



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**BIOINGENIERÍA EN CANALES PARA MITIGAR CONDICIONES ASOCIADAS AL  
AZOLVE EN ZONAS DE MANGLARES**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA HIDRÁULICA**

PRESENTA:

ING. CIVIL VIVIANA LÓPEZ LÓPEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. ERIKA VIVIANA MIRANDA MANDUJANO

EN CODIRECCIÓN DE:

MTRO. MARCOS GARCÍA REYES

CUNDUACÁN, TABASCO. OCTUBRE 2026

### **Declaración de Autoría y Originalidad**

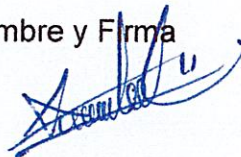
En el municipio de Cunduacán el día 14 del mes septiembre del año 2026, el que suscribe Viviana López López alumna del Programa de Maestría en Hidráulica con número de matrícula 232D10003, adscrito a la División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA), de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autora de la Tesis presentada para la obtención del grado Maestra en Ingeniería Hidráulica y titulada Bioingeniería en Canales para Mitigar Condiciones Asociadas al Azolve en Zonas de Manglares en dirección de la Dra. Erika Viviana Miranda Mandujano y en codirección del Mtro. Marcos García Reyes.

#### **DECLARO QUE:**

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita. Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 14 de septiembre 2026.

Nombre y Firma



Viviana López López



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2026  
año de  
Margarita  
Maza

## JEFATURA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco a 11 de septiembre de 2026.

**MEM/AP-DAIA/177/2026**

PARA **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
DIRECTORA DE LA DAIA  
DE: COMISIÓN SINODAL  
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE MAESTRÍA

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

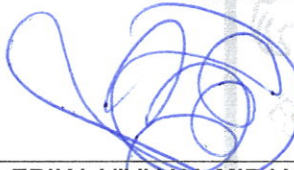
**"Bioingeniería en canales para mitigar condiciones asociadas al azolve en zonas de manglares"**

Desarrollado por la IC: **VIVIANA LÓPEZ LÓPEZ**, de la **Maestría en Ingeniería Hidráulica**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

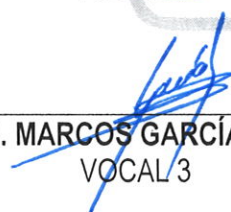
### COMITÉ SINODAL

  
DR. JESÚS ENRIQUE LEÓN JIMÉNEZ  
PRESIDENTE

  
DR. EMMANUEL MUNGUÍA BALVANERA  
SECRETARIO

  
DRA. ERIKA VIVIANA MIRANDA MANDUJANO  
VOCAL 1

  
DR. FRANCISCO MAGAÑA HERNÁNDEZ  
VOCAL 2

  
MTRO. MARCOS GARCÍA REYES  
VOCAL 3



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División  
Académica  
de Ingeniería  
y Arquitectura



2026  
año de  
Margarita  
Maza

## DIRECCIÓN

**OFICIO:** DAIA/DIR/938/2026  
**FECHA:** 15 de septiembre de 2026  
**ASUNTO:** Autorización de  
impresión definitiva

**IC. VIVIANA LÓPEZ LÓPEZ**  
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA HIDRÁULICA  
**PRESENTE**

En virtud de haber elaborado su trabajo de TESIS denominado:

**"Bioingeniería en canales para mitigar condiciones asociadas al azolve en zonas de manglares"**

Para obtener el grado de **Maestría en Ingeniería Hidráulica** y en el cual ha tenido como Directora de Tesis la Dr. Erika Viviana Miranda Mandujano y su Co-Director el Mtro. Marcos García Reyes. Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envió un afectuoso saludo.

**ATENTAMENTE**

**DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**  
**DIRECTORA**



**DIRECCIÓN**

c.c.p. Archivo  
DRA'DMFM / MCA'RACT

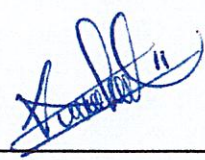
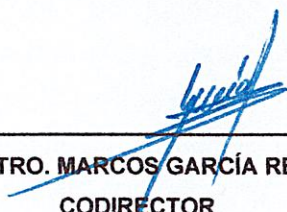
## Carta de Cesión de Derechos

Villahermosa, Tabasco a 14 de septiembre del 2026.

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como autora en la producción, creación y/o realización de la obra denominada Bioingeniería en Canales para Mitigar Condiciones Asociadas al Azolve en Zonas de Manglares en dirección de la Dra. Erika Viviana Miranda Mandujano y en codirección del Mtro. Marcos García Reyes.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

### COLABORADORES

  
\_\_\_\_\_  
ING.VIVIANA LÓPEZ LÓPEZ  
EGRESADA  
\_\_\_\_\_  
DRA. ERIKA VIVIANA MIRANDA MANDUJANO  
DIRECTORA  
\_\_\_\_\_  
MTRO. MARCOS GARCÍA REYES  
CODIRECTOR

### TESTIGOS

  
\_\_\_\_\_  
ING.JHON SEBASTIAN DÍAZ ARCOS  
\_\_\_\_\_  
ING. ALAN MANUEL NORIEGA VELÁZQUEZ

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a las mujeres de mi familia: a mis abuelas Flora y Mirella; a mis tías Conchy, Nereyda y Miriam; y, muy en especial, a mi madre Rosalvi. Aunque no tuvieron la oportunidad de ejercer una profesión, sus vidas han sido para mí ejemplo de fortaleza, sabiduría, trabajo y perseverancia. En ellas encuentro la inspiración que me ha acompañado hasta llegar a este momento.

Dedico también este logro a la alegría de mis días: mi hijo Jorge Alberto, por su comprensión, por sus muestras de amor mientras escribía este trabajo. Su compañía hizo más llevadero cada momento de este camino.

*“No es la fuerza, sino la perseverancia en los altos sentimientos, la que hace superiores a los hombres.”*

—Friedrich Nietzsche

### **Agradecimientos**

A Dios, en primer lugar, por su infinito amor, por sostenerme en todo momento y por darme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para concluir esta etapa de mi vida.

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por brindarme la oportunidad de cursar la Maestría en Ingeniería Hidráulica y por proporcionarme las herramientas necesarias para fortalecer mi formación profesional.

A la Dra. Erika Viviana Miranda Mandujano y al Mtro. Marcos García Reyes, por su orientación, paciencia y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos, observaciones y recomendaciones fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Al Dr. Jesús Enrique León Jiménez, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias a lo largo de la maestría y, de manera especial, por el apoyo que me ha brindado en distintos momentos de mi formación profesional. Agradezco profundamente la confianza que depositó en mí y la oportunidad que me dio al ser una de las primeras personas en abrirme las puertas en el ámbito laboral.

A los integrantes de mi comité y sinodales: el Dr. Emmanuel Munguía Balvanera y el Dr. Francisco Magaña Hernández, por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y por sus valiosas aportaciones, las cuales contribuyeron a mejorar su contenido y rigor académico.

A quienes participaron en el levantamiento topobatimétrico, las mediciones de campo y las demás actividades que hicieron posible el desarrollo de esta investigación en la laguna Mecoacán. Asimismo, a mis compañeros y amigos, por su apoyo, sus palabras de aliento y los momentos compartidos durante esta etapa.

A mis padres, por su comprensión, paciencia y apoyo incondicional. Gracias por saber esperar, por comprender mis ausencias y por confiar en mí a lo largo de este camino.

A mi esposo, por ser quien es, por escucharme con paciencia, acompañarme y motivarme a seguir adelante, especialmente en los momentos más difíciles.

Finalmente, y de manera especial, agradezco a mi hijo Jorge Alberto, cuya alegría, amor y energía me dieron la fuerza necesaria para continuar y alcanzar esta meta.

## Índice de contenido

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                             | 15 |
| Marco Teórico .....                                                            | 17 |
| Azolvamiento y Transporte de Sedimentos en Sistemas Lagunares de Manglar ..... | 17 |
| Restauración Hidrológica de Manglares .....                                    | 18 |
| Bioingeniería .....                                                            | 21 |
| Hidrodinámica Lagunar .....                                                    | 25 |
| Mediciones de Campo .....                                                      | 29 |
| Modelación Numérica .....                                                      | 30 |
| Criterios de Diseño .....                                                      | 33 |
| Justificación .....                                                            | 36 |
| Preguntas de Investigación .....                                               | 37 |
| Hipótesis o Supuesto .....                                                     | 38 |
| Objetivo General .....                                                         | 39 |
| Objetivos Específicos .....                                                    | 39 |
| Metodología .....                                                              | 40 |
| Área de Estudio .....                                                          | 40 |
| Diagrama de Procedimiento Metodológico .....                                   | 44 |
| Levantamiento Topobatimétrico .....                                            | 44 |
| Medición de Niveles Mediante Escalas Limnimétricas .....                       | 51 |
| Simulaciones Numéricas .....                                                   | 57 |
| Configuración del Modelo Numérico .....                                        | 57 |
| Malla Bidimensional .....                                                      | 58 |
| Coeficiente de Rugosidad .....                                                 | 60 |
| Condiciones Iniciales y de Contorno .....                                      | 61 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Alternativas .....                                                  | 63 |
| Resultados .....                                                    | 70 |
| Diagnóstico Hidráulico Laguna Mecoacán en Condiciones Actuales..... | 70 |
| Niveles de Agua.....                                                | 70 |
| Velocidades y Dirección del Flujo.....                              | 74 |
| Tirante de Agua.....                                                | 77 |
| Comportamiento Hidrodinámico de las Alternativas .....              | 80 |
| Selección .....                                                     | 84 |
| Discusión.....                                                      | 85 |
| Alcances y Limitaciones.....                                        | 86 |
| Conclusiones y Recomendaciones.....                                 | 88 |
| Referencias .....                                                   | 90 |
| Anexos.....                                                         | 98 |
| Anexo A.....                                                        | 98 |
| Registros de Elevaciones .....                                      | 98 |

## Índice de tablas

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Antecedentes de restauración hidrológica y modificación de las condiciones de flujo ....      | 20 |
| Tabla 2 Especificaciones del equipo ADCP de la marca Sontek modelo M-9 empleado en los trabajos ..... | 45 |
| Tabla 3 Resumen de las escalas empleadas para el registro de los niveles de agua .....                | 53 |
| Tabla 4 Valores de Manning usados en la simulación numérica .....                                     | 60 |
| Tabla 5 Serie temporal de niveles utilizados como condiciones de contorno.....                        | 62 |
| Tabla 6 Coordenadas UTM de los puntos que definen la Alternativa 1 .....                              | 64 |
| Tabla 7 Coordenadas UTM de los puntos que definen la Alternativa 2 .....                              | 65 |
| Tabla 8 Coordenadas UTM de los puntos que definen la Alternativa 3 .....                              | 66 |
| Tabla 9 Variación de los niveles registrados en los puntos de monitoreo .....                         | 70 |
| Tabla 10 Velocidad y dirección predominante del flujo en las conexiones hidráulicas .....             | 74 |
| Tabla 11 Tirante en las conexiones hidráulicas .....                                                  | 77 |
| Tabla 12 Resultados en los puntos de referencia analizados durante la fase de llenante.....           | 83 |
| Tabla 13 Resultados en los puntos de referencia analizados durante la fase de vaciante .....          | 83 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Regeneración natural del manglar en West Lake, Florida, a partir de la creación de arroyos de marea .....                                                                                                        | 19 |
| Figura 2 Cercas de bambú a lo largo de la costa de Bankok, Tailandia.....                                                                                                                                                 | 22 |
| Figura 3 a) Proyecto el Arrecife de cuello estrecho, construido en el año 2000 en Australia, b) Proyecto de la barrera contra mareas de tormenta del Eider (Eidersperrwerk) construida entre 1967 y 1973 en Alemania..... | 23 |
| Figura 4 Imágenes satelitales de la evolución de Anna Regina, Guyana.....                                                                                                                                                 | 24 |
| Figura 5 Principio de funcionamiento de un ADCP .....                                                                                                                                                                     | 30 |
| Figura 6 Modelación matemática de rompeolas separados de la línea de costa .....                                                                                                                                          | 31 |
| Figura 7 Elaboración de centros de dispersión (CD) .....                                                                                                                                                                  | 34 |
| Figura 8 Localización de los sistemas de manglar en la Laguna Mecoacán, estado de Tabasco ..                                                                                                                              | 40 |
| Figura 9 Distribución del manglar a través del tiempo en la Laguna Mecoacán, Tabasco .....                                                                                                                                | 41 |
| Figura 10 Dominio de la modelación y principales conexiones hidráulicas de la laguna Mecoacán, Tabasco .....                                                                                                              | 42 |
| Figura 11 Ubicación de la bocana del canal de Río Hondo y su conexión con la laguna Mecoacán .....                                                                                                                        | 43 |
| Figura 12 Diagrama del procedimiento metodológico de la investigación.....                                                                                                                                                | 44 |
| Figura 13 Levantamiento batimétrico con ADCP.....                                                                                                                                                                         | 46 |
| Figura 14 Levantamiento topográfico con Equipo RTK.....                                                                                                                                                                   | 47 |
| Figura 15 Curvas de nivel Laguna Mecoacán, Paraíso, Tabasco.....                                                                                                                                                          | 48 |
| Figura 16 Curvas de nivel en la transición entre el canal de Río Hondo y el cuerpo lagunar .....                                                                                                                          | 49 |
| Figura 17 Perfil longitudinal de la transición entre el canal de Río Hondo y el cuerpo lagunar ...                                                                                                                        | 50 |
| Figura 18 Modelo Digital de Elevación clave E15A79C3.....                                                                                                                                                                 | 51 |
| Figura 19 Ubicación de las escalas limnimétricas instaladas en la Laguna Mecoacán.....                                                                                                                                    | 52 |
| Figura 20 Escala limnimétrica instalada a la altura del Puente Río Cuxcuxapa .....                                                                                                                                        | 54 |
| Figura 21 Escala limnimétrica instalada a la altura de la conexión hidráulica Río Hondo.....                                                                                                                              | 55 |
| Figura 22 Escala limnimétrica instalada a la altura de Conexión hidráulica El Bellote .....                                                                                                                               | 56 |
| Figura 23 Representación del MDE de la extensión del dominio en condiciones actuales .....                                                                                                                                | 57 |
| Figura 24 Tamaños de malla empleados en el área de simulación .....                                                                                                                                                       | 58 |

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25 Detalle del mallado en el área de interés (donde se aplicará la técnica de bioingeniería)                   | 59 |
| Figura 26 Coeficientes de Manning asignados en la simulación                                                          | 60 |
| Figura 27 Ubicación de condiciones de contorno asignadas en la simulación                                             | 62 |
| Figura 28 Configuración geométrica de la Alternativa 1                                                                | 64 |
| Figura 29 Configuración geométrica de la Alternativa 2                                                                | 65 |
| Figura 30 Configuración geométrica de la Alternativa 3                                                                | 66 |
| Figura 31 Representación de los CDL mediante la modificación local de la malla en el software Iber                    | 67 |
| Figura 32 Comparación entre los niveles observados y simulados en los puntos de control                               | 71 |
| Figura 33 Distribución espacial de la cota de agua durante la fase llenante                                           | 72 |
| Figura 34 Distribución espacial de la elevación durante de la superficie libre en la fase vaciante                    | 73 |
| Figura 35 Distribución espacial de la velocidad y dirección del flujo durante la fase de llenante                     | 75 |
| Figura 36 Distribución espacial de la velocidad y dirección del flujo durante la fase de vaciante                     | 76 |
| Figura 37 Tirantes de agua durante la fase de llenante                                                                | 78 |
| Figura 38 Tirantes de agua durante la fase de vaciante                                                                | 79 |
| Figura 39 Comparación de la condición actual y las alternativas durante la fase de llenante en la bocana de Río Hondo | 80 |
| Figura 40 Comparación de la condición actual y las alternativas durante la fase de vaciante en la bocana de Río Hondo | 80 |

**TÍTULO:**  
**BIOINGENIERÍA EN CANALES PARA MITIGAR CONDICIONES ASOCIADAS AL  
AZOLVE EN ZONAS DE MANGLARES.**

**Resumen:** El azolvamiento de los canales en los sistemas lagunares reduce la capacidad hidráulica y puede limitar el intercambio de agua. Este proyecto de grado tiene como objetivo evaluar hidrodinámicamente tres configuraciones de Centros de Dispersión Lineales (CDL), propuestas como medidas de bioingeniería en la bocana del canal de Río Hondo, para determinar su influencia en la distribución de velocidades y los patrones de circulación del agua. Para ello, se realizó el levantamiento topobatimétrico del área de estudio y se midieron los niveles de agua en las conexiones hidráulicas de la laguna Mecoacán. Con la información obtenida se construyó un modelo hidrodinámico bidimensional de la condición actual. Este modelo sirvió de base para la implementación de las tres configuraciones de CDL, para posteriormente comparar su comportamiento en instantes representativos de llenante y vaciante, considerando como criterios de selección la distribución de velocidades, la continuidad del flujo, las recirculaciones y extensión de zonas de baja movilidad. Los resultados mostraron que las tres alternativas modificaron la circulación respecto a la condición actual; sin embargo, la alternativa 3 presentó el comportamiento más uniforme entre ambas fases. Se concluye que la implementación geométrica de los CDL puede mejorar localmente el comportamiento hidrodinámico actual.

**Palabras clave:** Bioingeniería, canales, CDL, manglares, modelación numérica.

**Abstract:** Siltation of channels in lagoon systems reduces hydraulic capacity and may limit water exchange. This graduate project aims to hydrodynamically evaluate three configurations of Linear Dispersion Centers (CDL), proposed as bioengineering measures at the mouth of the Río Hondo channel, to determine their influence on velocity distribution and water circulation patterns. To this end, a topobathymetric survey of the study area was conducted, and water levels were measured at the hydraulic connections of Mecoacán Lagoon. With the obtained information, a two-dimensional hydrodynamic model of the current condition was constructed. This model served as the basis for the implementation of the three CDL configurations, to later compare their behavior at representative moments of filling and emptying, considering as selection criteria the velocity distribution, flow continuity, recirculations, and extent of low-mobility zones. The results showed that the three alternatives modified the circulation compared to the current condition; however, alternative 3 exhibited the most uniform behavior between both phases. It is concluded that the geometric implementation of the CDL can locally improve the current hydrodynamic behavior.

**Keywords:** Bioengineering, channels, CDL, mangroves, numerical modeling.

## Introducción

Los manglares son ecosistemas costeros de gran importancia ecológica. Se desarrollan en la transición entre los ambientes terrestres y acuáticos y albergan numerosas especies de flora y fauna, muchas de ellas endémicas (Friess et al., 2019; Benedetti et al., 2023). Además de proteger las costas, actúan como reguladores de los ciclos biogeoquímicos y como refugio para diversas especies marinas (Alongi, 2002). Sin embargo, son altamente vulnerables a las alteraciones en su régimen hidrológico, ya sean ocasionadas por actividades humanas o por procesos naturales, las cuales pueden modificar la disponibilidad y la circulación del agua, poniendo en riesgo la supervivencia del manglar, su funcionamiento ecológico y su capacidad de brindar servicios ecosistémicos (Friess et al., 2019).

La restauración de ecosistemas ha adquirido relevancia internacional como estrategia para enfrentar la degradación ambiental. En este contexto, la Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el periodo 2021–2030 como el Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2019).

En los proyectos de restauración se emplean acciones como la apertura de canales de conexión y la construcción de Centros de Dispersión (CD). La apertura de canales busca recuperar la circulación del agua y crear condiciones favorables para la regeneración natural del manglar (Lewis, 2005), mientras que los CD permiten retener sedimentos y favorecer el establecimiento de la vegetación en áreas degradadas (Herrera-Silveira et al., 2021). Sin embargo, los canales abiertos para recuperar la conectividad pueden azolverse tanto al interior como en sus bocanas debido a la acumulación de sedimentos. Este proceso reduce gradualmente la sección hidráulica disponible, limita el intercambio de agua y puede disminuir la efectividad de las acciones de restauración. Por esta razón, es necesario evaluar alternativas que ayuden a conservar su capacidad hidráulica y mantener la conectividad del sistema.

Esta investigación evaluó diferentes configuraciones de bioingeniería mediante simulaciones hidrodinámicas del sistema lagunar Mecoacán, ubicado en el municipio de Paraíso, Tabasco. El análisis se centró en cambios en la distribución de velocidades y patrones de circulación del agua, con especial atención a la bocana del canal Río Hondo, lugar donde se planteó la intervención.

A partir de esta investigación se obtuvieron fundamentos técnicos para orientar el diseño y la posible aplicación de alternativas de bioingeniería dirigidas a mitigar condiciones asociadas al azolvamiento y favorecer la conectividad hidráulica del sistema lagunar.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## **Marco Teórico**

### **Azolvamiento y Transporte de Sedimentos en Sistemas Lagunares de Manglar**

Los sistemas lagunares de manglar son ecosistemas sensibles a los cambios en su entorno, provocados tanto por factores ambientales como por actividades antropogénicas (Castillo Mendoza, 2024). Herrera-Silveira et al. (2013), señalan que incluso acciones realizadas a escalas pequeñas pueden producir impactos de mayor extensión temporal y espacial. La apertura o clausura de bocintras que conectan al manglar con el mar, una laguna o un estuario, así como la construcción de carreteras, son ejemplos de acciones capaces de alterar la circulación natural del agua.

Además de su valor ecológico, los manglares representan una fuente de sustento para las comunidades locales mediante actividades como la pesca, el aprovechamiento de recursos naturales y el turismo (Friess et al., 2019).

Cuando cambia el régimen hidrológico, puede perderse vegetación y formarse depósitos de sedimentos que obstruyen o limitan el movimiento del agua. Los sedimentos pueden transportarse en suspensión, dentro de la columna de agua, o como carga de fondo, desplazándose cerca del lecho (Bosboom & Stive, 2023). Su origen puede ser orgánico (hojas, ramas y otros restos de vegetación) o inorgánico, relacionado principalmente con la erosión del suelo, del lecho y con partículas minerales.

Las actividades humanas pueden incorporar contaminantes a los sedimentos en los estuarios. Ibanga et al. (2019) documentaron concentraciones elevadas de metales pesados en los sedimentos de Woji Creek y del estuario Bonny, en el delta del Níger, Nigeria, relacionadas con actividades industriales y urbanas de la región.

Cuando los sedimentos se acumulan en canales y zonas de conexión, la sección hidráulica disponible cambia y, con ello, las condiciones de circulación. Por esta razón, el transporte y la deposición de sedimentos deben analizarse en conjunto con las condiciones hidrodinámicas del sistema, particularmente considerando las velocidades y el sentido de escurrimiento de las corrientes (Bosboom & Stive, 2023).

La vegetación también interviene en estos procesos. Puede contribuir a reducir la energía del flujo (Mullarney et al., 2017), favorecer la retención de sedimentos (Silva et al., 2023) y contribuir a la estabilidad del suelo y la reducción de la erosión (Cerrillos-Valle, 2021; Morris et al., 2019; Yu et al., 2020). La evolución de un sistema de manglar depende, en buena medida, de la interacción entre la vegetación, el movimiento del agua y los sedimentos.

El azolvamiento no depende únicamente de los sedimentos que se acumulan en un sitio. También de cómo se mueve el agua, de la configuración de los canales y de su conectividad hidráulica. Esta relación permite plantear alternativas que no se limiten a retirar los sedimentos acumulados, sino que también modifiquen las condiciones que favorecen su deposición.

### **Restauración Hidrológica de Manglares**

La restauración ecológica busca apoyar la recuperación de los ecosistemas degradados mediante acciones orientadas a favorecer los procesos naturales de recuperación y contemplar las particularidades del ecosistema intervenido que permitan evaluar su progreso (Gann et al., 2019).

En el caso de los manglares no consiste únicamente en reforestar. Herrera-Silveira et al. (2021) señalan que cuando existen alteraciones topográficas e hidrológicas, es necesario recuperar previamente las condiciones que permitan el establecimiento de la vegetación. En particular, la hidrología constituye uno de los factores fundamentales para su conservación, debido a que determina las condiciones de inundación, circulación e intercambio de agua dentro del sistema.

En West Lake, cerca de Fort Lauderdale, Florida, Lewis (2005) documentó un caso de regeneración de manglar sin realizar una plantación directa. Después de un periodo de seguimiento de 78 meses, la creación de arroyos de marea había favorecido la recolonización del manglar, demostrando la importancia de restablecer las condiciones hidrológicas adecuadas para favorecer los procesos naturales de recuperación (Figura 1).

**Figura 1**

*Regeneración natural del manglar en West Lake, Florida, a partir de la creación de arroyos de marea*



*Nota.* Adaptado de “Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests” (p. 413), por Lewis, 2005, *Ecological Engineering*, 24(4).

La restauración hidrológica busca recuperar los patrones de circulación e inundación que permiten el funcionamiento del ecosistema. Las modificaciones en la topografía respecto a un sitio de referencia pueden generar alteraciones en la frecuencia y el nivel de inundación, así como en los procesos de erosión y deposición de sedimentos (Herrera-Silveira et al., 2021).

Recuperar la conectividad hidráulica puede ser una medida previa o complementaria a la reforestación. En algunos casos, las modificaciones en canales, bocas o conexiones pueden alterar significativamente el intercambio de agua y, por tanto, las condiciones necesarias para el establecimiento y desarrollo de la vegetación (Lewis, 2005; Marois & Mitsch, 2017).

La conectividad hidráulica desempeña un papel importante en los manglares asociados con lagunas costeras del Golfo de México. López-Adame et al. (2026) analizaron la efectividad de distintas acciones de restauración a partir de los cambios observados en los niveles de inundación y en la conexión de manglar con el cuerpo lagunar, demostrando que el intercambio de agua entre ambos ambientes puede servir como indicador para la recuperación hidrológica del manglar.

La recuperación de la conectividad hidráulica guarda relación con las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) porque busca aprovechar procesos naturales para abordar problemas ambientales y reducir la dependencia de estructuras tradicionales. Desde este enfoque la intervención busca crear condiciones que permitan su recuperación y funcionamiento, sin controlar completamente sus procesos naturales (Winterwerp et al., 2025).

La relación con el azolvamiento es implícita. Si una alteración de la circulación favorece la acumulación de sedimentos y la degradación del manglar, recuperar o ajustar esa circulación puede mejorar las condiciones del sistema.

