if (L/HL) >= 1.333
hi = 0.375 * HL;
else
hi = HL * (0.5 - 0.09375*(L/HL));
end
hc = HL * (1 - (cosh(3.16*(HL/L)) - 1) / ...
(3.16*(HL/L)*sinh(3.16*(HL/L))));

% periodo convectivo
Tc = 2*pi / sqrt((3.16*g_const/L) * tanh(3.16*(HL/L)));
for i = 1:length(Sms_escenarios)
for j = 1:length(Sml_escenarios)
Sms = Sms_escenarios(i);
Sml = Sml_escenarios(j);
Sds = (2/3)*Sms*Fa;
Sdl = (2/3)*Sml*Fv;
Ci = Sds;
if Tc <= TL
Cc = 1.5*Sdl/Tc;
else
Cc = 1.5*Sdl*TL/(Tc^2);
end

```

```

Cc = min(Cc,1.5*Sds);
Pi = (Ci*I*Wi)/Ri;
Pc = (Cc*I*Wc)/Rc;
V_escenarios(i,j) = sqrt(Pi^2 + Pc^2);
M_escenarios(i,j) = sqrt((Pi*hi)^2 + (Pc*hc)^2);
end
end
[SMS,SM1] = meshgrid(Sms_escenarios,Sm1_escenarios);

% GRÁFICAS DE CURVAS DE NIVEL
%% ===== CORTANTE =====
figure(10 + 2*i_geom - 1); clf;
set(gcf,'Color','w');
contourf(SMS, SM1, V_escenarios', 15); hold on;
contour(SMS, SM1, V_escenarios', 15, 'k');
colormap(jet)
colorbar
xlabel('Sms')
ylabel('Sm1')
title(['Curvas de nivel - Cortante basal - Geometría ', nombre_geom], ...
'FontWeight','bold')
grid on
axis tight

% ===== MAX Y MIN =====
[Vmax, idxMax] = max(V_escenarios(:));
[Vmin, idxMin] = min(V_escenarios(:));
Sms_max = SMS(idxMax);
Sm1_max = SM1(idxMax);
Sms_min = SMS(idxMin);
Sm1_min = SM1(idxMin);
txtV = sprintf(['Máx: Sms=%.2f Sm1=%.2f V=%.1f | ', ...
'Min: Sms=%.2f Sm1=%.2f V=%.1f'], ...
Sms_max, Sm1_max, Vmax, ...
Sms_min, Sm1_min, Vmin);
annotation('textbox',[0.15 0.02 0.7 0.05], ...
'String',txtV, ...
'FontSize',10,'FontWeight','bold', ...
'EdgeColor','k', ...
'BackgroundColor','w', ...
'HorizontalAlignment','center');
cb = colorbar;
ylabel(cb,'Cortante basal (kN)');

%% ===== MOMENTO =====
figure(10 + 2*i_geom); clf;
set(gcf,'Color','w');
contourf(SMS, SM1, M_escenarios', 15); hold on;
contour(SMS, SM1, M_escenarios', 15, 'k');
colormap(jet)
colorbar
xlabel('Sms')
ylabel('Sm1')
title(['Curvas de nivel - Momento basal - Geometría ', nombre_geom], ...
'FontWeight','bold')
grid on
axis tight
cb = colorbar;
ylabel(cb,'Momento basal (kN·m)');

% ===== MAX Y MIN =====
[Mmax, idxMax] = max(M_escenarios(:));
[Mmin, idxMin] = min(M_escenarios(:));

```

```

Sms_max = SMS(idxMax);
Sml_max = SML(idxMax);
Sms_min = SMS(idxMin);
Sml_min = SML(idxMin);
txtM = sprintf(['Máx: Sms=%.2f Sml=%.2f M=%.1f | ', ...
'Min: Sms=%.2f Sml=%.2f M=%.1f'], ...
Sms_max, Sml_max, Mmax, ...
Sms_min, Sml_min, Mmin);
annotation('textbox',[0.15 0.02 0.7 0.05], ...
'String',txtM, ...
'FontSize',10,'FontWeight','bold', ...
'EdgeColor','k', ...
'BackgroundColor','w', ...
'HorizontalAlignment','center');

