

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Modelización hidráulica de un sistema de canales urbanos influenciados por marea e
intervenidos por obra de control

INGE - 2612

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería Oceanográfica

Presentado por:

Xiomara Nicole Matías Reyes

Eduarda Katherynne Sotelo Cruz

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

A mi familia por su apoyo incondicional, por no permitir que me dé por vencida cuando todo se complicaba.

A mi papá que me enseñó a terminar lo que empecé, aunque en su momento me pareció difícil de entender, ahora veo cuánto razón tenías.

A mis amores de cuatro patas, Bones, Gandhi, Vulko, Kala, Oso y Fergus, por recibirme con amor todos los fines de semana que volvía a casa y hacer las salidas a la playa siempre divertidas.

Con todo mi cariño.

Eduarda

A Luis y Silvia que apoyaron cada una de mis decisiones y confiaron en que lo haría bien.

A Ximena que estuvo todo el camino dándome ánimos, aun cuando no los tenía ni para ella misma.

A Evelyn que siempre tuvo las palabras necesarias.

A Andrés que toma mi mano en sueños siempre.

Este es un logro en conjunto,

Xiomara

Agradecimientos

A Dios por darme la fuerza y guía necesaria para terminar esta etapa, por no permitir que me pierda en el camino, y por darme unos padres y hermanas que me han apoyado desde el día uno cuando todo se veía imposible.

A Eddy y Katherynne gracias por su esfuerzo y amor. A mis hermanos Harry, Andrea y Adela que me dieron alegría en los momentos más estresantes, recordándome que la vida va mucho más allá de los estudios y las buenas calificaciones.

A mis amigas Katherine y Paula, las amistades que Dios puso en el momento perfecto.

A Xiomara por su gran amistad e infinita paciencia, por hacer de este tiempo, en particular, algo llevadero y enseñarme que un Naturísimo nunca viene mal.

Gracias a todos ustedes por estar.

Eduarda

Infinitamente a Dios por todo.

A mis padres por acompañarme en cada etapa de mi vida ajustándose a mi ritmo.

A Ximena y Sayary por estar y tenerme paciencia en todo momento.

A los Inv's por hacer mi vida universitaria más bonita

A Eduarda por ayudarme a completar esta etapa y documentar de forma exitosa los distintos cambios de ánimos que tuvimos a lo largo de este proyecto.

A mi viejito de cuatro patas por acompañarme en todo este camino incluidas las malas noches.

Gracias de todo corazón por estar y espero que, permanecer en mi vida.

Xiomara

A las personas de la academia que nos brindaron no solo respuestas de las tantas preguntas que tuvimos en el desarrollo del proyecto, sino también ánimo y el apoyo emocional que tanto necesitábamos. Gracias a Carlos Martillo, PhD., María José Marín, PhD., y al Ing. Rafael González a

A Isaac Macías por su amistad y predisposición incondicional, a Sebastián Vinuesa por su colaboración en el inicio del desarrollo de este proyecto y a Boris Apolo técnico de investigación del CADS, por su ayuda en el soporte en campo

Finalmente, Ignace Pelckmans, candidato doctoral de la Universidad de Amberesque a la distancia y el idioma no fueron barrera para extendernos su ayuda.

Infinitas gracias,

Eduarda & Xiomara

Declaración Expresa

Nosotros Xiomara Nicole Matías Reyes y Eduarda Katherynne Sotelo Cruz acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de derechos de autor del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 24 de mayo del 2024.


Xiomara Nicole Matías Reyes


Eduarda Katherynne Sotelo Cruz

Evaluadores

Ing. Jorge Washington Espinoza

Amaguaña

Profesor de Materia

Indira Yadira Nolivos Álvarez,

PhD

Tutora de proyecto

Resumen

Este proyecto integrador se enfoca en modelar la hidrodinámica de los canales urbanos del estero Salado en Guayaquil, influenciados por la marea y una obra de control de inundaciones, utilizando un modelo numérico bidimensional llamado Telemac2d. Se busca comprender el impacto de la obra sobre el comportamiento hidrodinámico del sistema siendo necesario el uso de una herramienta precisa para la gestión sostenible de cuerpos de agua urbanos y la prevención de inundaciones. Para el desarrollo del proyecto, se levantaron datos in-situ mediante equipos de medición específicos y se procesaron datos de batimetría y marea utilizando herramientas GIS y Matlab. Se calibró y validó el modelo numérico con la información recolectada, siguiendo normas técnicas establecidas para asegurar la precisión. Los resultados indicaron que el modelo replicó con precisión los rangos de marea en los ramales libres, mientras que en los ramales controlados se observaron discrepancias significativas, especialmente en áreas internas. Estas diferencias sugieren la necesidad de ajustes adicionales en el modelo. Actualmente, el modelo proporciona una herramienta eficaz para entender los efectos de las intervenciones humanas en la hidrodinámica de los canales urbanos. Adicional, el proyecto fortalece el Desarrollo Sostenible (ODS) 13: Acción por el Clima. Específicamente en la meta 13.1 que tiene base en el fortalecimiento de resiliencia y capacidad de adaptación a riesgos que se encuentren relacionados con el clima y desastres naturales y contribuye al ODS 11: Desarrollo sustentable de la comunidad en la meta 11.4 Salvaguardar el patrimonio cultural y natural del mundo

Palabras claves: Modelo numérico, Estero Salado, ramales internos

Abstract

This integrative project focuses on modeling the hydrodynamics of the urban channels of the Salado Estuary in Guayaquil, influenced by tidal actions and a flood control structure, using a two-dimensional numerical model called Telemac2d. The goal is to understand the impact of the structure on the hydrodynamic behavior of the system, emphasizing the need for a precise tool for the sustainable management of urban water bodies and flood prevention. The project involved collecting in-situ data using specific measurement equipment and processing bathymetric and tidal data with GIS and Matlab tools. The numerical model was calibrated and validated with the collected data, following established technical standards to ensure accuracy. Results indicated that the model accurately replicated tidal ranges in the free branches, while significant discrepancies were observed in the controlled branches, especially in internal areas. These differences suggest the need for further adjustments to the model. Currently, the model provides an effective tool for understanding the effects of human interventions on the hydrodynamics of urban channels. Additionally, the project strengthens Sustainable Development Goal (SDG) 13: Climate Action. Specifically in goal 13.1, which is based on strengthening resilience and adaptive capacity to risks related to climate and natural disasters, and contributes to SDG 11: Sustainable community development in goal 11.4 Safeguarding the world's cultural and natural heritage.

Keywords: Numerical model, Salado Estuary, internal branches

Índice general

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1 Descripción del Problema | 3 |
| 1.2 Justificación del Problema | 4 |
| 1.3 Objetivos | 5 |
| 1.3.1 Objetivo General | 5 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 5 |
| 1.4 Marco teórico | 5 |
| 1.4.1 Antecedentes | 5 |
| 1.4.2 Descripción del área de estudio | 6 |
| 1.4.3 Descripción de la obra hidráulica de control de marea | 7 |
| 1.4.4 Hidráulica de canales | 8 |
| 2. Metodología | 12 |
| 2.1 Recolección de datos | 12 |
| 2.1.1 Revisión bibliográfica | 12 |
| 2.1.2 Batimetría | 13 |
| 2.1.3 Datos de marea y nivel de agua | 13 |
| 2.2 Procesamiento de datos | 16 |
| 2.2.1 Procesamiento de batimetría | 16 |
| 2.2.2 Procesamiento de datos de marea | 18 |
| 2.3 Construcción del modelo | 21 |
| 2.3.1 Definición del dominio | 21 |
| 2.3.2 Geometría del canal | 22 |
| 2.3.3 Condiciones de borde | 23 |
| 2.4 Validación del modelo | 25 |
| 2.4.1 Iteraciones y evaluación de parámetros | 25 |
| 2.4.2 Ajuste de parámetros | 25 |
| 3. Resultados y Análisis | 28 |
| 3.1 Variación del nivel de agua entre canales profundos y someros del área de estudio | 28 |
| 3.2 Resultados del modelo | 29 |
| 3.4 Resultados de los puntos de control | 33 |
| 3.5 Análisis de resultados | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 3.6 Presupuesto..... | 40 |
| 4. Conclusiones y recomendaciones..... | 43 |
| 4.1 Conclusiones | 43 |
| 4.2 Recomendaciones | 43 |
| Referencias..... | 45 |
| ANEXOS..... | 49 |

Abreviaturas

| | |
|--------|--|
| CADS | Centro de Agua y Desarrollo Sustentable |
| EMAPAG | Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable |
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| IGM | Instituto Geográfico Militar |
| INAMHI | Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología |
| INOCAR | Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada |
| MLWS | Mean Low Water Spring-Promedio de las Bajamares de Sicigia |
| NMM | Nivel Medio del Mar |
| ODS | Objetivo de Desarrollo Sostenible |
| RTK | Real-Time Kinematic-Tiempo Real Cinemático |
| SCADA | Sistema de Control Supervisor y Adquisición de Datos |
| SNM | Sobre Nivel del Mar |

Simbología

| | |
|------|-----------------------------------|
| BM's | Bench Marks-puntos de referencias |
| Km | Kilómetros |
| m | Metros |
| min | Minutos |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. <i>Área de estudio</i> | 6 |
| Figura 2. <i>Sistema de válvulas</i> | 8 |
| Figura 3. <i>Diagrama de flujo: Metodología utilizada</i> | 12 |
| Figura 4. <i>Data Tres Bocas Inocar</i> | 14 |
| Figura 5. <i>Data Puerto Nuevo Inocar</i> | 14 |
| Figura 6. <i>Sensor e instalación</i> | 15 |
| Figura 7. <i>Ubicación de sensores de marea</i> | 16 |
| Figura 8. <i>Posiciones de reglas de marea y BM's</i> | 17 |
| Figura 9 <i>Diagrama de cada posición de la regla</i> | 17 |
| Figura 10. <i>Densidad de puntos de batimetría</i> | 18 |
| Figura 11. <i>Regla de marea Puente Lineal</i> | 20 |
| Figura 12 <i>Regla de marea Puente ZigZag</i> | 20 |
| Figura 13. <i>Dominio del modelo</i> | 21 |
| Figura 14. <i>Geometría del área de estudio vista-2d con relación al MLWS</i> | 22 |
| Figura 15. <i>Corte de sección transversal del canal</i> | 23 |
| Figura 16. <i>Geometría del area de estudio con el estrechamiento de ramal controlado</i> | 23 |
| Figura 17. <i>Área de ingreso de condiciones de borde</i> | 24 |
| Figura 18. <i>Línea de condiciones de borde</i> | 24 |
| Figura 19. <i>Registros de niveles de marea medidos por sensores in-situ</i> | 28 |
| Figura 20. <i>Predicciones de marea en puntos de control</i> | 29 |
| Figura 21. <i>Registros de niveles de marea modelados en TELEMAC-2D</i> | 30 |
| Figura 22. <i>Comparación de Datos In-Situ vs Modelado en el ramal libre</i> | 31 |
| Figura 23. <i>Comparación de Datos In-Situ vs Modelado en el ramal controlado</i> | 31 |
| Figura 24. <i>Datos In-situ del Punto de Control Tres Bocas</i> | 33 |

Índice de ecuaciones

| | |
|--|----|
| (1. 1) Ecuación de aguas someras | 8 |
| (1. 2) Continuidad | 8 |
| (1. 3) Momentum en dirección x..... | 8 |
| (1. 4) Momentum en dirección y..... | 8 |
| (1. 5) Coeficiente de Chézy | 10 |
| (1. 6) Ecuación de Chézy | 10 |
| (1. 7) Ecuación de Manning..... | 10 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. <i>Valores del coeficiente de Manning</i> | 9 |
| Tabla 2. <i>Parámetros del Set Up de corrida</i> | 24 |
| Tabla 3. <i>Diferencia rango de marea de ramal libre</i> | 32 |
| Tabla 4. <i>Diferencia rango de marea de ramal libre</i> | 32 |
| Tabla 5. <i>Diferencia rango de marea de ramal controlado</i> | 32 |
| Tabla 6. <i>Diferencia rango de marea de ramal controlado</i> | 32 |
| Tabla 7. <i>Presupuesto</i> | 40 |

Capítulo 1

1. Introducción

La ciudad de Guayaquil se caracteriza por estar delimitada por dos cuerpos de agua, por el oeste se encuentra el Estero Salado y por el este la ría Guayas. El Estero Salado es una entrante de mar que baña el suroeste de la ciudad de Guayaquil, inicia a la altura del canal del Morro y se adentra en la ciudad por la acción de marea, a través de una red de canales internos someros hasta alcanzar zonas urbanas como las ciudadelas Urdesa y Kennedy. Actualmente, existen asentamientos urbanos a orillas del Estero Salado, que son susceptibles a inundaciones por desbordamientos (Ordóñez Ramírez, 2007). Debido a esto el Municipio de Guayaquil a través la Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable (EMAPAG) ha emprendido acciones para reducir el riesgo de inundaciones en su área de influencia, como la construcción de sistemas hidráulicos para control de marea.