**Tabla 1**

*Antecedentes de restauración hidrológica y modificación de las condiciones de flujo*

| Autor                           | Sitio                                                                 | Intervención                                                                                    | Dimensiones o configuración                                                                       | Condiciones y/o variables hidráulicas                                                                 | Resultado principal                                                                                         |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Lewis (2005)</b>             | West Lake Park, Florida, EE. UU.                                      | Restauración hidrológica mediante adecuación topográfica y creación de red de canales de marea. | Área de restauración de 500 ha; cotas finales entre +27 y +42 cm respecto al nivel medio del mar. | Inundación mareal, profundidad, duración y frecuencia de inundación; elevación topográfica.           | Regeneración natural del manglar sin plantación directa después de 78 meses.                                |
| <b>Marois y Mitsch (2017)</b>   | Naples Bay, Florida, EE. UU.                                          | Restauración de canal de manglar mediante extensión y modificación geométrica.                  | Canal propuesto 1.1 km de longitud aprox., 7.5 m de ancho y 1.2 m de profundidad.                 | Nivel del agua, extensión de inundación e influencia mareal.                                          | Mayor influencia de la marea en el manglar interior.                                                        |
| <b>Winterwerp et al. (2020)</b> | Costas de manglar de Guyana, Indonesia, Surinam, Tailandia y Vietnam. | Presas permeables y unidades para captura de sedimentos.                                        | Postes de bambú colocados verticalmente con poco espaciamiento.                                   | Oleaje, corrientes, sedimentación y erosión.                                                          | Disminución del oleaje y favoreció la acumulación de sedimentos.                                            |
| <b>Fivash et al. (2021)</b>     | Canal experimental, NIOZ, Países Bajos.                               | Estructuras artificiales porosas (elementos BESE) de polímero biodegradable.                    | Estructura de 30 × 80 × 6 cm, poros de 40 mm.                                                     | Velocidad del flujo, turbulencia y sedimentación; ensayos con velocidades de 0.085, 0.145 y 0.23 m/s. | La reducción de la velocidad al interior de la estructura favoreció la retención y acumulación de material. |

| Autor                    | Sitio                               | Intervención                                                               | Dimensiones o configuración                                                                                         | Condiciones y/o variables hidráulicas                                                                | Resultado principal                                                                                                                    |
|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Winterwerp et al. (2025) | Lac Bay, Bonaire; Guyana y Surinam. | Reapertura de canales y aplicación de soluciones basadas en la naturaleza. | Cuatro espigones geotextiles de 500 m, separados entre 2 y 2.5 km en Anna Regina. En Bonaire se reabrieron canales. | Siguiendo patrones históricos del flujo. Circulación, drenaje, condiciones mareales y sedimentación. | En Bonaire se recuperó la circulación del flujo; en Guyana se formaron planicies intermareales posteriormente colonizadas por manglar. |

## Bioingeniería

A nivel internacional se han desarrollado proyectos de ingeniería orientados a resolver diversas problemáticas costeras. Entre las obras de ingeniería tradicional o “dura” empleadas para la protección y recuperación se encuentran la construcción de diques, escolleras y rompeolas (Sciarrone et al., 2012). Sin embargo, cuando estas intervenciones conllevan a la eliminación o modificación de la vegetación costera, pueden presentarse efectos desfavorables sobre la dinámica del sistema. Anthony y Gratiot (2012) documentaron que la pérdida de manglar en la costa de Guyana redujo la disipación del oleaje y favoreció la erosión de los bancos lodosos.

El reconocimiento del papel de la vegetación en la protección y estabilización de los ecosistemas (Benedetti et al., 2023; Yu et al., 2020) ha impulsado enfoques de ingeniería orientados a resolver necesidades técnicas sin descuidar la conservación ambiental. Para comprender el tema, es necesario conocer las siguientes definiciones:

- Soluciones basadas en la naturaleza (SbN): Acciones que pueden implicar o no intervenciones que consideran los procesos naturales para proteger, gestionar de forma sostenible y restaurar ecosistemas naturales y modificados de manera que aborden los desafíos sociales de forma eficaz y adaptativa, buscando el bienestar de los seres vivos (Cohen-Shacham et al., 2016).
- Ingeniería blanda: Intervenciones que emplean principios ecológicos para estabilizar costas y controlar la erosión, con mayor flexibilidad que la ingeniería tradicional (Lamoglia Swinnen, 2023).

- Bioingeniería: Emplea las plantas vivas como elemento constructivo principal.

Sangalli y Valenzuela (2008) señalan que estas plantas vivas como elemento constructivo pueden emplearse de manera individual o en combinación con materiales inertes como madera, piedra, concreto, geotextiles u otros productos sintéticos. Schiechl (1980) describe la bioingeniería como una disciplina constructiva que busca objetivos técnicos, ecológicos, estéticos y económicos mediante el aprovechamiento de las capacidades de las plantas y el empleo de técnicas de construcción que reduzcan el impacto ambiental.

El diseño de las alternativas de bioingeniería retoma principios de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) y del enfoque Construir con la Naturaleza. En los manglares, ambos planteamientos requieren recuperar sus procesos naturales, principalmente la dinámica hidrológica y el transporte de sedimentos (Gijsman et al., 2021; Luts, 2024).

Las estructuras permeables son una de las estrategias utilizadas para controlar la erosión. Winterwerp et al. (2020, 2025) reportaron que estas estructuras pueden modificar las condiciones hidrodinámicas y favorecer la acumulación y estabilización de sedimentos. Las cercas de bambú instaladas en Tailandia (Figura 2) son un ejemplo: al disminuir la energía del flujo y generar zonas de menor velocidad donde los sedimentos pueden asentarse.

**Figura 2**

*Cercas de bambú a lo largo de la costa de Bangkok, Tailandia*

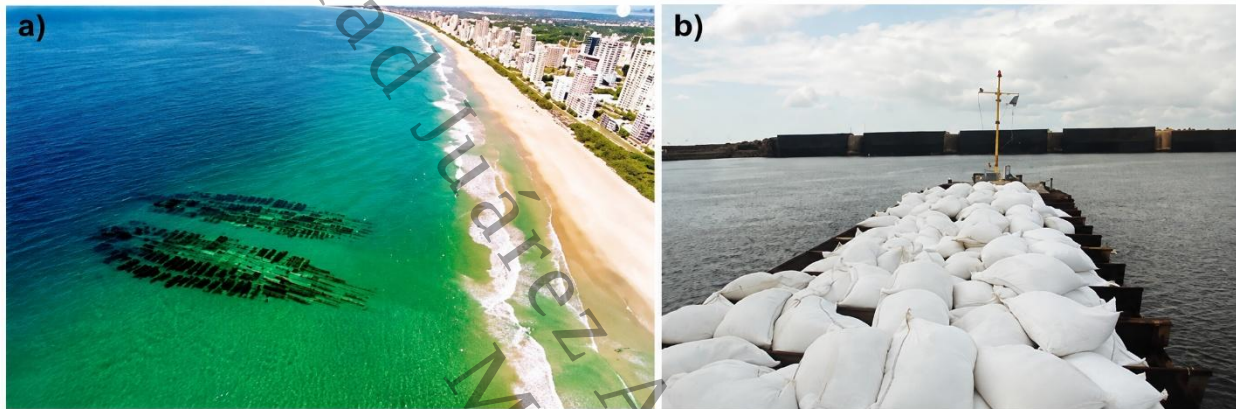


**Nota.** Adaptado de “Managing erosion of mangrove–mud coasts with permeable dams: Lessons learned” (p. 8), por Winterwerp et al., 2020, Ecological Engineering, 158, artículo 106078.

Otra alternativa empleada para el control de la erosión corresponde al uso de contenedores geotextiles. Saathoff et al. (2007) documentaron aplicaciones en Australia y Alemania, mostrando su uso en diferentes contextos costeros (Figura 3).

**Figura 3**

*a) Proyecto el Arrecife de cuello estrecho, construido en el año 2000 en Australia, b) Proyecto de la barrera contra mareas de tormenta del Eider (Eidersperrwerk) construida entre 1967 y 1973 en Alemania.*



**Nota.** Adaptado de “Experiences from Australian and German projects using geotextile containers” (p. 251 y 263), por Saathoff, Oumeraci y Restall, 2007, *Geotextiles and Geomembranes*, 25(4–5).

Es importante señalar que los geotextiles por sí solos no constituyen una técnica de bioingeniería, ya que son materiales sintéticos. Sin embargo, de acuerdo con Sangalli y Valenzuela (2008) pueden formar parte de ella cuando se combinan con plantas vivas que se desarrollan en o alrededor de estos materiales sintéticos, funcionando como un soporte mientras la vegetación crece.

El seguimiento mediante imágenes satelitales permite observar cómo evolucionan estas soluciones con el paso del tiempo. Winterwerp et al. (2025) realizaron este proceso utilizando imágenes de distintos años para observar la línea de costa y la consolidación de la franja de manglar (Figura 4).

**Figura 4**

*Imágenes satelitales de la evolución de Anna Regina, Guyana*



**Nota.** Adaptado de “Mangrove recovery by habitat restoration using nature-based solutions” (p. 5), por Winterwerp et al., 2025, Ecological Engineering, 212, artículo 107520

La vegetación también puede utilizarse como elemento de estabilización del suelo. Según Grajales-Saavedra et al. (2021), las raíces de árboles y arbustos contribuyen a incrementar su resistencia frente a procesos de inestabilidad, aunque para la elección de especies se deben considerar las condiciones ambientales del sitio.

Kazemi et al. (2021) estudiaron este efecto a través de modelos físicos simplificados de raíces de manglar. Los autores observaron que la porosidad de la configuración modificó la velocidad del flujo, la turbulencia y el inicio del movimiento de los sedimentos. En las condiciones evaluadas, la configuración con porosidad intermedia produjo una menor erosión en el fondo.

Por su parte, Kettenhuber et al. (2023) evaluaron diferentes especies vegetales sometidas a distintas condiciones ambientales e identificaron, mediante análisis estadístico, aquellas con mayor resistencia y capacidad de adaptación. Alvarado-García y Zúñiga-Amador (2018) concluyeron que el empleo de especies nativas en procesos de restauración ecológica y forestación puede mejorar las condiciones mecánicas, hidráulicas y ambientales del lugar.

En determinadas condiciones, la reforestación como estrategia de estabilización puede constituir una alternativa frente al uso de grandes volúmenes de concreto (Perico-Granados et al., 2025). De León-Solís (2021) destaca que una de las ventajas de la bioingeniería consiste en la posibilidad de proporcionar hábitat para fauna acuática y terrestre, reduciendo algunos impactos ambientales.

No obstante, estas técnicas no pueden trasladarse de un sitio a otro sin considerar las condiciones particulares de cada sitio. Moreau et al. (2022) señalan que requieren experimentación y mejoramiento constante, por tanto, su aplicación debe considerar las características ambientales, hidráulicas y geomorfológicas de cada lugar. A esta necesidad de adaptación se le suma el cambio climático, cuyas condiciones obligan a revisar el diseño de la infraestructura hidráulica como los criterios empleados para su dimensionamiento (Piguave Rodríguez et al., 2025).

Esta necesidad de adaptación local se observa en el estudio de Hsiung et al. (2025), quienes evaluaron estructuras híbridas destinadas a favorecer el establecimiento de manglares en tres sitios costeros y encontraron diferencias en su efectividad. Sus resultados mostraron que el funcionamiento de estas intervenciones depende de factores locales de cada entorno.

En conjunto, estos antecedentes muestran que la eficacia de la bioingeniería depende, por tanto, de que cada intervención aproveche los procesos naturales y se adapte a las condiciones específicas del sistema en el que se implementa.

### **Hidrodinámica Lagunar**

La hidrodinámica es una rama de la hidráulica que se encarga de estudiar los fluidos en movimiento y puede ser descrita mediante ecuaciones matemáticas.

Uno de los primeros matemáticos que realizó estudios de hidrodinámica fue Daniel Bernoulli, quien precisamente dio nombre a su obra de 1738, *Hydrodynamica*. Entre los principios fundamentales de la hidrodinámica está la conservación de la energía, descrita mediante el principio de Bernoulli (Gerhart et al., 2021).

El principio de conservación de la masa establece que la cantidad de fluido que entra en un sistema debe ser igual a la que sale. Para una sección de flujo, el caudal puede expresarse como:

$$Q=A \cdot V$$

Ecuación 1

Donde  $Q$  es el caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $A$  es el área de la sección transversal [ $\text{m}^2$ ] y  $V$  es la velocidad media del flujo [ $\text{m/s}$ ] (Chow, 1959). Esta relación permite comprender que los cambios en el área disponible para el paso del agua pueden generar modificaciones en la velocidad. Así, una reducción de la sección puede favorecer un incremento de la velocidad, mientras que una ampliación puede producir una disminución de esta.

En un sistema lagunar el agua se mueve principalmente en dos direcciones horizontales, ya que la profundidad es menor que el ancho y el largo del sistema. Este tipo de flujos se describen mediante las ecuaciones de aguas someras (Shallow Water Equations, SWE) también conocidas como ecuaciones de Saint-Venant 2D (Sanz-Ramos et al., 2022). Estas ecuaciones expresan la conservación de la masa y del momento lineal en las dos direcciones horizontales, lo que permite calcular la variación del nivel del agua y la distribución de las velocidades del flujo.

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant, incorporando los efectos de la turbulencia, el rozamiento superficial producido por el viento y la fricción de fondo (Bladé et al., 2014). La conservación de la masa se expresa mediante:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hU_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hU_y)}{\partial y} = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

Mientras que la conservación del momento en las direcciones  $x$  y  $y$  se representa mediante:

$$\frac{\partial(hU_x)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hU_x^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(hU_xU_y)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{\partial(hU_y)}{\partial t} + \frac{\partial(hU_xU_y)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( hU_y^2 + \frac{gh^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

donde  $h$  representa el tirante [ $\text{m}$ ];  $u$  y  $v$  son las velocidades horizontales promediadas en profundidad en las direcciones  $x$  y  $y$ , respectivamente [ $\text{m/s}$ ];  $g$  es la aceleración de la gravedad en [ $\text{m/s}^2$ ];  $z_b$  corresponde a la cota del fondo [ $\text{m}$ ];  $\tau_{s,x}$  y  $\tau_{s,y}$  representan los esfuerzos asociados con la acción del viento sobre la superficie libre [ $\text{N/m}^2$ ];  $\tau_{b,x}$  y  $\tau_{b,y}$  corresponden a los esfuerzos de fricción en el fondo en [ $\text{N/m}^2$ ];  $\rho$  es la densidad del agua en [ $\text{kg/m}^3$ ]; y  $\nu_t$  representa la viscosidad turbulenta [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] (Bladé et al., 2014).

Debido a la poca profundidad del sistema, estas ecuaciones son adecuadas para representar el movimiento del agua en las dos direcciones horizontales. También permiten analizar cómo las configuraciones de bioingeniería modifican la circulación en la bocana del canal.

La resistencia al flujo es un factor que condiciona la distribución de las velocidades. Esta resistencia depende de varios factores, como las características hidráulicas del flujo, la cobertura vegetal, la composición granulométrica del fondo, la configuración del cauce y la irregularidad de la superficie del fondo (Chow, 1959). En sistemas de manglar, la presencia de vegetación modifica las condiciones del flujo al generar resistencia hidráulica y disipación de energía, debido a la interacción del agua con tallos y raíces presentes en el cauce (Curran & Hession, 2013; Mullarney et al., 2017).

Para flujos con superficie libre la relación entre velocidad, rugosidad y condiciones hidráulicas puede expresarse mediante la ecuación de Manning:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $V$  representa la velocidad media [m/s],  $n$  el coeficiente de rugosidad de Manning,  $R_h$  el radio hidráulico [m] y  $S_f$  la pendiente de energía, considerada como adimensional. Esta relación permite considerar el efecto de la resistencia hidráulica sobre la velocidad del flujo, de manera que un incremento en la rugosidad puede generar una mayor resistencia al movimiento del agua (Chow, 1959).

La resistencia ejercida por el flujo sobre la superficie del fondo se relaciona con el esfuerzo cortante. Esta variable es útil para determinar la capacidad del agua para mover las partículas presentes en el fondo (Bosboom & Stive, 2023). Este esfuerzo puede expresarse como:

$$\tau_b = \rho g R_h S_f \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde  $\tau_b$  es el esfuerzo cortante en el fondo [N/m<sup>2</sup>];  $\rho$  es la densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>];  $g$  es la aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>];  $R_h$  es el radio hidráulico [m] y  $S_f$  es la pendiente de energía, adimensional (Chow, 1959).

Otro aspecto que considerar en los sistemas lagunares con conexión al mar es la influencia de la marea. El cambio de nivel del agua puede modificar la dirección y la magnitud de las corrientes dentro del sistema. En el sistema Mecoacán-río González, Medellín et al. (2013) documentaron la influencia de la marea sobre la hidrodinámica del sistema, mostrando la importancia de las variaciones mareales en el comportamiento de las corrientes.

Cuando el nivel del mar aumenta, el gradiente puede impulsar el agua hacia el interior de la laguna, mientras que durante su descenso del nivel puede producirse un flujo en sentido contrario. Como consecuencia, la dirección y velocidad de las corrientes en una bocana pueden variar a lo largo del ciclo mareal (Medellín et al., 2013).

Esta dinámica resulta relevante para la evaluación hidrodinámica de las configuraciones de bioingeniería debido a las variaciones de nivel y cambios de dirección que se producen en el ciclo mareal.

Por otro lado, cuando el agua encuentra obstáculos o configuraciones que modifican su trayectoria, pueden generarse áreas de recirculación, caracterizadas por presentar velocidades menores respecto de la corriente principal. Estas zonas pueden disminuir la capacidad del flujo para mantener las partículas en movimiento y favorecer su deposición. Por el contrario, cuando el flujo se concentra y aumenta su velocidad, puede incrementarse su capacidad para movilizar los sedimentos. Los cambios en las condiciones del canal pueden generar variaciones importantes en la distribución y el comportamiento del flujo (Aragón-Hernández et al., 2022) mientras que la presencia de vegetación puede favorecer la retención y deposición de sedimentos al modificar las condiciones locales del flujo (Silva et al., 2023).

En este trabajo, la evaluación hidrodinámica se centra en los cambios en la velocidad del flujo y su distribución espacial bajo la influencia de las variaciones de nivel asociadas con el ciclo mareal. Estos elementos permiten analizar la respuesta de las diferentes configuraciones de bioingeniería y su posible relación con las condiciones que favorecen el azolvamiento en la zona de estudio.

## Mediciones de Campo

Las mediciones de campo constituyen el punto de partida para caracterizar las condiciones en las que se encuentra un sistema, ya que permiten conocer su comportamiento hidrodinámico. Estos datos pueden utilizarse como referencia para evaluar o sustentar los resultados obtenidos mediante una modelación numérica.

El perfilador acústico Doppler de corrientes (ADCP, por sus siglas en inglés) permite medir la velocidad del agua y obtener información sobre la columna de agua y la configuración del fondo.

El funcionamiento del ADCP utiliza el efecto Doppler; este transmite pulsos acústicos hacia la columna de agua y parte de la señal emitida es reflejada por partículas u otros reflectores acústicos presentes en el agua. Cuando existe movimiento relativo entre el instrumento y los reflectores, la señal recibida presenta un cambio aparente en su frecuencia, denominado corrimiento Doppler, cuya magnitud está relacionada con la velocidad relativa (RDI Instruments, 1996; SonTek/YSI Inc., 2007).

De esta manera, el ADCP puede determinar la velocidad del agua a diferentes profundidades a partir del movimiento de los reflectores (sedimentos) presentes en la columna de agua. Además, estos equipos registran la configuración de fondo (profundidad) y proporcionan información referente a la intensidad del sedimento (RDI Instruments, 1996; SonTek/YSI Inc., 2007). Chalov et al. (2022) utilizaron este equipo para comprender los procesos de transporte sedimentario en los cuerpos de agua naturales para su gestión y conservación.

La relación entre las frecuencias y las velocidades está dada por la Ecuación 7:

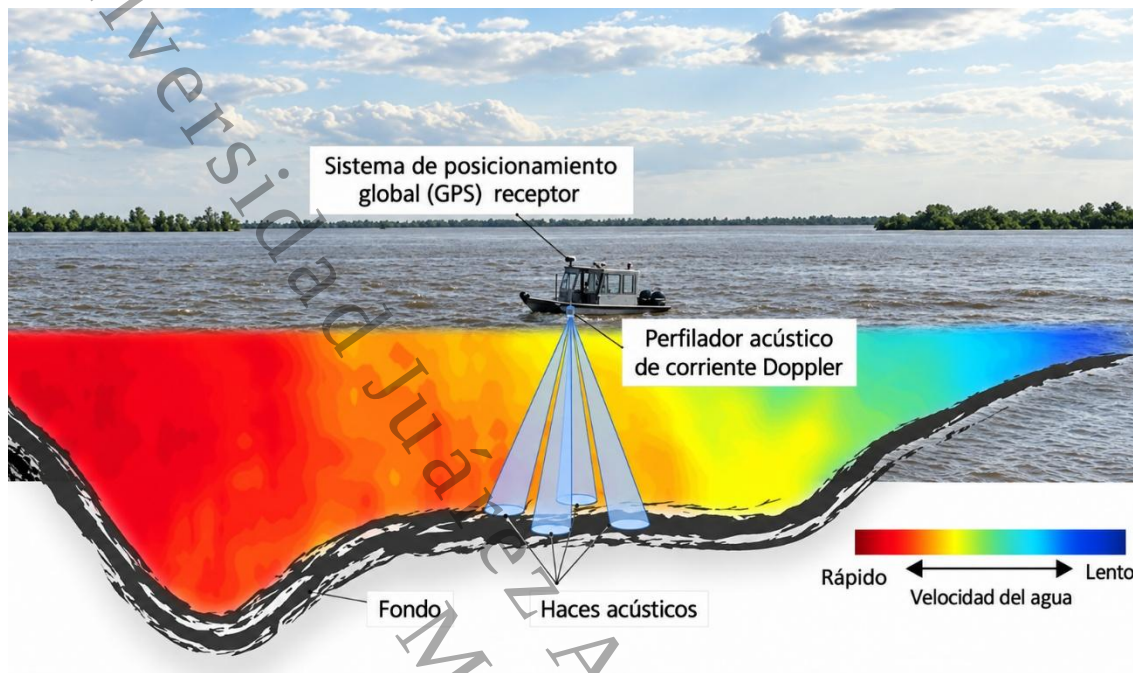
$$F_d = 2F_s \left( \frac{V}{C} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:  $F_d$  es el corrimiento de la frecuencia;  $F_s$  es la frecuencia original de la onda;  $V$  es la velocidad de los reflectores [m/s];  $C$  es la velocidad del sonido en el agua [m/s].

En la Figura 5 se ilustra el funcionamiento del equipo ADCP.

**Figura 5**

*Principio de funcionamiento de un ADCP*



**Nota.** Adaptado de ADCP data collection diagram [Diagrama], por Upper Midwest Water Science Center, 2019, U.S. Geological Survey (<https://www.usgs.gov/media/images/adcp-data-collection-diagram>). Cortesía de P. Ryan Jackson, USGS.

Además de la configuración del fondo, el monitoreo de los niveles de agua (láminas de agua) permite conocer la variación temporal de la superficie libre dentro de un sistema lagunar sometido a la influencia de la marea. De acuerdo con Basile (2017) el nivel hidrométrico corresponde a la cota de la superficie del agua respecto a una referencia denominada cero hidrométrico. Para su medición pueden utilizarse escalas hidrométricas o limnómetros, las cuales consisten en reglas graduadas en las que se observa el nivel alcanzado por el agua.

### Modelación Numérica

La modelación numérica hidrodinámica constituye una herramienta para analizar el comportamiento del flujo bajo diferentes condiciones y observar cómo cambia su comportamiento cuando se modifican determinadas condiciones. Una de sus principales ventajas es que permite

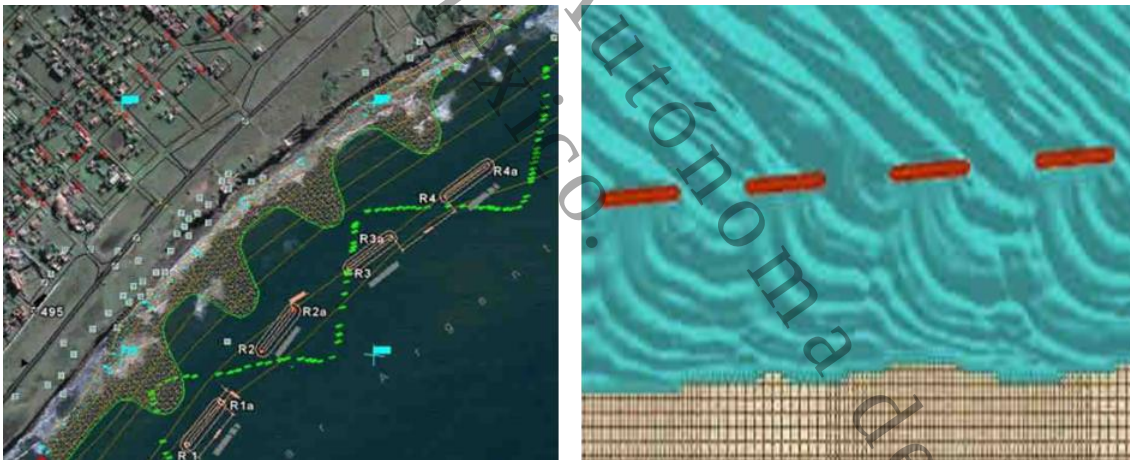
representar una situación existente y compararla con escenarios modificados o de proyecto (George et al., 2012; Kramer y Arias, 2023).

Marois y Mitsch (2017) demostraron la utilidad de un modelo matemático basado en trayectorias históricas de flujo para analizar los efectos de la ampliación y extensión de un canal, con el objetivo de apoyar el diseño de un plan de restauración de manglares afectados por el desarrollo costero y el dragado de una bahía adyacente. Este tipo de aplicaciones muestra la utilidad de la modelación hidrodinámica como herramienta de apoyo para estrategias de restauración.

De manera similar, Sciarrone et al. (2012) desarrollaron un modelo matemático para evaluar una obra de protección costera orientada a la recuperación y estabilización de una playa (Figura 6). Previamente se construyó un modelo físico considerando la geometría de la estructura proyectada, lo que permitió obtener parámetros necesarios para alimentar el modelo matemático.