% =====
% TABLA DE RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS SÍSMICOS
% =====
Tabla_Escenarios = table( ...
SMS(:), ...
SML(:), ...
V_escenarios(:), ...
M_escenarios(:), ...
'VariableNames', ...
{'Sms','Sml','Cortante_basal_kN','Momento_basal_kNm'});
disp(' ');
disp('=====');
disp([' RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS SÍSMICOS - GEOMETRÍA ', upper(nombre_geom)]);
disp('=====');
disp(Tabla_Escenarios);
fprintf('\n=====');
fprintf('RESUMEN DE RESULTADOS - %s\n', upper(nombre_geom));
fprintf('=====');
fprintf('\nCORTANTE MÁXIMO:\n');
fprintf('V = %.2f kN\n', Vmax);
fprintf('Sms = %.3f | Sml = %.3f\n', ...
SMS(idxMax), SML(idxMax));
fprintf('\nCORTANTE MÍNIMO:\n');
fprintf('V = %.2f kN\n', Vmin);
fprintf('Sms = %.3f | Sml = %.3f\n', ...
SMS(idxMin), SML(idxMin));
fprintf('\nMOMENTO MÁXIMO:\n');
fprintf('M = %.2f kN·m\n', Mmax);
fprintf('Sms = %.3f | Sml = %.3f\n', ...
SMS(idxMax), SML(idxMax));
fprintf('\nMOMENTO MÍNIMO:\n');
fprintf('M = %.2f kN·m\n', Mmin);
fprintf('Sms = %.3f | Sml = %.3f\n', ...
SMS(idxMin), SML(idxMin));

%% =====
% EVALUACIÓN DE ESCENARIOS SÍSMICOS (Sms y Sml) - AIS 100-24 GEOMETRIA ESBELTA
% =====
i_geom = 3;
nombre_geom = geom(i_geom).nombre;
Sms_escenarios = [0.19 0.304 0.418 0.532 0.646 ...
0.76 0.874 0.988 1.102 1.216 1.33];
Sml_escenarios = [0.09 0.141 0.192 0.243 0.294 ...
0.345 0.396 0.447 0.498 0.549 0.60];
V_escenarios = zeros(length(Sms_escenarios),length(Sml_escenarios));
M_escenarios = zeros(length(Sms_escenarios),length(Sml_escenarios));
L = geom(i_geom).L;
HL = geom(i_geom).HL;

```



```

B = 4.5;
gammaL = 9.81;
g_const = 9.81;
WL = L * B * HL * gammaL;
Wi = WL * tanh(0.866*(L/HL)) / (0.866*(L/HL));
Wc = WL * 0.264 * (L/HL) * tanh(3.16*(HL/L));
% alturas
if (L/HL) >= 1.333
    hi = 0.375 * HL;
else
    hi = HL * (0.5 - 0.09375*(L/HL));
end
hc = HL * (1 - (cosh(3.16*(HL/L)) - 1) / ...
    (3.16*(HL/L)*sinh(3.16*(HL/L))));
% periodo convectivo
Tc = 2*pi / sqrt((3.16*g_const/L) * tanh(3.16*(HL/L)));
for i = 1:length(Sms_escenarios)
    for j = 1:length(Sm1_escenarios)
        Sms = Sms_escenarios(i);
        Sm1 = Sm1_escenarios(j);
        Sds = (2/3)*Sms*Fa;
        Sd1 = (2/3)*Sm1*Fv;
        Ci = Sds;
        if Tc <= TL
            Cc = 1.5*Sd1/Tc;
        else
            Cc = 1.5*Sd1*TL/(Tc^2);
        end
        Cc = min(Cc, 1.5*Sds);
        Pi = (Ci*I*Wi)/Ri;
        Pc = (Cc*I*Wc)/Rc;
        V_escenarios(i,j) = sqrt(Pi^2 + Pc^2);
        M_escenarios(i,j) = sqrt((Pi*hi)^2 + (Pc*hc)^2);
    end
end
[SMS, SM1] = meshgrid(Sms_escenarios, Sm1_escenarios);

% GRÁFICAS DE CURVAS DE NIVEL
%% ===== CORTANTE =====
figure(10 + 2*i_geom - 1); clf;
set(gcf, 'Color', 'w');
contourf(SMS, SM1, V_escenarios', 15); hold on;
contour(SMS, SM1, V_escenarios', 15, 'k');
colormap(jet)
colorbar
xlabel('Sms')
ylabel('Sm1')
title(['Curvas de nivel - Cortante basal - Geometría ', nombre_geom], ...
    'FontWeight', 'bold')
grid on
axis tight