No obstante, el emplazamiento de este tipo de obras hidráulicas implica varias repercusiones en el cuerpo de agua intervenido. Para comenzar, se menciona la alteración del régimen de marea, que a su vez influye en los ciclos de vida y reproducción de los ecosistemas nativos (Calderón, 2018). De igual manera, el cambio de la geomorfología del canal intervenido, donde el cuerpo de agua deja de circular con naturalidad lo que permite la acumulación de sedimentos con mayor facilidad (Calderón, 2018). Debido a una deficiente planificación urbana y a la limitada cobertura de saneamiento ambiental de barrios periféricos de la ciudad de Guayaquil. El Estero Salado se encuentra actualmente hipereutrofizado afectando tanto a la fauna que sostiene como a la salud de los ciudadanos de Guayaquil (Ormaza et al., 2022). De hecho, se le llama también “laguna costera urbanizada del Estero Salado” donde se registran altas concentraciones de Nitrógeno y Fósforo, hipoxia perenne y anoxia, y condiciones de pH elevado que conllevan a un leve índice de acidificación; todas estas características actuales del cuerpo de agua están acompañadas de concentraciones elevadas de coliformes totales y fecales (*E. coli*) y sólidos suspendidos, que como se menciona en líneas previas afectan negativamente a la fauna, especialmente a las especies pelágicas y bentónicas de las zonas costeras y estuarinas (Ormaza-González et al., 2024). En general, las obras hidráulicas que regulan el caudal y flujo de agua en canales alteran y favorecen a la concentración de sales y sólidos suspendidos, modificando diferentes propiedades como velocidad de corriente y calidad de agua (Dos Santos, 2015).

Este proyecto busca representar la hidrodinámica de los ramales urbanos del estero Salado mediante la aplicación de un modelo numérico bidimensional para la comprensión de los

procesos físicos que juegan un rol en la propagación de la señal de marea en estos canales, considerando la presencia de una obra hidráulica implantadas para el control de inundaciones en zonas urbanas. Adicional, el proyecto fortalece el Desarrollo Sostenible (ODS) 13: Acción por el Clima. Específicamente en la meta 13.1 que tiene base en el fortalecimiento de resiliencia y capacidad de adaptación a riesgos que se encuentren relacionados con el clima y desastres naturales (CEPAL, 2015) y contribuye al ODS 11: Desarrollo sustentable de la comunidad en la meta 11.4 Salvaguardar el patrimonio cultural y natural del mundo (CEPAL, 2015), esto se piensa conseguir a través del desafío 8 de los retos de la década de los océanos, el cual es: “Crear una representación digital del Océano” (UNESCO, 2023) dado que como producto se obtendrá un modelo numérico de la hidrodinámica de los canales urbanos del estero Salado.

1.1 Descripción del Problema

Los ramales internos del Estero Salado son cuerpos de agua naturales que presentan diferentes servicios a la ciudad, como de regulación del clima a nivel local, un espacio biodiverso, un entorno natural de recreación y, además, un cuerpo de agua donde drenan las aguas lluvias de cuencas urbanas durante los meses de estación lluviosa. La ciudad de Guayaquil se ubica a 4.5 msnm (Ordóñez Tapia, 2020), por lo que barrios como los de Urdesa y Kennedy que se encuentran en zonas de inundación natural son vulnerable a sufrir de estos eventos tanto durante la estación seca como en la lluviosa, cuando los niveles de marea son máximos, durante mareas de sicigia. Comprender la hidrodinámica de estos canales es necesario para proteger a la ciudad de inundaciones previniendo impactos ambientales negativos mayores.

Como plan de control, el Municipio de Guayaquil construyó un sistema de válvulas ubicado bajo el puente de Urdesa central que controla el ingreso del agua de mar hacia el canal que atraviesa las ciudadelas Urdesa y Kennedy durante el flujo de marea de sicigia. El estudio de impacto ambiental de esta obra contó con la simulación del comportamiento hidráulico del dique, donde se determinó que la inclusión del sistema de válvulas no produciría variaciones en los niveles máximos del estero que podrían generar desbordamientos de este hacia sus márgenes, y que durante la época seca el ramal intervenido tendría el mismo comportamiento que cuando no estaba presente la obra (Cabrera Santos, 2017). Esta obra fue implementada en el año 2021 (El Universo, 2021) y desde entonces ha servido para disminuir el impacto de la

inundaciones en las ciudadelas de Urdesa y Kennedy durante eventos de precipitación de alta intensidad que coinciden con la marea alta en el estero Salado.

No obstante, los efectos adversos que causan la presencia de estas válvulas son evidenciados por los moradores, universitarios y trabajadores del sector, especialmente cuando las válvulas se encuentran cerradas de acuerdo con registros de mayo del 2023 donde los ciudadanos se quejaron de los malos olores que provenían del ramal controlado generados por la falta del flujo de agua por aproximadamente dos semanas (Menoscal, 2023). Los niveles de oxígeno disminuyen al obstruir la circulación del cuerpo de agua, que ya es menor a $50 \mu\text{M}$ (Pizarro Mera et al., 2022), en consecuencia se produce la muerte de fauna acuática en el sector que al descomponerse libera malos olores.

El presente proyecto de Ingeniería Oceanográfica integrará la información existente de estos canales, levantará nueva información, y generará un modelo hidrodinámico del sistema de canales que nos permitirá evidenciar los cambios introducidos por la obra de control en la hidrodinámica del canal controlado para condiciones de válvulas abiertas y solo durante meses de época seca para reducir la complejidad del sistema a simular.

1.2 Justificación del Problema

Actualmente, existe una obra civil que puede haber modificado el equilibrio hidrodinámico de un estero contaminado agravando tal vez su estado de deterioro; fue construida con el objetivo de regular el nivel de marea de uno de los ramales internos del Estero Salado. No obstante, es posible que la presencia de esta obra influya en la formación de bancos de sedimentos (Ríos et al., 2021), cerca del puente ZigZag en la ciudadela Urdesa. Las consecuencias pueden llegar a ser muy graves si no existe un plan de monitoreo adecuado. Este proyecto integrador busca realizar un estudio enfocado en la información sobre la hidrodinámica del Estero y las condiciones actuales de características físicas del ramal controlado y no controlado que están cercanos a la obra, considerando que son canales similares emplazados en la misma zona, y por tanto es posible realizar un estudio comparativo.

Para esto es importante el uso de modelos numéricos que nos permitan reproducir la hidrodinámica de los canales en dos dimensiones, considerando el emplazamiento del sistema de válvulas de control de flujo en los ramales interiores del estero Salado. Destacando que en este proyecto no se considera el funcionamiento de las válvulas para la época teniendo como finalidad es comprender como se propaga la marea de ramales más profundos a ramales más

someros y cuál es el efecto que la obra de control hidráulico está ejerciendo sobre la hidrodinámica del canal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Modelar la hidrodinámica de los canales urbanos del estero Salado influenciados por la marea y modificados por la implantación de una obra de control de inundaciones aplicando un modelo numérico bidimensional que analice el comportamiento hidrodinámico del sistema.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Levantar datos in-situ por medio de equipos plantados en puntos específicos dentro del área de interés para la correcta calibración y validación del modelo numérico.
2. Procesar datos de batimetría y marea requeridos por el modelo numérico por medio de dos softwares de geolocalización (GIS), plataforma de programación y cálculo numérico (Matlab) que genere los archivos de entrada para el modelo.
3. Validar la efectividad del modelo comparando los resultados obtenidos con la información levantada en estaciones de medición ubicadas en canales profundos y someros para su aplicación en diferentes escenarios.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Antecedentes

1.4.1.1 Estudios de hidrodinámica de canales costeros a través de modelos numéricos

El programa TELEMAC-2D ha sido utilizado para estudiar los procesos hidrodinámicos en diferentes países de Europa, pero existen pocos casos de estudio en América Latina. A continuación, se mencionan dos estudios que analizan la hidrodinámica de diferentes cuerpos de agua.

El río De IJzermonding en Bélgica ha sido intervenido por diferentes construcciones como puertos y bases navales. Entre los archivos de entrada que se usaron para la modelación se datos de batimetría y registros *in-situ* del nivel de agua. La información que se obtuvo fue la velocidad de flujo para después compararlos con datos medidos en el área de estudio, sedimentación y validar la precisión del modelo desarrollado (Nolivos et al., 2004).

En Reino Unido, en los estuarios Burry Inlet, Dyfi, y Mawddach de Gales, se empleó el módulo de transporte de sedimentos SISYPHE para complementar el estudio propuesto. Al igual que en el caso del río De IJzermonding se simulan los flujos y velocidades del cuerpo de

agua. No obstante, las simulaciones de los estuarios están siendo condicionados por el cambio climático y analiza el aumento del nivel del mar, cambio morfológico y riesgo de erosión (Robins & Davies, 2011). Por otra parte, en Latinoamérica existe un estudio realizado en el río Purificación en Bogotá que determina un aumento de caudal después de la construcción de una represa, que a su vez aumenta la capacidad de erosión ya que el agua ingresa a mayor velocidad provocando socavación en el lecho (Arandia Suárez, 2018).

De manera general, la aplicación de modelos numéricos a canales costeros contribuye a la simulación del funcionamiento natural de los sistemas de canales y pueden ser usados para evaluar el impacto de intervenciones humanas como construcción de infraestructura para reducir al máximo los impactos negativos en el entorno natural

1.4.2 Descripción del área de estudio

Guayaquil se encuentra limitado por la ría Guayas, dentro de su cuenca se encuentra ubicado el Estero Salado influenciado por corrientes oceánicas que producen el flujo y reflujo de la marea y una variación en el nivel del agua a lo largo de todo el Estero Salado, incluyendo sus ramales internos (Alvear, 2014). El Estero Salado se extiende a lo largo de la ciudad de Guayaquil, reconocida por ser una de las ciudades más pobladas del Ecuador, con un total de 2'650.288 millones de habitantes en la zona urbana (INEC, 2017). De acuerdo con un estudio realizado en el 2019, entre los años 1950 y 1960 comenzaron los asentamientos a lo largo de áreas de manglar en los ramales interno del Estero Salado debido al rápido crecimiento de la población (Moreira et al., 2019).

Figura 1.

Área de estudio



Nota. La figura muestra la extensión del cuerpo de agua que comprende al Estero Salado desde Urdenor I (norte) hasta Isla de la Esperanza (sur).

El proyecto se enfoca en el estudio hidrodinámico de los ramales urbanos del estero Salado alrededor del puente Zig-Zag que fue inaugurado en el 2012, con la finalidad de crear una unión entre la universidad de Guayaquil con el parque Lineal ubicado frente a la Universidad Católica (Matamoros, 2012) considerándose únicamente para uso peatonal. No obstante, en el 2021 se inaugura el sistema de válvulas para controlar el ingreso de la marea en un ramal y reducir el impacto de inundaciones (El Universo, 2021). Este sistema se despliega en las bases del puente de ingreso a la ciudadela Urdesa. Es decir, que un ramal del Estero Salado ha sido manipulado desde hace 3 años, aproximadamente, por lo que es posible evaluar los impactos que la presencia de este sistema de válvulas ha provocado en diferentes variables como la velocidad del agua y dirección de flujo.

1.4.3 Descripción de la obra hidráulica de control de marea

El diseño y construcción del sistema hidráulico de control de inundaciones se encuentra emplazado en el canal entre Av. Juan Tanca Marengo y la ciudadela Kennedy, este canal al que denominaremos “ramal controlado” tiene un área superficial de cuerpo de agua de aproximadamente 13.2 [km²] cruzando por la parte norte de la ciudad de Guayaquil (Cabrera Santos, 2017). Ubicada bajo el puente de Urdesa, junto a “Guayarte”, esta obra hidráulica cuenta con un total de 17 válvulas, 15 tipo *pinch* y 2 tipo *check*. Únicamente se controlan las válvulas de tipo *pinch* por medio de un Sistema de Control Supervisor y Adquisición de Datos (SCADA), donde se presentan 3 opciones: manual, automático y remoto, que varían de acuerdo con las condiciones del ramal interno. Durante época seca se mantienen abiertas todas las válvulas siempre que el nivel de marea se encuentre bajo los 3.80[m], este evento sucede aproximadamente de dos-tres veces al mes, caso contrario se procede a cerrar las válvulas vía remoto, es decir, desde la sala de control.