**Figura 6**

*Modelación matemática de rompeolas separados de la línea de costa*



**Nota.** Adaptado de “Rompeolas aislados como estructuras de protección costera y recuperación de playas” (p. 9 y 14), por Sciarrone, Meléndez y Loschacoff, 2012, Asociación Argentina de Ingenieros Portuarios.

En ambientes lagunares, Torres Marchena (2015) estudió los procesos hidrodinámicos y de transporte de la Ciénaga Mallorquín mediante un modelo numérico bidimensional, considerando escenarios correspondientes a época seca y de lluvias. Con ello fue posible analizar la respuesta hidrodinámica del sistema bajo condiciones diferentes y observar el comportamiento de las corrientes y de las variables transportadas.

Los modelos bidimensionales y tridimensionales son de gran utilidad porque permiten conocer la distribución espacial del flujo y cómo cambia la circulación bajo diferentes escenarios, incluyendo los efectos que pueden generar distintas geometrías sobre el comportamiento del flujo (Bladé et al., 2019; Echeverribar et al., 2019; Kramer y Arias, 2023; Zeng et al., 2019). Aragón-Hernández et al. (2022) compararon resultados hidrodinámicos de tres modelos bidimensionales con mediciones experimentales realizadas en un canal de laboratorio y encontraron una aproximación aceptable entre los resultados numéricos y medidos.

Evaluar cómo las modificaciones en la geometría de un sistema estuarino pueden alterar su comportamiento hidrodinámico se puede hacer a partir de una modelación numérica. Stark et al. (2017) analizaron este fenómeno en el estuario del Escalda destacando la importancia de la configuración geométrica en su respuesta hidrodinámica.

Entre los modelos empleados para este tipo de análisis se encuentra Iber, el cual emplea el método de volúmenes finitos para la resolución de problemas relacionados con el flujo de agua, sedimentos y turbulencia (Túquerres Panamá, 2025). Iber ha evolucionado de un modelo hidrodinámico y morfodinámico hacia una herramienta numérica capaz de representar diferentes procesos ambientales de base hidrodinámica (Sanz-Ramos et al., 2022). En particular, el módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones bidimensionales de aguas someras o de St. Venant, considerando una distribución de presión hidrostática y una distribución de velocidad promediada en profundidad (Aragón-Hernández et al., 2022). A partir de estas ecuaciones se resuelve la conservación de la masa y del momento en las dos direcciones horizontales (Sanz-Ramos et al., 2022).

Ahora bien, para conocer qué tan bien representa un modelo las condiciones observadas, sus resultados deben compararse con información obtenida en campo o mediante mediciones experimentales. Esta evaluación puede realizarse mediante enfoques cualitativos y cuantitativos.

La evaluación cualitativa permite analizar visualmente el grado de correspondencia entre los valores observados y los simulados. Torres Marchena (2015) por ejemplo, utilizó los niveles de agua medidos como referencia para contrastarlos con los obtenidos mediante la modelación numérica. De manera similar, Bladé et al. (2014) compararon resultados numéricos obtenidos mediante Iber con mediciones experimentales.

La evaluación cuantitativa permite determinar numéricamente el grado de correspondencia entre los valores observados y los simulados. Aragón-Hernández et al. (2022) por ejemplo, compararon velocidades medidas experimentalmente con las calculadas por sus modelos y utilizaron regresión lineal y el coeficiente de correlación para analizar su correspondencia. Este tipo de evaluación también puede apoyarse en indicadores de error, entre los que se encuentran el error absoluto medio (MAE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Willmott & Matsuura, 2005). Cada indicador aporta información diferente del desempeño del modelo; al interpretarlos de manera conjunta, se puede tener una visión más completa.

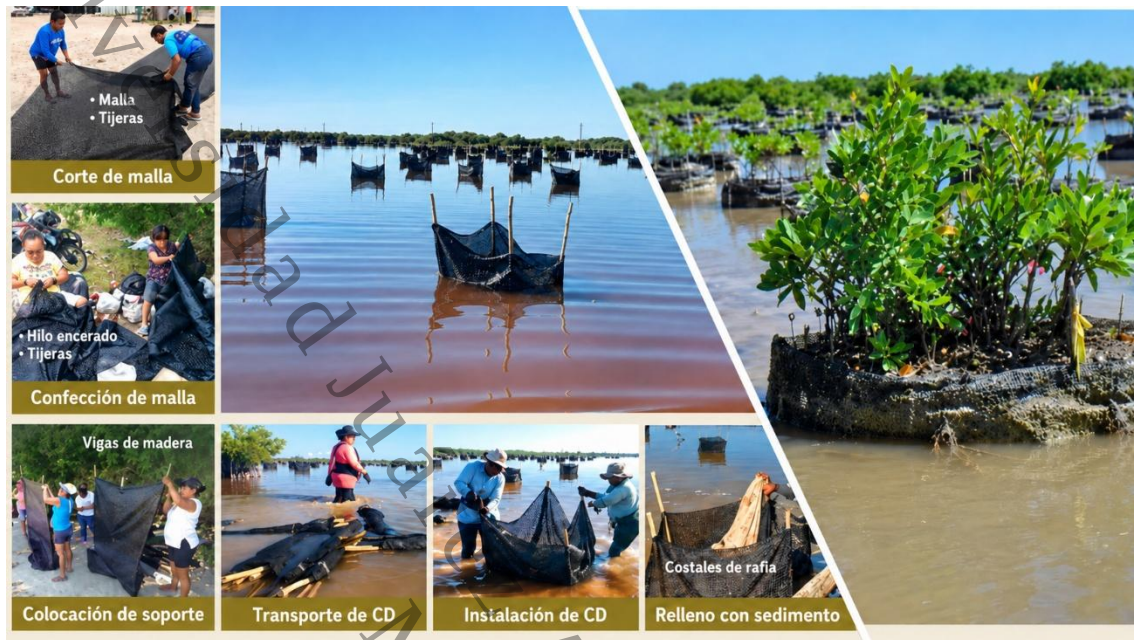
Los antecedentes revisados muestran que la modelación hidrodinámica puede utilizarse tanto para comprender el funcionamiento de un sistema como para analizar los cambios producidos por modificaciones en su geometría. También dejan claro que los resultados numéricos deben contrastarse con información observada antes de utilizarlos para interpretar el comportamiento hidráulico. Sin embargo, dentro de los antecedentes consultados no se encontraron estudios que comparen distintas configuraciones de bioingeniería con el propósito específico de conocer cómo modifican el campo de velocidades y las condiciones hidrodinámicas vinculadas con la deposición de sedimentos.

### **Criterios de Diseño**

Los Centros de Dispersión (CD) también conocidos como tarquinas, son islotes de tierra donde se siembran plántulas de mangle, estos guardan semejanza con las chinampas de los antiguos aztecas (Figura 7). Al principio, las mallas y estacas contienen el material; después, las plantas de mangle, al crecer, contribuyen a mantenerlo (Herrera-Silveira et al., 2021).

**Figura 7**

*Elaboración de centros de dispersión (CD)*



**Nota.** Adaptado de Manual para la restauración ecológica de manglares del Sistema Arrecifal Mesoamericano y el Gran Caribe (pp. 56-57), por Herrera-Silveira et al. 2021, Mesoamerican Reef Fund.

Partiendo del concepto de CD, en este estudio se denominan Centros de Dispersión Lineales (CDL) a los CD alineados de forma que modifiquen las condiciones hidrodinámicas locales. En caso de implementación en campo, su comportamiento dependerá de los materiales utilizados, de la configuración geométrica de sus elementos y del establecimiento de la vegetación. Sin embargo, la definición de los materiales y del procedimiento constructivo queda fuera del alcance de esta investigación.

Las intervenciones dentro de una corriente pueden modificar la distribución espacial de las velocidades, generando sectores donde el flujo se reduce y otros donde puede concentrarse. Fivash et al. (2021), por ejemplo, evaluaron estructuras artificiales para modificar el flujo y propiciar la acumulación de sedimentos y semillas. Los efectos hidrodinámicos fueron monitoreados mediante un Velocímetro Doppler Acústico (ADV) y registró menor energía y turbulencia dentro de las estructuras.

La velocidad es una variable hidráulica importante para analizar el azolvamiento debido a que interviene en el transporte y la deposición de sedimentos. Una reducción de la velocidad puede disminuir la capacidad del flujo para mantener las partículas en movimiento, mientras que un incremento puede generar condiciones más favorables para su movilización (Bosboom & Stive, 2023). por ello, la distribución espacial de las velocidades permite identificar los cambios hidrodinámicos generados por una intervención.

Por esta razón, las configuraciones de bioingeniería se evalúan a partir del cambio en la velocidad del flujo respecto de la condición natural del sistema. La comparación permite identificar cuáles incrementan la circulación y cuál presenta la respuesta más favorable frente a las demás alternativas y a la condición sin intervención.

### Justificación

En México, los sistemas lagunares con áreas de manglar presentan un importante valor ambiental y paisajístico. La Laguna Mecoacán es un ejemplo de ello, ya que, además de albergar vegetación de manglar, forma parte del entorno productivo de las comunidades cercanas, principalmente por actividades como la pesca. Mantener el intercambio y la circulación del agua dentro del sistema es necesario tanto para la conservación ambiental como para sostener las actividades que dependen de sus recursos. A esta importancia se suma la vulnerabilidad física de su entorno costero. Núñez Gómez et al. (2016) identificaron el sector ubicado frente a la laguna Mecoacán como una zona de muy alta vulnerabilidad ante el incremento del nivel del mar y procesos asociados a la erosión e inundación. Este resultado resalta la necesidad de estudiar su funcionamiento.

El funcionamiento hidráulico de la laguna está condicionado por aportes continentales, la influencia de la marea y la configuración topobatemétrica de sus canales y bocanas. La interacción de estos elementos determina la entrada y salida de agua, así como la distribución de las velocidades dentro del sistema. Cuando los sedimentos se acumulan en las zonas de conexión, la sección disponible para el flujo puede disminuir y modificar las condiciones de circulación. En la bocana del canal de Río Hondo, situada en su conexión con la Laguna Mecoacán, el levantamiento topobatemétrico permitió identificar una sobre elevación del fondo. A partir de una línea de referencia trazada en el perfil longitudinal, se estimaron diferencias verticales de entre 0.34 y 1.00 m. Esta condición topobatemétrica puede reducir localmente la profundidad y la sección hidráulica disponible, limitar el intercambio de agua y propiciar zonas de baja movilidad potencialmente favorables para la deposición de sedimentos. Ante esta situación, se evaluaron tres configuraciones de bioingeniería mediante modelación numérica. Los CDL evaluados se plantearon para modificar la distribución de las velocidades y los patrones de circulación del agua, buscando concentrar el flujo en la sección libre de la bocana.

Desde el punto de vista académico, el principal aporte de esta investigación consiste en comparar el efecto de diferentes configuraciones de CDL sobre la distribución de las velocidades y los patrones de circulación. Los resultados proporcionan un sustento técnico para evaluar este tipo de intervenciones mediante modelación numérica y apoyar futuros estudios que consideren las condiciones hidrodinámicas particulares de cada sitio.

### **Preguntas de Investigación**

- ✚ ¿Cuáles son las condiciones hidrodinámicas que caracterizan la bocana del canal de Río Hondo?
- ✚ ¿Cómo modifican las diferentes configuraciones de Centros de Dispersión Lineales (CDL) la distribución de las velocidades y los patrones de circulación del agua en la bocana del canal?
- ✚ ¿Qué correspondencia se observa entre los niveles de agua obtenidos mediante el modelo hidrodinámico y los registrados en campo?

### **Hipótesis o Supuesto**

Las configuraciones modeladas de Centros de Dispersión Lineales (CDL) en la bocana del canal de Río Hondo modificarán la distribución de las velocidades y los patrones de circulación del agua respecto a la condición actual. Se espera que al menos una de las configuraciones incremente la velocidad del flujo en la bocana del canal y amplíe la zona de mayor movilidad entre el canal y el cuerpo lagunar, generando condiciones hidrodinámicas potencialmente menos favorables para la deposición de sedimentos.

### **Objetivo General**

Evaluar hidrodinámicamente tres configuraciones de bioingeniería mediante Centros de Dispersión Lineales (CDL) en la bocana del canal de Río Hondo a través de simulaciones numéricas, con el fin de analizar su influencia sobre la distribución de velocidades y los patrones de circulación del agua.

### **Objetivos Específicos**

- ✚ Realizar un levantamiento topobatimétrico del sitio de estudio mediante equipos ADCP y RTK.
- ✚ Simular el comportamiento del sistema hidrodinámico bajo las condiciones actuales registradas durante la realización de esta investigación.
- ✚ Comparar cualitativamente los niveles de agua simulados mediante el modelo hidrodinámico con los registrados en campo.
- ✚ Simular el comportamiento hidrodinámico de tres configuraciones de CDL propuestas en la bocana del canal de Río Hondo.
- ✚ Comparar las configuraciones propuestas con la condición actual, considerando la distribución de las velocidades y los patrones de circulación del agua.

## Metodología

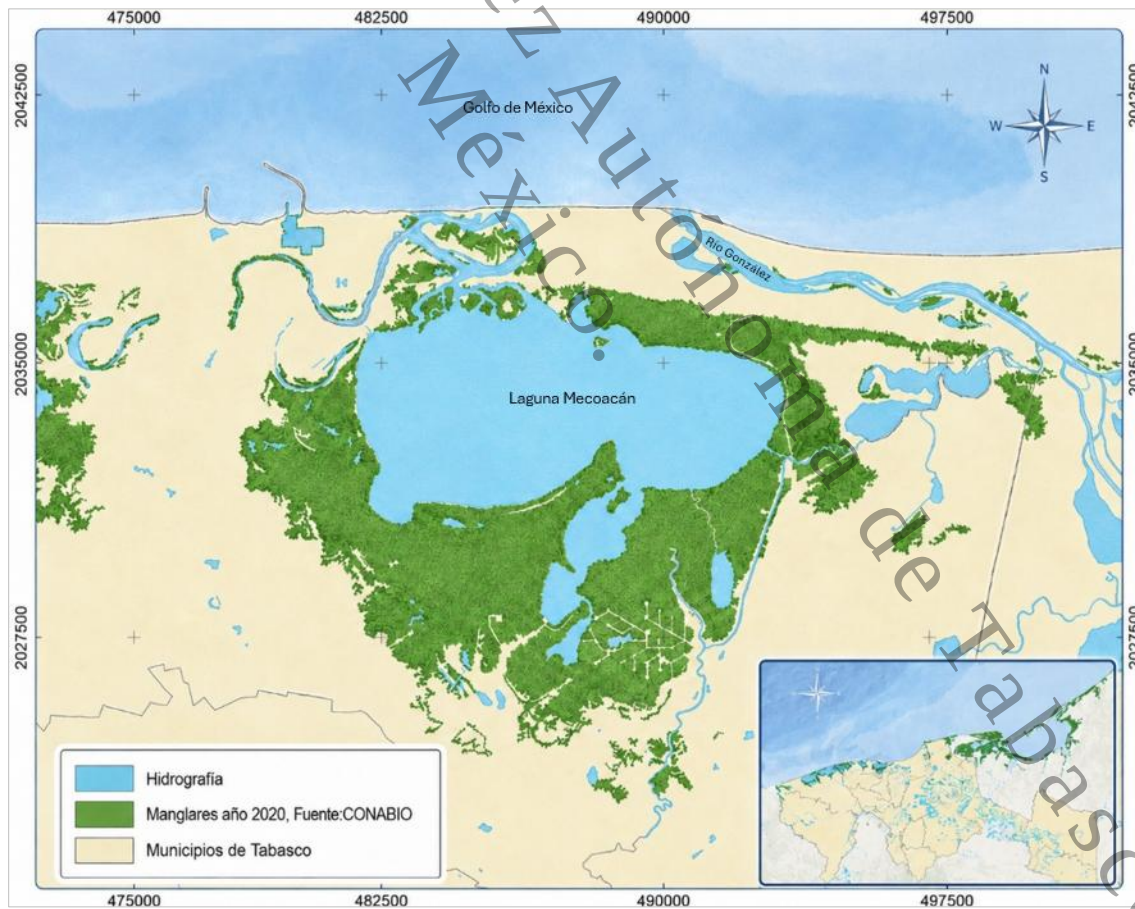
La presente investigación es de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo, diseño no experimental, apoyada en mediciones de campo y modelación numérica hidrodinámica.

## Área de Estudio

La laguna Mecoacán se localiza en el municipio de Paraíso, Tabasco, en la región costera del sur-occidente del Golfo de México. Este sistema lagunar mantiene comunicación con el Golfo de México a través de sus bocanas y canales de conexión. El sitio de interés se localiza al noroeste del sistema lagunar, cuya conexión con el mar se realiza a través del Río González. Además, en la laguna se desarrollan extensas áreas de manglar (véase la Figura 8).

**Figura 8**

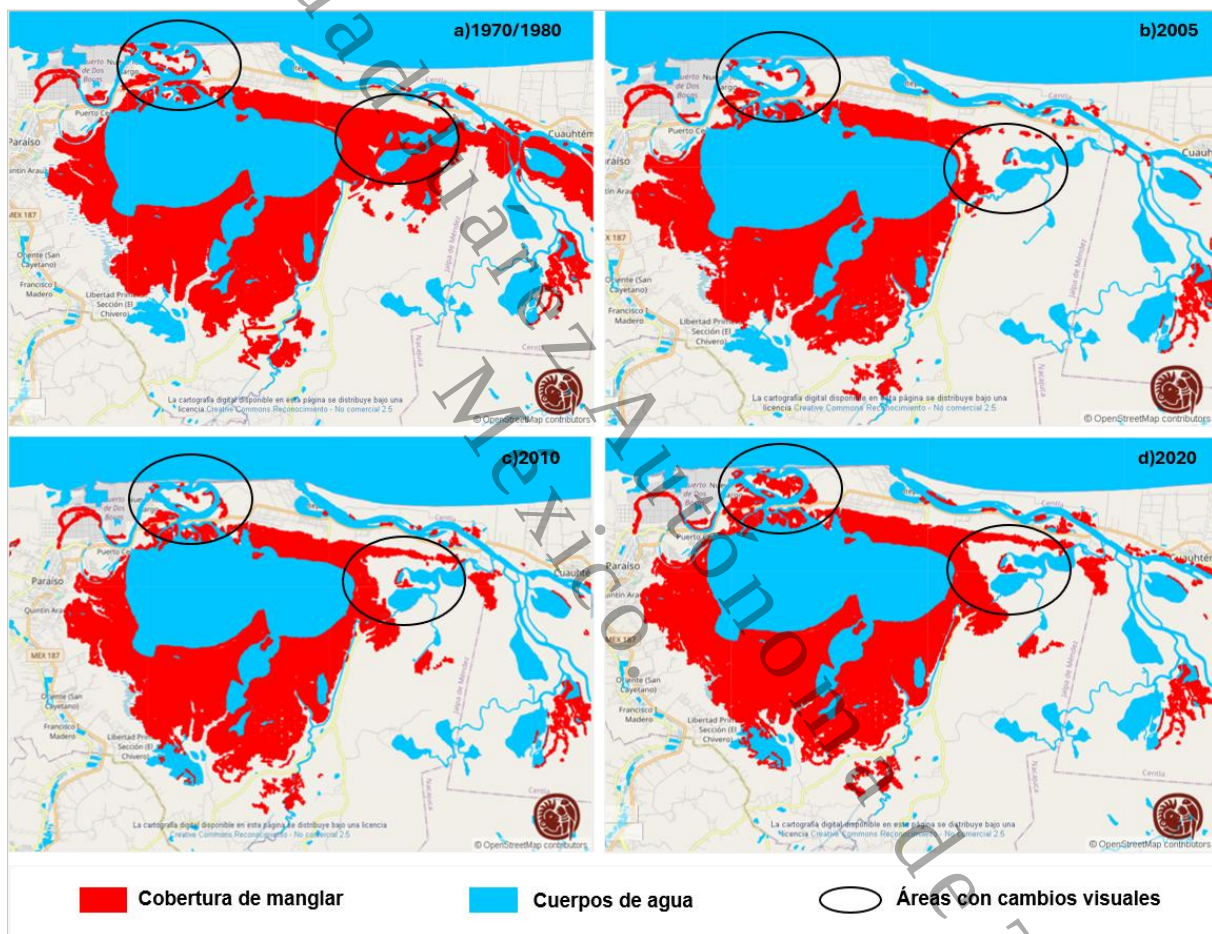
*Localización de los sistemas de manglar en la Laguna Mecoacán, estado de Tabasco*



La Figura 9 presenta mapas históricos de la cobertura de manglar. El color rojo representa las áreas cubiertas por manglar y el azul los cuerpos de agua, mientras que los círculos de color negro señalan las áreas donde se identificaron cambios visuales entre los periodos analizados. Uno de ellos corresponde a la zona de conexión entre la laguna Mecoacán y el canal de Río Hondo.

**Figura 9**

*Distribución del manglar a través del tiempo en la Laguna Mecoacán, Tabasco*



**Nota.** Elaboración propia con base en información cartográfica de CONABIO (2013a, 2013b, 2013c, 2021), con mapas base de OpenStreetMap contributors (<https://www.openstreetmap.org/copyright>).

La Laguna Mecoacán y sus principales conexiones hidráulicas fueron contempladas en la modelación hidrodinámica, con una extensión total de dominio de aproximadamente 180 km<sup>2</sup> (18 000 ha). Dentro de este dominio, el análisis detallado se centró en la bocana del canal de Río Hondo,

ubicada aproximadamente en las coordenadas UTM X = 4927278 m E y Y = 2032726 m N, de acuerdo con el sistema de referencia WGS 84 / UTM Zona 15N.

En la Figura 10 se presentan la delimitación del dominio modelado, las principales conexiones hidráulicas del sistema y la ubicación del sitio donde se evaluaron las configuraciones propuestas. La Figura 11 presenta un acercamiento de este sitio, que permite identificar la bocana del canal de Río Hondo y su conexión con la laguna Mecoaacán.

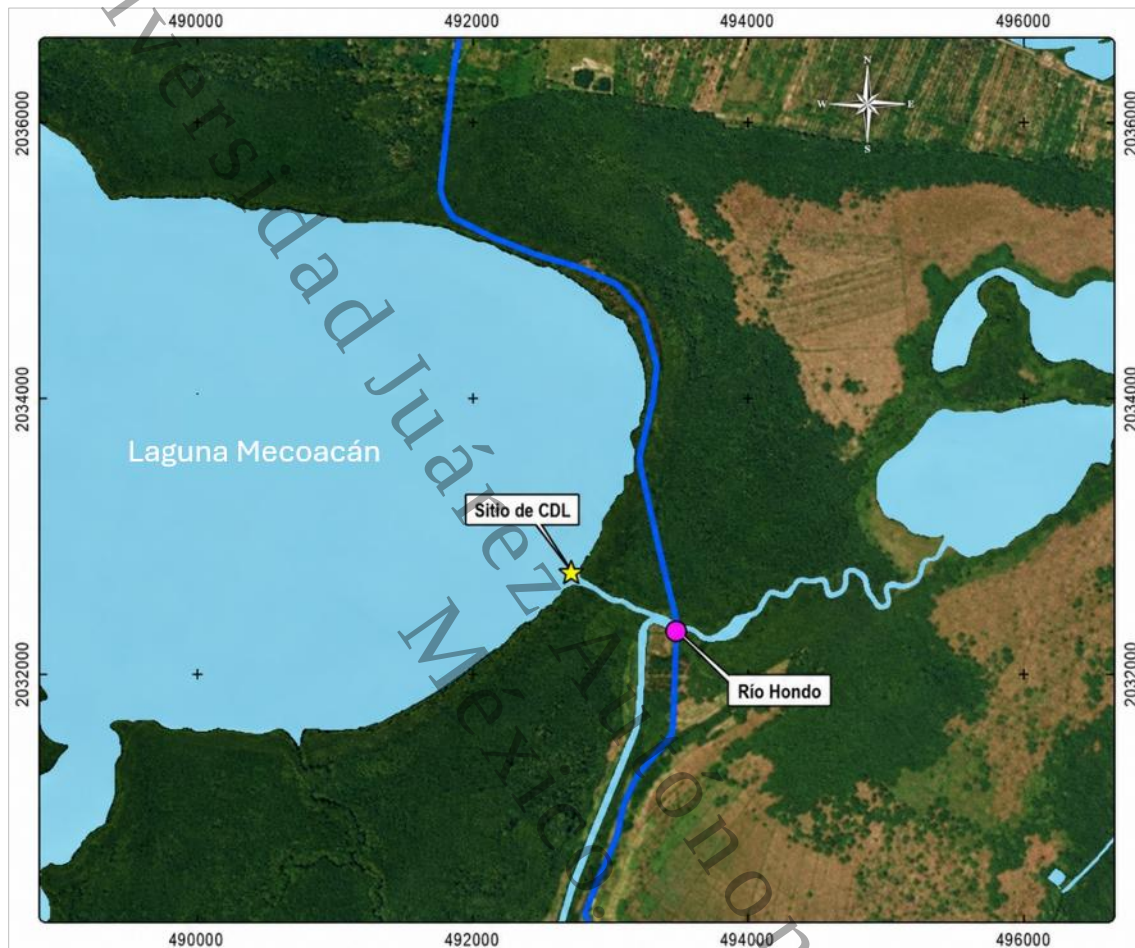
**Figura 10**

## Dominio de la modelación y principales conexiones hidráulicas de la laguna Mecoacán, Tabasco



**Figura 11**

*Ubicación de la bocana del canal de Río Hondo y su conexión con la laguna Mecoacán*

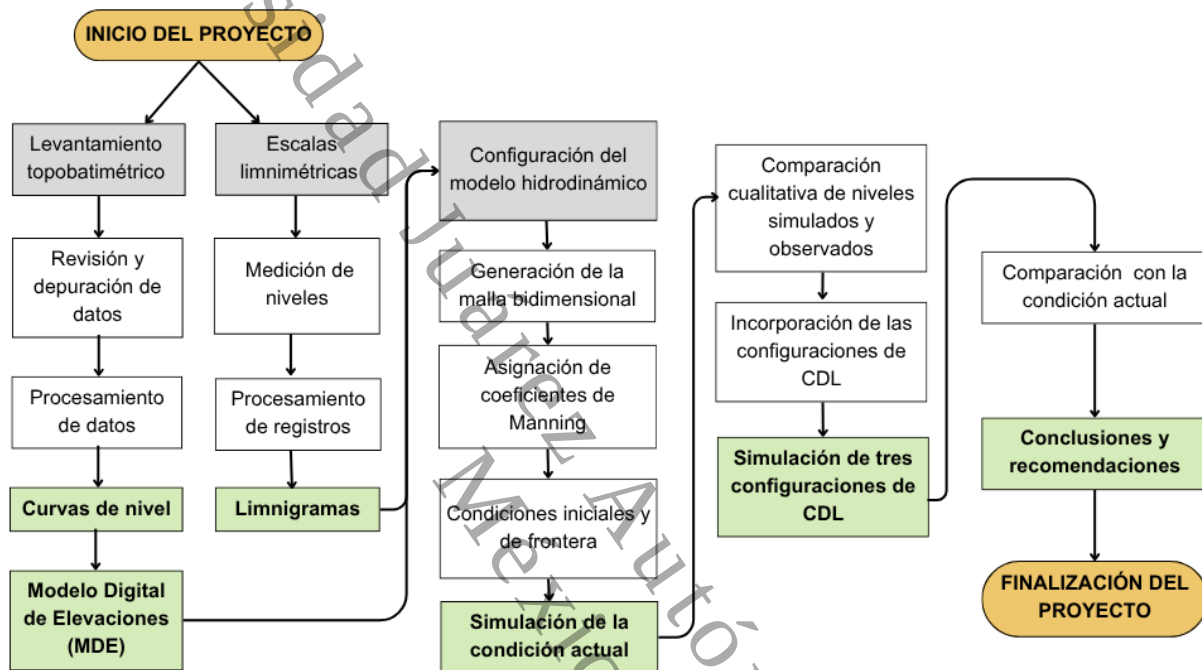


## Diagrama de Procedimiento Metodológico

En la Figura 12 se presenta el procedimiento seguido para la ejecución del proyecto.