% ===== MAX Y MIN =====
[Vmax, idxMax] = max(V_escenarios(:));
[Vmin, idxMin] = min(V_escenarios(:));
Sms_max = SMS(idxMax);
Sm1_max = SM1(idxMax);
Sms_min = SMS(idxMin);
Sm1_min = SM1(idxMin);
txtV = sprintf(['Máx: Sms=%.2f Sm1=%.2f V=%.1f | ', ...
    'Mín: Sms=%.2f Sm1=%.2f V=%.1f'], ...
    Sms_max, Sm1_max, Vmax, ...
    Sms_min, Sm1_min, Vmin);

```

```

annotation('textbox',[0.15 0.02 0.7 0.05], ...
'String',txtV, ...
'FontSize',10,'FontWeight','bold', ...
'EdgeColor','k', ...
'BackgroundColor','w', ...
'HorizontalAlignment','center');
cb = colorbar;
ylabel(cb,'Cortante basal (kN)');

%% ===== MOMENTO =====
figure(10 + 2*i_geom); clf;
set(gcf,'Color','w');
contourf(SMS, Sml, M_escenarios', 15); hold on;
contour(SMS, Sml, M_escenarios', 15, 'k');
colormap(jet)
colorbar
xlabel('Sms')
ylabel('Sml')
title(['Curvas de nivel - Momento basal - Geometría ', nombre_geom], ...
'FontWeight','bold')
grid on
axis tight
cb = colorbar;
ylabel(cb,'Momento basal (kN·m)');

% ===== MAX Y MIN =====
[Mmax, idxMax] = max(M_escenarios(:));
[Mmin, idxMin] = min(M_escenarios(:));
Sms_max = SMS(idxMax);
Sml_max = Sml(idxMax);
Sms_min = SMS(idxMin);
Sml_min = Sml(idxMin);
txtM = sprintf(['Máx: Sms=%.2f Sml=%.2f M=%.1f | ', ...
'Mín: Sms=%.2f Sml=%.2f M=%.1f'], ...
Sms_max, Sml_max, Mmax, ...
Sms_min, Sml_min, Mmin);
annotation('textbox',[0.15 0.02 0.7 0.05], ...
'String',txtM, ...
'FontSize',10,'FontWeight','bold', ...
'EdgeColor','k', ...
'BackgroundColor','w', ...
'HorizontalAlignment','center');

% =====
% TABLA DE RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS SÍSMICOS
% =====
Tabla_Escenarios = table( ...
SMS(:), ...
Sml(:), ...
V_escenarios(:), ...
M_escenarios(:), ...
'VariableNames', ...
{'Sms','Sml','Cortante_basal_kN','Momento_basal_kNm'});
disp(' ');
disp('=====');
disp([' RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS SÍSMICOS - GEOMETRÍA ', upper(nombre_geom)]);
disp('=====');
disp(Tabla_Escenarios);
fprintf('\n=====\\n');
fprintf('RESUMEN DE RESULTADOS - %s\\n', upper(nombre_geom));
fprintf('=====\\n');
fprintf('\\nCORTANTE MÁXIMO:\\n');
fprintf('V = %.2f kN\\n', Vmax);

```

```
fprintf('Sms = %.3f | Sm1 = %.3f\n', ...
SMS(idxMax), SM1(idxMax));
fprintf('\nCORTANTE MÍNIMO:\n');
fprintf('V = %.2f kN\n', Vmin);
fprintf('Sms = %.3f | Sm1 = %.3f\n', ...
SMS(idxMin), SM1(idxMin));
fprintf('\nMOMENTO MÁXIMO:\n');
fprintf('M = %.2f kN·m\n', Mmax);
fprintf('Sms = %.3f | Sm1 = %.3f\n', ...
SMS(idxMax), SM1(idxMax));
fprintf('\nMOMENTO MÍNIMO:\n');
fprintf('M = %.2f kN·m\n', Mmin);
fprintf('Sms = %.3f | Sm1 = %.3f\n', ...
SMS(idxMin), SM1(idxMin));
```