Las válvulas tipo *pinch* se encuentran seccionadas por tres grupos de cinco válvulas, por lo que el cerrado del sistema no es simultáneo. Una vez que los sensores de nivel de agua detectan el umbral especificado, se procede a iniciar el cierre del sistema cada cinco válvulas de manera consecutiva. De esta manera, se evita que el nivel de agua dentro del ramal B o ramal controlado siga aumentando.

Figura 2.

Sistema de válvulas



Nota. La figura expone las 17 válvulas que se encuentran emplazadas en el Estero Salado y controlan el flujo de agua en el ramal controlado. (Quillupangui, 2021)

1.4.4 Hidráulica de canales

La hidráulica de canales se basa en la descripción de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas y no lineales. Relacionando de forma conservativa, los vectores F_x y F_y que representan la transferencia de masa o energía de un líquido en las direcciones x e y en el tiempo t (Munguía Balvaner et al., 2016). Esta ecuación es una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo de fluidos en un entorno donde la longitud horizontal es mucho mayor que la profundidad, como se puede visualizar en la ecuación 1.1.

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} = \sum_{k=1}^n G_k \quad (1.1)$$

Para la resolución de esta ecuación es posible implementar el programa TELEMAC-2D y el interfaz gráfico Blue Kenue©; este último integra datos geoespaciales con datos de entrada y resultados de modelos (NRC.Canada, 2019). Adicionalmente, se exponen las demás ecuaciones que se rigen a la hidrodinámica de canales abiertos para obtener la continuidad y Momentum en dirección vertical y horizontal; respectivamente.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \cdot \vec{\nabla}(h) + h \operatorname{div}(\vec{u}) = S_h \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\nabla} u) \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad (1.4)$$

Donde h es la profundidad de flujo; g es la aceleración de la gravedad; ν_t es el coeficiente de difusión; Z es el nivel de la superficie libre; t es el tiempo; S_h es una fuente o sumidero en la ecuación de continuidad; $\vec{\nabla}$ es el gradiente; div es la divergencia; u y v , S_x y S_y son las velocidades medias en vertical y las fuentes o sumideros en las ecuaciones de cantidad de movimiento en el sentido x e y respectivamente (Peruzzo & Riccardi, 2018). Todas estas ecuaciones son utilizadas para para modelar el flujo y los niveles de agua en cuerpos de agua. Para los modelos numéricos estos parámetros deben de definirse correctamente en la malla, así como las condiciones de borde, condiciones iniciales y coeficiente de fricción, se puede simular y analizar el comportamiento hidrodinámico.

Existen diferentes leyes de fricción que se aplican según sea el caso a estudiar, se menciona a la Ley de Haaland, Ley de Chézy, Strickler, Manning Nikurasade, Colebrooke-White, existen casos poco prácticos en la vida real donde el canal no presenta fricción (MASCARET, 2022). Asimismo, es posible que el valor del coeficiente de fricción varíe con el tiempo o sea un valor fijo; al momento de realizar un modelo numérico esto es definido en el archivo principal que el programa interpreta con todos los archivos de entrada.

La selección de la ley de fricción a utilizar se basa en la descripción del flujo. Si es de tipo turbulento, presenta fuerzas viscosas débiles en relación con las fuerzas inerciales y aunque el recorrido de sus partículas es aleatorio su movimiento siempre es hacia adelante (Rodríguez, 2008). Además, se debe de definir si el flujo es uniforme o no; un flujo uniforme es constante a lo largo del canal, en la sección transversal, pendiente del canal y rugosidad, por lo que la aceleración convectiva es igual a cero (Cadavid, 2020).

Tabla 1.

Valores del coeficiente de Manning

| Material | Valores | | |
|--------------------------------------|---------|--------|--------|
| | Mínimo | Normal | Máximo |
| Arroyo de montaña con muchas piedras | 0.035 | 0.040 | 0.050 |
| Tepetate (liso y uniforme) | 0.025 | 0.035 | 0.040 |
| Tierra en buenas condiciones | 0.017 | 0.020 | 0.025 |
| Tierra libre de vegetación | 0.020 | 0.025 | 0.033 |
| Mampostería seca | 0.025 | 0.030 | 0.033 |

| | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| Mampostería con cemento | 0.017 | 0.020 | 0.025 |
| Concreto | 0.013 | 0.017 | 0.020 |
| Asbesto cemento | 0.090 | 0.010 | 0.011 |
| Polietileno y PVC | 0.007 | 0.008 | 0.009 |
| Fierro fundido (Fo. Fo) | 0.011 | 0.014 | 0.016 |
| Acero | 0.013 | 0.015 | 0.017 |
| Vidrio, cobre | 0.009 | 0.010 | 0.010 |

Nota. La tabla expone los rangos para el modelado de canales libres y diseño de tuberías. (Rodríguez, 2008).

La ecuación 1.5 se refiere al coeficiente de Chézy, mientras que la fórmula 1.6 es la fórmula de Chézy, donde $R(h)$ es el radio hidráulico, S es la pendiente de la línea de agua y C el coeficiente de rugosidad. Mientras que la relación de los parámetros descritos anteriormente y n que es la rugosidad de la pared se refieren a la fórmula de Manning para canales abiertos y tuberías. Determinando así, que esta última formula es una evolución de la fórmula de Chézy.

$$C = \frac{1}{n} R(h)^{\frac{1}{6}} \quad (1.5)$$

$$V(h) = C \sqrt{R(h) * S} \quad (1.6)$$

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

Finalmente, se menciona que un modelo numérico práctico y de libre acceso es TELEMAC-2D, que además es bidimensional y está diseñado para simular el comportamiento hidrodinámico de cuerpos de agua superficiales. Desarrollado por el consorcio open TELEMAC-MASCARET, este programa se utiliza para modelar el flujo de diversos entornos acuáticos como ríos, estuarios, lagos y costas. Utilizando esta herramienta es posible realizar interacciones complejas entre el agua y su entorno, incluyendo efectos de mareas, vientos y estructuras hidráulicas (Schwindt, 2013).

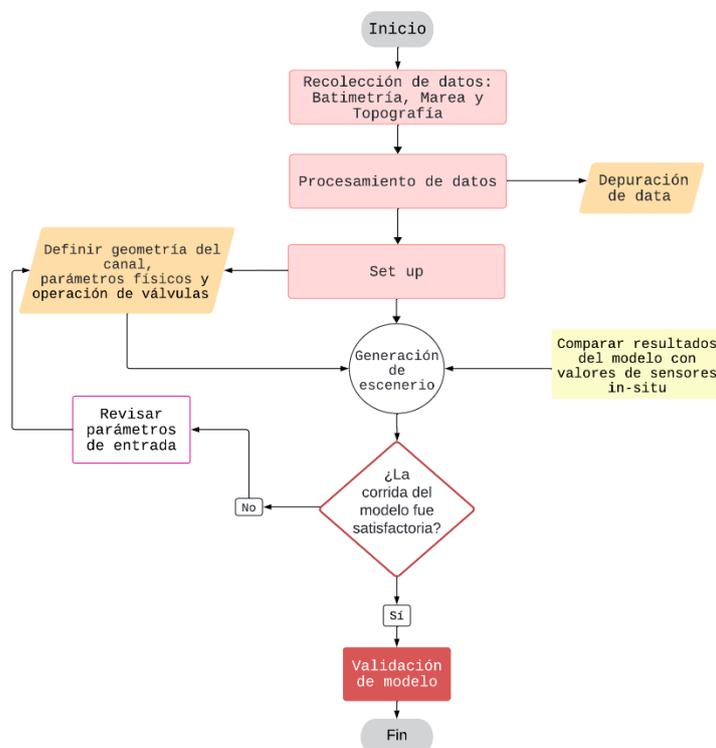
Capítulo 2

2. Metodología

Para la modelización del sistema de canales urbanos se solicitaron datos al Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada (INOCAR) y a la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guayaquil (EMAPAG). De igual manera, se realizó una revisión bibliográfica de trabajos de modelación costera de canales utilizando TELEMAC-2D. Esta metodología tiene 4 etapas principales 1. Colección y levantamiento de datos, 2. Procesamiento de datos, 3. Construcción del modelo, 4. Validación del modelo hidrodinámico para las variables de nivel y rango de marea. Como se describe en la figura 3.

Figura 3.

Diagrama de flujo: Metodología utilizada



Nota. La figura muestra el procedimiento iterativo que se siguió hasta obtener resultados coherentes y que se ajusten a los valores reales tomados en puntos específicos.

2.1 Recolección de datos

2.1.1 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica se centró en recopilar y analizar estudios previos relacionados con la modelización hidráulica de sistemas de canales urbanos influenciados por mareas. Se

investigaron artículos científicos, tesis, informes técnicos y libros relevantes para entender los principios y metodologías aplicadas en estudios de análisis hidráulico, hidrodinámico y sedimentológico en la plataforma Google scholar utilizando las palabras claves: modelado numérico, Telemac2D estuarios, hidrodinámica de canales. También se recopiló información sobre el modo de operación de las válvulas de control de inundaciones mediante una entrevista con un representante de Interagua-Veolia, compañía que se encuentra a cargo de la operación de esta infraestructura hidráulica.

2.1.2 Batimetría

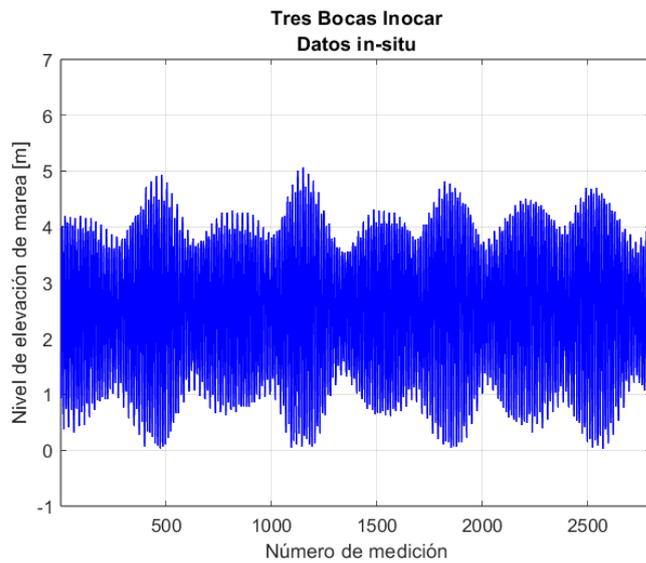
Para información de batimetría obtenida se utilizaron diferentes fuentes de origen para los datos. La batimetría del ramal A hasta la reserva del Salado fue proporcionada por EMAPAG, con un sistema de referencia de EPSG4326 - WGS 84 Mean Low Water Spring (MLWS), mientras que la información batimétrica del ramal B fue proporcionada por INOCAR con un sistema de referencia de EPSG32717 - WGS 84 Sobre el Nivel del Mar (SNM).

2.1.3 Datos de marea y nivel de agua

Se obtuvo información de marea del año 2019-2020 al INOCAR, en las estaciones de Tres Bocas Figura 4 y Puerto Nuevo Figura 5, se trabajó con datos que tenían fecha de inicio de 2019-01-05 hasta 2020-12-31 para la estación Tres Bocas y desde el 2019-01-01 hasta 2020-12-31 en la estación Puerto Nuevo con una distribución temporal de toma de datos cada hora y referenciada al MLWS

Figura 4.

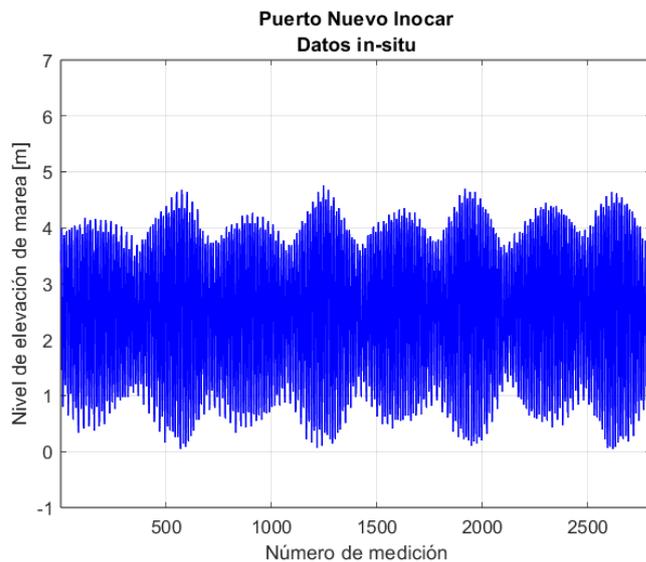
Data Tres Bocas INOCAR



Nota. La figura muestra el comportamiento de la marea en la Estación de marea Tres Bocas desde el 2019-01-05 hasta el 2019-04-19. Fuente INOCAR

Figura 5.