Figura 12

Diagrama del procedimiento metodológico de la investigación



A continuación, se describen las etapas que lo conforman.

### Levantamiento Topobatómico

Se realizó el levantamiento topográfico y batimétrico utilizando equipos RTK y ADCP, respectivamente. En este estudio, se utilizó el registro de la configuración batimétrica del sitio obtenido con el equipo ADCP de la marca Sontek, modelo M-9 con las características mostradas en la Tabla 2.

**Tabla 2***Especificaciones del equipo ADCP de la marca Sontek modelo M-9 empleado en los trabajos*

| <b>Especificaciones</b>               |                                                     |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Medición de velocidad</b>          |                                                     |
| Rango de perfiles (distancia):        | 0.06m a 40m                                         |
| Rango de perfiles (velocidad):        | +/- 20m/s                                           |
| Precisión:                            | hasta +/- .25% de la velocidad medida: +/- 0.2 cm/s |
| Resolución:                           | 0.001 m/s                                           |
| Número de celdas:                     | Hasta 128                                           |
| Tamaño de celdas:                     | 0.02m a 4m                                          |
| <b>Configuración de transductores</b> |                                                     |
| 1 haz vertical (profundidad)          | 0.5 mhz                                             |
| 4 haces de velocidad                  | 3.0 mhz                                             |
| 4 haces de velocidad                  | 1.0 mhz                                             |
| <b>Medición de profundidad</b>        |                                                     |
| Rango:                                | 0.2m a 80m                                          |
| Exactitud:                            | 1%                                                  |
| Resolución:                           | 0.001m                                              |

El levantamiento de la bocana del canal Río Hondo con la conexión a la laguna Mecoacán se llevó a cabo el día 8 de septiembre de 2025, con una duración aproximada de 4 horas, mientras que el resto de la laguna Mecoacán se levantó en días posteriores desde una lancha utilizando un equipo ADCP. El levantamiento topográfico de la zona terrestre se realizó paralelamente al de batimetría utilizando un equipo RTK.

La Figura 13 ilustra el levantamiento con el equipo ADCP.

**Figura 13**

*Levantamiento batimétrico con ADCP*



Durante el levantamiento, el ADCP registró tanto la profundidad como la velocidad del flujo. Las velocidades obtenidas durante el levantamiento no se consideraron para validar la simulación, ya que están condicionadas por factores ambientales como el viento, que no fueron incluidos en el modelo.

En la Figura 14 se muestra el posicionamiento del punto de control (GPS), el cual fue ubicado en un sitio libre de vegetación, con el fin de evitar interferencias y garantizar una correcta georreferenciación.

**Figura 14**

*Levantamiento topográfico con Equipo RTK*

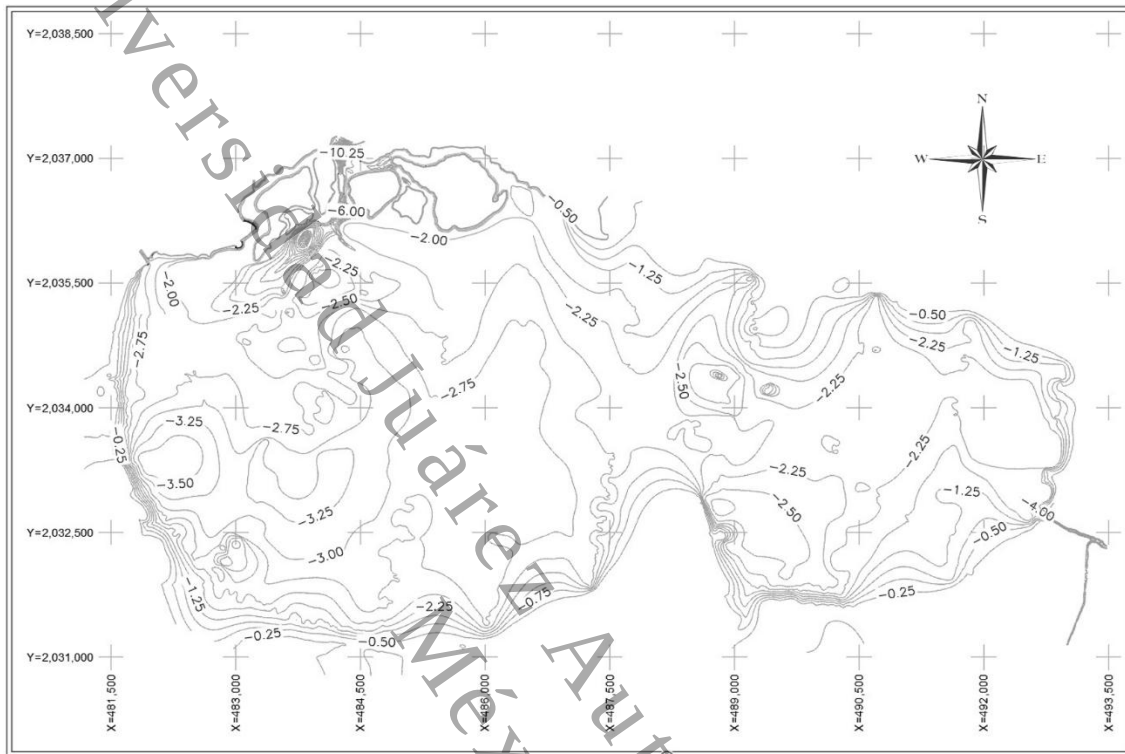


La información obtenida en campo fue procesada en gabinete.

El registro de levantamiento topobatimétrico requiere ajustar el valor de  $z$  con respecto a la lámina de agua medida en campo. La lámina de agua está referenciada al punto de control y la red activa del INEGI. Una vez corregidas las cotas, los datos correspondientes a las coordenadas  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  fueron procesados mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD), en su versión educativa. A partir de esta información se generaron las curvas de nivel (véase Figura 15).

**Figura 15**

*Curvas de nivel Laguna Mecoacán, Paraíso, Tabasco*

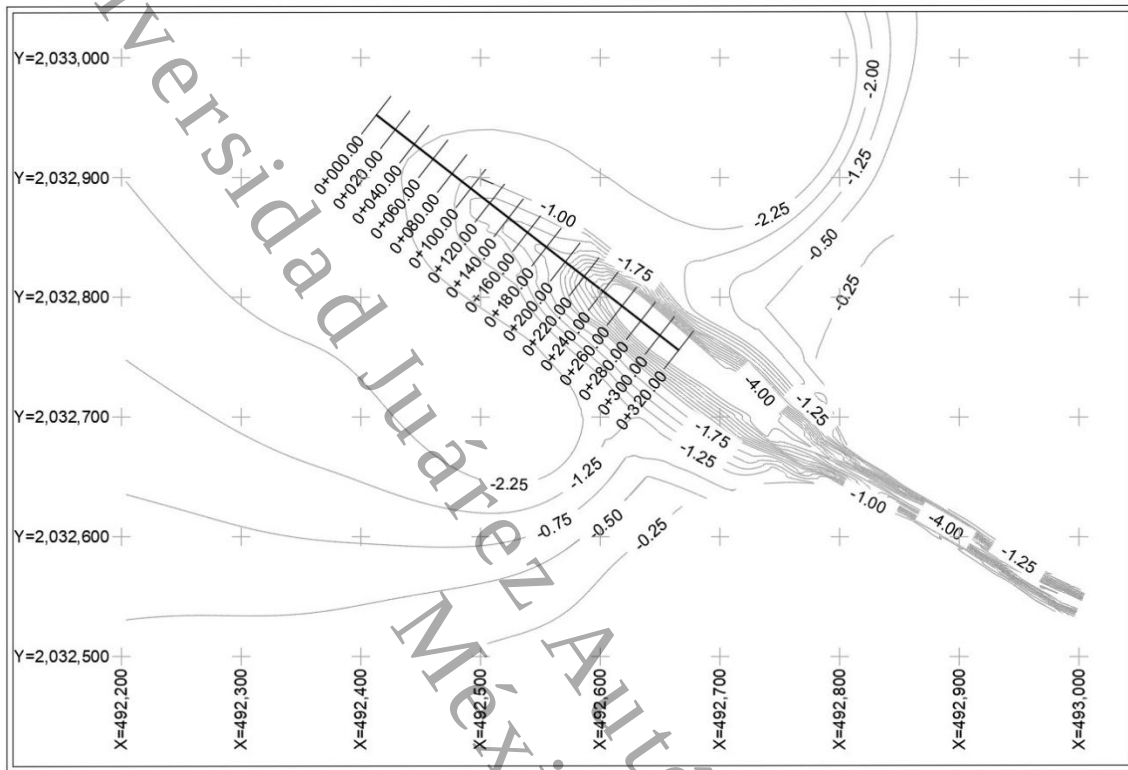


La información obtenida sirvió para conocer la configuración topobatemétrica de la zona de estudio.

En la Figura 16 se muestran el eje del perfil trazado y las curvas de nivel en la transición entre el canal de Río Hondo y el cuerpo lagunar. Se observó que el canal alcanza una cota de fondo de -4 m.s.n.m., conforme se aproxima a la zona de transición con la laguna. Al adentrarse hacia el cuerpo lagunar, el canal pierde progresivamente profundidad, evidenciándose la presencia de un tapón (sobreelevación del fondo), caracterizado por cotas de fondo comprendidas entre -1 y -3 m.s.n.m. Una vez superada esta zona de sobreelevación, la cota del fondo disminuye nuevamente.

**Figura 16**

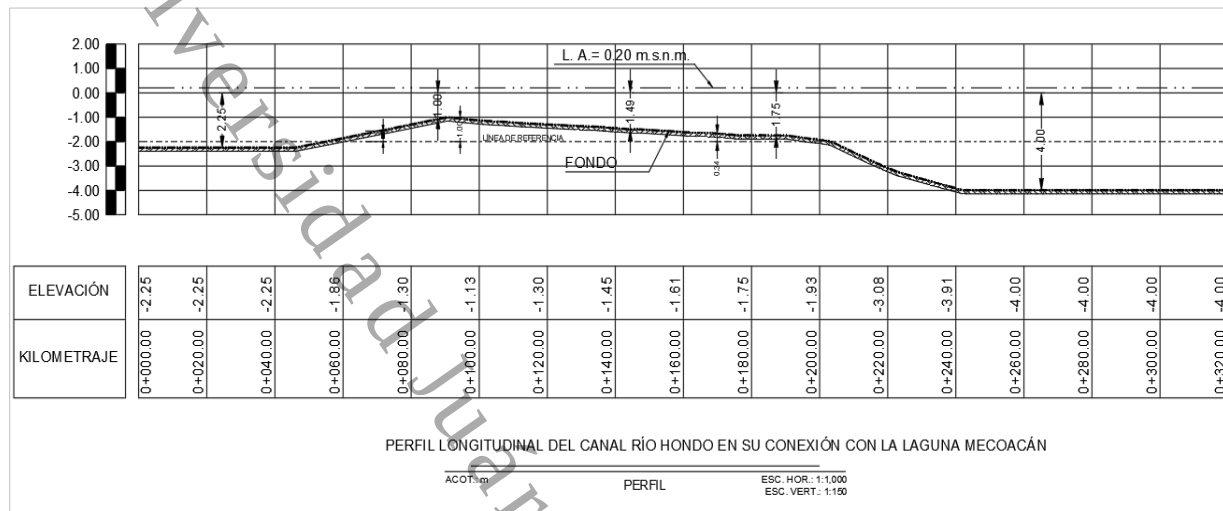
*Curvas de nivel en la transición entre el canal de Río Hondo y el cuerpo lagunar*



Con el fin de mostrar a mayor detalle la zona donde se identificó el tapón, se presenta el perfil longitudinal correspondiente al eje trazado en la Figura 17. En el perfil se incorporó una línea de referencia que permitió estimar las diferencias verticales.

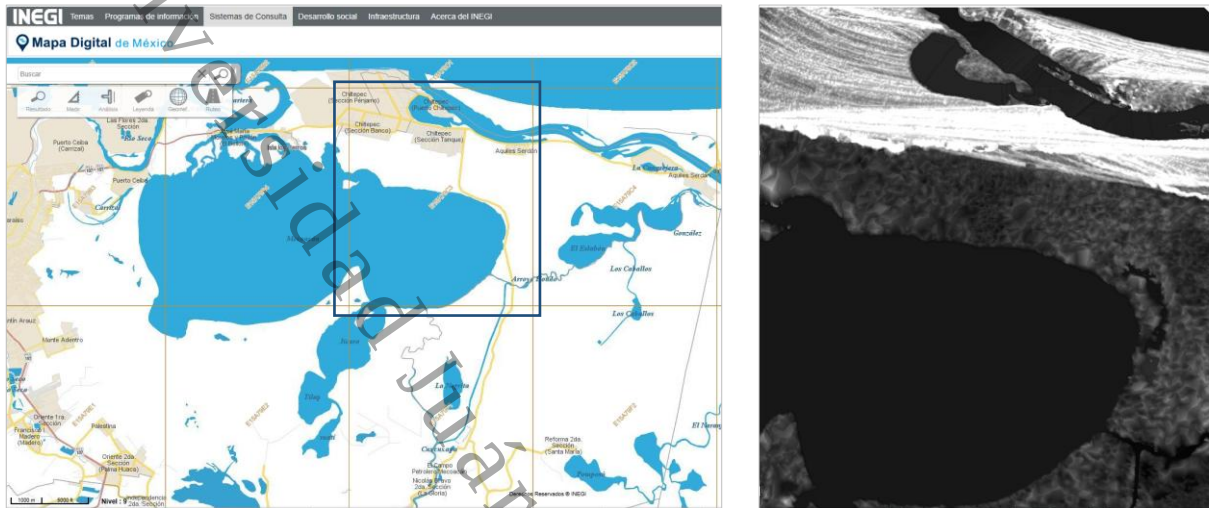
**Figura 17**

*Perfil longitudinal de la transición entre el canal de Río Hondo y el cuerpo lagunar*



A partir de la línea de referencia se estimó una diferencia vertical entre 0.34 y 1.00 m. Estos valores indican una sobreelevación local del fondo y, por consiguiente, una disminución de la profundidad disponible para el flujo. Sin embargo, las diferencias estimadas no representan directamente el espesor de los sedimentos acumulados, debido a que no se cuenta con información topobatemétrica previa que sirva de referencia para conocer la configuración del sitio.

La información del levantamiento topobatemétrico se transformó en un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), con el propósito de representar de manera continua la geometría del terreno y del fondo lagunar. Las áreas que no fueron levantadas en campo se complementaron con MDE de alta resolución del INEGI, generados mediante tecnología LiDAR, con una resolución espacial de 5 m, en formato ráster (Figura 18).

**Figura 18***Modelo Digital de Elevación clave E15A79C3*

**Nota.** Adaptado de Mapa Digital de México V6 [mapa interactivo], por INEGI, s. f., (<https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjE4LjM2NTgwLGxvbjotOTMuMTQ5NTgsejo4LGw6dDExMXNlcnZpY2lvcw==>).

Para generar el MDE correspondiente a la información obtenida en campo, las curvas de nivel se transformaron en una red irregular de triángulos (TIN) mediante QGIS, software libre y de código abierto. Posteriormente, esta superficie fue convertida a formato ráster utilizando el mismo software.

Finalmente, el ráster generado a partir del levantamiento de campo y los MDE del INEGI se unieron mediante la herramienta Combinar (Merge) de QGIS. El ráster correspondiente al levantamiento se colocó al final de la lista de entrada para darle prioridad a sus valores de elevación en las zonas de superposición.

### **Medición de Niveles Mediante Escalas Limnimétricas**

Las escalas limnimétricas fueron instaladas en puntos estratégicos de la Laguna Mecoacán, en específico en las conexiones hidráulicas directas o indirectas con el mar (véase Figura 19). Las lecturas obtenidas permitieron registrar la variación del nivel del agua (cota de agua) durante el periodo de monitoreo.

Las elevaciones usadas como referencia para las escalas limnimétricas (Tabla 3) se obtuvieron mediante levantamiento GPS y posproceso de los registros RINEX, vinculados a la red activa del INEGI. Las coordenadas horizontales están referenciadas al sistema WGS 84 / UTM Zona 15N.

**Figura 19**

*Ubicación de las escalas limnimétricas instaladas en la Laguna Mecoacán*



**Tabla 3***Resumen de las escalas empleadas para el registro de los niveles de agua*

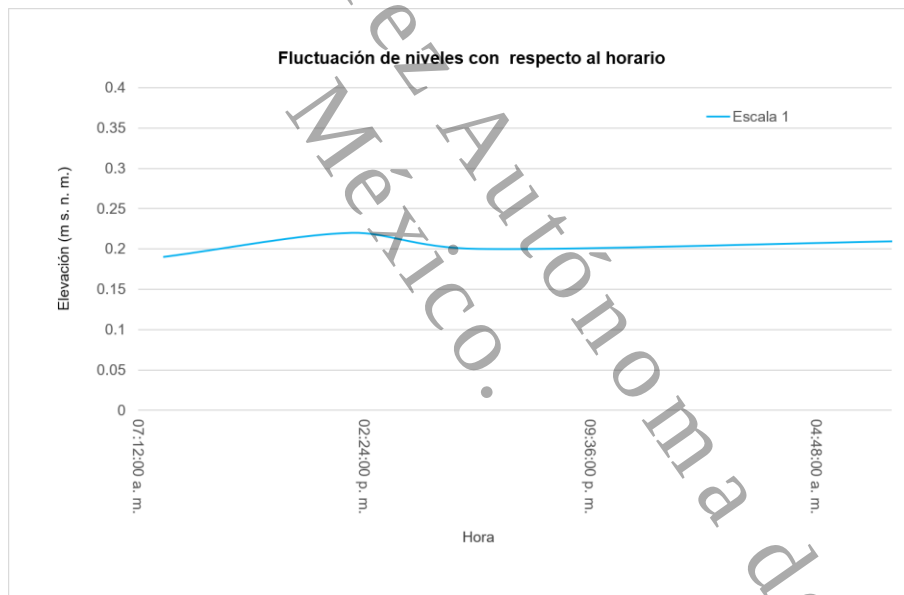
| Escala                     | Coordenadas UTM                      | Periodo de monitoreo      | Horario                                    | Número de registros | Observaciones   |
|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|---------------------|-----------------|
| Escala 1<br>Río Cuxcuxapa. | X=491064.81 m E<br>Y= 2026562.58 m N | 25 al 26 de enero de 2026 | 8:00, 14:00, 20:00 y 8:00 h día siguiente. | 4                   | Cielo despejado |
| Escala 2<br>Río Hondo.     | X=493453.63 m E<br>Y= 2032298.75 m N | 25 al 26 de enero de 2026 | 8:00, 14:00, 20:00 y 8:00 h día siguiente. | 4                   | Cielo despejado |
| Escala 3<br>El bellote.    | X=484447.34 m E<br>Y= 2037167.18 m N | 25 al 26 de enero de 2026 | 8:00, 14:00, 20:00 y 8:00 h día siguiente. | 4                   | Cielo despejado |

Para realizar las mediciones, personal de campo acudió a cada uno de los sitios donde se instalaron las escalas limnimétricas y efectuó la lectura directa del nivel del agua. Los registros se anotaron de forma manual en horarios previamente acordados, de acuerdo con la posibilidad del personal. Debido a que las lecturas se realizaron en momentos específicos del día, no representan de manera continua toda la oscilación mareal.

A partir de los registros obtenidos durante el monitoreo, se elaboró el limnigrama de cada sitio. La instalación de cada escala limnimétrica junto con el limnigrama obtenido, se presenta en la Figura 20, Figura 21 y Figura 22.

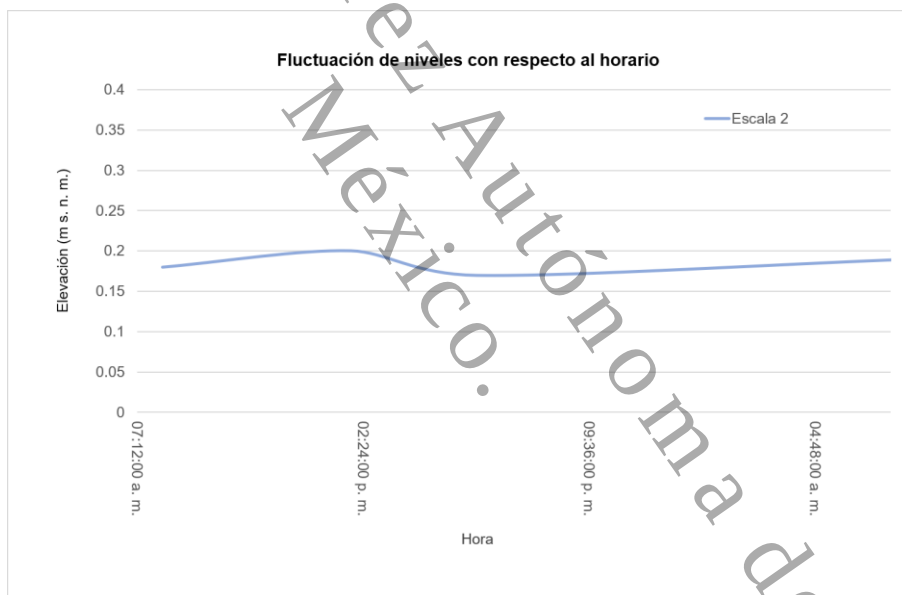
**Figura 20**

*Escala limnimétrica instalada a la altura del Puente Río Cuxcuxapa*



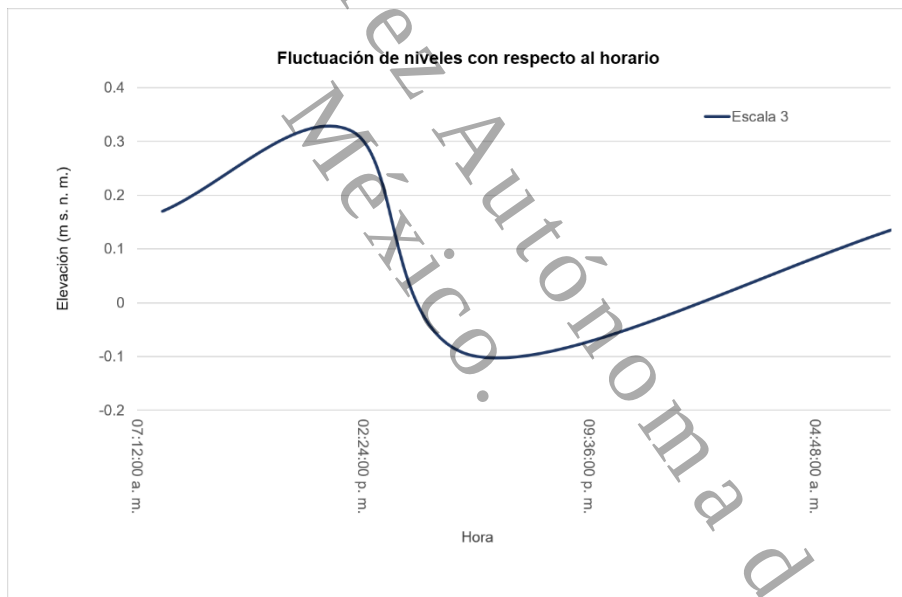
**Figura 21**

*Escala limnimétrica instalada a la altura de la conexión hidráulica Río Hondo*



**Figura 22**

*Escala limnimétrica instalada a la altura de conexión hidráulica El Bellote*



## Simulaciones Numéricas

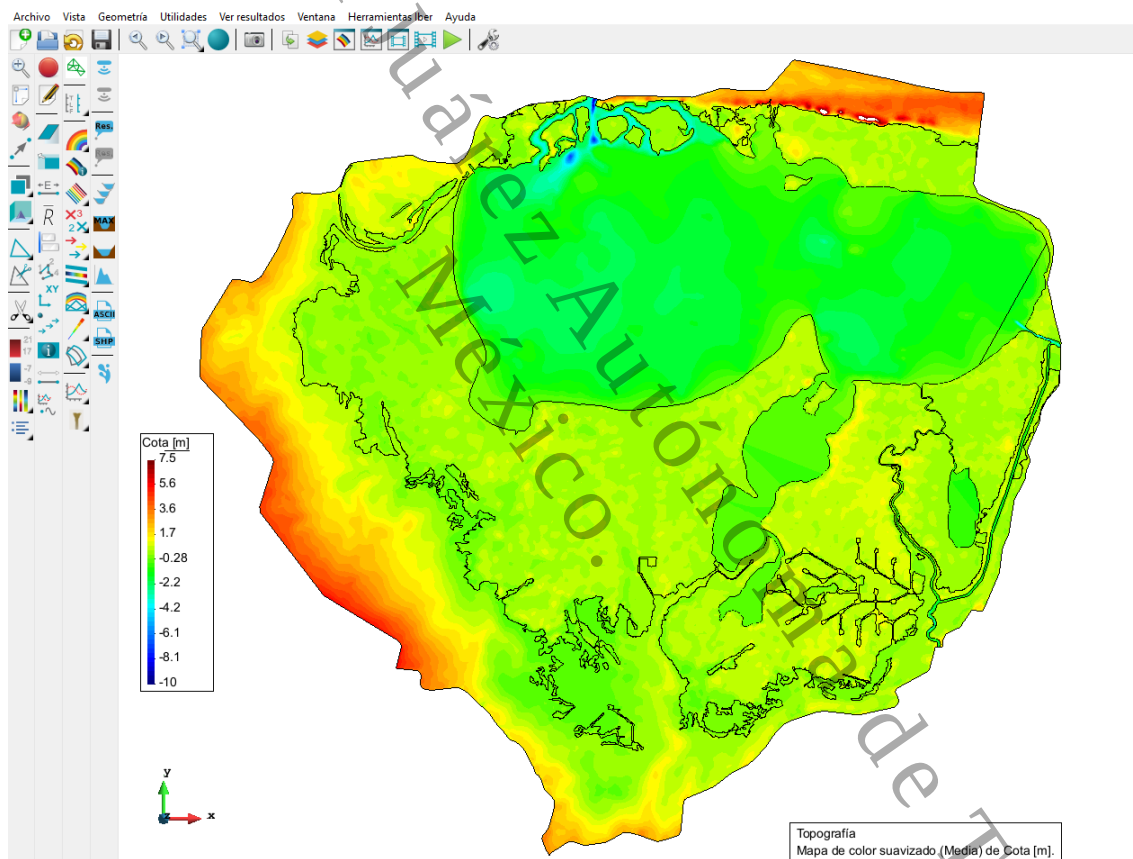
Para la ejecución de la modelación numérica bidimensional se empleó el software Iber 3.4.

### *Configuración del Modelo Numérico*

Como insumo para representar la geometría del dominio de cálculo, se utilizó el MDE final, mostrado en la Figura 23.

**Figura 23**

*Representación del MDE de la extensión del dominio en condiciones actuales*



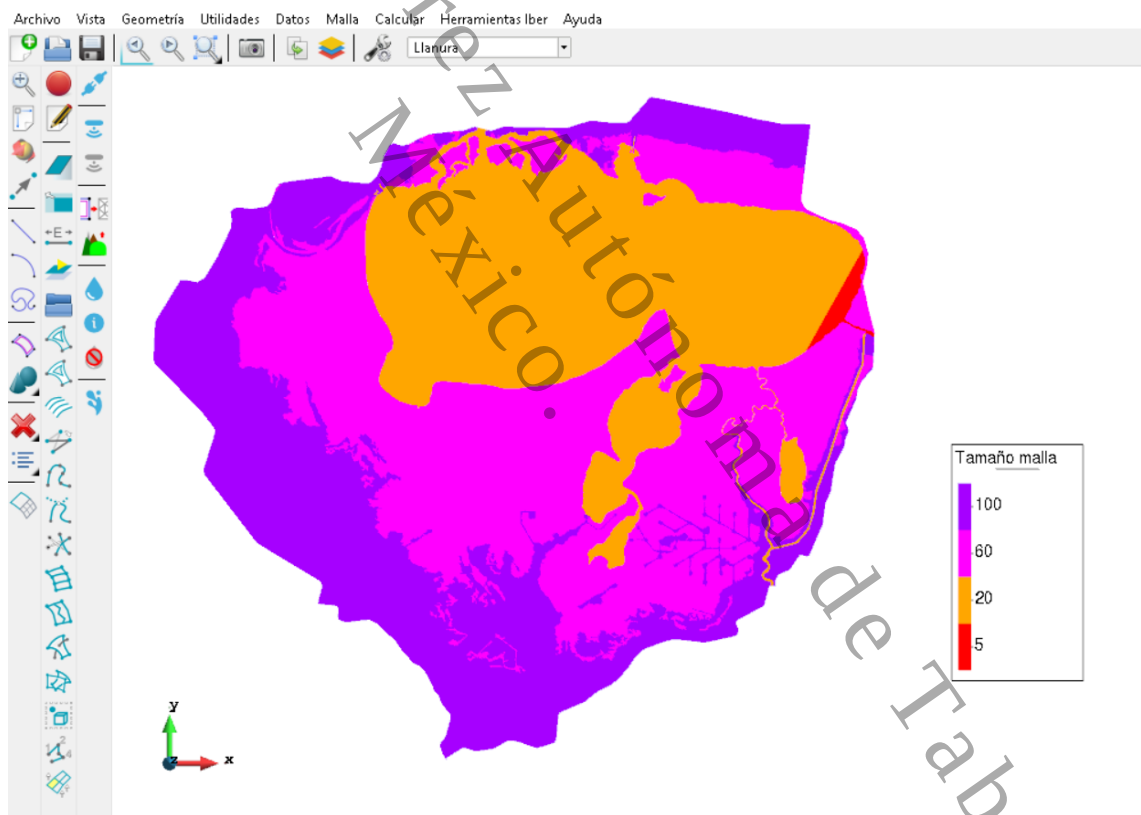
### ***Malla Bidimensional***

En la Figura 24 presentan los diferentes tamaños de la malla bidimensional correspondiente al área de dominio, definidos de acuerdo con el nivel de detalle requerido en cada zona. En el área donde se evaluaron las configuraciones de CDL se utilizaron elementos de menor tamaño, mientras que en las zonas más alejadas del área de interés se emplearon elementos de mayor tamaño.

Los elementos de la malla variaron entre 5 y 100, con un total de 606 367 elementos. El uso de elementos más pequeños permitió representar con mayor detalle la zona de interés; sin embargo, este refinamiento incrementa el costo computacional.

**Figura 24**

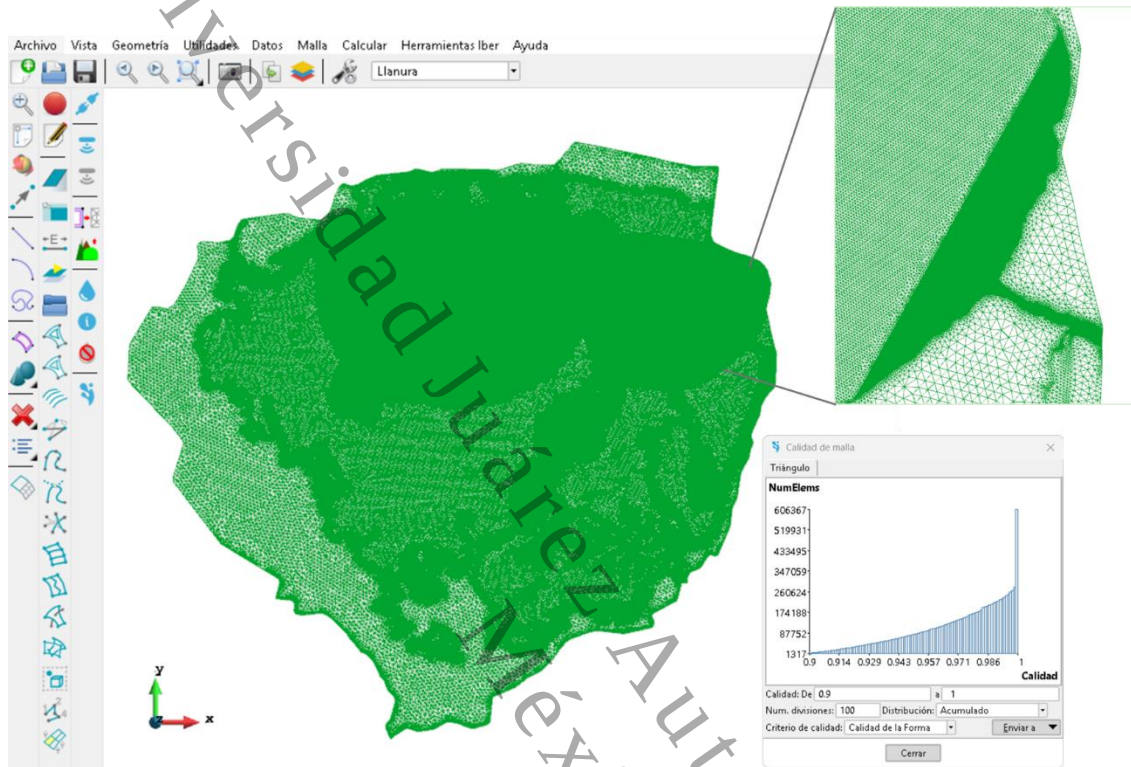
*Tamaños de malla empleados en el área de simulación*



En la Figura 25 se muestra un acercamiento a detalle de dicha malla, permitiendo visualizar con claridad la distribución y densidad de los elementos utilizados en la modelación.

**Figura 25**

*Detalle del mallado en el área de interés (donde se aplicará la técnica de bioingeniería)*



### ***Coefficiente de Rugosidad***

Los valores de rugosidad de Manning asignados en el área de simulación se definieron a partir de las características observadas en campo (Figura 26) y tomando como referencia los valores reportados por Chow (1959) para superficies con condiciones similares.

**Figura 26**

*Coefficientes de Manning asignados en la simulación*



Para la Laguna Mecoacán se consideró un coeficiente de Manning de 0.025, al tratarse principalmente de una superficie de agua libre de vegetación. En la periferia de la laguna, donde predomina vegetación densa de manglar, se asignó un valor de 0.070 para representar la mayor resistencia que este tipo de cobertura ejerce sobre el flujo. Finalmente, para el área restante del dominio, considerada como llanura de inundación y caracterizada por vegetación dispersa y presencia de infraestructura, se utilizó un coeficiente de Manning de 0.040. En la Tabla 4 se resumen los valores empleados.

**Tabla 4**

*Valores de Manning usados en la simulación numérica*

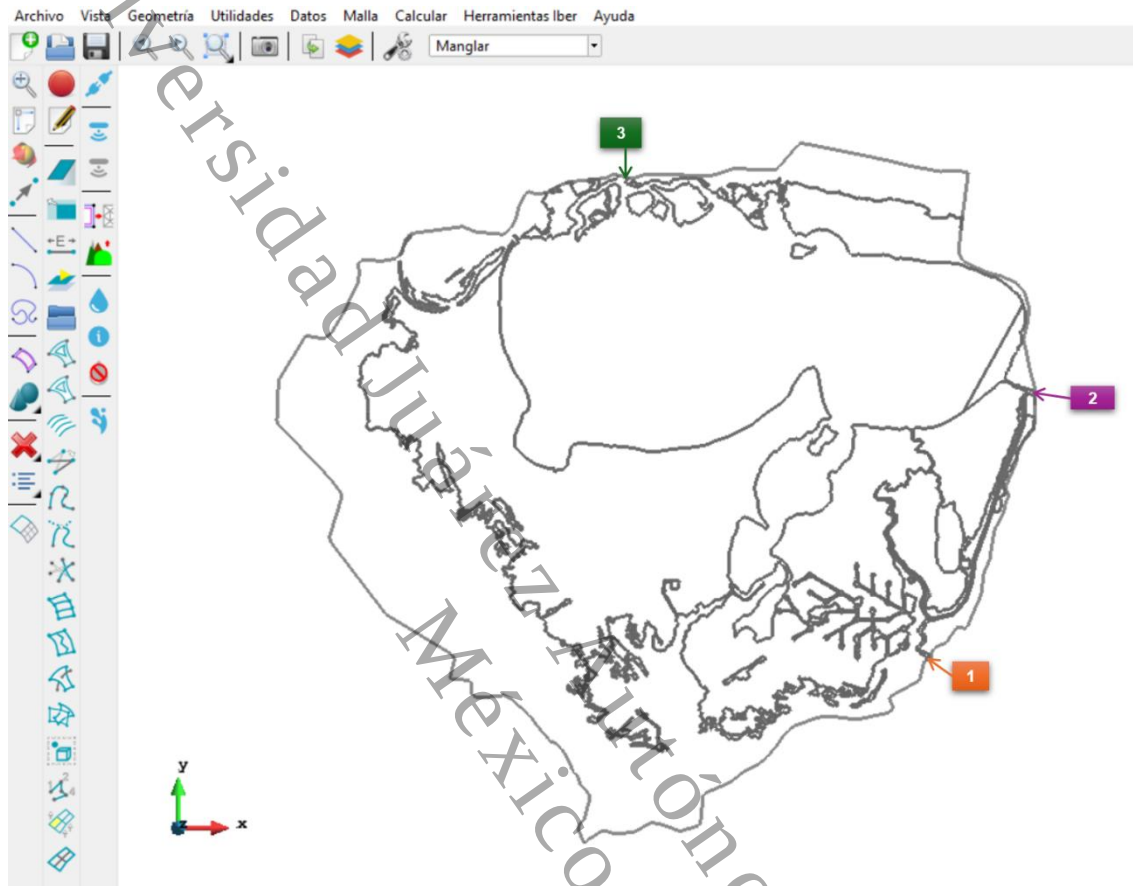
| Cobertura                        | Característica                                                   | Valor | Fuente      |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------|-------------|
| Laguna Mecoacán.                 | Agua limpia y libre de vegetación.                               | 0.025 | Chow (1959) |
| Periferia de la laguna Mecoacán. | Vegetación densa de manglar.                                     | 0.070 | Chow (1959) |
| Área restante del dominio.       | Llanura de inundación con vegetación dispersa e infraestructura. | 0.040 | Chow (1959) |

**Nota.** Los valores fueron seleccionados tomando como referencia los rangos reportados por Chow (1959) para condiciones de cobertura semejantes a las observadas en el área de estudio.

### **Condiciones Iniciales y de Contorno**

Las condiciones de contorno fueron definidas a partir de la información recabada en los limnigramas. En las tres ubicaciones de contorno se utilizaron los niveles de agua medidos durante el monitoreo.

La Figura 27 muestra la ubicación de las condiciones de contorno asignadas en el modelo, identificadas como 1, 2 y 3.

**Figura 27***Ubicación de condiciones de contorno asignadas en la simulación*

El tiempo y cota correspondientes a cada ubicación se presentan en la Tabla 5. El tiempo inicial 0 corresponde a las 8:00 h y así sucesivamente.

**Tabla 5***Serie temporal de niveles utilizados como condiciones de contorno*

| Ubicación 1 |          | Ubicación 2 |          | Ubicación 3 |          |
|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| Tiempo (s)  | Cota (m) | Tiempo (s)  | Cota (m) | Tiempo (s)  | Cota (m) |
| 0           | 0.19     | 0           | 0.18     | 0           | 0.17     |
| 21600       | 0.22     | 21600       | 0.20     | 21600       | 0.32     |
| 43200       | 0.20     | 43200       | 0.17     | 43200       | -0.10    |
| 86400       | 0.21     | 86400       | 0.19     | 86400       | 0.15     |

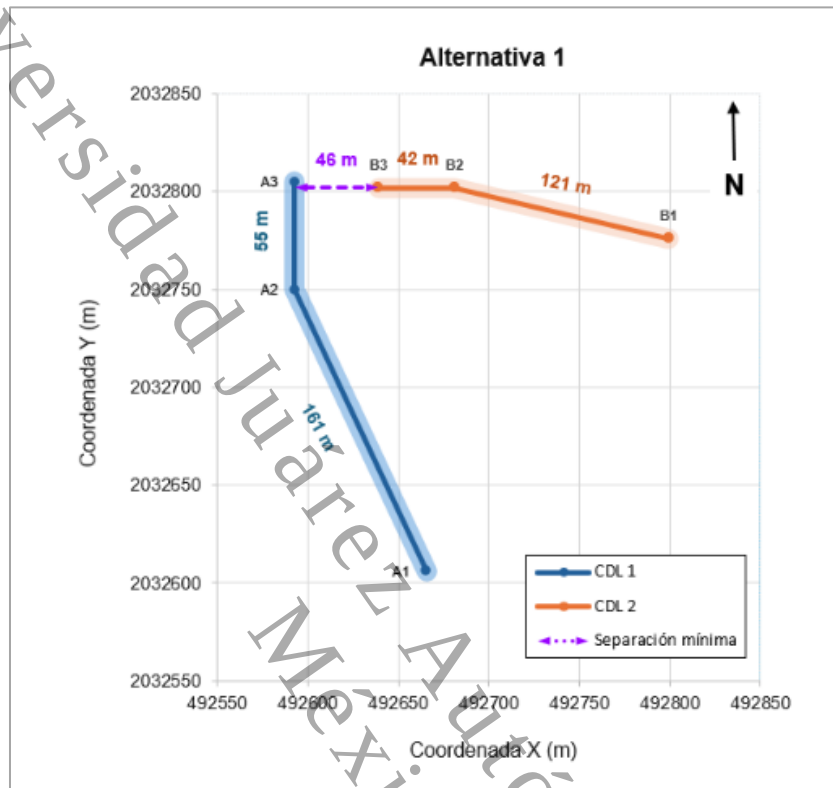
Mientras que la condición inicial se definió con una cota uniforme de 0.18 m, correspondiente al promedio de los niveles asignados al inicio de la simulación. Para el cálculo hidrodinámico se utilizó un esquema numérico de primer orden, con un valor CFL de 0.45, un incremento máximo de tiempo de 1 s y un límite seco-mojado de 0.01 m. El tiempo de simulación asignado es de 100000 s, con la finalidad de dejar un tiempo adicional para la respuesta del modelo.

### **Alternativas**

**Criterios de Diseño.** El planteamiento de las alternativas se realizó a partir del análisis de la condición actual. Para ello, se revisaron los mapas de velocidad, la dirección de vectores de flujo y la configuración topobatemétrica de la bocana del canal de Río Hondo. Estos elementos permitieron identificar las direcciones predominantes del flujo y las zonas de baja movilidad.

Con base en este diagnóstico, se definieron la orientación, la separación y la disposición espacial de los CDL. En las tres configuraciones se mantuvo una sección libre para permitir el intercambio de agua a través de la bocana. Las longitudes se calcularon siguiendo el eje de cada CDL, mientras que la separación mínima se determinó como la distancia horizontal entre los extremos más próximos de sus respectivos ejes. Para la parte superior de los CDL se estableció una cota de 0.20 m, referida al mismo sistema vertical utilizado para la topobatemetría y los niveles de agua. Este valor corresponde a la cota máxima de la superficie libre registrada en la Escala 2 Río Hondo durante el periodo de medición (véase el Anexo A). En las tres configuraciones se asignó la misma cota superior.

**Alternativa 1.** Estuvo conformada por dos CDL. El CDL 1, ubicado en el lado izquierdo de acuerdo con la orientación de la Figura 27, tuvo una longitud total de 216 m, mientras que el CDL 2, localizado en el lado derecho, presentó una longitud de 163 m. Entre los extremos más próximos de sus ejes se mantuvo una separación mínima de 46 m. La configuración geométrica se presenta en la Figura 28 y las coordenadas de los puntos que la definen se incluyen en la Tabla 6.

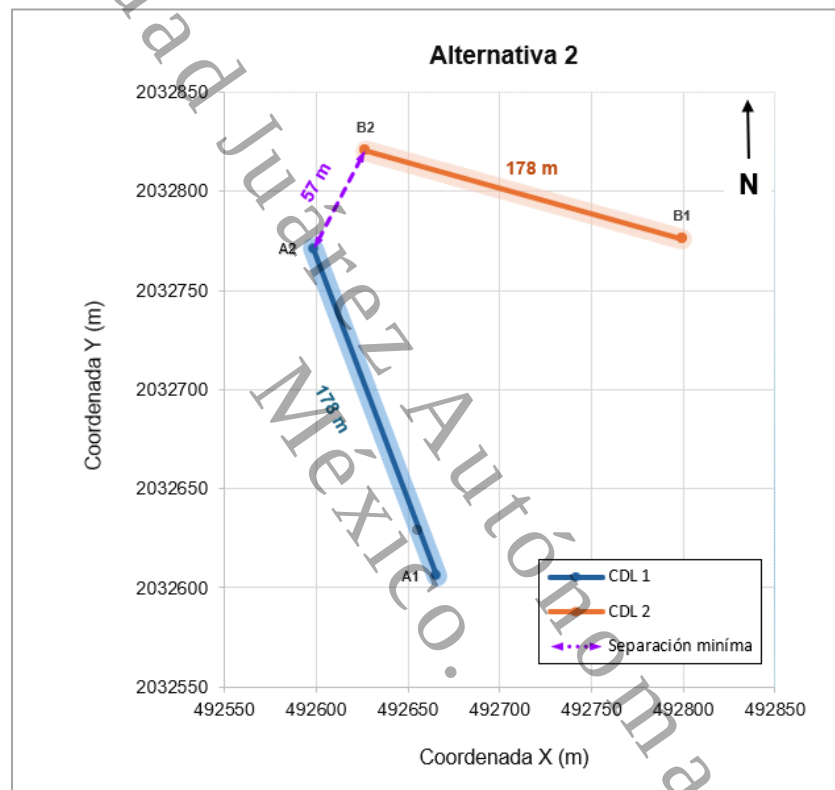
**Figura 28***Configuración geométrica de la Alternativa 1***Tabla 6***Coordenadas UTM de los puntos que definen la Alternativa 1*

| CDL   | Ubicación | Punto | X (m)  | Y (m)   | Z (m) |
|-------|-----------|-------|--------|---------|-------|
| CDL 1 | Izquierda | A1    | 492666 | 2032606 | 0.20  |
|       | Izquierda | A2    | 492593 | 2032750 | 0.20  |
|       | Izquierda | A3    | 492593 | 2032805 | 0.20  |
| CDL 2 | Derecha   | B1    | 492799 | 2032776 | 0.20  |
|       | Derecha   | B2    | 492681 | 2032802 | 0.20  |
|       | Derecha   | B3    | 492639 | 2032802 | 0.20  |

**Alternativa 2.** Estuvo conformada por dos CDL de trazo recto. Cada uno presentó una longitud aproximada de 178 m. Entre los extremos más próximos de sus ejes se dejó una separación mínima de 57 m. La configuración geométrica se presenta en la Figura 29 y las coordenadas de los puntos que la definen se incluyen en la Tabla 7.

**Figura 29**

*Configuración geométrica de la Alternativa 2*



**Tabla 7**

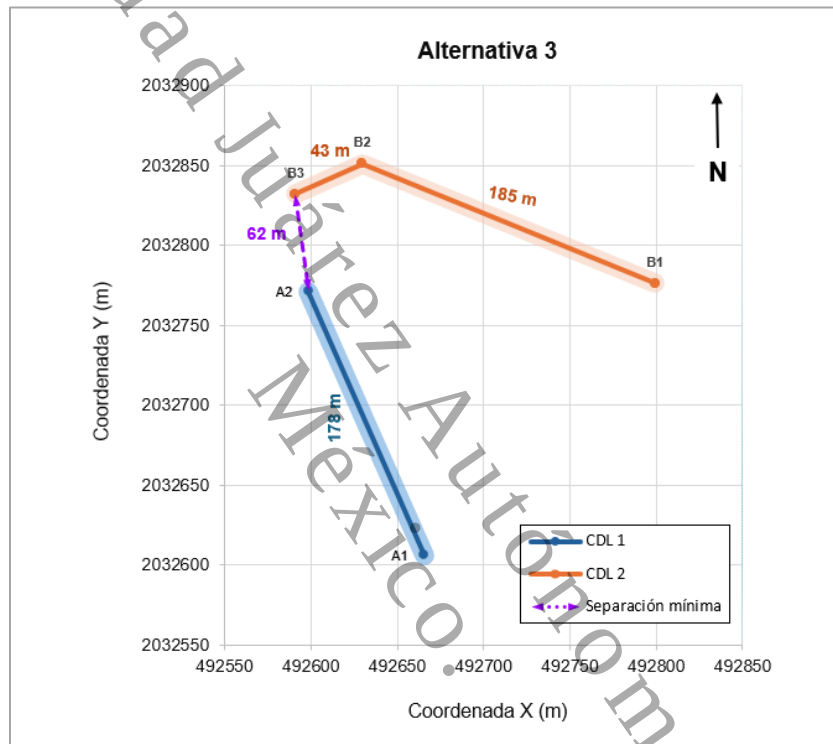
*Coordenadas UTM de los puntos que definen la Alternativa 2*

| CDL   | Ubicación | Punto | X (m)  | Y (m)   | Z (m) |
|-------|-----------|-------|--------|---------|-------|
| CDL 1 | Izquierda | A1    | 492666 | 2032606 | 0.20  |
|       | Izquierda | A2    | 492599 | 2032771 | 0.20  |
| CDL 2 | Derecha   | B1    | 492799 | 2032776 | 0.20  |
|       | Derecha   | B2    | 492627 | 2032821 | 0.20  |

**Alternativa 3.** Estuvo integrada por un CDL izquierdo de 178 m y un CDL derecho de 228 m. Entre ambos se mantuvo una separación mínima aproximada de 62 m. La configuración geométrica se presenta en la Figura 30 y las coordenadas de los puntos que la definen se incluyen en la Tabla 8.

**Figura 30**

*Configuración geométrica de la Alternativa 3*



**Tabla 8**

*Coordenadas UTM de los puntos que definen la Alternativa 3*

| CDL   | Ubicación | Punto | X (m)  | Y (m)   | Z (m) |
|-------|-----------|-------|--------|---------|-------|
| CDL 1 | Izquierda | A1    | 492666 | 2032606 | 0.20  |
|       | Izquierda | A2    | 492599 | 2032771 | 0.20  |
|       | Derecha   | B1    | 492799 | 2032776 | 0.20  |
| CDL 2 | Derecha   | B2    | 492630 | 2032851 | 0.20  |
|       | Derecha   | B3    | 492591 | 2032832 | 0.20  |

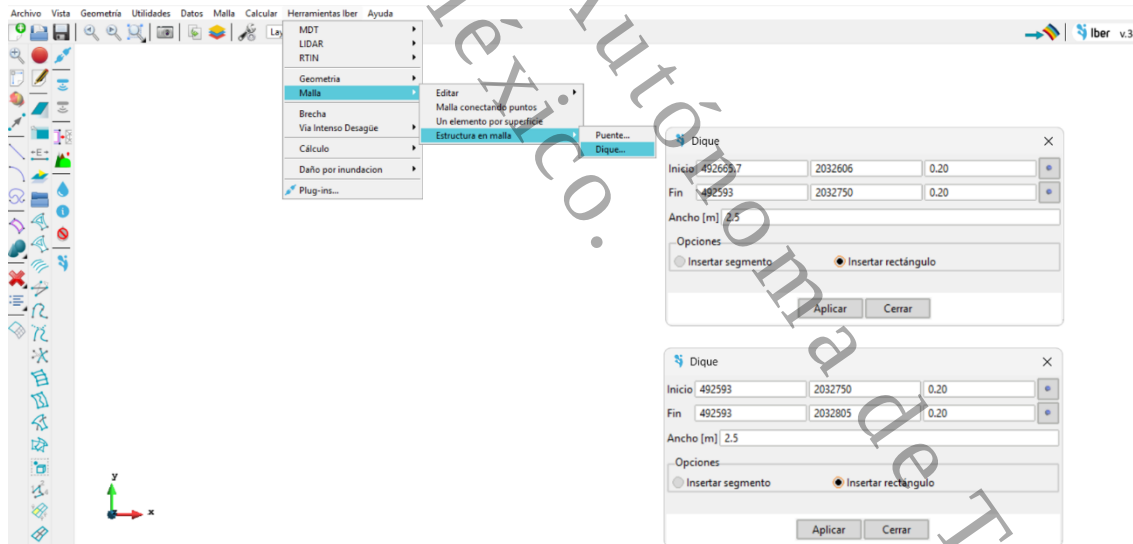
**Representación Numérica de los CDL.** Los CDL se incorporaron al modelo mediante la herramienta Estructura en malla–Dique de Iber, utilizando la opción insertar rectángulo. Esta operación produjo modificaciones locales en los elementos de la malla para ajustar su geometría al trazado de cada CDL. Se estableció un ancho de coronación modelado de 5 m y una cota Z uniforme de 0.20 m.