Data Puerto Nuevo INOCAR



Nota. La figura muestra el comportamiento de la marea en la Estación de marea Puerto Nuevo desde el 2019-01-01 hasta el 2019-04-15. Fuente INOCAR

Se realizaron a su vez diferentes salidas de campo para la colocación de sensores de nivel de agua Figura 6 a, con la finalidad de tener datos in situ durante dos meses, mayo y junio. Estos sensores fueron colocados estratégicamente, referirse a la figura 6 b. donde se muestra la instalación del sensor, para poder abarcar la mayor cantidad de información a lo largo de toda la zona de estudio, se ubicaron dos sensores en cada ramal interno y luego de la convergencia de estos se colocó otro, cada sensor recolectó información con una distribución temporal de cinco minutos empezando el registro el 2024-05-10 finalizándolo en 2024-06-26 , de esta forma se obtuvo información sobre el nivel de agua que existe en el ramal libre, el ramal controlado antes del sistema de válvulas y la convergencia entre ambos.

Figura 6.

Sensor e instalación

a. Sensor de presión plantado en cada estación



b. Instalación de sensor de presión

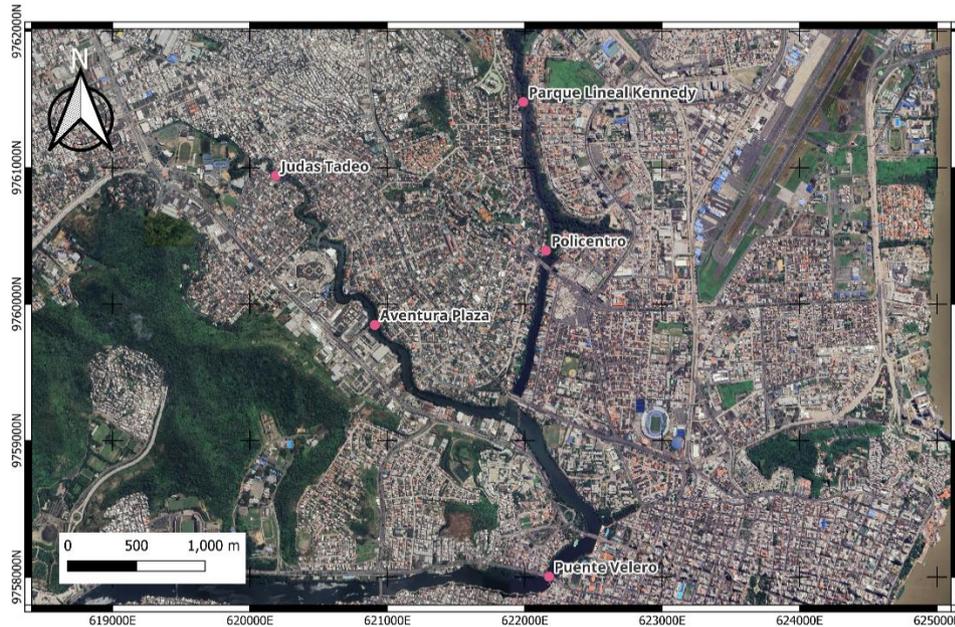


Nota. La figura 6a. muestra los sensores que se colocan a lo largo de los diferentes canales de interés. La figura 6b. expone la instalación del sensor plantado en el ramal controlado.

A partir de los sensores de marea que se colocaron a lo largo de los ramales de interés, referirse a la figura 7, fue posible recolectar información In-situ desde mayo hasta julio, que fue comparada con los valores obtenidos en el modelo para su validación.

Figura 7.

Ubicación de sensores de marea



Nota. La figura muestra los sensores plantados a lo largo de los canales de interés para la recolección de información in-situ.

2.2 Procesamiento de datos

2.2.1 Procesamiento de batimetría

La batimetría del canal B fue realizada por EMAPAG en el año 2016 y seccionada en ocho archivos <<.dwg>>, se seccionó desde el ramal que colinda con la Av. Francisco de Orellana hasta la obra hidráulica. Todos los planos se importaron en ArcGIS, bajo el sistema de referencias EGS32717. Para después, extraer posición, profundidad y elevación de cada punto en un archivo <<.txt>>; ya que los archivos originalmente cuentan con datos de batimetría y topografía, referidos al NMM. Posteriormente, en Excel se separaron puntos de batimetría y topografía, donde finalmente se importó la información depurada a QGIS, para verificar la posición de puntos de batimetría y topografía.

Dado que la información no estaba al mismo nivel de referencia, se proyectaron los datos del canal A al mismo nivel de referencia que los datos del canal B; para esto se utilizó el nivel de referencia cero del sistema de coordenadas verticales (z0) equivalente a 2.60[m], utilizando un proceso de suma o resta como se detalla en la Figura 7 y 8.

Figura 8.

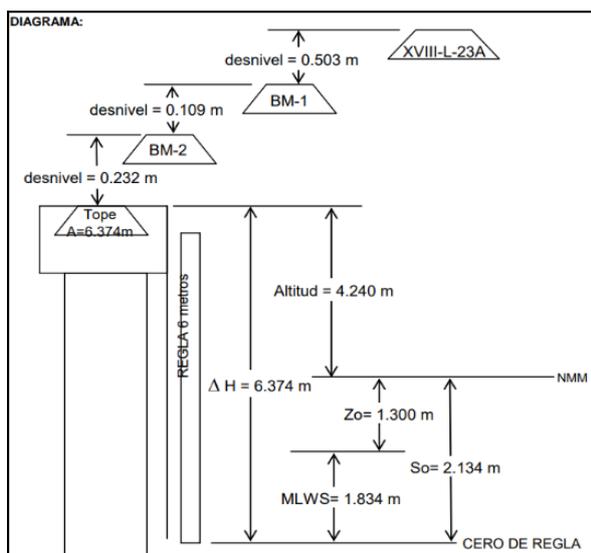
Posiciones de reglas de marea y BM's



Nota. La figura muestra la ubicación de las reglas de marea colocadas por INOCAR, de donde se obtuvo la información necesaria para la corrección del nivel de referencia.

Figura 9

Diagrama de cada posición de la regla



Nota. La figura muestra una vista transversal de la ubicación de los tope empleados como referencia para cada una de las reglas mencionadas y presentadas en la Figura 7. (Alavera, 2009)

2.2.1.1 Interpolación de batimetría

Los puntos de batimetría fueron llevados a un mismo nivel de referencia, en este caso debido a la disposición de datos se refieren al nivel promedio de las bajamares durante sicigia (MLWS), como se muestra en la figura 10a. No obstante, para una correcta representación del fondo del canal por lo que se realiza una interpolación de Red Irregular Triangulada (TIN) que aumenta la cantidad de puntos de batimetría en función de los puntos más cercanos. En el presente proyecto el aumento de densidad de puntos para los canales de interés fue de tres pixeles, referirse a la figura 6b, mientras que el resto del canal fue aumentado a cinco pixeles.

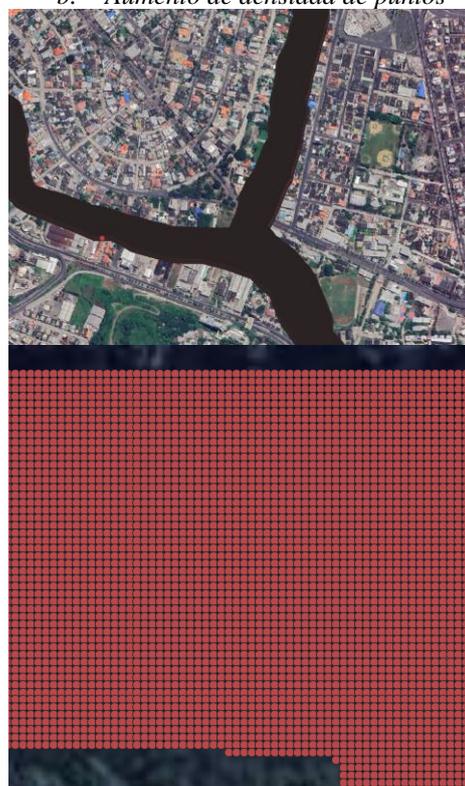
Figura 10.

Densidad de puntos de batimetría

a. *Puntos de batimetría registrados por INOCAR y EMAPAG*



b. *Aumento de densidad de puntos*



Nota. La figura muestra la comparación en la densidad de puntos antes y después de la interpolación lineal.

2.2.2 Procesamiento de datos de marea

2.2.2.1 Datos de marea – INOCAR

Para realizar el procesamiento de los datos de mareas se requiere primero realizar la simulación de una serie de tiempo de marea simultánea a la serie de tiempo de niveles de agua obtenido por los sensores en sitio Figura 7. Para esto, a partir de los datos proporcionados por

el INOCAR fueron obtenidos de dos estaciones, Tres Bocas y Puerto Nuevo, para el periodo, 2019-2020, se procesaron mediante la función t_tide en MatlabR2023a para obtener los armónicos de la serie de tiempo de estas estaciones.

Una vez que se obtienen los armónicos correspondientes para cada estación se utilizó la función t_predic para obtener la proyección de cada estación en las fechas en la que los sensores fueron ubicados en el campo. Estos datos dieron soporte para el apartado de validación de modelo.

2.2.2.2 Registros de sensores de nivel de marea

Los sensores de nivel fueron recolectados luego de dos meses de ser colocados en la zona de estudio, se procedió a importar los datos y se realizó la respectiva revisión de datos tomados a lo largo del tiempo en campo. Los datos que se obtiene a partir de estos sensores son: presión, temperatura y profundidad. Se colocó también un sensor de presión atmosférica adicional en el Hotel Radisson, posterior a la instalación de los sensores de nivel de marea. Esta serie de tiempo fue utilizada para corregir los datos obtenidos con los sensores de nivel de marea In-Situ utilizando los valores recolectados de variación de presión atmosférica. Los registros de elevación de nivel de marea corregidos fueron llevados al WGS84 siguiendo el procedimiento de corrección de la posición vertical de cada uno de los sensores de nivel de marea. La serie de tiempo de nivel de marea conlleva un periodo de inicio de 2024-06-06 13:30 hasta 2024-06-26 15:00 presentando la elevación del nivel del agua en cada punto referida al geoide WGS-84 (aproximado al NMM).

Se describe a continuación el procesamiento realizado para determinar la posición vertical de cada uno de los sensores de presión con respecto al WGS84 relativo al NMM.

La metodología RTK se empleó únicamente en el puente ZigZag y en el Parque Lineal; donde se describen tres Bench Marks (BM's) para establecer el nivel de marea, considerando como referencia el nivel medio del mar (NMM). Adicionalmente, algunos puntos o hitos pertenecen al Instituto Geográfico Militar (IGM) y están nivelados con relación al cero de la regla de marea (Alavera, 2009).

Figura 11.

Regla de marea Puente Lineal



Nota. La figura presenta la visualización de las *Bench Marks* de la regla de marea del Puente Lineal.

Figura 12

Regla de marea Puente ZigZag



Nota. La figura muestra que las *Bench Marks* fueron colocadas a diferentes alturas, incluso en la pasarela del puente ZigZag.

Se procedió a registrar los datos de topografía. Primero se estableció el sistema de referencia, en este caso WGS 84-UTM, después se definió un punto fijo donde se colocó la antena receptora, la terraza del hotel Radisson fue el punto seleccionado debido a su altura y así evitar problemas de comunicación entre receptores. La otra antena, también conocida como Rover se mantuvo en movimiento, alrededor de los puntos mostrados (figura 11 y figura 12), algunas de las mediciones pueden variar por la precisión de los equipos o el número de satélites; una vez que todos los puntos fueron registrados se importaron a la computadora para realizar la configuración del terreno.

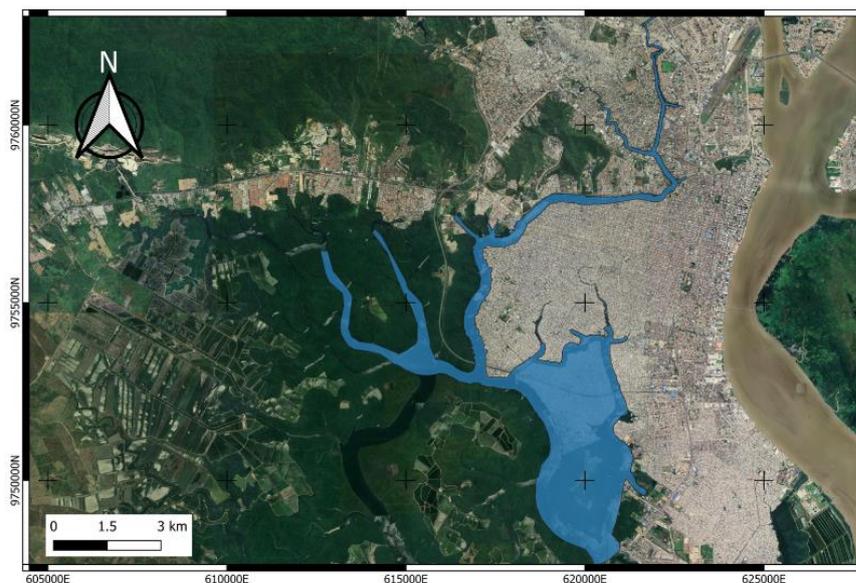
2.3 Construcción del modelo

2.3.1 Definición del dominio

Se delimitó la zona de estudio, abarcando de los ramales internos hasta la estación de marea de Puerto Nuevo, además de incluir de forma parcial los ramales cercanos a la estación de marea de Tres Bocas como se muestra en la figura 13, para una representación más realista de la zona, debido a que, todo este sector se encuentra influenciado por la marea. La definición correcta del dominio ayudó a establecer los límites del modelo logrando una representación cercana a la geometría del canal.

Figura 13.

Dominio del modelo



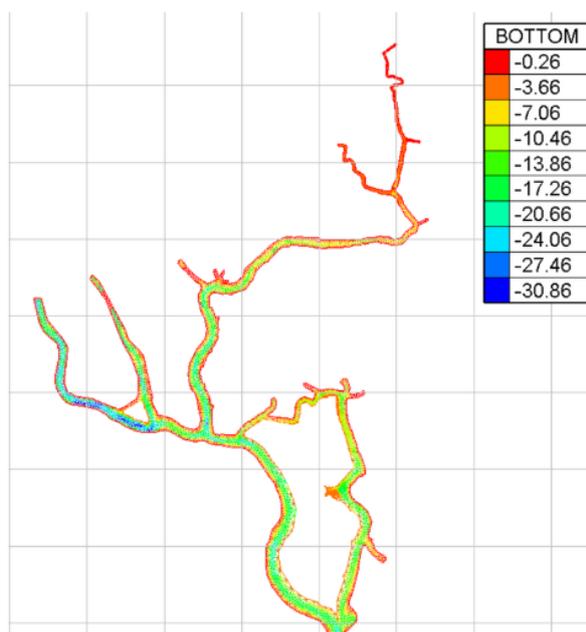
Nota. La figura expone la geometría y extensión de la malla construida en el procesador gráfico Blue Kenue.

2.3.2 Geometría del canal

Se utilizaron los datos tomados de la batimetría y topografía para la construcción de la geometría del canal, permitiendo más detalle y precisión en la representación del sistema de canales. En la figura 14 se muestra una vista de los valores de batimetría y topografía mezclados con la malla que se utilizó y cómo el modelo interpretó estos valores de profundidad. Mientras que, el corte de la sección transversal de la figura 15 en la zona del puente ZigZag demuestra el aproximando una forma realista del canal, esto ayuda al resolver las ecuaciones internas de TELEMAC-2D obteniendo como resultado valores más precisos en las variables de salida. Se tuvo también que representar la presencia de las válvulas abiertas en el ramal controlado, para lograr esta representación se realizó un estrechamiento a la geometría del canal como se muestra en la figura 16 logrando una aproximación a lo que sucede en el canal con la presencia de las válvulas abiertas y el dique que se encuentra en el fondo.

Figura 14.

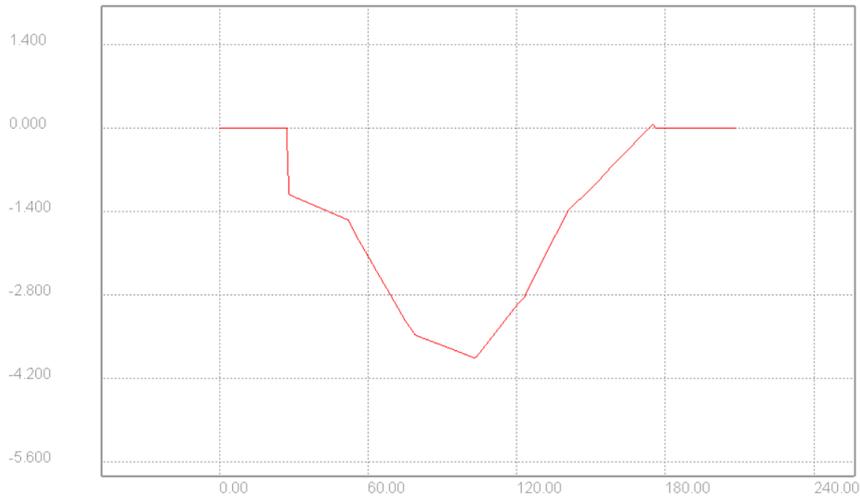
Geometría del área de estudio vista-2d con relación al MLWS



Nota. La figura representa la batimetría interpolada a la malla, archivo de entrada (input), siendo esta una visualización en 2D.

Figura 15.

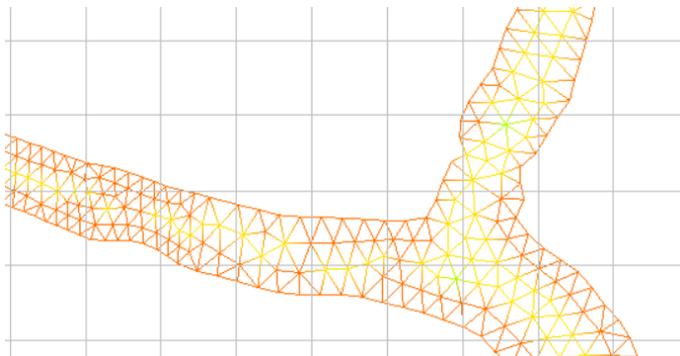
Corte de sección transversal del canal



Nota. La figura representa le forma que presenta el canal al realizar un corte transversal siendo esta una visualización en 2D.

Figura 16.

Geometría del área de estudio con el estrechamiento de ramal controlado



Nota. La figura representa la geometría de la malla, archivo de entrada (input), siendo esta una visualización en 2D.

2.3.3 Condiciones de borde

Se establecieron las condiciones de borde utilizando como límite la ubicación del mareógrafo del INOCAR en la estación de Puerto Nuevo. Para el ingreso de esta condición de borde primero se debe señalar el borde que la va a contener como se muestra en la figura 17 y figura 18, una vez seleccionado el borde se desplegará un cuadro de dialogo donde se debe especificar el tipo de condición a ingresar. Para este proyecto se definió como borde cerrado

toda la zona de ribera de los canales y como borde abierto la sección transversal del canal a la altura de la estación mareográfica Puerto Nuevo, donde se proyectaron los registros de marea para el periodo de tiempo de la simulación, iniciando con una altura prescrita. Se decidió utilizar únicamente esta condición, debido a la proximidad que se tiene con los canales y geometría del modelo.

Figura 17.

Área de ingreso de condiciones de borde

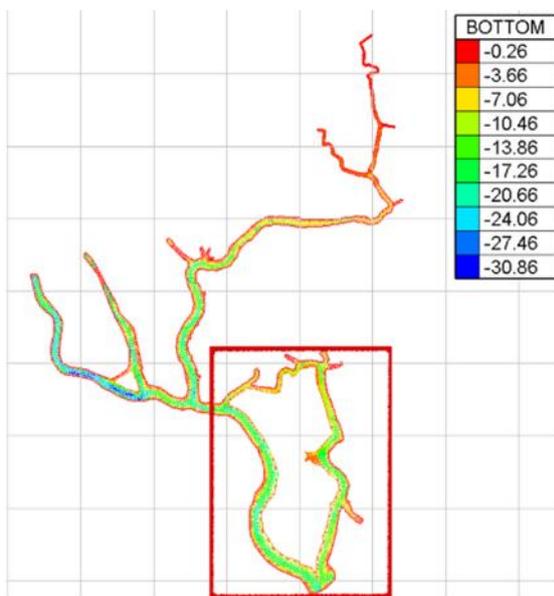
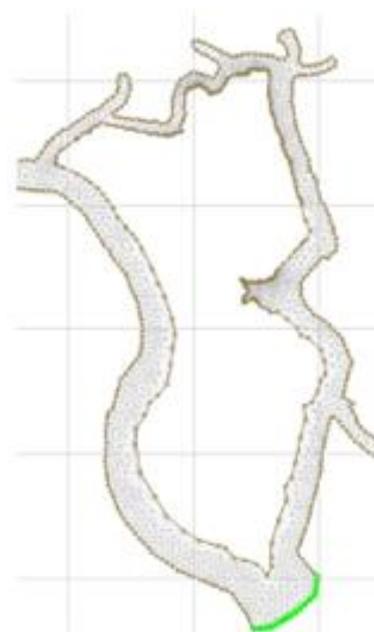


Figura 18.

Línea de condiciones de borde



Nota. La figura 17 muestra la sección donde se determina la condición de borde. La figura 18 muestra la línea de condición de borde abierto, por donde ingresan los valores de elevación de marea de la estación Puerto Nuevo.

2.3.4 Set Up del modelo

Para el set up de la corrida se establecieron algunos parámetros importantes que se encuentran detallados en la Tabla 2.

Tabla 2.

Parámetros del Set Up de corrida

| Parámetros | Unidades |
|------------|----------|
|------------|----------|

| | | |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Fecha original | 2024;06;16;00;00;00 | Año;Mes;Dia;Hora;Minuto;Segundo |
| Número de Time Step | 432000 | |
| Time Step | 1 | Segundos |
| Condiciones Iniciales | Elevación Constante | |
| Elevación Inicial | 1.6748 | Metros |
| Ley de Fricción de Fondo | 4 | Código para ley de Manning |
| Coefficiente de Fricción | 0.028 | |
| Número del Time Step para impresión | 300 | segundos |
| Frecuencia de salida de resultados | 300 | Segundos |
| Variables de salida | S,B | |

Nota. Parámetros de ingreso para el set up de la corrida con las unidades en las que deben ser ingresados.

2.4 Validación del modelo

La validación del modelo hidrodinámico es un paso crítico para garantizar que las simulaciones reflejen con precisión el comportamiento real del sistema de canales urbanos del Estero Salado, es por eso por lo que este apartado se dividió en dos partes.

2.4.1 Iteraciones y evaluación de parámetros

Se realizaron múltiples iteraciones del modelo para ajustar los parámetros de entrada y obtener una representación adecuada entre los resultados simulados y los datos observados. Cada iteración implicó la ejecución del modelo, la comparación de los resultados con las observaciones reales y el ajuste de los parámetros como la batimetría (densidad de puntos), coeficiente de fricción o condiciones iniciales (tabla 2 model set up) en función de los errores o advertencias que fueron generadas por TELEMAC-2D al momento de correr el modelo.

2.4.2 Ajuste de parámetros

Los parámetros ajustados incluyeron coeficientes de rugosidad, condiciones de borde y características de las válvulas cuando se encuentran abiertas. Estos ajustes se realizaron de

manera cíclica hasta que el modelo representó de forma más aproximada el comportamiento hidrodinámico real del sistema en función del nivel de marea y rango de marea, con una evolución cuantitativa en la estación mareográfica de Tres Bocas y con una evaluación cualitativa del error para los cuatro puntos donde se instalaron los sensores de nivel. Esto se hizo debido a que los registros de nivel de marea se encuentran referidos al NMM mientras que los niveles de marea modelados están referidos al MLWS.