Bajo esta representación, los CDL se comportaron como barreras topográficas impermeables. El agua no pudo atravesar el cuerpo de las estructuras, aunque podía circular alrededor de sus extremos o sobrepasarlas cuando la cota de la superficie libre superaba los 0.20 m. La posible permeabilidad de los materiales de una futura construcción no se representó en las simulaciones.

La Figura 31 muestra un ejemplo de la incorporación de los CDL en la malla del modelo.

**Figura 31**

*Representación de los CDL mediante la modificación local de la malla en el software Iber*



Las tres alternativas se simularon con las mismas condiciones iniciales y de contorno, duración, paso de tiempo y parámetros numéricos empleados en la condición actual. En todos los casos se utilizó la misma malla base y se conservaron los criterios generales de discretización. No obstante, la incorporación de los CDL hizo que la malla se adaptara a la geometría de cada configuración.

**Procedimiento de Comparación.** La condición actual y las tres alternativas se compararon en los mismos instantes de simulación, seleccionados como representativos de las fases de llenante y vaciante. La evaluación se realizó mediante mapas de velocidad y vectores de flujo, utilizando en todos los casos la misma extensión espacial, escala de colores, intervalos de velocidad y escala de representación de los vectores.

La evaluación comprendió dos variables. La primera consistió en una comparación espacial cualitativa de la distribución de las velocidades, la extensión de las zonas de baja movilidad, la orientación y continuidad de los vectores y la presencia de recirculaciones. Para efectos de este análisis, se definieron operativamente como zonas de baja movilidad aquellas donde la magnitud de la velocidad fue igual o inferior a 0.01 m/s.

La continuidad del flujo se identificó cuando los vectores mantuvieron una orientación definida a través de la sección libre, sin interrupciones ni recirculaciones que limitaran el intercambio de agua.

La segunda variable correspondió a una comparación puntual de las velocidades en dos puntos fijos. El Punto 1 se localizó entre las coordenadas  $X = 492680.10$  m E y  $Y = 2032746.16$  m N, correspondiente a la bocana. El Punto 2 se ubicó entre las  $X = 492288.76$  m E y  $Y = 2033005.55$  m N, en la laguna. Ambas coordenadas están referidas al sistema WGS 84/UTM zona 15N.

**Criterio de Selección de Alternativa.** Para seleccionar la configuración más favorable se comparó la respuesta de cada alternativa durante las fases de llenante y vaciante. La valoración consideró las velocidades en los puntos de referencia, la continuidad del flujo central, la presencia de recirculaciones y la extensión visual de las zonas de baja movilidad. También se consideraron los cambios desfavorables locales respecto a la condición actual. Seleccionando aquella configuración más consistente entre ambas fases. Debido a que no se simuló el transporte de sedimentos, la evaluación se basó únicamente en su respuesta hidrodinámica respecto a la condición actual, específicamente en los cambios en la redistribución de las velocidades y patrones de circulación, sin interpretar directamente los procesos de erosión, transporte o deposición.

La hipótesis se considerará respaldada si al menos una configuración presenta, respecto a la condición actual, velocidades mayores en los puntos de referencia y una trayectoria más continua del flujo entre el canal y el cuerpo lagunar durante las fases de llenante y vaciante. La presencia de zonas locales de baja movilidad junto a los CDL se registrará como un efecto desfavorable, pero no implicaron el rechazo de la hipótesis mientras no interrumpieran la continuidad del flujo central.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.  
México.

## Resultados

### Diagnóstico Hidráulico Laguna Mecoacán en Condiciones Actuales

#### Niveles de Agua

A partir del monitoreo de los niveles de agua mediante las cuatro lecturas efectuadas, se determinaron los niveles de agua en cada punto de monitoreo.

En el Río Cuxcuxapa, las cotas registradas variaron entre 0.19 y 0.22 m.s.n.m., lo que representa una diferencia de 0.03 m. En el Río Hondo, los valores fluctuaron entre 0.17 y 0.20 m.s.n.m., con un intervalo de variación igual. La mayor diferencia fue registrada en El Bellote, con 0.42 m, a partir de los niveles de agua registrados entre  $-0.10$  y 0.32 m.s.n.m.

En la Tabla 9 se muestran las cotas máximas y mínimas registradas durante el tiempo de medición.

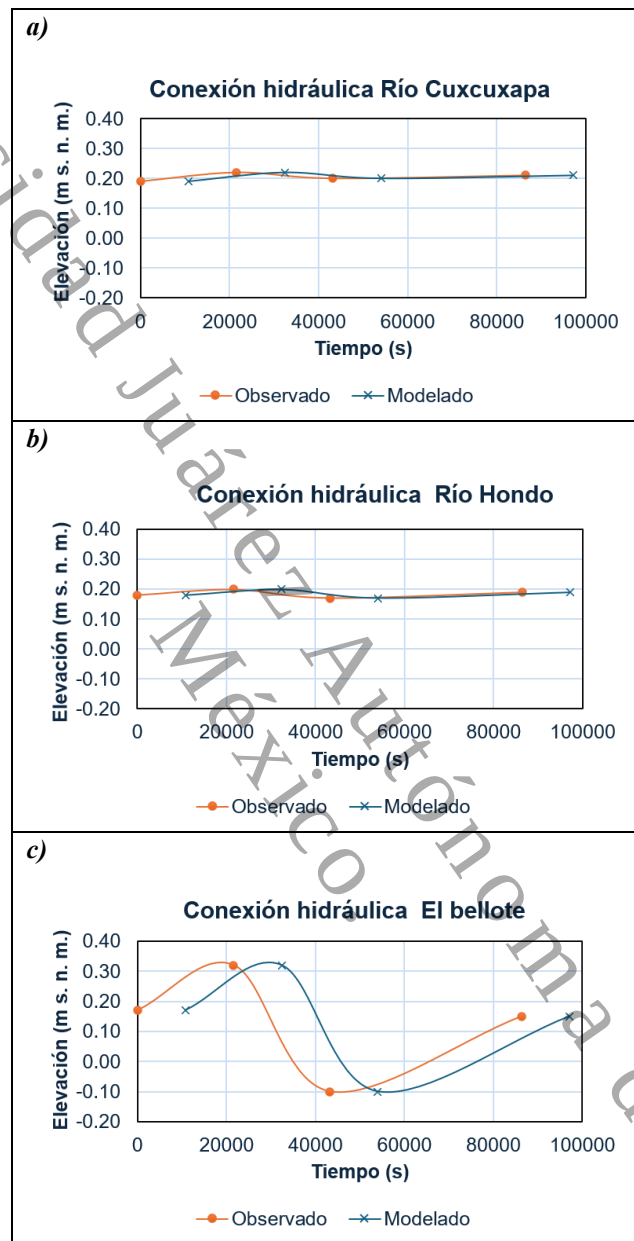
**Tabla 9**

*Variación de los niveles registrados en los puntos de monitoreo*

| Punto de monitoreo | Cota mínima registrada (m.s.n.m.) | Cota máxima registrada (m.s.n.m.) | Diferencia (m) |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| Río Cuxcuxapa      | 0.19                              | 0.22                              | 0.03           |
| Río Hondo          | 0.17                              | 0.20                              | 0.03           |
| El Bellote         | $-0.10$                           | 0.32                              | 0.42           |

**Nota.** Estos registros puntuales corresponden a una fracción del ciclo mareal.

La Figura 32 muestra la comparación de los niveles de agua observados en campo en los instantes asignados en la simulación y lo reproducido en el modelo. Los incisos a), b) y c) corresponden a las conexiones hidráulicas del Río Cuxcuxapa, del Río Hondo y de El Bellote, respectivamente. En los tres sitios se observa un desfase temporal entre los niveles registrados y los simulados.

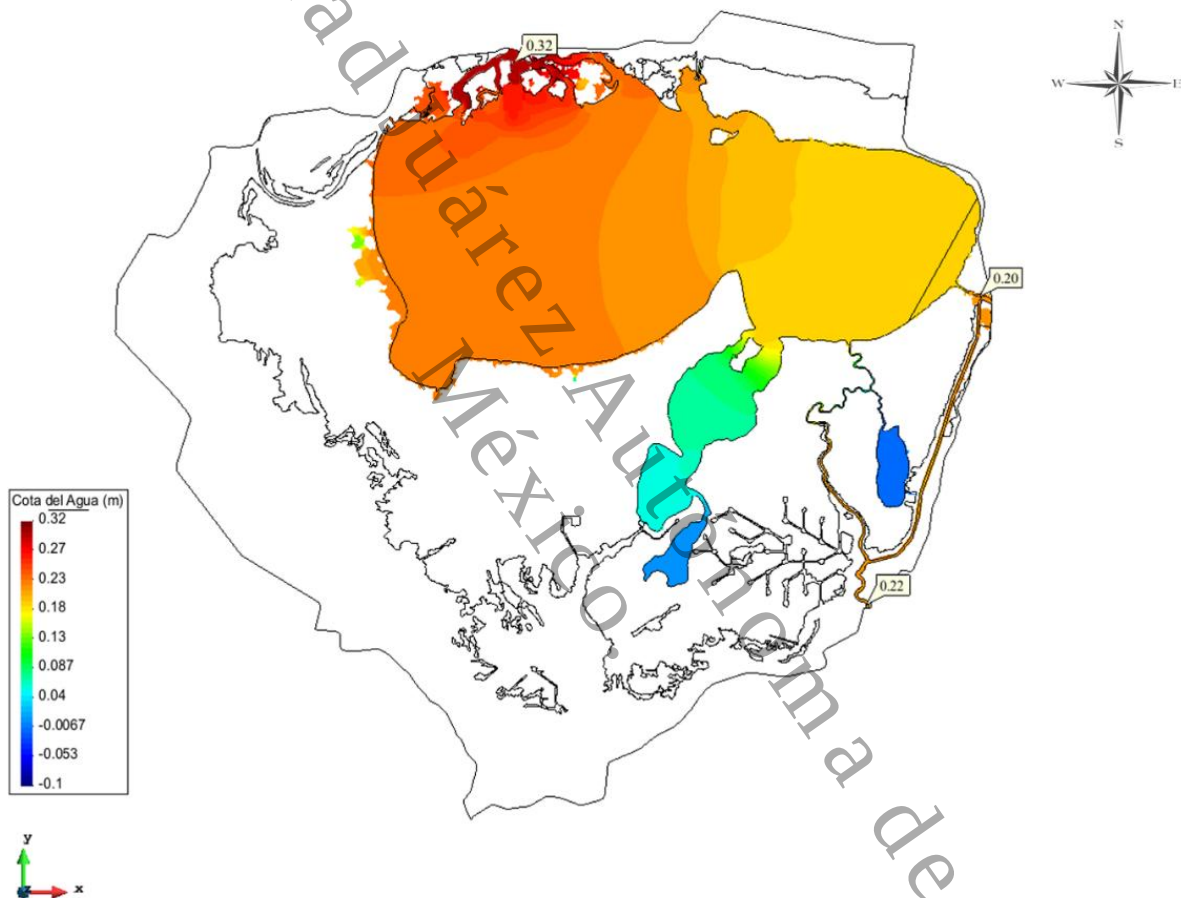
**Figura 32***Comparación entre los niveles observados y simulados en los puntos de control*

La correspondencia entre los niveles observados y los resultados de la modelación no fue considerada como validación, sino como una comprobación de que se alcanzaron niveles utilizados como referencia. La Figura 33 y Figura 34 muestran su distribución espacial, en los instantes de simulación seleccionados para representar la fase llenante y vaciante, respectivamente.

El instante de tiempo fue determinado a partir de la serie del modelado y el sentido del flujo observado a partir de la dirección predominante de sus vectores, el cual se desarrolla en el apartado de Velocidades y Dirección del Flujo.

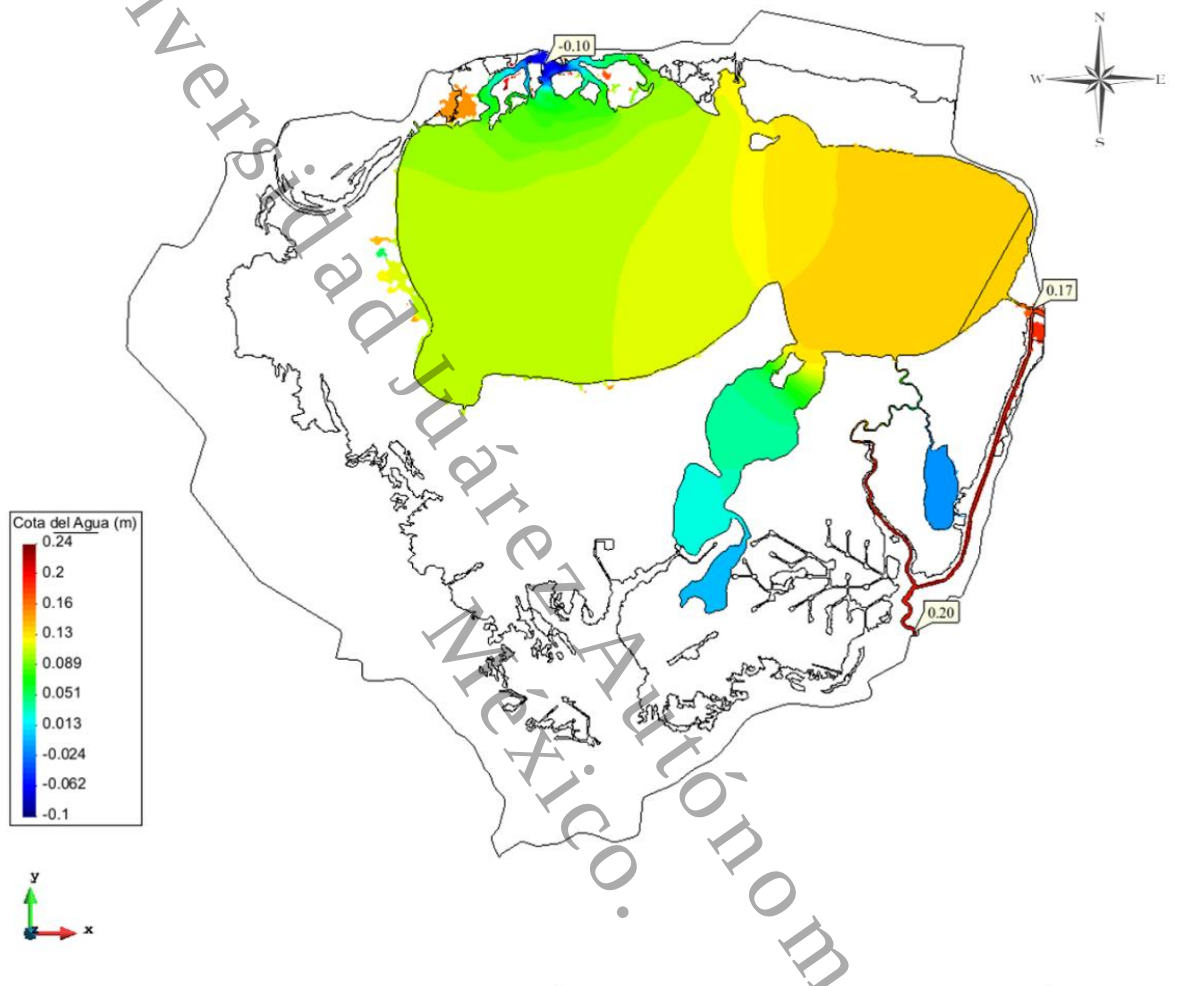
**Figura 33**

*Distribución espacial de la cota de agua durante la fase llenante*



**Figura 34**

*Distribución espacial de la elevación durante de la superficie libre en la fase vaciante*



### ***Velocidades y Dirección del Flujo***

Los resultados de la modelación muestran diferencias entre el interior de la laguna y sus principales conexiones hidráulicas. En los dos instantes analizados, las velocidades más bajas se localizaron al interior, mientras que los valores más altos se concentraron en las bocanas Norte y Noroeste, correspondientes a las conexiones hidráulicas de El Bellote y Río Hondo, respectivamente.

El Bellote presentó una velocidad máxima de 2.33 m/s durante la llenante y 1.54 m/s durante la vaciante. La dirección del flujo en El Bellote cambió entre ambas fases. Durante la llenante, la dirección del flujo se orientó hacia el sureste, desde el mar hacia el interior de la laguna. En la vaciante, el flujo cambió de sentido y se dirigió hacia el norte, desde la laguna hacia el mar.

En el Río Hondo se obtuvo una velocidad máxima de 0.51 m/s en la llenante y 0.50 m/s en la vaciante. La dirección del flujo se mantuvo en la misma orientación, por lo que no se identificó una inversión del flujo bajo las condiciones simuladas.

En la conexión hidráulica Río Cuxcuxapa, ubicada al sureste del sistema lagunar, las velocidades fueron de 0.19 m/s en ambas fases. De acuerdo con los vectores, el flujo mantuvo una orientación predominante hacia el norte.

El comportamiento hidrodinámico de la laguna Mecoaacán tiene una respuesta amortiguada en las bocanas con comunicación indirecta con el mar (Río Hondo, Río Cuxcuxapa) en comparación con la bocana con conexión directa (El Bellote) como se muestra en la Tabla 10. Esta comparación limitada a dos momentos específicos no determina que las velocidades se mantengan estables durante un ciclo mareal.

**Tabla 10**

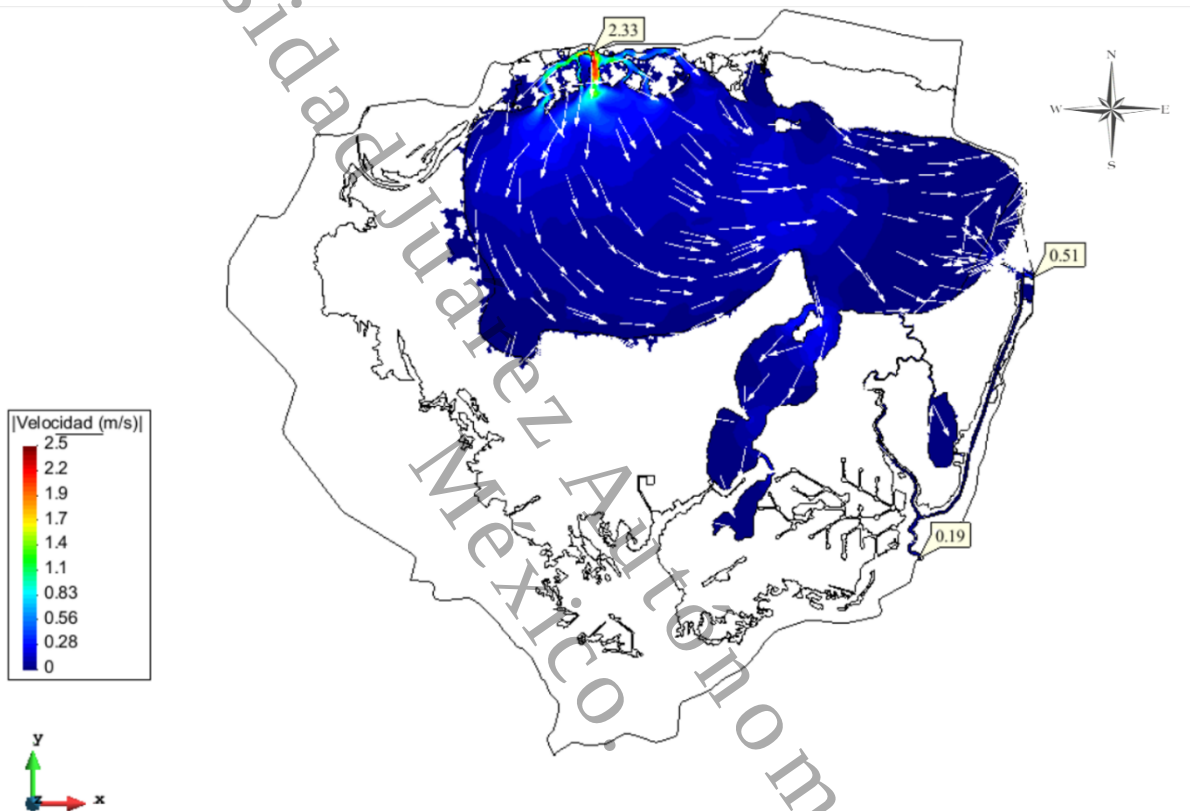
*Velocidad y dirección predominante del flujo en las conexiones hidráulicas*

| <b>Conexiones<br/>hidráulicas</b> | <b>Velocidad en<br/>llenante (m/s)</b> | <b>Dirección en<br/>llenante</b> | <b>Velocidad en<br/>vaciente (m/s)</b> | <b>Dirección en<br/>vaciente</b> |
|-----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| Río Cuxcuxapa                     | 0.19                                   | Norte                            | 0.19                                   | Norte                            |
| Río Hondo                         | 0.51                                   | Noroeste                         | 0.50                                   | Noroeste                         |
| El Bellote                        | 2.33                                   | Sureste                          | 1.54                                   | Norte                            |

La Figura 35 y Figura 36 muestran la distribución espacial de la velocidad y la dirección de los vectores del flujo durante las fases de llenante y vaciante, respectivamente.

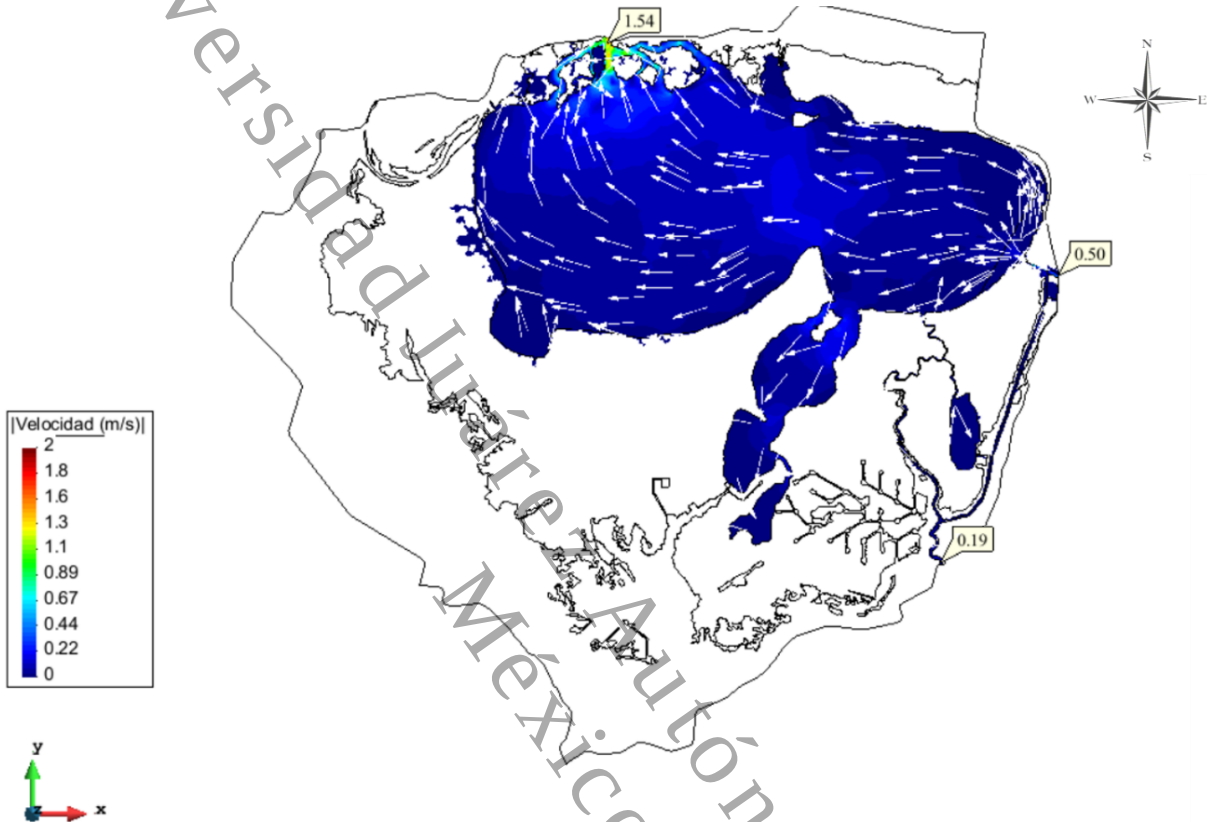
**Figura 35**

*Distribución espacial de la velocidad y dirección del flujo durante la fase de llenante*



**Figura 36**

*Distribución espacial de la velocidad y dirección del flujo durante la fase de vaciante*



***Tirante de Agua***

En el sistema lagunar se obtuvieron tirantes (calados) que van de 0.10 m a 9.80 m. La distribución espacial está relacionada con la configuración topobatimétrica del sistema lagunar: los tirantes altos se localizan en las zonas de mayor profundidad del cuerpo lagunar, mientras que los menores tirantes se localizan en las zonas de menor profundidad y en su mayoría en la proximidad de las márgenes.

Las diferencias entre las fases de llenante y vaciante se presentaron en las inmediaciones de la bocana Norte (conexión hidráulica El Bellote), el tirante disminuyó de 9.80 m durante la llenante a 9.30 m durante la vaciante, representando una diferencia de 0.50 m.

En la conexión hidráulica Río Hondo, la distribución de los tirantes no varió en los dos instantes analizados; al igual que en Río Cuxcuxapa, se mantuvo estable.

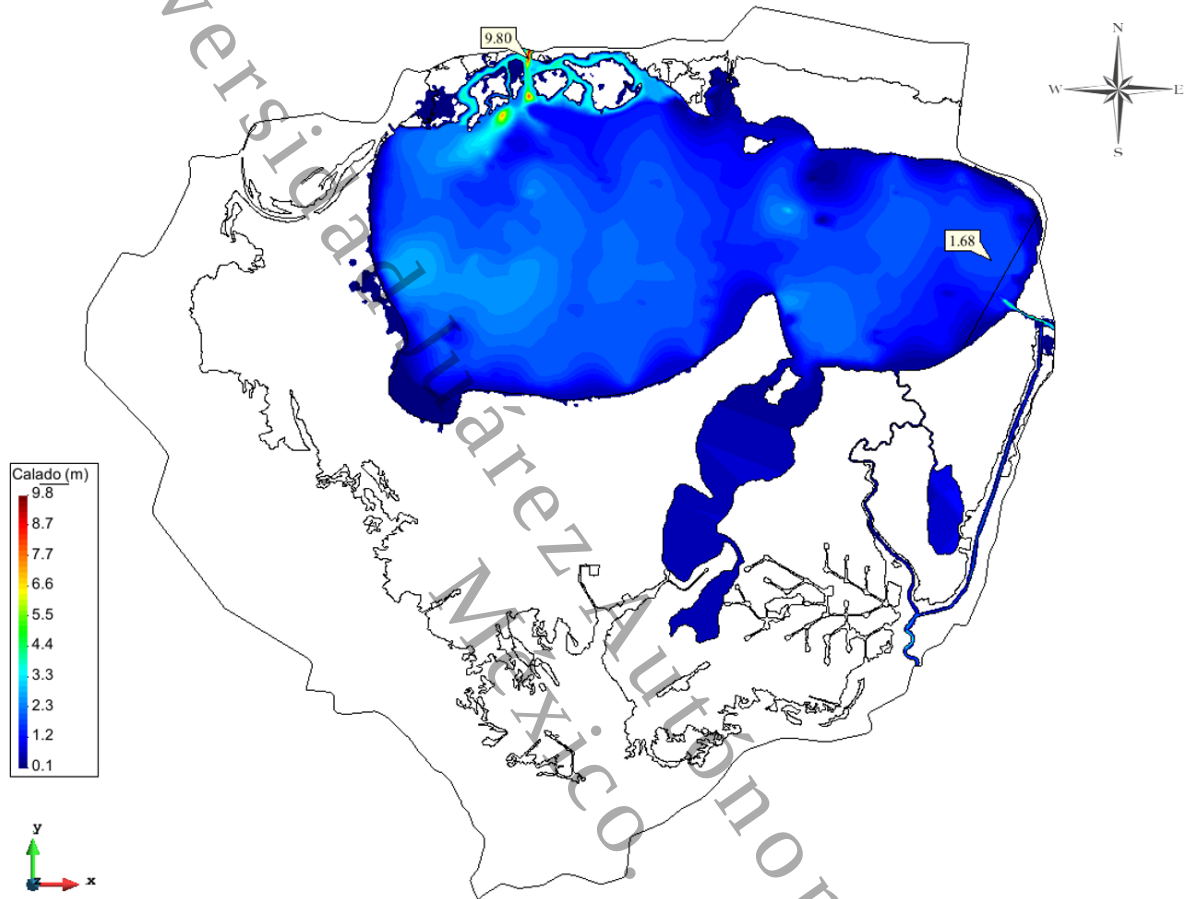
Las diferencias mínimas entre ambos mapas muestran que para los instantes analizados la variación del tirante en el Río Hondo y el Río Cuxcuxapa fue menor que la observada en El Bellote (Ver Tabla 11, Figura 37 y Figura 38).

**Tabla 11***Tirante en las conexiones hidráulicas*

| <b>Conexiones hidráulicas</b> | <b>Tirante en llenante (m)</b> | <b>Tirante en vaciante (m)</b> | <b>Diferencia (m)</b> |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Río Cuxcuxapa                 | 1.00                           | 1.00                           | 0.00                  |
| Río Hondo                     | 2.50                           | 2.50                           | 0.00                  |
| El Bellote                    | 9.80                           | 9.30                           | 0.50                  |

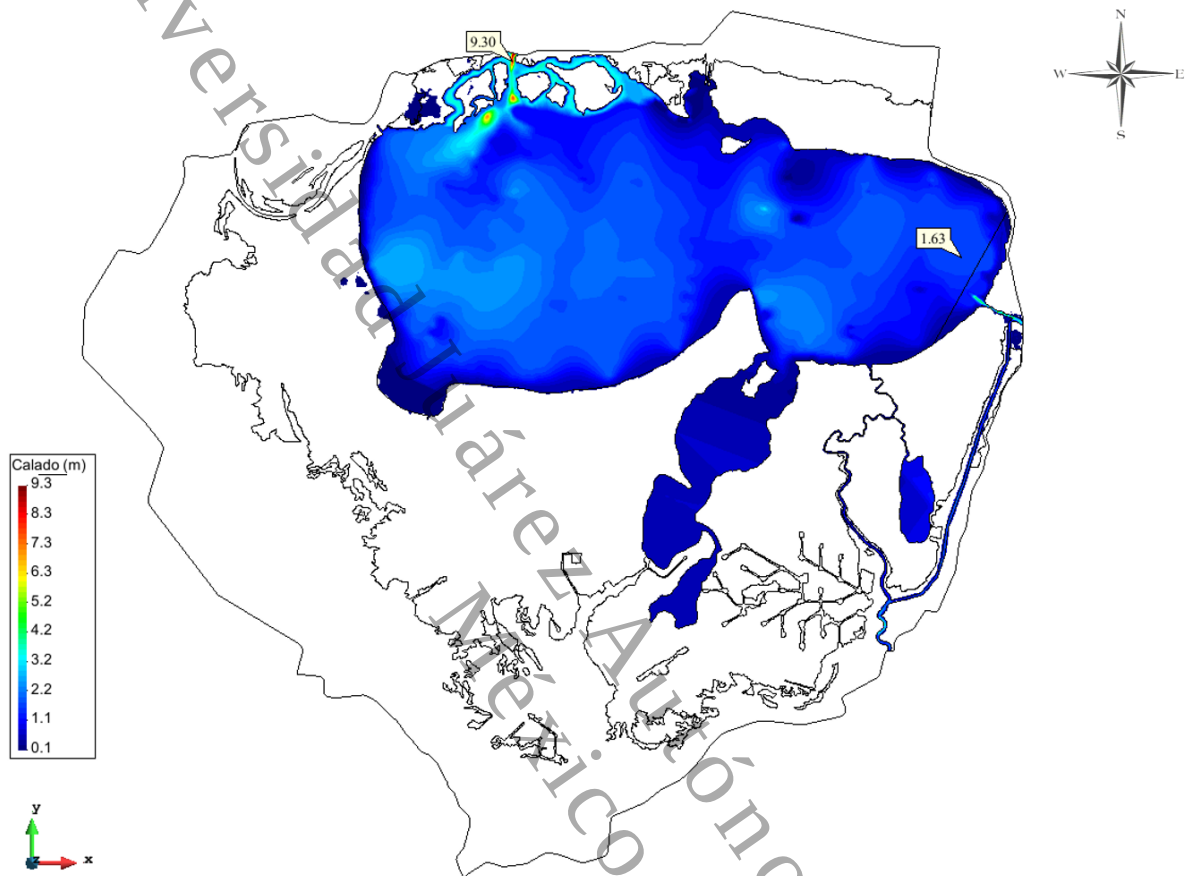
**Figura 37**

*Tirantes de agua durante la fase de llenante*



**Figura 38**

*Tirantes de agua durante la fase de vaciante*



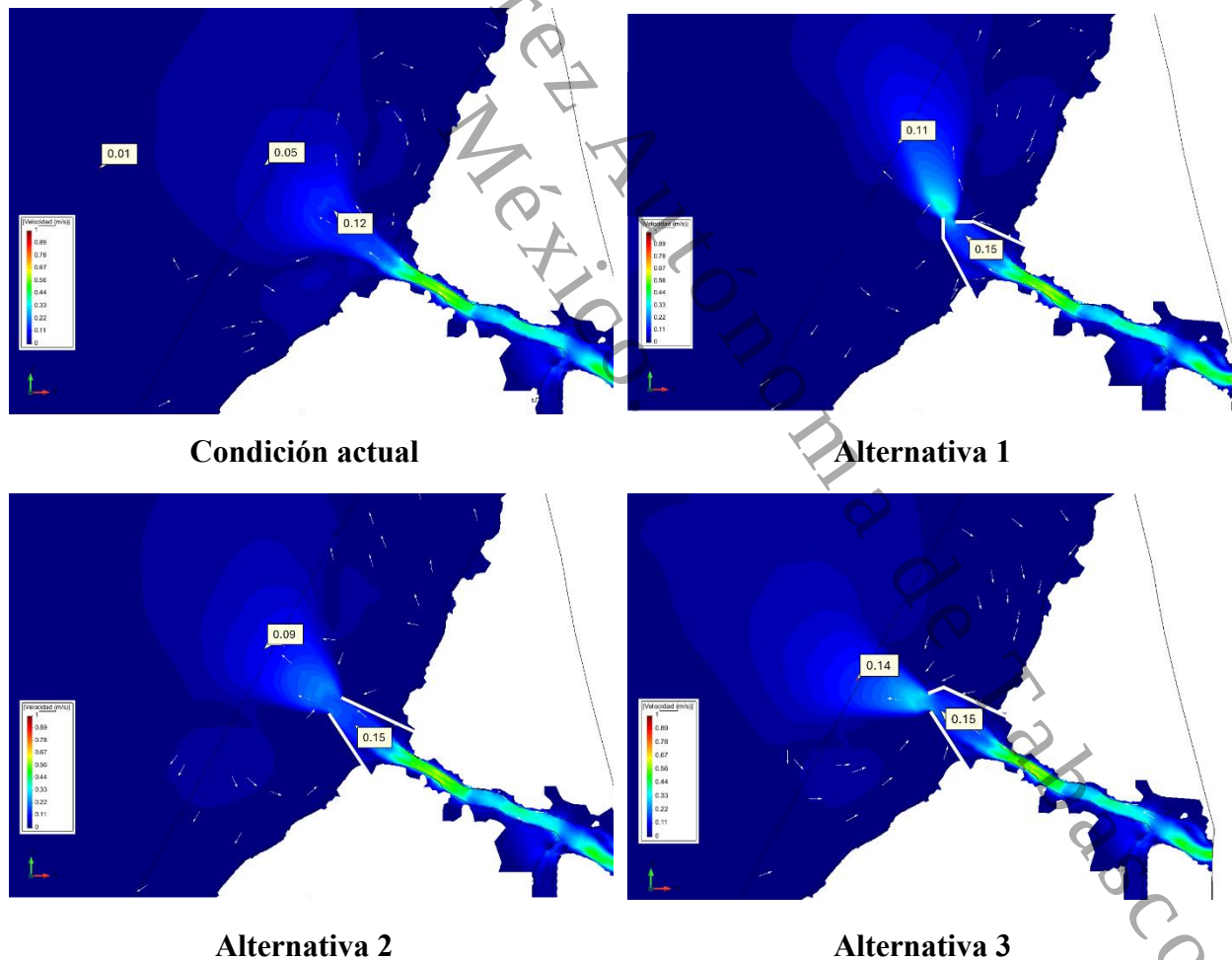
### Comportamiento Hidrodinámico de las Alternativas

Se compara la condición actual con las tres alternativas durante las fases de llenante y vaciante, respectivamente (Figura 39 y Figura 40). Para ello, se emplearon la misma extensión espacial, la misma escala de colores, los mismos intervalos de velocidad y el mismo tamaño de vectores. Se incorporaron etiquetas de resultados que muestran valores puntuales de velocidad.

Para identificar la modificación de la trayectoria y la concentración del flujo, algunas etiquetas se ubicaron en lugares distintos para mostrar los efectos de la configuración. Estas etiquetas se utilizaron únicamente como apoyo visual.

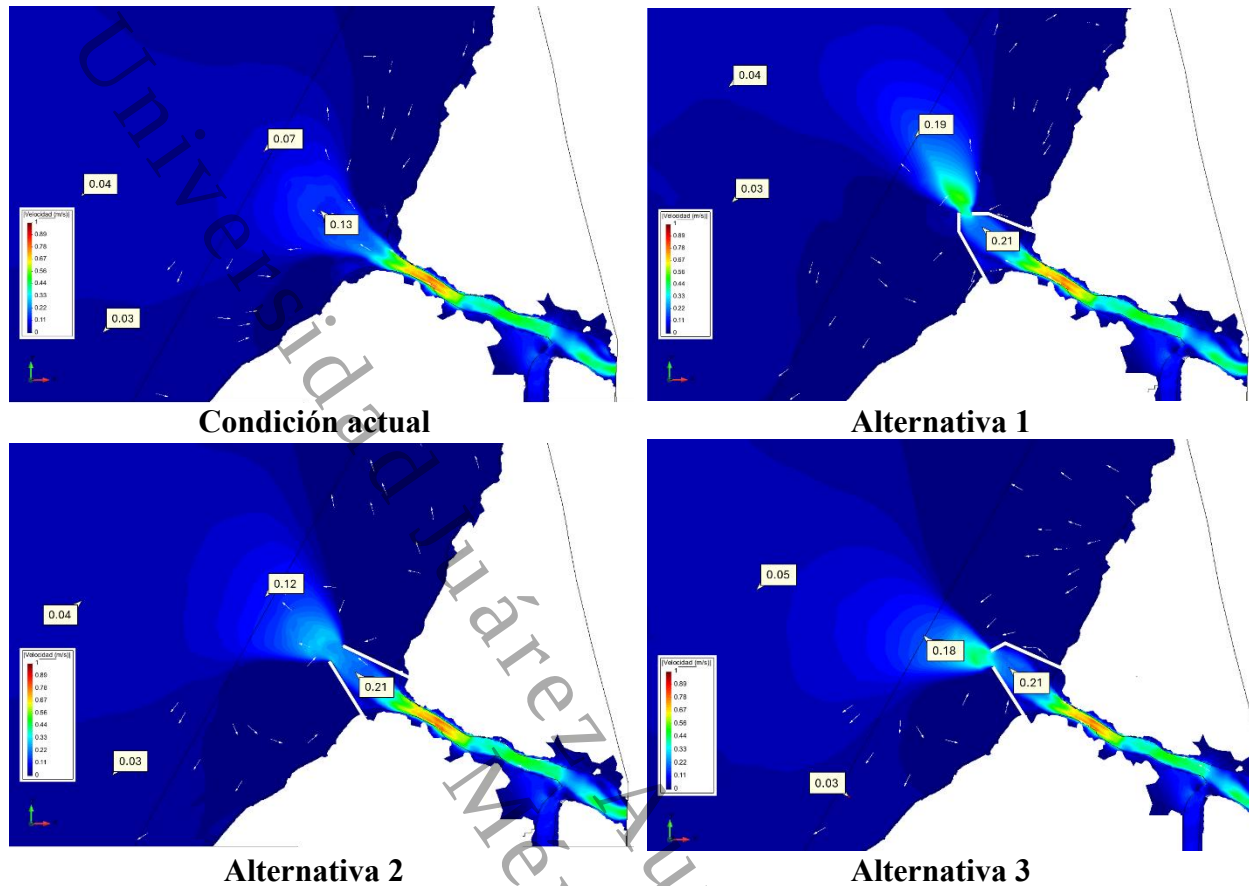
**Figura 39**

*Comparación de la condición actual y las alternativas durante la fase de llenante en la bocana de Río Hondo*



**Figura 40**

*Comparación de la condición actual y las alternativas durante la fase de vaciante en la bocana de Río Hondo*



La selección de la alternativa se realizó mediante la comparación numérica de las velocidades en dos puntos fijos definidos en la metodología. La dirección y continuidad de los vectores de flujo, la presencia de recirculaciones y la extensión de las zonas de baja movilidad se evaluaron a partir de los mapas mostrados anteriormente.

En la condición actual, la velocidad en el Punto 1 fue de 0.12 m/s durante la llenante y de 0.13 m/s durante la vaciante. En el Punto 2 se obtuvieron valores de 0.05 y 0.07 m/s, respectivamente. Por tanto, en ambos puntos las velocidades fueron menores durante la llenante. Los vectores mostraron recirculaciones a ambos lados de la bocana en las dos fases, mientras que la extensión visual de la zona de baja movilidad fue mayor durante la llenante.

Con la implementación de la Alternativa 1, durante la llenante la velocidad en el Punto 1 aumentó de 0.12 a 0.15 m/s, mientras que en el Punto 2 pasó de 0.05 a 0.11 m/s. En esta fase permanecieron las recirculaciones, aunque su desplazamiento fue más visible en el lado derecho de la bocana. La extensión visual de la zona de baja movilidad fue mayor que en la condición

actual. Durante la vaciante, la velocidad aumentó de 0.13 a 0.21 m/s en el Punto 1 y de 0.07 a 0.19 m/s en el Punto 2. Las recirculaciones se observaron en ambos lados de la bocana, pero con trayectorias más alejadas que en la condición actual. La extensión visual de la zona de baja movilidad también fue mayor que en la condición actual.

La Alternativa 2 también incrementó las velocidades respecto a la condición actual. Durante la llenante, en el Punto 1 se obtuvo una velocidad de 0.15 m/s y en el Punto 2 un valor de 0.09 m/s. Los vectores mostraron una dirección más definida en el lado derecho, mientras que en el izquierdo persistió un comportamiento semejante al de la condición actual. La extensión visual de la zona de baja movilidad fue mayor que en la condición actual, pero menor que en la Alternativa 1. Durante la vaciante se alcanzaron velocidades de 0.21 m/s en el Punto 1 y 0.12 m/s en el Punto 2. En esta fase no se identificó recirculación en el lado derecho, mientras que en el izquierdo se mantuvo una trayectoria semejante a la condición actual. La extensión visual de la zona de baja movilidad fue mayor que en la condición actual y que en la Alternativa 1.

La Alternativa 3 incrementó las velocidades en los dos puntos de referencia. Durante la llenante, en el Punto 1 se obtuvo una velocidad de 0.15 m/s y en el Punto 2 un valor de 0.14 m/s. En esta fase persistió el patrón general de recirculación, aunque las trayectorias se desplazaron hacia sectores más alejados de la bocana. La extensión visual de la zona de baja movilidad fue menor que en la condición actual y que en las alternativas 1 y 2. Durante la vaciante se registraron velocidades de 0.21 m/s en el Punto 1 y 0.18 m/s en el Punto 2. No se identificó recirculación en el lado derecho, mientras que en el izquierdo se mantuvo una trayectoria semejante a la condición actual. Sin embargo, la extensión visual de la zona de baja movilidad fue mayor que en la condición actual y que en las alternativas 1 y 2.

La Tabla 12 y Tabla 13 resumen los resultados obtenidos en los puntos de referencia definidos en la metodología, específicamente en el apartado de procedimiento de comparación. El Punto 1 corresponde a la bocana, mientras que el Punto 2 a la laguna.

**Tabla 12***Resultados en los puntos de referencia analizados durante la fase de llenante*

| Configuración    | Velocidad en el punto 1 (m/s) | Velocidad en el punto 2 (m/s) | Extensión visual de zona con velocidad $\leq 0.01$ m/s     | Recirculaciones                                                                                       |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Condición actual | 0.12                          | 0.05                          | Referencia                                                 | Presencia en ambos lados de la bocana                                                                 |
| Alternativa 1    | 0.15                          | 0.11                          | Mayor que la condición actual                              | Presencia en el lado derecho con una trayectoria más alejada que en condición actual                  |
| Alternativa 2    | 0.15                          | 0.09                          | Mayor que la condición actual y menor que la Alternativa 1 | Trayectoria similar a la condición actual en el lado izquierdo y dirección más definida en el derecho |
| Alternativa 3    | 0.15                          | 0.14                          | Menor que la condición actual y que las alternativas 1 y 2 | Patrón general semejante al actual, con trayectorias más alejadas en ambos lados                      |

**Tabla 13***Resultados en los puntos de referencia analizados durante la fase de vaciante*

| Configuración    | Velocidad en el punto 1 (m/s) | Velocidad en el punto 2 (m/s) | Extensión visual de zona con velocidad $\leq 0.01$ m/s | Recirculaciones                                                                    |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Condición actual | 0.13                          | 0.07                          | Referencia                                             | Presencia en ambos lados de la bocana                                              |
| Alternativa 1    | 0.21                          | 0.19                          | Mayor que la condición actual                          | Presencia en ambos lados, con trayectorias más alejadas que en la condición actual |

| Configuración | Velocidad en el punto 1 (m/s) | Velocidad en el punto 2 (m/s) | Extensión visual de zona con velocidad $\leq 0.01$ m/s   | Recirculaciones                                                                                            |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alternativa 2 | 0.21                          | 0.12                          | Mayor que la condición actual y que la Alternativa 1     | Ausencia de recirculación en el lado derecho y trayectoria semejante a la condición actual en el izquierdo |
| Alternativa 3 | 0.21                          | 0.18                          | Mayor que la condición actual y que la Alternativa 1 y 2 | Ausencia de recirculación en el lado derecho y trayectoria semejante a la condición actual en el izquierdo |

### Selección

Ninguna de las tres configuraciones fue superior en todos los criterios considerados. En el Punto 1, las tres alternativas obtuvieron los mismos incrementos respecto a la condición actual. Las principales diferencias se presentaron en el Punto 2 y en los patrones de circulación.

La alternativa 1 registró la mayor velocidad en el Punto 2 durante la vaciante, con 0.19 m/s. Aunque presentó recirculación y un aumento en las áreas de baja movilidad, en ambas fases.

La alternativa 2 presentó las velocidades menores en ambas fases en comparación con las otras dos alternativas y no se observó una reducción visual de las zonas de baja movilidad respecto a la condición actual.

La alternativa 3 mostró un comportamiento más equilibrado. Al observarse que durante la llenante presentó la menor extensión visual de áreas de baja movilidad tanto en la condición actual como en las otras dos alternativas y que durante la vaciante del lado izquierdo fue menor que la alternativa 1 y 2, y mayor con respecto a la condición actual, mientras que la recirculación dejó de presentarse del lado derecho.

Al considerar en conjunto las velocidades, la dirección de los vectores y el comportamiento observado en ambas fases, la alternativa 3 presentó la respuesta hidrodinámica más favorable.

## Discusión

Los resultados de la condición actual permitieron caracterizar el comportamiento hidrodinámico del sistema lagunar. Las velocidades altas se concentraron en las conexiones hidráulicas El Bellote, Río Hondo y Río Cuxcuxapa, mientras que hacia el interior del sistema fueron menores. Este comportamiento concuerda con Pedrozo Acuña et al. (2009), quienes identificaron las velocidades más altas en la entrada de la descarga de Río Hondo y en los canales próximos a la boca lagunar, mientras que en la parte central de la laguna reportaron las velocidades más bajas.

En Río Hondo, las velocidades obtenidas de 0.51 m/s durante la llenante y 0.50 m/s durante la vaciante fueron cercanas al valor máximo aproximado de 0.50 m/s registrado por Medellín et al. (2013). En El Bellote las velocidades registradas fueron de 2.33 m/s durante la llenante y 1.54 m/s durante la vaciante. Sin embargo, el punto utilizado para obtener estos resultados no coincide con la ubicación situada en la parte interior de la bocana, donde dichos autores reportan 0.35 m/s en ambas fases. Al ubicar este sitio en los mapas de velocidad de la presente investigación, corresponde visualmente a un rango de entre 0.28 y 0.56 m/s de acuerdo con la escala de colores. La semejanza encontrada sirve como comparación, pero no permite validar el modelo, debido a los datos corresponden a periodos, ubicaciones y condiciones mareales diferentes.

La dirección del flujo obtenida en El Bellote coincide con lo reportado por Pedrozo Acuña et al. (2009) y Medellín et al. (2013), quienes identificaron la inversión del flujo en esta conexión durante el ciclo mareal. En la presente simulación, los vectores se orientaron hacia el sureste durante la llenante, desde el mar hacia la laguna, y hacia el noroeste durante la vaciante. En Río Hondo, en cambio, no se identificó una inversión entre los dos instantes seleccionados. Esto no permite descartar la influencia de la marea, pues Medellín et al. (2013) registraron una disminución en la velocidad e incluso una inversión en la dirección del flujo de Río Hondo durante mareas vivas. Debido a que el análisis se limitó a dos momentos, no puede afirmarse que la dirección permaneciera constante durante todo un ciclo mareal.

Respecto a las alternativas, las tres configuraciones incrementaron la velocidad en la sección libre de la bocana de Río Hondo. Como las simulaciones conservaron las mismas condiciones iniciales y de contorno, estos cambios se relacionan principalmente con la modificación geométrica de la sección producida por los CDL.

El aumento de la velocidad es consistente con la ecuación de continuidad ( $Q=AV$ ): al reducirse la sección efectiva, el flujo se concentra y la velocidad tiende a aumentar (Chow, 1959). Esta relación se interpreta cualitativamente, ya que las velocidades analizadas corresponden a puntos específicos y no al valor medio integrado en toda la sección. Por tanto, el incremento de la velocidad se atribuye a la redistribución del flujo ocasionada por la geometría de los CDL.

Desde la perspectiva del azolvamiento, la reducción de las zonas de baja movilidad presentada por la Alternativa 3 durante la llenante representa una condición hidrodinámica potencialmente menos favorable para la permanencia de agua con velocidades muy pequeñas. No obstante, el aumento de estas zonas durante la vaciante constituye un efecto desfavorable. Además, una velocidad mayor no implica por sí sola la movilización del material depositado, pues este proceso también depende de las características del sedimento, el esfuerzo cortante en el fondo y el umbral de inicio de movimiento.