Para obtener el valor de los datos obtenidos en el modelo, se utilizó como método el cálculo del Erro Cuadrático Medio (ECM) descrito en la ecuación 2.1, donde el número de datos (n) modelados e in-situ son iguales para calcular el promedio y diferencia entre estos es elevado al cuadrado. De esta manera se proporciona que tan dispersos están los datos modelados de los reales en ambos puntos de control.

$$ECM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (DataModelado_i - DataInsitu_i)^2 \quad (2.1)$$

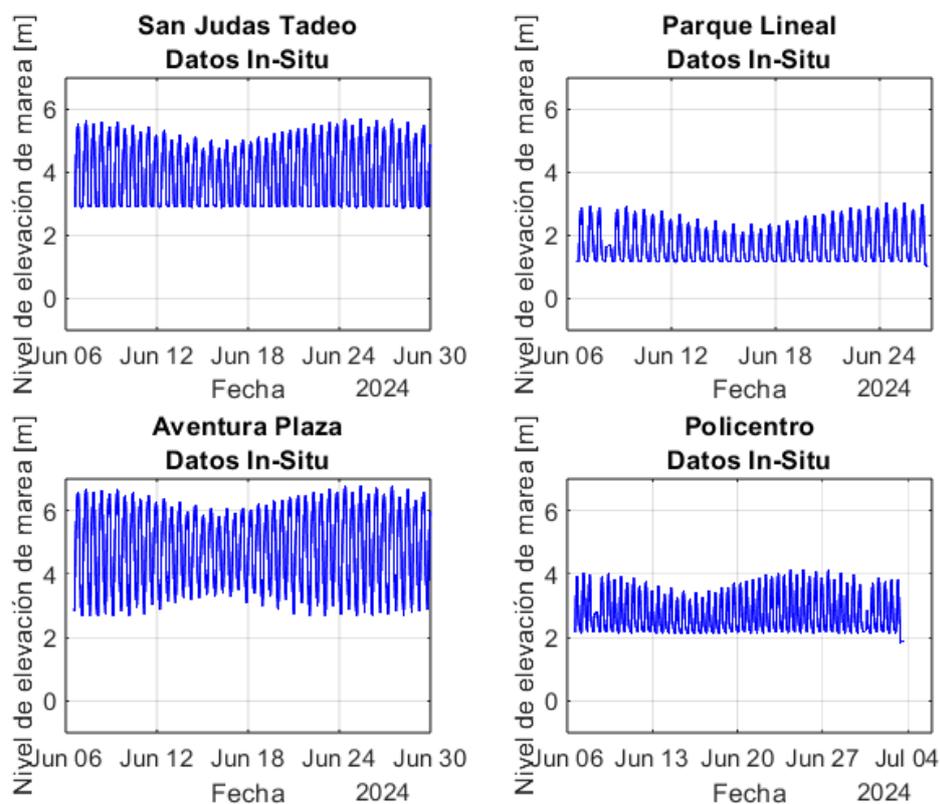
Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

3.1 Variación del nivel de agua entre canales profundos y someros del área de esti

Figura 19.

Registros de niveles de marea medidos por sensores in-situ

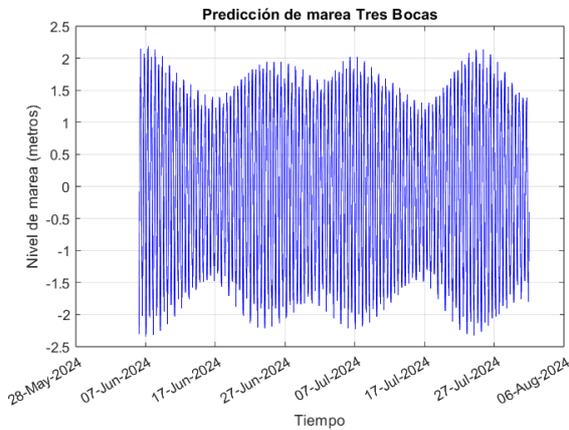


Nota. La figura 19 muestra en la parte superior las mediciones de los sensores ubicados en el ramal libre, mientras que la parte inferior los datos del ramal controlado.

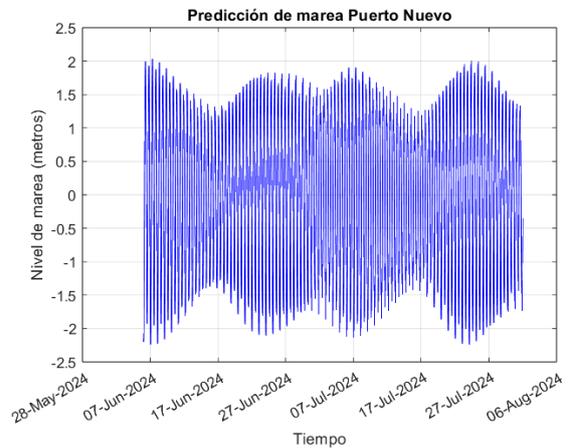
Figura 20.

Predicciones de marea en puntos de control

a. *Predicción de marea en estación Tres Bocas*



b. *Predicción de marea en estación Puerto Nuevo*



Nota. Predicciones de marea elaboradas en Matlab en base a sus armónicos correspondientes.

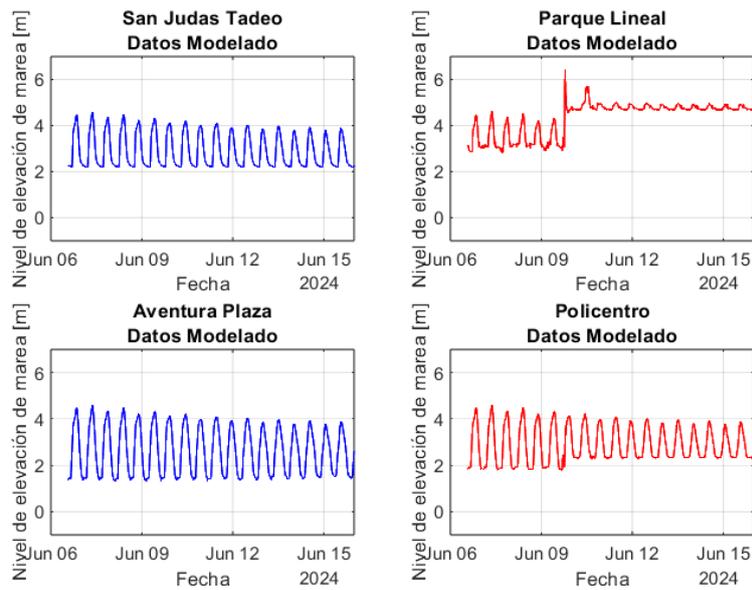
De la recolección de sensores in-situ se obtuvieron diversos resultados. Se tiene que tanto la data del sensor del Parque Lineal figura 19b. como la data del Policentro figura 19d. registraron al menos un episodio de cierre de válvulas en época seca aproximadamente el día 7 de junio. A su vez se muestra un comportamiento diferente cuando se presenta la bajamar en comparación a la data del sensor de San Judas Tadeo figura 19a. y la data del sensor de Aventura Plaza Figura 19b. donde se presenta un comportamiento más sinusoidal.

3.2 Resultados del modelo

La simulación considera el sistema de válvulas abiertas junto con la presencia de un dique, para simular este escenario se realizó un estrechamiento en las coordenadas donde se ubican las válvulas en el ramal controlado.

Figura 21.

Registros de niveles de marea modelados en TELEMAC-2D

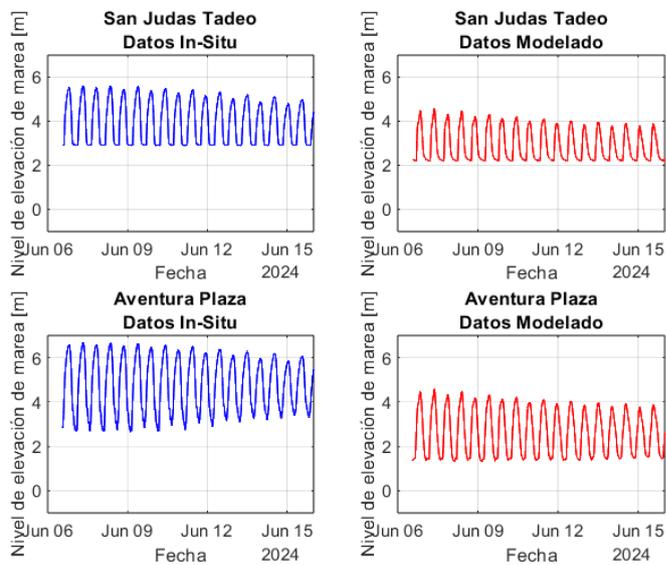


Nota. Los literales a. San Judas Tadeo y b. Parque Lineal de la figura representan los puntos más internos del ramal libre y controlado, respectivamente. De igual manera, los literales c. Aventura Plaza y d. Policentro corresponden a los puntos más alejados de sus ramales especificados.

La figura 21b muestra un cambio abrupto en el nivel de marea a partir del día 9 de junio aproximadamente, el comportamiento de la onda difiere con el resto de las estaciones. De igual manera, existe una pequeña disminución en el rango de marea de la otra estación del ramal controlado, figura 21d. Por otra parte, el comportamiento de onda sinusoidal se mantiene en las estaciones del ramal libre, figura 21a y 21c, durante toda la serie de tiempo modelada, con valles de 2[m] y crestas de 4[m].

Figura 22.

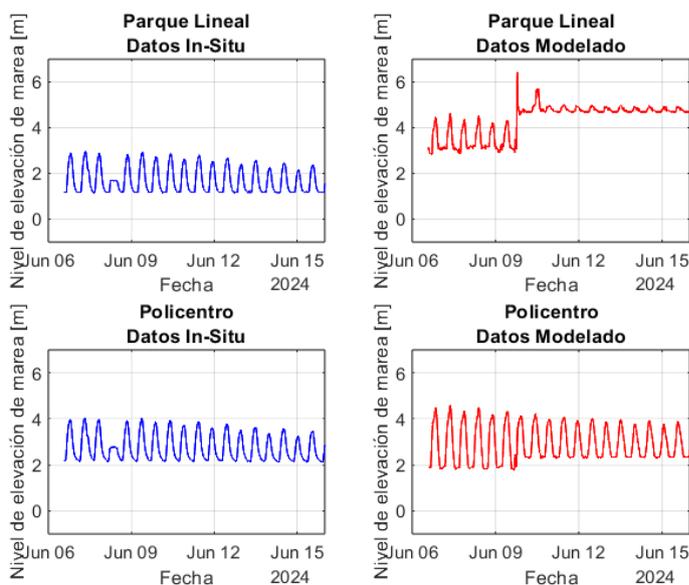
Comparación de Datos In-Situ vs Modelado en el ramal libre



Nota. La figura muestra la comparación entre los datos recolectados In-Situ a. San Judas Tadeo y c. Aventura Plaza vs los valores de la modelación b. San Judas Tadeo y d. Aventura Plaza en el ramal libre

Figura 23.

Comparación de Datos In-Situ vs Modelado en el ramal controlado



Nota. La figura muestra la comparación que se obtiene de los datos recolectados In-Situ a. San Judas Tadeo y c. Aventura Plaza vs los valores obtenidos como resultado de la modelación b. San Judas Tadeo y d. Aventura Plaza en el ramal controlado

Tabla 3.*Diferencia rango de marea de ramal libre*

| Estación: Puente San Judas Tadeo | |
|----------------------------------|------------|
| Rango de marea in situ: | 2.727 [m] |
| Rango de marea modelado: | 2.395 [m] |
| Diferencia en el rango de marea | -0.331 [m] |

Nota. Datos de rango de marea en la zona más interna del ramal libre.**Tabla 4.***Diferencia rango de marea de ramal libre*

| Estación: Aventura Plaza | |
|---------------------------------|------------|
| Rango de marea in situ: | 3.986 [m] |
| Rango de marea modelado: | 3.284 [m] |
| Diferencia en el rango de marea | -0.701 [m] |

Nota. Datos de rango de marea en la zona menos interna del ramal libre.**Tabla 5.***Diferencia rango de marea de ramal controlado*

| Estación: Parque Lineal | |
|----------------------------------|-----------|
| Rango de marea in situ: | 1.803 [m] |
| Rango de marea modelado | 3.581 [m] |
| Diferencia en el rango de marea: | 1.778 [m] |

Nota. Datos de rango de marea en la zona más interna del ramal controlado.**Tabla 6.***Diferencia rango de marea de ramal controlado*

| Estación: Policentro | |
|----------------------------------|-----------|
| Rango de marea in situ: | 1.926 [m] |
| Rango de marea modelado: | 2.808 [m] |
| Diferencia en el rango de marea: | 0.882 [m] |

Nota. Datos de rango de marea en la zona menos interna del ramal controlado.

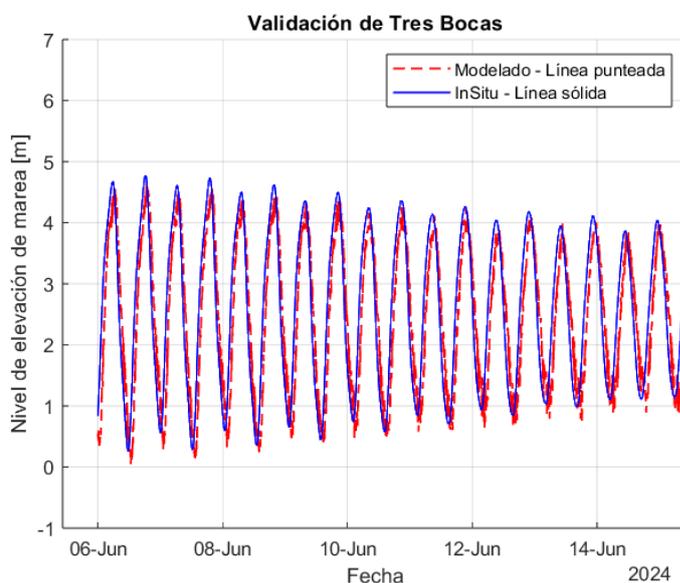
De los resultados modelados obtenidos se tiene que los rangos obtenidos en los ramales libres figura 21 son similares a los rangos obtenidos en la data de los sensores in-situ figura 20 manteniendo un rango de marea aproximado 2.39[m] para el ramal más interno ubicado en el puente San Judas Tadeo y un rango de marea aproximado 3.28[m] para el ramal más externo ubicado en Aventura Plaza, con una diferencia de $-0.33[m]$ y $-0.77[m]$ entre los valores de marea In-Situ y los valores modelados Tabla 3 y Tabla 4.

Para los resultados modelados obtenidos en los ramales controlados se obtienen rangos donde la variación resulta un poco mayor en comparación a los rangos obtenidos por los sensores in-situ, manteniendo un rango de 3.58[m] en la parte más interna del ramal controlado ubicado en el Parque Lineal con una diferencia de 1.77 [m] Tabla 5 y un rango de 2.80[m] en la parte más externa del ramal controlado ubicado cercano al Policentro con una diferencia de 0.88 [m] Tabla 6.

3.4 Resultados de los puntos de control

Figura 24.

Datos In-situ del Punto de Control Tres Bocas



Nota. La figura muestra el resultado del mareógrafo en comparación con los resultados de TELEMAC-2D en la Estación Tres Bocas con un EMC de 0.39926, punto utilizado para la calibración del modelo.

Como resultados del punto de control en Tres Bocas tenemos que tanto los datos recolectados In-Situ como los modelados presentan un comportamiento muy similar Figura 24 con un error medio cuadrático de 0.3992, indicando que el modelo representa de buena forma el comportamiento en el punto de control.

3.5 Análisis de resultados

En los resultados obtenidos de la modelización hidráulica de un sistema de canales urbanos influenciados por marea e intervenidos por obras de control, se observan diversos comportamientos en los rangos de marea al comparar los datos modelados con los datos recolectados In-Situ en los dos diferentes ramales. Para el análisis de resultados se presta más atención al rango de marea obtenido en los resultados que a los valores netos, esto debido a que los valores de la data In-Situ se encuentran referidos al geoide WGS-84 mientras que los datos obtenidos del modelo se encuentran referidos al MLWS.

En los ramales libres, los resultados modelados muestran una gran coherencia con los datos obtenidos In-Situ. En el ramal más interno, ubicado en el puente San Judas Tadeo, se obtuvo una diferencia de rango de marea aproximado de -0.331 [m], mientras que, en el ramal más externo, ubicado en Aventura Plaza, tuvo una diferencia en el rango de -0.701 [m], presentando diferencias entre los rangos de los datos modelados y los In-Situ relativamente pequeñas, esto se atribuye a que el modelo este posiblemente subestimando en una pequeña cantidad los valores reales. Estas diferencias mínimas sugieren que el modelo hidrodinámico es eficaz para replicar las condiciones observadas en los ramales libres o no intervenidos, lo que permite una mayor precisión del modelo en escenarios sin intervención de infraestructuras.

El punto de control muestra un error cuadrático medio muy pequeño exponiendo una alta concordancia con los datos in situ proyectados para la fecha del 06-Jun-2024 hasta 16-06-2024, con una diferencia mínima en el rango de marea de 0.089 [m]. Esto refuerza la confianza en la capacidad del modelo para replicar las condiciones reales en esta ubicación específica.

En los ramales controlados, las diferencias entre los datos modelados y los datos In-Situ son más notables. En el ramal controlado más interno, ubicado en el Parque Lineal, se obtuvo un rango de marea de 3.58 [m], con una diferencia de 1.77 [m] respecto a los datos In-Situ. En el ramal más externo, cercano al Policentro, el rango modelado fue de 2.80 [m], con una discrepancia de 0.88 [m], lo que indica que el modelo se encuentra sobreestimando los

valores obtenidos en ambas ubicaciones del ramal controlado especialmente en la parte más interna del canal. Estos resultados indican que tanto el estrechamiento realizado en el canal para la interpretación del sistema de válvulas en los ramales controlados como los puntos escasos para recrear de una manera más detallada la forma del canal puede llegar a afectar la precisión del modelo cuando se simula el comportamiento de ramales intervenidos siendo el error más alto obtenido en el registro con variaciones que resultan ser más significativas en comparación con los rangos observados en los datos In-Situ. Esto podría deberse a la complejidad adicional introducida al querer representar efectos de la infraestructura, también puede encontrarse ligado a la poca representación morfológica del canal en la parte interna, creando situaciones que al modelo se le complica resolver con las ecuaciones internas, esto se puede dar por ejemplo, cuando algunos puntos del canal no son representados adecuadamente o son interpretados por el modelo como un punto seco o un escalón, arrojando valores poco cercanos al comportamiento real.

Se mencionó anteriormente en la metodología el cambio de referencia en el fondo del canal, siendo el ramal controlado al que se le modificó su nivel de referencia a MLWS con el valor de Z_0 , este cambio pudo influir de forma significativa a la precisión del modelo en cuanto a la morfología del canal, dado que las profundidades presentes en el ramal controlado son más someras en comparación a los puntos donde fueron ubicadas los BM's Figura 8, lo que pudo presentarse como un cambio no tan preciso en el fondo.

El modelo hidráulico utilizado en este estudio ha demostrado ser efectivo para replicar los rangos de marea en los canales urbanos, especialmente en los ramales libres, no siendo comparable con la variable de nivel de mareas debido a la incertidumbre del Z_0 en los canales más someros. Sin embargo, en los ramales controlados las diferencias observadas indican que podrían ser necesarios ajustes adicionales en el modelo para mejorar su precisión, esto puede encontrarse fuertemente ligado a la falta de una batimetría y topografía detallada en la parte más interna de los ramales, especialmente en el ramal controlado, por la estación del Parque Lineal, dado que este factor juega un papel importante para la definición de la morfología y geometría que presentan los canales que se quieren modelar. Es importante tener presente los puntos claves necesarios para ajustar el modelo hidrodinámico para obtener predicciones y simulaciones más precisas.

3.6 Consideraciones del presupuesto

A partir del análisis general realizado, se considera que, para mejorar la precisión y confiabilidad del modelo hidrodinámico, especialmente en los ramales controlados, es fundamental llevar a cabo un levantamiento detallado de la batimetría y topografía de las áreas críticas. Esto requerirá la asignación de recursos específicos para la recolección de datos adicionales y la implementación de ajustes en el modelo numérico.

El presupuesto necesario para estas actividades deberá contemplar la contratación de equipos de medición especializados, personal técnico capacitado, y posibles actualizaciones de software. Estos costos son esenciales para garantizar que el modelo hidrodinámico pueda ofrecer simulaciones más precisas.

3.6 Presupuesto

Tabla 7

Presupuesto

| Rubro | Detalles | Cantidad | Unidades | Valor unitario | Valor total |
|---|--|----------|----------|----------------|-------------|
| Materiales de oficinas | Papelería (papel, bolígrafos, carpetas) | 1 | Lote | \$50 | \$50 |
| | Cartucho de tinta | 3 | unidades | \$25 | \$75 |
| Materiales específicos para el Proyecto | Sensores de nivel de agua | 5 | unidades | \$700 | \$3,500 |
| | Sensores de presión | 1 | unidad | \$700 | \$700 |
| | Equipo GPS para georreferenciación | 1 | unidad | \$300 | \$300 |
| Estudios específicos para el Proyecto | Topografía | 8.484 | km | \$1,200 | \$10,181 |
| | Batimetría | 8.484 | Km | \$1,500 | \$12,726 |
| | Licencia de MATLAB | 1 | año | \$980 | \$980 |
| Software y Licencias | Licencia de telemac-2D | 1 | año | \$0 | \$0 |
| | Licencia de QGis | 1 | año | \$0 | \$0 |
| | Licencia Blue Kenue | 1 | año | \$0 | \$0 |
| | Desplazamiento terrestre para ubicación de sensores de nivel | 12 | viajes | \$15 | \$180 |
| Transporte | Desplazamiento marítimo para ubicación de sensores de nivel | 4 | viajes | \$30 | \$120 |
| | Ing. Oceanográfico | 2 | personas | \$1,200.00 | \$2,400 |
| Recursos humanos | Profesional hidráulico | 1 | personas | \$1,000.00 | \$1,000 |
| | Personal de soporte | 2 | personas | \$600.00 | \$1,200 |
| Gastos administrativos | Gastos de comunicación | 4 | Lote | \$1,500 | \$6,000 |
| SUBTOTAL | | | | | \$39,412 |
| Contingencia | Fondo para imprevistos (15% presupuesto total) | | | | \$591 |
| TOTAL, PRESUPUESTO | | | | | \$40,003 |

Nota. En la tabla se expresa el desglose del presupuesto para la implementación de este proyecto integrador

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

El trabajo desarrollado en la modelización hidrodinámica de un sistema de canales urbanos influenciados por marea e intervenidos por obras de control es de gran relevancia para la gestión hídrica urbana. Este estudio ayuda a proporcionar un análisis de cómo las mareas y las intervenciones humanas afectan el comportamiento hidrodinámico del sistema de los canales urbanos, lo que es crucial para la toma de decisiones informadas en la gestión del agua, la mitigación de inundaciones y la planificación urbana.

4.1 Conclusiones

- La hidrodinámica del flujo en los canales investigados está fuertemente influenciada por la morfología de estos y por la obra de control de mareas.
- Con base a los resultados obtenidos se demuestra que el modelo hidrodinámico cuando es aplicado en los ramales libres del estero Salado es efectivo para representar las condiciones observadas In-Situ manteniendo, tanto la forma de la onda como el rango de marea. Presenta mínimos errores donde se llega a subestimar de forma ligera los valores reales, manteniendo una precisión considerablemente buena.
- Por otro lado, en los ramales controlados se presentan discrepancias más significativas al comparar los datos In-Situ vs los datos modelados, concluyendo de esta forma que el desempeño de Telemac2D es inestable al simular el comportamiento del ramal controlado, el cual podría estar siendo afectado por la falta de información en los datos batimétricos obtenidos.
- Concluyendo que el modelo hidrodinámico empleado demuestra ser una herramienta útil y confiable para el análisis del comportamiento del sistema de canales urbanos del Estero Salado. Sin embargo, Telemac no es capaz de representar adecuadamente lo que sucede en el canal controlado. La reducción de la sección transversal aplicada no podría ser suficiente, siendo necesario trabajar en el modelo y en el levantamiento de datos.

4.2 Recomendaciones

- Levantamiento de batimetría y topografía detallada.

Una de las recomendaciones clave para mejorar la precisión de futuras simulaciones, es un levantamiento más detallado de batimetría y topografía en la zona

del estudio. La batimetría y la topografía deberían extenderse más allá de las áreas de interés identificadas, es decir no solo los ramales ni los canales, sino que es necesario incluir áreas aledañas que podrían afectar al sistema de manera significativa. Una batimetría y topografía más detallada proporcionarán una base de datos más precisa, lo que permitirá una mejor representación de la geometría del fondo del canal y las características del terreno en el modelo hidrodinámico. Esto es esencial para proporcionar resultados más precisos de flujos y niveles de agua en futuras simulaciones del sistema.

- Simular la hidrodinámica

Los resultados obtenidos están basados en el sistema de referencia MLWS, por lo que, se recomienda realizar la transformación del sistema de referencia vertical del MLWS al NMM debido a que el valor de Z_0 puede variar conforme se aproxime a niveles de cama más altos en los canales someros aumentando el margen de error.

- Simular el flujo a través de válvulas de control de inundaciones en Telemac 2D

Este proyecto integrador se centró en simular el comportamiento de los ramales más internos del Estero Salado, donde uno se encuentra intervenido por una obra de control de marea, donde para aproximarla en el modelo se realizó una reducción del canal. Sin embargo, se recomienda la modificación de la malla para conseguir que no solo se logre la reducción de la sección transversal y la cama de fona, sino también se consiga lograr el efecto de disipación de energía que presentan estas válvulas

Referencias

- Alavera, J. (2009). Instituto Oceanográfico Armada del Ecuador.
- Arandia Suárez, A. (2018). *Estimación de los cambios hidrológicos, sedimentológicos y morfológicos en ríos aluviales intervenidos por presas de gran altura*.
<http://hdl.handle.net/1992/34834>
- Cabrera Santos, M. (2017). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD Y DISEÑOS DEFINITIVOS DE LA ESTRUCTURA DE REGULACIÓN RAMAL A ESTERO SALADO*.
- Cadavid, J. H. (2020). *Hidráulica de canales: Fundamentos*. Universidad Eafit.
- Calderón, A. B. (2018, enero 15). *Megaproyectos hidráulicos: Consecuencias y conflictos* [Text]. iAgua; iAgua. <https://www.iagua.es/blogs/arturo-bravo-calderon/megaproyectos-hidraulicos-consecuencias-y-conflictos>
- CEPAL. (2015). *Indicadores priorizados para el seguimiento de los ODS en América Latina y el Caribe*. CEPAL - Naciones Unidas.
<https://agenda2030lac.org/estadisticas/indicadores-priorizados-seguimiento-ods.html#13>
- Dos Santos, A. (2015). *Estudio del fitobenton del Río Salado (Buenos Aires) en vinculación a obras hidráulicas realizadas en la cuenca* [Doctor en Ciencias Naturales, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/47892>
- El Universo. (2021). *Inauguran sistema de válvulas para mitigar el impacto de las lluvias en Urdesa y sectores aledaños | Comunidad | Guayaquil | El Universo*.
<https://www.eluniverso.com/guayaquil/comunidad/inauguran-sistema-de-valvulas-para-mitigar-el-impacto-de-las-lluvias-en-urdesa-y-sectores-aledanos-nota/>
- MASCARET. (2022). *User Manual TELEMAT-2D v8p4*.
<https://www.opentelemac.org/index.php/component/jdownloads/viewcategory/13-telemac-2d?Itemid=136>

- Matamoros, Wi. (2012, junio 6). *Puente en zigzag ya está listo*. El Universo. <https://www.eluniverso.com/2012/06/06/1/1445/puente-zigzag-ya-esta-listo.html>
- Menoscal, G. (2023). *El 'nocivo' cruce en el Salado para entrar y salir de Urdesa*. www.expreso.ec. <https://www.expreso.ec/guayaquil/nocivo-cruce-salado-entrar-salir-urdesa-161019.html>
- Munguía Balvaner, E., Blanco Piñón, A., & Alavez-Ramírez, J. (2016). Análisis hidrodinámico de rejas de canales mediante simulaciones numéricas bidimensionales. *Ingeniería y Ciencia*, 12(23), 73-92. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.23.4>
- Nassi-Mirengi, G. (2018). *DISEÑO Y MODELAMIENTO HIDRÁULICO DE LA BOCATOMA EL PUEBLO DEL DISTRITO DE CHÓCHOPE, PROVINCIA DE LAMBAYEQUE, DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE, UTILIZANDO EL MODELO NUMÉRICO TELEMAC – 2D*. a Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.
- Nolivos, I., Choudhur, A., & Monbaliu, J. (2004). *N 2d Hydrodynamic Modelling Of A Tidal Inlet Using Telemac. Case Study Of “De Ijzermunding*.
- NRC.Canada, N. R. C. (2019, marzo 19). *Blue Kenue™: Software tool for hydraulic modellers*. <https://nrc.canada.ca/en/research-development/products-services/software-applications/blue-kenuetm-software-tool-hydraulic-modellers>
- Ordóñez Tapia, M. F. (2020). *La forma de Guayaquil: Entre lo protegido y lo privado: caso de Vía a la Costa*. 1-12. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/329008>
- Ormaza, F., Castro, R., Maridueña-Bravo, A., Ramos-Castañeda, I., Statham, P. J., & Bobadilla Córdova, D. (2022). Hg, Cd, as, and Pb in Surface Sediments from the Polluted and Non-Polluted Zones of the Coastal Lagoon Estero Salado, Gulf of Guayaquil-Ecuador. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4265697>

- Ormaza-González, F. I., Campi-Alvarez, P. A., Cárdenas-Condoy, J. W., Caiza-Quinga, R. J., & Statham, P. J. (2024). Further evidence for increasing global near-shore eutrophication from the Estero Salado, Guayaquil, Ecuador. *Continental Shelf Research*, 278, 105271. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105271>
- Peruzzo, F., & Riccardi, G. (2018). *Implementación del modelo matemático Telemac-2D para el análisis de la evolución de la hidrodinámica en un tramo del río Paraná inferior*.
- Pizarro Mera, E. M., Sarmiento Tapia, J. E., & Ormaza González, F. (2022). *Eutrofización y Anoxia del cuerpo de agua Estero Salado, Guayaquil, Ecuador* [Thesis, ESPOL. FIMCM: Oceanografía]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/55923>
- Ríos, P. V., Torre, M. G. D. L., Montesinos, S. L., & Abad, A. R. (2021). Análisis de los factores incidentes de un remanso en la ría Guayas empleando mediciones de campo y su posible efecto en las inundaciones de la ciudad de Guayaquil. *Revista Acta Oceanográfica del Pacífico*, 3(2), Article 2. <https://doi.org/10.54140/raop.v3i1.39>
- Robins, P., & Davies, A. (2011). *Application of TELEMAC-2D and SISYPHE to complex estuarine regions to inform future management decisions*.
- Rodríguez, P. (2008). *Hidráulica II*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/59539423/hidraulica_ruiz20190605-53177-dlu0cu-libre.pdf?1559762863=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DHIDRAULICA_de_CANALES.pdf&Expires=1724864917&Signature=hLX31fqWrFzIdMu6Su-a916ox522bMGsjY7syGEECQQhyOE8d9oNK7UqcVD8k0hoExz7RLiyfEzbYh-BI3a1mVyua6xKuQQc61uCo92nczFvqS42Wpi~NQL5u~LdCfU0wR92IUovVyzN51Wj4o-oMebqP9PHO1ICWjdXH17D4rbP-DTAMRxRfREoR4XcAJZiL5qwlFWhzpT08b74yEQxD6~XRI2j46lk6IkeVfRk~UWHZsuc6H-

C3LtO3mScUSEQNA8N24htsXT1PWsoFG0TdQi522YQPjKbgmIkWCVPnDssVA
PHbm6i5ldmXyZaagEo3L6XQWmypfxMMo6eyiW9uQ__&Key-Pair-
Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Salvado, D. E. S. A. E. (2010, noviembre 15). Mansiones que perdieron su encanto por el estero Salado. *de Estero Salado a Estero Salvado*.
<https://esterosalado.blogspot.com/2010/11/mansiones-que-perdieron-su-encanto-por.html>

Schwindt, S. (2013). TELEMAC (Installation)—Hydro-Informatics. <https://hydro-informatics.com/get-started/install-telemac.html#bluekenue>

UNESCO. (2023, diciembre 1). 10 retos—Década Oceánica. *Década del Océano*.
<https://oceandecade.org/es/challenges/>

Wan Leussen, W. (2008). La gestión de las inundaciones en los países bajos: cómo se afrontan los riesgos. *Revista Catalana de Seguretat Pública*, 89-101.

ANEXOS

```
-----/
/ TELEMAC-2D : a software of the TELEMAC System /
/ System Environment
/ PRUEBA SERIE DE TIEMPO DE MATLAB
/ PRUEBA CON BOTTOM FRICTION AGREGADA EN EL MESH /
-----/
GEOMETRY FILE = 'valvulasabiertas.slf'
BOUNDARY CONDITIONS FILE = 'valvulasabiertas.cli'
CHECKING THE MESH=YES
-----/
/ BOUNDARY CONDITIONS
-----/
PRESCRIBED ELEVATIONS = 3
LIQUID BOUNDARIES FILE = 'liqjunioseistreintauno.liq'
ORIGINAL DATE OF TIME = 2024;06;16;00;00;00
-----/
/ NUMERICAL PARAMETERS
-----/
NUMBER OF TIME STEPS = 432000
TIME STEP = 1
INITIAL CONDITIONS = 'CONSTANT ELEVATION'
INITIAL ELEVATION = 1.674855957
TREATMENT OF NEGATIVE DEPTHS = 0
SOLVER OPTION= 3
SOLVER ACCURACY = 1.E-6
-----/
/ PHYSICAL PARAMETERS
-----/
LAW OF BOTTOM FRICTION = 4
FRICTION COEFFICIENT = 0.028
```

/-----/

/ OUTPUT

/-----/

NUMBER OF FIRST TIME STEP FOR GRAPHIC PRINTOUTS=300

GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 300

RESULTS FILE = 'PRUEBA_MLWS_VALVULASABIERTAS_mlws16.slf'

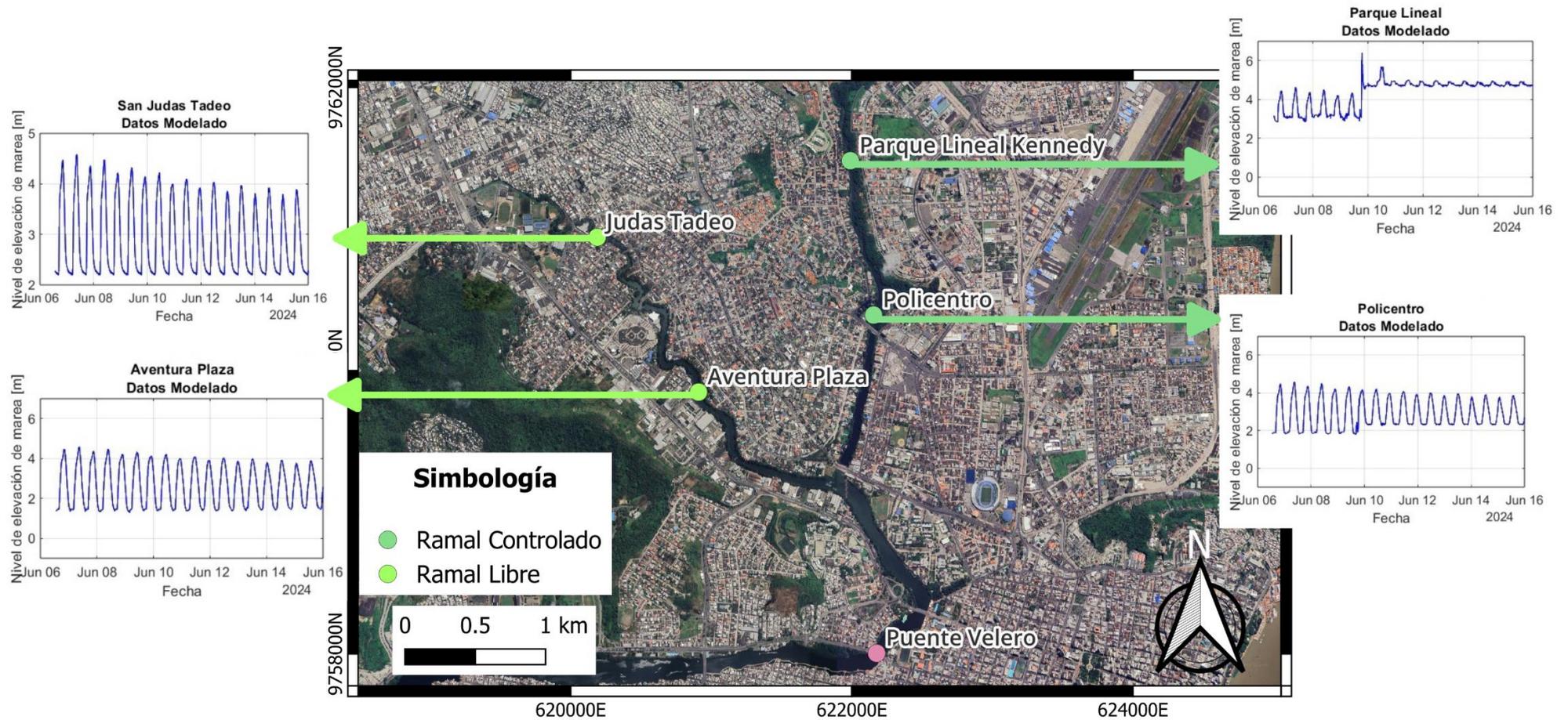
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS = 'S,B'

/-----/

/ OTHER PARAMETERS

/-----/

Anexo 1. Producto obtenido de la simulación del modelo



Nota. El anexo muestra el resultado obtenido en cada estación donde se colocó un sensor de nivel. De esta forma es mas sencillo apreciar las variaciones en el comportamiento de cada ramal