En consecuencia, los resultados respaldan la hipótesis dentro del alcance hidrodinámico establecido. Las tres alternativas incrementaron las velocidades en los puntos de referencia respecto a la condición actual, mientras que la Alternativa 3 mantuvo una trayectoria más continua del flujo entre el canal y el cuerpo lagunar durante ambas fases. No obstante, el aumento local de las zonas de baja movilidad durante la vaciante representa un efecto desfavorable. Por ello, el respaldo de la hipótesis no constituye evidencia directa de una reducción del azolvamiento.

En términos generales, los resultados son compatibles con una fuerte influencia mareal sobre la hidrodinámica de la laguna Mecoacán durante el periodo representado. La respuesta más evidente se observó en El Bellote, mientras que hacia el interior del sistema las variaciones fueron menos marcadas. En la bocana de Río Hondo, la incorporación de los CDL modificó localmente las velocidades y los patrones de circulación, aunque sus efectos variaron entre la llenante y la vaciante.

### **Alcances y Limitaciones**

El alcance del estudio consistió en comparar la respuesta hidrodinámica de tres configuraciones de CDL mediante un modelo bidimensional. No se simuló el transporte de sedimentos, por lo que los resultados no permiten cuantificar cambios en la erosión, el transporte o la deposición del material. Las zonas con velocidades iguales o inferiores a 0.01 m/s se utilizaron

únicamente como un indicador hidrodinámico de baja movilidad y no como una medida directa del azolvamiento.

Asimismo, las velocidades obtenidas en campo no se emplearon para validar la simulación, ya que pudieron estar condicionadas por factores ambientales como el viento que no fueron incluidos en el modelo.

Los CDL se representaron como barreras topográficas impermeables, con un ancho de coronación de 5 m y una cota superior uniforme de 0.20 m. Esta simplificación no consideró la posible permeabilidad y el comportamiento de los materiales de una futura construcción. Tampoco se evaluó la estabilidad estructural, el proceso constructivo, los costos ni los posibles efectos ecológicos de su implementación.

La comparación espacial se realizó en dos instantes representativos de las fases de llenante y vaciante. Por tanto, los resultados no describen todas las variaciones que pueden ocurrir durante un ciclo mareal completo o bajo otras condiciones estacionales. Asimismo, la extensión de las zonas de baja movilidad se determinó mediante una comparación visual y no mediante el cálculo de su superficie.

Los niveles de agua medidos en campo se emplearon como condiciones de contorno, por lo que la correspondencia entre los niveles observados y simulados no representa una validación. En trabajos posteriores será necesario contar con series continuas de nivel y medir velocidades en puntos interiores del dominio, así como realizar pruebas de sensibilidad de los parámetros y una evaluación temporal del desempeño del modelo.

Finalmente, la construcción de los CDL quedó fuera del alcance de la investigación. La Alternativa 3 representa el mejor comportamiento hidrodinámico debido a que incrementó las velocidades en los puntos de referencia respecto a la condición actual y mantuvo una trayectoria más continua del flujo entre el canal y el cuerpo lagunar durante las fases de llenante y vaciante. Esta selección cumple con la mayoría de los criterios. Antes de proponer su implementación, será necesario evaluar el transporte de sedimentos, su respuesta durante un lapso de tiempo más extendido, la factibilidad constructiva y sus posibles efectos sobre el ecosistema de manglar.

### Conclusiones y Recomendaciones.

A partir de la investigación realizada y conforme al orden de los objetivos específicos planteados se concluye lo siguiente:

- El levantamiento topobatimétrico permitió representar la configuración del sistema lagunar. En la bocana del canal de Río Hondo se encontraron diferencias de entre 0.34 y 1.00 m en la elevación de fondo. Estos valores indican que el fondo se encuentra localmente más elevado y, por consiguiente, que existe una disminución de la profundidad disponible para el flujo. Sin embargo, las diferencias calculadas no representan directamente el espesor de los sedimentos acumulados, debido a que no se dispone de un levantamiento previo que sirva de referencia.
- La simulación de la condición actual permitió caracterizar el comportamiento hidrodinámico del sistema lagunar. En El Bellote la velocidad registrada durante la llenante es de 2.33 m/s y 1.54 m/s durante la vaciante; mientras que la dirección del flujo se invirtió entre ambas fases. En el Río Hondo se obtuvieron velocidades de 0.51 y 0.50 m/s, mientras que la dirección del flujo fue constante, hacia el noreste. En el Río Cuxcuxapa se obtuvieron 0.19 m/s en los dos instantes, con una dirección del flujo hacia el norte. Los tirantes en El Bellote fueron de 9.80 m durante la llenante y 9.30 m durante la vaciante, con una diferencia de 0.50 m. En Río Hondo y Río Cuxcuxapa se obtuvieron tirantes de 2.50 y 1.00 m, respectivamente, sin diferencias apreciables entre las fases analizadas.
- La comparación cualitativa de los niveles mostró correspondencia entre el comportamiento observado en campo y lo representado por el modelo. En el Río Cuxcuxapa las cotas registradas en campo variaron entre 0.19 y 0.22 m. En el Río Hondo entre 0.17 y 0.20 m y entre -0.10 y 0.32 m en El Bellote. Debido a que los niveles de agua medidos en campo se utilizaron como condiciones de contorno, esta correspondencia no fue considerada como una validación del modelo.
- Las tres configuraciones de CDL modificaron localmente la distribución de las velocidades y los patrones de circulación en la bocana de Río Hondo. En el Punto 1, las tres alternativas obtuvieron los mismos incrementos respecto a la condición actual. En el Punto 2, la condición actual presentó velocidades de 0.05 y 0.07 m/s

durante la llenante y la vaciante, respectivamente. Para esas mismas fases, la Alternativa 1 alcanzó 0.11 y 0.19 m/s; la Alternativa 2, 0.09 y 0.12 m/s; y la Alternativa 3, 0.14 y 0.18 m/s. Estos resultados confirman que la geometría de los CDL redistribuyó y concentró localmente el flujo.

- Entre las configuraciones analizadas, la Alternativa 3 presentó la respuesta hidrodinámica más favorable. Durante la llenante y la vaciante mantuvo velocidades relativamente altas en los dos puntos de referencia con una trayectoria continua del flujo entre el canal y el cuerpo lagunar. En la fase de llenante registro la menor extensión en las zonas de baja movilidad, respecto a la condición actual y a las otras dos alternativas. Sin embargo, durante la vaciante estas zonas aumentaron en las tres alternativas. Al valorar conjuntamente los indicadores, la alternativa 3 mostró el mayor potencial para favorecer la movilidad del flujo en el área estudiada. Estos resultados indican cambios hidrodinámicos que podrían influir en los procesos de azolvamiento.

La Alternativa 3 debe considerarse una configuración preliminar. Antes de proponer su implementación se recomienda contar con mediciones más continuas de los niveles de agua durante un periodo prologando de tiempo, que permitan caracterizar con mayor detalle la respuesta hidrodinámica durante ciclos mareales completos y distintas condiciones estacionales. Asimismo, será necesario incorporar a la modelación el transporte de sedimentos, con el fin de evaluar los procesos de erosión y depositación asociados a la alternativa.

## Referencias

- Alongi, D. M. (2002). *Present state and future of the world's mangrove forests*. *Environmental Conservation*, 29(3), 331–349. <https://doi.org/10.1017/S0376892902000231>
- Alvarado-García, V., & Zúñiga-Amador, M. A. (2018). *Vegetación nativa como factor de control de erosión y restauración ecológica, San José, Costa Rica*. *La Calera*, 18(30), 39–47. <https://doi.org/10.5377/calera.v18i30.7738>
- Anthony, E. J., & Gratiot, N. (2012). Coastal engineering and large-scale mangrove destruction in Guyana, South America: Averting an environmental catastrophe in the making. *Ecological Engineering*, 47, 268–273. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.07.005>
- Aragón-Hernández, J. L., Caballero-Coranguéz, C. A., Jiménez-Castañeda, A. A., & Berezowsky-Verduzco, M. (2022). Estudio numérico-experimental del campo de velocidades en un canal rectangular con curvatura compuesta y ancho variable en 2DH. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 13(1), 01-48. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-01>
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2019). *Decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas (2021–2030)* (Resolución A/RES/73/284). Naciones Unidas. <https://undocs.org/A/RES/73/284>
- Basile, P. A. (2017). Mediciones hidrológicas. En H. Orsolini, E. Zimmermann & P. A. Basile (Eds.), *Hidrología: procesos y métodos* (4.<sup>a</sup> ed., pp. 19–46). UNR Editora.
- Benedetti, C., Hurtado, S., Sauza, B. L., Tocamo, Y., & Acevedo, E. (2023). Conservación de los manglares en el corregimiento de Juan Díaz, Panamá. *Revista Semilla Científica*, 1(4), 487–498. <https://doi.org/10.37594/sc.v1i4.1293>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Sanz-Ramos, M., Dolz, J., Expósito-Pérez, J. M., & Sánchez-Juny, M. (2019). Modelling flood propagation in the service galleries of a nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*, 352, Article 110180. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110180>

- Bosboom, J., & Stive, M. J. F. (2023). Coastal dynamics (Version 1.2). TU Delft OPEN Publishing. <https://doi.org/10.5074/T.2021.001>
- Castillo Mendoza, J. F. (2024). La fragilidad de los guardianes costeros [Nota de divulgación científica]. Universidad de El Salvador.
- Cerrillos-Valle, G. A. (2021). Recuperación de cubierta vegetal y control de erosión por medio de técnicas de bioingeniería, maguey (*Agave salmiana*) y nopal (*Opuntia robusta*) en el Parque Ecológico Cubitos, Pachuca de Soto, Hidalgo [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Chalov, S., Moreido, V., Ivanov, V., & Chalova, A. (2022). Assessing suspended sediment fluxes with acoustic Doppler current profilers: case study from large rivers in Russia. *Big Earth Data*, 6(4), 504–526. <https://doi.org/10.1080/20964471.2022.2116834>.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (Eds.). (2016). \*Nature-based solutions to address global societal challenges\*. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2013a). *Distribución de los manglares en México en 1970/1980* [Mapa]. Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/biodiv/monmang/bimagdmo/mexman70gw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/biodiv/monmang/bimagdmo/mexman70gw)
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2013b). *Distribución de los manglares en México en 2005* [Mapa]. Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/biodiv/monmang/bimagdmo/mexman2005gw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/biodiv/monmang/bimagdmo/mexman2005gw)
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2013c). *Distribución de los manglares en México en 2010* [Mapa]. Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad.

[http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/biodiv/monmang/bimagdmo/mexman2010gw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/biodiv/monmang/bimagdmo/mexman2010gw)

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2021). *Distribución de los manglares en México en 2020* [Mapa]. Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad.

[http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/biodiv/monmang/bimagdmo/mx\\_man20gw](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/biodiv/monmang/bimagdmo/mx_man20gw)

Curran, J. C., & Hession, W. C. (2013). Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system. *Journal of Hydrology*, 505, 364–376. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.013>

De León-Solís, C. M. (2021). Comparación de la bioingeniería con los métodos tradicionales para la reducción de riesgos y su aplicación como refuerzo estructural sobre diques longitudinales en diferentes puntos de la costa sur de Guatemala [Tesis doctoral, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/15913>

Echeverribar, I., Morales-Hernández, M., Brufau, P., & García-Navarro, P. (2019). 2D numerical simulation of unsteady flows for large scale floods prediction in real time. *Advances in Water Resources*, 134, Article 103444. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103444>

Fivash, G. S., Temmink, R. J. M., D'Angelo, M., van Dalen, J., Lengkeek, W., Didderen, K., Ballio, F., van der Heide, T., & Bouma, T. J. (2021). Restoration of biogeomorphic systems by creating windows of opportunity to support natural establishment processes. *Ecological Applications*, 31(5), e02333. <https://doi.org/10.1002/eap.2333>.

Friess, D. A., Rogers, K., Lovelock, C. E., Krauss, K. W., Hamilton, S. E., Lee, S. Y., Lucas, R., Primavera, J., Rajkaran, A., & Shi, S. (2019). The state of the world's mangrove forests: Past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, 89–115. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033302>

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological

- restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1–S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- George, D. A., Gelfenbaum, G., & Stevens, A. W. (2012). Modeling the hydrodynamic and morphologic response of an estuary restoration. *Estuaries and Coasts*, 35, 1510–1529. <https://doi.org/10.1007/s12237-012-9541-8>
- Gerhart, A. L., Hochstein, J. L., & Gerhart, P. M. (2021). *Munson, Young and Okiishi's fundamentals of fluid mechanics: SI version* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Gijsman, R., Horstman, E. M., van der Wal, D., Friess, D. A., Swales, A., & Wijnberg, K. M. (2021). Nature-based engineering: A review on reducing coastal flood risk with mangroves. *Frontiers in Marine Science*, 8, Article 702412. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.702412>
- Grajales-Saavedra, F., Vallarino, R., Mejía, G., & Centella, D. (2021). Bioingeniería de taludes: Evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. *Revista de Iniciación Científica*, 7(2), 26–38. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.2.3336>
- Herrera-Silveira, J. A., Teutli-Hernández, C., & Cisneros-de la Cruz, D. J. (Coords.). (2021). *Manual para la restauración ecológica de manglares del sistema arrecifal mesoamericano y el Gran Caribe*. UNEP-Convención de Cartagena; Mesoamerican Reef Fund. <https://bvearmb.do/handle/123456789/1529>
- Herrera-Silveira, J. A., Teutli, H. C., Zaldívar-Jiménez, A., Pérez-Ceballos, R., Carrillo, B. L., & Cortés, B. O. (2013). Caracterización y diagnóstico de los manglares del ANP “Manglares de Nichupté”, para su conservación y restauración (Reporte técnico final). CINVESTAV/FF y CM/CONANP.
- Hsiung, A. R., Fest, B., Rubinstein, T., Swearer, S. E., & Morris, R. L. (2025). Effectiveness of novel hybrid mangrove living shorelines is context dependent. *Journal of Applied Ecology*, 62(5), 1188–1201. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.70037>
- Ibanga, L. B., Nkwoji, J. A., Use, A. I., Onyema, I. C., & Chukwu, L. O. (2019). Hydrochemistry and heavy metals concentrations in sediment of Woji Creek and Bonny Estuary, Niger Delta, Nigeria. *Regional Studies in Marine Science*, 25, Article 100473. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.10.004>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s. f.). *Modelos digitales de elevación (MDE)* [Conjunto de datos ráster]. Recuperado el 30 de enero de 2026, de <https://www.inegi.org.mx/programas/mde/>
- Kazemi, A., Castillo, L., & Curet, O.M. (2021). Mangrove roots model suggest an optimal porosity to prevent erosion. *Scientific Reports*, 11, Article 9969. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88119-5>
- Kettenhuber, P. L. W., dos Santos Oliveira, D. A., & Martins, S. V. (2023). Selecting native species for soil and water bioengineering techniques: Alternative to restore areas in Brumadinho, MG, Brazil. *Floresta e Ambiente*, 30(3), Article e20220088. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2022-0088>
- Kramer, M., & Arias, M. E. (2023). Modeling the impact of hydraulic reconnection on estuary hydrodynamics. *Journal of Ecological Engineering Design*. <https://doi.org/10.21428/f69f093e.4f085bec>
- Lamoglia Swinnen, L. (2023). Análisis de actuaciones y propuesta de solución para la erosión costera en Cataluña.
- Lewis, R. R. (2005). Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. *Ecological Engineering*, 24(4), 403–418. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.10.003>
- López-Adame, H., Zaragoza-Méndez, F. Á., Lara-Domínguez, A. L., Alvarado-Barrientos, M. S., Mariño-Tapia, I., Sáinz-Hernández, E., Pérez-Ceballos, R., Zaldívar-Jiménez, A., & López-Portillo, J. (2026). Effectiveness of hydrological restoration in the mangrove of a coastal lagoon in the Gulf of Mexico. *Ecological Engineering*, 223, Article 107848. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107848>
- Luts, G. (2024). Naturbaserade lösningar för att adressera översvämningsrisker vid kusten: En undersökning av Vellinge kommuns översvämningskydd samt två åtgärdsförslag baserat på olika prioriteringar av kustvärden [Tesis de maestría, Swedish University of Agricultural Sciences]. Epsilon Archive for Student Projects. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:slu:epsilon-s-20200>

- Marois, D. E., & Mitsch, W. J. (2017). A mangrove creek restoration plan utilizing hydraulic modeling. *Ecological Engineering*, 108, 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.063>
- Medellín, G., Mariño-Tapia, I., Pedrozo-Acuña, A., Enríquez, C., & González-Villarreal, F. J. (2013). Influencia de la marea en la hidrodinámica del sistema Mecoacán-río González, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(2), 71–90.
- Moreau, C., Cottet, M., Rivière-Honegger, A., François, A., & Evette, A. (2022). Nature-based solutions (NbS): A management paradigm shift in practitioners' perspectives on riverbank soil bioengineering. *Ecological Engineering*, 176, Article 106544. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106544>
- Morris, R., Heery, E. C., Loke, L. H., Lau, E., Strain, E. M. A., Airolidi, L., & Leung, K. M. Y. (2019). Design options, implementation issues and evaluating success of ecologically engineered shorelines. *Oceanography and Marine Biology*, 57, 169–228.
- Mullarney, J. C., Henderson, S. M., Reyns, J. A. H., Norris, B. K., & Bryan, K. R. (2017). Spatially varying drag within a wave-exposed mangrove forest and on the adjacent tidal flat. *Continental Shelf Research*, 147, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.06.019>
- Núñez Gómez, J. C., Ramos Reyes, R., Barba Macías, E., Espinoza Tenorio, A., & Gama Campillo, L. M. (2016). Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. *Investigaciones Geográficas*, (91), 70–85. <https://doi.org/10.14350/rig.50172>
- Pedrozo Acuña, A., Medellín Mayoral, G., Rodríguez Rincón, J. P., Garnica Hidalgo, L. E., Osegueda, A. S., & Amaro Loza, A. E. (2009). *Modelación de procesos costeros y obras de protección o mitigación*. En *La segunda fase para la integración del Plan Hídrico Integral de Tabasco*. Comisión Nacional del Agua.
- Perico-Granados, N., Tovar-Torres, C., Medina-Naranjo, E., Acosta-Castellanos, P., & Perico-Martínez, N. (2025). Bioingeniería de taludes con árboles para disminuir deslizamientos: Caso Betétiva. *Revista de Iniciación Científica*, 11(1). <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v11.1.4120>
- Piguave Rodríguez, C. A., Parrales Tumbaco, J. F., Pichucho Morales, X. L., Velásquez Zambrano, H. R., & Carvajal Rivadeneira, D. D. (2025). Impacto del cambio climático en el diseño de infraestructuras hidráulicas: Un análisis textual discursivo de artículos de investigación. *Revista*

*Científica Multidisciplinar G-Nerando*, 6(1), 1459–1475.  
<https://doi.org/10.60100/rcmg.v6i1.479>

RDI Instruments. (1996). Principles of operation: A practical primer for broadband acoustic Doppler current profilers (2nd ed.).

Saathoff, F., Oumeraci, H., & Restall, S. (2007). Experiences from Australian and German projects using geotextile containers. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(4–5), 251–263.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.04.003>

Sangalli, P., & Valenzuela, M. (2008). *Introducción a la bioingeniería o ingeniería biológica*. Asociación Española de Ingeniería del Paisaje (AEIP).

Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., García-Alén, G., & Aragón-Hernández, J. (2022). *Iber v3: Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones*. Iber. <https://doi.org/10.23967/iber.2022.01>

Schiechtl, H. (1980). *Bioengineering for land reclamation and conservation*. University of Alberta Press.

Sciarrone, R., Meléndez, R., & Loschacoff, S. (2012). *Rompeolas aislados como estructuras de protección costera y recuperación de playas*. Asociación Argentina de Ingenieros Portuarios.

Silva, R. E., Rodrigues, S. C., & Vieira, A. A. B. (2023). Role of vegetation inducing sedimentation in an artificial earth channel. *Mercator* (Fortaleza), 22, e22003.  
<https://doi.org/10.4215/rm2023.e22003>

SonTek/YSI Inc. (2007). *RiverSurveyor system manual (Software version 4.60)*.

Stark, J., Smolders, S., Meire, P., & Temmerman, S. (2017). Impact of intertidal area characteristics on estuarine tidal hydrodynamics: A modelling study for the Scheldt Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 198, 138–155. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.09.004>

Torres Marchena, C. (2015). *Aplicación del modelo numérico MOHID para el estudio hidrodinámico y de transporte de la Ciénaga Mallorquín* [Trabajo de grado de Ingeniería Ambiental, Universidad de la Costa]. Repositorio Institucional de la Universidad de la Costa.  
<https://hdl.handle.net/11323/498>

- Túquerres Panamá, S. J. (2025). *Modelación numérica bidimensional del transporte de sedimentos en el tramo de aproximación a la captación Pilatón, proyecto hidroeléctrico Toachi Pilatón* [Proyecto de titulación, Universidad Técnica de Cotopaxi]
- Upper Midwest Water Science Center. (2019, 4 de abril). ADCP data collection diagram [Diagrama]. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/media/images/adcp-data-collection-diagram>
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Winterwerp, J. C., Albers, T., Anthony, E. J., Friess, D. A., Mancheño, A. G., Moseley, K., Muhari, A., Naipal, S., Noordermeer, J., Oost, A., Saengsupavanich, C., Tas, S. A. J., Tonneijck, F. H., Wilms, T., van Bijsterveldt, C., van Eijk, P., van Lavieren, E., & van Wesenbeeck, B. K. (2020). Managing erosion of mangrove–mud coasts with permeable dams: Lessons learned. *Ecological Engineering*, 158, Article 106078. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106078>
- Winterwerp, J. C., Bayney, A., Engel, S., Jack, L., Moseley, K., & Smits, B. (2025). Mangrove recovery by habitat restoration using nature-based solutions. *Ecological Engineering*, 212, Article 107520. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2025.107520>
- Yu, G. A., Li, Z., Yang, H., Lu, J., Huang, H. Q., & Yi, Y. (2020). Effects of riparian plant roots on the unconsolidated bank stability of meandering channels in the Tarim River, China. *Geomorphology*, 351, Article 106958. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106958>
- Zeng, J., Ansar, M., Rakib, Z., Wilsnack, M., & Chen, Z. (2019). Applications of computational fluid dynamics to flow rating development at complex prototype hydraulic structures: Case study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(12), Article 04019024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001403](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001403)

**Anexos****Anexo A****Registros de Elevaciones**

## Escala 1 Río Cuxcuxapa

| <b>Fecha</b>                 | <b>Hora</b>    | <b>Elevación</b> | <b>Observación</b> |
|------------------------------|----------------|------------------|--------------------|
| Domingo, 25 de enero de 2026 | 08:00:00 A. M. | 0.19             | Cielo despejado    |
| Domingo, 25 de enero de 2026 | 02:00:00 P. M. | 0.22             | Cielo despejado    |
| Domingo, 25 de enero de 2026 | 08:00:00 P. M. | 0.20             | Cielo despejado    |
| Lunes, 26 de enero de 2026   | 08:00:00 A. M. | 0.21             | Cielo despejado    |

## Escala 2 Río Hondo

| <b>Fecha</b>                 | <b>Hora</b>    | <b>Elevación</b> | <b>Observación</b> |
|------------------------------|----------------|------------------|--------------------|
| Domingo, 25 de enero de 2026 | 08:00:00 A. M. | 0.18             | Cielo despejado    |
| Domingo, 25 de enero de 2026 | 02:00:00 P. M. | 0.20             | Cielo despejado    |
| Domingo, 25 de enero de 2026 | 08:00:00 P. M. | 0.17             | Cielo despejado    |
| Lunes, 26 de enero de 2026   | 08:00:00 A. M. | 0.19             | Cielo despejado    |

## Escala 3 El bellote

| <b>Fecha</b>                 | <b>Hora</b>    | <b>Elevación</b> | <b>Observación</b> |
|------------------------------|----------------|------------------|--------------------|
| Domingo, 25 de enero de 2026 | 08:00:00 A. M. | 0.17             | Cielo despejado    |
| Domingo, 25 de enero de 2026 | 02:00:00 P. M. | 0.32             | Cielo despejado    |
| Domingo, 25 de enero de 2026 | 08:00:00 P. M. | -0.10            | Cielo despejado    |
| Lunes, 26 de enero de 2026   | 08:00:00 A. M. | 0.15             | Cielo despejado    |

| <b>Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Título de tesis:</b>                                        | Bioingeniería en Canales para Mitigar Condiciones Asociadas al Azolve en Zonas de Manglares.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Autor(a) o autores(ras) de la tesis:</b>                    | <p>Autor:<br/>Ing. Civil Viviana López López.</p> <p>Dirección:<br/>Dra. Erika Viviana Miranda Mandujano.</p> <p>Codirección:<br/>Mtro. Marcos García Reyes.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>ORCID:</b>                                                  | <p>ID ORCID: I0009-0008-8624-0940<br/>Ing. Civil Viviana López López.</p> <p>ID ORCID: 0000-0001-5840-6415<br/>Dra. Erika Viviana Miranda Mandujano.</p> <p>ID ORCID: 0009-0009-5280-2594<br/>Mtro. Marcos García Reyes.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Resumen de la tesis:</b>                                    | <p>El azolvamiento de los canales en los sistemas lagunares reduce la capacidad hidráulica y puede limitar el intercambio de agua. Este proyecto de grado tiene como objetivo evaluar hidrodinámicamente tres configuraciones de Centros de Dispersión Lineales (CDL), propuestas como medidas de bioingeniería en la bocana del canal de Río Hondo, para determinar su influencia en la distribución de velocidades y los patrones de circulación del agua. Para ello, se realizó el levantamiento topobatimétrico del área de estudio y se midieron los niveles de agua en las conexiones hidráulicas de la laguna Mecoacán. Con la información obtenida se construyó un modelo hidrodinámico bidimensional de la condición actual. Este modelo sirvió de base para la implementación de las tres configuraciones de CDL, para posteriormente comparar su comportamiento en instantes representativos de llenante y vaciante, considerando como criterios de selección la distribución de velocidades, la continuidad del flujo, las recirculaciones y extensión de zonas de baja movilidad. Los resultados mostraron que las tres alternativas modificaron la circulación respecto a la condición actual; sin embargo, la alternativa 3 presentó el comportamiento más uniforme entre ambas fases. Se concluye que la implementación geométrica de los CDL puede mejorar localmente el comportamiento hidrodinámico actual.</p> |
| <b>Palabras claves de la tesis:</b>                            | Bioingeniería, canales, CDL, manglares, modelación numérica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Referencias citadas:</b>                                    | Pág. 90 a pag. 97                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |