

**SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE LOS CUERPOS DE AGUA  
COMPREDIDOS ENTRE LA LAGUNA DEL CABRERO Y LAS  
COMPUERTAS DE CHAMBACÚ DE LA CIUDAD DE CARTAGENA -  
COLOMBIA**



**Universidad de  
Cartagena**

Fundada en 1827



**Programa de  
Ingeniería Civil**

Fundado en 1949

**ALDAIR ALVAREZ VASQUEZ**

**RAFAEL ALONSO OLIVELLA BELTRAN**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

**2018**

**SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE LOS CUERPOS DE AGUA COMPRENDIDOS  
ENTRE LA LAGUNA DEL CABRERO Y LAS COMPUERTAS DE CHAMBACÚ DE LA  
CIUDAD DE CARTAGENA – COLOMBIA**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:**

GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE HIDRÁULICA Y MANEJO COSTERO (GIHMAC)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

MANEJO HIDRÁULICO Y AMBIENTAL DE LA ZONA COSTERA Y FLUVIAL

**AUTORES:**

ALDAIR ALVAREZ VASQUEZ

RAFAEL ALONSO OLIVELLA BELTRAN

**DIRECTOR (A):**

Ing. ALFONSO ARRIETA PASTRANA

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.**

**2018**



## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

*"La perseverancia es el trabajo duro que haces, después del trabajo duro que ya hiciste" –*

*Newt Gingrich*

Este trabajo está dedicado a nuestras familias quienes nos acompañaron en este largo proceso de manera muy comprometida y nos apoyaron incondicionalmente depositando toda su confianza en nosotros. Fueron muchos los obstáculos que se presentaron en el camino, pero de la mano de Dios todos se fueron superando y, aunque los retos fueron grandes, siempre fueron más grandes las ganas de conseguir este sueño tan anhelado.

En primer lugar, le damos gracias a Dios por habernos iluminado en el camino durante toda la carrera, dándonos la fortaleza y la inteligencia necesaria para culminar esta fase de nuestras vidas. En segundo lugar, le damos gracias a nuestros familiares por inculcar el deseo de prosperar y estar en busca de un futuro mejor para nosotros y para ellos, ya que es gracias a esto que pudimos avanzar y estar donde hoy nos encontramos. En tercer lugar, le agradecemos al Ingeniero Alfonso Arrieta Pastrana, nuestro director de tesis, que nos acompañó durante este proceso ganándose toda nuestra admiración y respeto, por todos sus buenos consejos y la motivación que nos brindó para seguir adelante. Por último, les agradecemos a todos aquellos amigos y colegas que siempre estuvieron allí para nosotros y quienes de alguna manera han hecho parte de nuestro crecimiento y preparación como personas e ingenieros.



## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	9
1. MARCO REFERENCIAL.....	12
1.1. Antecedentes .....	12
1.2. Estado del arte .....	15
1.3. MARCO TEÓRICO .....	17
1.3.1. Estuarios .....	17
1.3.2. Mareas.....	19
1.3.3. Fuerzas astronómicas de producción de mareas.....	21
1.3.3.1. Mareas lunares.....	21
1.3.3.2. Mareas solares.....	22
1.3.4. Fases lunares.....	23
1.3.4.1. Mareas vivas y mareas muertas. ....	23
1.3.5. Tipos de mareas.....	24
1.3.6. Descripción de Modelos .....	26
1.3.7. Modelación hidráulica .....	28
1.3.8. Planteamiento del modelo de simulación hidráulico de estuarios .....	29
1.3.9. MIKE HYDRO RIVER.....	33
1.3.10. Coeficiente de correlación y de determinación.....	34
2. OBJETIVOS .....	35
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	35
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	35
3. ALCANCE .....	36
4. METODOLOGÍA.....	39
4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA .....	40
4.2. EVALUACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	42
4.2.1. Calibración del Modelo MHE UdeC .....	43
4.2.2. Validación del modelo MHE UdeC .....	45
4.3. SOFTWARE MIKE HYDRO .....	45
4.3.1. Modelación Hidrodinámica.....	45
4.3.1.1. Creación de la Malla inicial .....	45



4.3.1.2. Creación de la Malla final.....	51
4.3.2. Preparación del modelo para la simulación .....	54
4.3.3. Simulación hidrodinámica del modelo.....	61
5. RESULTADOS Y DISCUSION.....	63
5.1. MHE UdeC.....	63
5.2. MIKE HYDRO.....	66
5.3. CONTRASTE DE RESULTADOS .....	69
6. CONCLUSIONES.....	72
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquemas de las zonas de un estuario.....	18
<b>Figura 2.</b> Factores involucrados en los procesos de los niveles de los cuerpos de agua. ....	19
<b>Figura 3.</b> Mareas lunares y solares.....	23
<b>Figura 4.</b> Posición del sol, la luna y la tierra en relación a sus mareas.....	24
<b>Figura 5.</b> Distribución de las fases de las mareas. ....	26
<b>Figura 6.</b> Proceso de modelos numéricos. ....	27
<b>Figura 7.</b> Restricciones Modelos numéricos.....	28
<b>Figura 8.</b> Parámetros Modelos hidráulicos. ....	29
<b>Figura 9.</b> Corte transversal esquemático del flujo a través de una compuerta.....	29
<b>Figura 10.</b> Representación esquemática en planta del sistema estuario. ....	30
<b>Figura 11.</b> Diagrama de flujo para el proceso de simulación hidráulica del sistema. ....	32
<b>Figura 12.</b> Localización zona de estudio. ....	36
<b>Figura 13.</b> Esquema de la metodología del proyecto de investigación.....	40
<b>Figura 14.</b> Series de niveles para la Laguna del Cabrero.....	41
<b>Figura 15.</b> Series de niveles para las Compuertas de Chambacú.....	41
<b>Figura 16.</b> Canal de entrada y canal de salida del sistema, respectivamente.....	43
<b>Figura 17.</b> Variaciones en los niveles en la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú. .....	44
<b>Figura 18.</b> Herramienta para generar mallas en el MIKE ZERO. ....	46
<b>Figura 19.</b> Definición del área de trabajo. ....	46
<b>Figura 20.</b> Importación de los datos de dispersión. ....	47
<b>Figura 21.</b> Límite entre el cuerpo de agua y el terreno. ....	48
<b>Figura 22.</b> Propiedades del arco limite. ....	48
<b>Figura 23.</b> Opciones de triangulación.....	49
<b>Figura 24.</b> Triangulación de la malla. ....	50
<b>Figura 25.</b> Interpolación de la batimetría para todo el dominio.....	51
<b>Figura 26.</b> La malla tal como aparece en el generador de malla después de interpolar los datos de la profundidad del agua en la malla. ....	52
<b>Figura 27.</b> Editor de mallas.....	53
<b>Figura 28.</b> Malla en forma de cuadrícula. ....	54
<b>Figura 29.</b> Creación de un nuevo documento MIKE HYDRO.....	54
<b>Figura 30.</b> Tipo de modelo del documento. ....	55
<b>Figura 31.</b> Sistema de coordenadas utilizado.....	55
<b>Figura 32.</b> Modelo digital de elevación. ....	56
<b>Figura 33.</b> Batimetría ingresada al software. ....	56
<b>Figura 34.</b> Ramal definido para la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú. ....	56
<b>Figura 35.</b> Secciones transversales trazadas. ....	57
<b>Figura 36.</b> Condición de contorno en Chambacú. ....	57
<b>Figura 37.</b> Condiciones de contorno en el ramal. ....	58
<b>Figura 38.</b> Serie de tiempo para la Laguna del Cabrero. ....	58



<b>Figura 39.</b> Condiciones iniciales para la simulación. ....	59
<b>Figura 40.</b> Parámetros de control computacional del MIKE HYDRO. ....	59
<b>Figura 41.</b> Periodo de simulación. ....	62
<b>Figura 42.</b> Paso de tiempo establecido.....	62
<b>Figura 43.</b> Síntesis de resultados de la calibración de los coeficientes de descarga de las compuertas. ....	64
<b>Figura 44.</b> Simulación hidráulica. ....	65
<b>Figura 45.</b> Simulación Hidráulica del Cuerpo de Agua, con la curva suavizada. ....	66
<b>Figura 46.</b> Niveles obtenidos en la validación vs niveles medidos en campo para las Compuertas de Chambacú en el MIKE.....	67
<b>Figura 47.</b> Niveles obtenidos en la validación vs niveles medidos en campo para la Laguna del Cabrero en el MIKE.....	68
<b>Figura 48.</b> Comparación entre los niveles obtenidos por el MHE UdeC y el MIKE HYDRO. ..	69
<b>Figura 49.</b> Comparación entre los niveles medidos en campo, el MHE UdeC y el MIKE HYDRO. ....	70
<b>Figura 50.</b> Comparación entre los niveles medidos en campo, el MHE UdeC y el MIKE HYDRO (Zoom). ....	71



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tipos de Marea.	24
<b>Tabla 2.</b> Características de la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú.	42
<b>Tabla 3.</b> Parámetros computacionales involucrados.	59
<b>Tabla 4.</b> Parámetros de entrada al modelo hidráulico del cuerpo de agua.	63
<b>Tabla 5.</b> Coeficiente de correlación y de determinación entre los datos simulados y medidos.	68





## RESUMEN

En el presente trabajo de grado se implementó un modelo matemático propuesto por el Ingeniero Alfonso Pastrana Arrieta que permite realizar simulaciones de los comportamientos de la marea en el tiempo. Se planteó un modelo simplificado de tipo hidráulico que tiene por nombre Modelo Hidráulico de Estuarios Universidad de Cartagena (MHE UdeC) basado en los niveles de entrada e internos de la Laguna del Cabrero, cuyo único parámetro de calibración es el coeficiente de descarga de las Compuertas de Chambacú. Para esto, se calibró el modelo a partir de datos de niveles medidos en campo en un estudio realizado por la Universidad de Cartagena, luego se validó el modelo y se compararon los resultados obtenidos con los medidos en campo y, adicional a esto, se utilizó el software MIKE HIDRO RIVER, el cual también se calibró y validó a partir de los niveles medidos en campo, para simular el mismo periodo y compararlo con los resultados que se obtuvieron con el MHE UdeC.

Se obtuvieron resultados confiables al realizar la simulación, que al ser comparados con los datos medidos en campo y el MIKE HIDRO RIVER, se analizaron comportamientos muy similares obteniendo coeficientes de correlación entre la simulación realizada por el MHE UdeC y la simulación realizada por el MIKE HIDRO RIVER del orden de 0.989 al comparar los resultados obtenidos con los niveles obtenidos para las Compuertas de Chambacú y de 0.86 al comparar con la Laguna del Cabrero, lo que indica un alto grado de relación entre los datos. Por lo tanto, podemos afirmar que el modelo planteado MHE UdeC, es una herramienta válida y puede ser empleado para realizar simulaciones de los niveles de marea en los cuerpos de agua de la ciudad de Cartagena.



## ABSTRACT

In the present work of degree is implemented a mathematical model proposed by the Engineer Alfonso Pastrana Arrieta that allows to realize simulations of the behaviors of the tide. A simplified model of hydraulic type was proposed that has the name of Hydraulic Model of Estuaries University of Cartagena (MHE UdeC) based on the entrance and internal levels of the “Laguna del Cabrero”, whose only parameter of calibration is the discharge coefficient of the Chambacú Sluices. For this, the model was calibrated using the tide levels measured in the field in a study carried out by the University of Cartagena, then the model was validated and compared the results obtained with the measured levels in the field and, in addition, the software MIKE HIDRO RIVER was used, which was also calibrated and validated from the measured levels in the field, to simulate the same period and compare with the results obtained with the MHE UdeC.

Reliable results were obtained when performing the simulation, when compared with the data measured in the field and the MIKE HIDRO RIVER, similar results were analyzed obtaining correlation coefficients between the simulation performed by the MHE UdeC and the simulation performed by the MIKE HIDRO RIVER on the order of 0.989 when comparing the results obtained with the levels obtained for the “Compuertas de Chambacú” and 0.86 when comparing with the “Laguna del Cabrero”, indicating a high degree of relationship between the data. Therefore, we can state that the proposed MHE UdeC model is a valid tool and can be used to perform simulations of tidal levels in the water bodies of the city of Cartagena.



## INTRODUCCIÓN

La ciudad de Cartagena se encuentra rodeada por grandes extensiones de cuerpos de agua, al igual que dentro de su extensión territorial cuenta con numerosos caños y lagunas, haciendo referencia específicamente a la zona de estudio comprendida desde la Laguna del Cabrero hasta las compuertas de Chambacú ubicados entre las coordenadas  $10^{\circ}26'01.1''N$   $75^{\circ}32'12.5''W$  y  $10^{\circ}25'42.6''N$   $75^{\circ}32'37.7''W$ . Es de sumo interés estimar la variación en los niveles de marea, los cuales son afectados por diferentes factores, entre los cuales se encuentran: la marea, el viento, la escorrentía superficial y/o restricciones físicas, como insumos necesarios en la planificación de la ciudad. Tener un conocimiento acerca del comportamiento de los niveles de un cuerpo de agua puede ayudar a prevenir problemas en el futuro, pero lo más importante es identificar cuáles son las causas de estas variaciones de los niveles y el comportamiento hidráulico del cuerpo de agua.

En la actualidad el uso de modelos de simulación para proyectar el comportamiento de los cuerpos de agua es de mucha utilidad. Puesto que los modelos de simulación hidráulica buscan estimar el comportamiento del agua con base a los parámetros característicos de la zona de estudio, los cuales deben ser calibrados para lograr resultados similares en comparación al comportamiento medido de niveles, velocidades o caudales (Betancur, 2013). Por lo tanto, se planteó un modelo de simulación hidráulica que recibe el nombre de “Modelo Hidráulico de Estuarios Universidad de Cartagena (MHE UdeC) propuesto por el Ingeniero Alfonso Arrieta Pastrana, docente de la Universidad de Cartagena.

En cuanto a los estudios realizados a nivel nacional se ha demostrado que es posible la obtención de resultados muy cercanos a la realidad aplicando estos modelos de simulación hidráulica. En la ciudad de Santa Marta, se determinaron las condiciones hidrodinámicas del Área Costera mediante el uso de un modelo hidrodinámico 3D. El modelo RMA10 fue previamente calibrado y validado para la época seca y de lluvias (García, Palacio, & García, 2012).

Para la Universidad de Cartagena también resulta ser un tema de gran importancia y por ello se han desarrollado estudios relacionados con la variación de los niveles y la aplicación de modelos de simulación hidráulica para de esta manera poder realizar proyecciones de estos niveles. Para el año 1992, se realizó un estudio apoyándose en el modelo de simulación llamado HIDROMUL (Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental (1992), citado por Cañate & Guzmán (2016),



en el cual se tomaron las medidas de los niveles de agua para los lagos y caños de la ciudad de Cartagena, cabe resaltar que en este estudio no se obtuvo información muy precisa debido a que en el año en que fue realizada no contaban con las herramientas adecuadas para estudiar el comportamiento hidráulico de los cuerpos de agua, sin embargo, sirvió de iniciativa y base para futuras investigaciones.

Cañate & Guzmán (2016), realizaron un estudio el cual tuvo como objetivo determinar los puntos y niveles de inundación en el sistema de caños y lagos de la ciudad de Cartagena proyectados para el año 2040 y contrastándolos con el software MIKE HYDRO RIVER en el cual se obtuvieron láminas de agua para la simulación más desfavorable de hasta 1.2 m (para el caño Juan Angola) por encima del borde, afectando gravemente los asentamientos donde se ubica una de las poblaciones más vulnerables de la ciudad, que en su mayoría son invasiones ilegales.

El presente estudio se realizó con la finalidad de evaluar el comportamiento hidráulico del cuerpo de agua comprendido entre la Laguna del Cabrero y las compuertas de Chambacú de la ciudad de Cartagena, aplicando el Modelo Hidráulico de Estuarios Universidad de Cartagena (MHE UdeC) propuesto por el profesor Alfonso Arrieta Pastrana, con el fin de proporcionar un modelo confiable con el que se puedan realizar proyecciones de los niveles de los cuerpos de agua.

Este objetivo se planteó partiendo de los siguientes cuestionamientos ¿Es posible establecer factores de influencia sobre los niveles de los cuerpos de agua basados en el modelo de simulación hidráulica MHE UdeC propuesto por el profesor Alfonso Arrieta?, ¿Qué tantas variaciones tienen los datos arrojados por el modelo propuesto en comparación con datos medidos en campo y el software MIKE HYDRO RIVER?

Estos estudios son de suma importancia debido a que fueron realizados directamente sobre cuerpos de agua a nivel de la ciudad y de esta manera la Universidad de Cartagena se puede convertir en un ente confiable a la hora de brindar información sobre estos estudios, realizando un aporte significativo a la Ciudad relacionados con los niveles de los cuerpos de agua. De igual forma, los resultados que se obtengan servirán de base para estudios futuros relacionados con el comportamiento del nivel de agua. La aplicación del modelo propuesto puede llegar a facilitar los resultados que se deseen obtener y les permitirá seguir liderando actividades de investigación



relacionadas con su área de influencia y que pueden apoyar procesos para la toma de decisiones con miras a la planificación y ordenamiento de los cuerpos de aguas pertenecientes a la Ciudad.

Para llevar a cabo este estudio se tomaron datos sobre los niveles de los cuerpos de agua que fueron objeto de esta investigación, lo cuales fueron medidos durante el año 2016 y se utilizaron para calibrar el modelo. Una vez calibrado el MHE UdeC, para la validación del modelo, se efectuó una simulación de un periodo de tiempo de seis días, a partir del 11 de septiembre del 2016 hasta el 16 del mismo mes, esto se hizo tanto en el modelo propuesto como en el software MIKE HYDRO RIVER del cual se obtuvo una licencia académica con duración de un año otorgada por el Danish Hydraulic Institute (DHI), se contrastaron los resultados obtenidos en ambos modelos y los datos de las mediciones utilizados. De esta forma, se identificó que el modelo MHE UdeC es funcional.

Con esto se formuló una herramienta de mucha utilidad que incrementa de manera significativa las competencias de los estudiantes y permite que la Universidad de Cartagena se mantenga explorando en nuevos campos de aplicación, pues no se contaba con un modelo propio de simulación. Además, los resultados que se obtengan junto con los obtenidos en el estudio anterior sirven como referencia o apoyo a futuras investigaciones sobre el comportamiento hidráulico de los cuerpos de agua de la ciudad de Cartagena.



## 1. MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se hace una descripción de los principales fundamentos teóricos que enmarcan este proyecto de investigación, teniendo en cuenta la importancia de una adecuada interpretación de los fundamentos de los modelos de simulación hidráulica en cuerpos de agua realizados con anterioridad, y sobre las metodologías hasta ahora desarrolladas para la selección de estos modelos.

### 1.1. Antecedentes

Los estudios realizados para conocer el comportamiento hidráulico en cuerpos de agua para el control de inundaciones no son un tema de ahora, con el pasar de los años se ha venido estudiando y trabajando en este tema no solo en Colombia sino en todo el mundo. Un elemento que se analiza frecuentemente para aproximarse al comportamiento de un cuerpo de agua son los niveles del fondo obtenidos mediante estudios batimétricos. Existen diferentes métodos para analizar el comportamiento hidráulico en cuerpos de agua basados en ecuaciones diferenciales, las cuales pueden ser mediante elementos finitos, determinísticos, entre otros.

En Valencia, se presentó la experiencia de uso de un modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS) y uno bidimensional (FESWMS) en las llanuras de inundación, aplicación al caso del río Tajo en Talavera de la Reina (Martín, López, Moreta, Simarro, & Ferrández, 2003). En el cual se revisaron los fundamentos y se analizaron las aplicaciones de estos modelos, extrayendo las enseñanzas prácticas de sus virtudes e inconvenientes. El uso del modelo HEC-RAS unidimensional y FESWMS-2DH bidimensional para estudiar la inundabilidad de Talavera de la Reina llevó a concluir en el respectivo estudio: que el HEC-RAS es un modelo preciso porque puede incorporar fácilmente mucha información geométrica. Teniendo en cuenta que, para el caso de este estudio, esto es una ventaja sustancial, más importante que el inconveniente que supone despreciar los efectos bidimensionales. También que HEC-RAS requiere criterio e ingenio en aspectos importantes como la definición de la condición de contorno aguas abajo, el cálculo del flujo en dos brazos y los azudes. Cabe resaltar que fue fundamental introducir la rugosidad del cauce a partir de su granulometría y la de la vegetación a partir de observaciones de campo. En



términos generales, Talavera de la Reina presentó alto riesgo de inundación en las áreas de expansión más modernas, no así en el casco antiguo.

En otro estudio realizado por García, Palacio, & García (2012), se determinaron las condiciones hidrodinámicas del Área Costera de Santa Marta, mediante el uso de un modelo hidrodinámico 3D. El modelo RMA10 fue previamente calibrado y validado para dos periodos diferentes del año (Época seca y de lluvias). Se encontró un buen grado de acercamiento entre las mediciones y las simulaciones. Para el año 2001 el modelo predijo las condiciones de magnitud y velocidad de corriente a 40 metros de profundidad en la columna de agua, encontrando corrientes máximas de 12 cm/s. Las distribuciones de las magnitudes de corrientes mostraron una ocurrencia del 30% para el rango entre 2 y 4 cm/s, al igual que entre 4 y 6 cm/s, el eje principal de corriente fue 62-242 grados.

La Universidad de Cartagena en el año 1992 realizó un estudio apoyándose en el modelo de simulación llamado HIDROMUL, donde se tomaron las medidas de los niveles de agua para los lagos y caños de la ciudad de Cartagena y de esta manera establecer cuál es el comportamiento hidráulico, y en este concluyeron que la marea durante el ciclo del Pleamar no alcanzó niveles más pronunciados para penetrar por los caños hasta Ciénaga de la Virgen ni desde la boca de la Boquilla (Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental (1992), citado por Cañate & Guzmán (2016)). Se resalta que esta investigación no ofrece información muy precisa debido a que en el año en que fue realizada no contaban con las herramientas adecuadas para estudiar el comportamiento hidráulico de los cuerpos de agua.

Cabe mencionar que en la ciudad de Cartagena de Indias, Colciencias financió un proyecto que consistió en la validación de una nueva metodología de simulación hidrodinámica de estuarios y bahías en la Ciénaga de la Virgen, del cual se obtuvo que en el sistema lagunar se evidencian mayores volúmenes de salida que de entrada, que la velocidad máxima en la Bocana está a alrededor de 1 m/s, que el Volumen de agua que sale por las Compuertas de Chambacú, representa entre el 2 y 4% del volumen que sale por la Bocana de Marea Estabilizada (Arrieta, Rejtman, & Escorcía, 2003).



En el año 2010, se realizó un estudio para la implementación de un modelo hidrodinámico, bidimensional para la Bahía de Cartagena (Colombia) y su calibración mediante series de tiempo de marea. Los resultados del modelo hidrodinámico fueron comparados con mediciones de mareas. La comparación mostró un buen acercamiento entre los datos, particularmente mejor en marea alta frente a la marea baja. Igualmente, se mostró un procedimiento para asegurar una adecuada resolución y calidad de la malla (Palacio, García, & García, 2010).

En el 2015 la Universidad de Cartagena en convenio con el EPA realizó un estudio completo del monitoreo de la calidad del agua, donde los resultados no fueron los más favorables debido a que la contaminación de estos cuerpos de agua va en aumento por diferentes factores antrópicos y climáticos: los vertimientos, influencia humana y el calentamiento global que perjudica al planeta (aumento del nivel del mar). Entre las variables determinadas en este estudio, se encuentran las características hidráulicas del sistema de caños y lagos, cuyas mediciones del nivel de agua fueron realizadas mediante la instalación de reglas (miras), por tanto, el grado de incertidumbre fué bastante elevado (Universidad de Cartagena, EPA, 2015).





## **1.2.Estado del arte**

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, a continuación se muestran estudios a nivel internacional con aspectos particulares sobre simulación hidráulica y también comparación entre los modelos propuestos en sus respectivos estudios. Del mismo modo, se realiza una consulta de estudios a nivel local sobre la relación del nivel de marea, en donde el objetivo fue monitorear constantemente los niveles de marea en la respectiva zona de estudio para el adecuado control de inundaciones y verificar la efectividad de los mismos.

Dentro de investigaciones similares que se han desarrollado en el exterior se puede mencionar un estudio realizado en Cataluña, que consistió en modelación de inundaciones que lleva por título “Modelización numérica de inundaciones” en la cual se concluyó que la modelización numérica del flujo en cuerpos de agua es una herramienta fundamental para la evaluación del riesgo de inundación tal como lo requiere la normativa vigente, la cual entiende como riesgo la combinación de la peligrosidad pero necesariamente también de sus consecuencias. La combinación de los resultados de los modelos hidrodinámicos con datos georreferenciados de usos del suelo, valores del mismo y de los bienes u actividades, junto con la consideración de la exposición y la vulnerabilidad conducen a la obtención de mapas de riesgo (Bladé, Cea, & Corestein, 2014).

Para 2014, en Bogotá se lleva a cabo una investigación a cerca de la aplicación de un modelo de simulación hidráulica para la emisión de pronósticos hidrológicos de inundaciones en tiempo real, en la cuenca media del río Bogotá - sector Alicachin, permitiendo determinar cada una de las etapas que ha originado la presencia de una onda de caudal en un canal natural, así como la respuesta del cauce del río ante tan magnitud de volumen de agua en la parte media sector Alicachin. El modelo se basa en ecuaciones diferenciales determinísticas, que al ser solucionadas en la estructura del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS, permiten pronosticar la dinámica de los niveles de agua en los eventos hidrometeorológicos extremos de inundación, definiendo las cotas de inundación a través de perfiles transversales, simulando de manera aproximada el comportamiento de la dinámica del recurso hídrico y del cauce con características de: Secciones mojadas variables con cualquier geometría a lo largo del cauce, diferentes tipos de rugosidad para ciertas partes del



perfil mojado, distintas profundidades del agua y con caudal variable a lo largo del cauce en condiciones de régimen de flujo sub-crítico o súper-crítico con efectos hidráulicos debido a obstáculos transversales naturales o artificiales en el cauce (Torres & Gonzalez, 2011).

Dentro de la modelación hidráulica es importante identificar las ventajas y limitaciones de un modelo matemático. Por ello, se realizó un estudio sobre la Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS (Santos, Cubillos, & Vargas, 2008), en el cual el objetivo principal fue el de reportar los resultados de un ejercicio de aplicación realizado para establecer la eficacia del modelo unidimensional HEC-RAS en la simulación del comportamiento hidráulico de un cauce que presenta bifurcaciones y derivaciones de gran caudal, como es el caso del río Magdalena en proximidades al Canal del Dique. Con base en mediciones de campo realizadas en junio de 2005 (aforos y barimetrías) y registros hidrométricos de caudal y nivel en dos estaciones (Calamar en el río Magdalena e INCORA K7 en el Canal del Dique), se realizó la calibración del modelo; se desarrolló un proceso de validación simulando un hidrograma de entrada correspondiente al período comprendido entre el 1 de junio de 2004 y el 1 de noviembre de 2005, y comparando los resultados con el hidrograma de caudal registrado en la estación INCORA K7, situada a aproximadamente 7 kilómetros de la embocadura del Canal del Dique. Los resultados obtenidos evidencian la efectividad del modelo y su alta capacidad predictiva para tales condiciones.

Para el año 2016, ingenieras de la Universidad de Cartagena realizaron un estudio llamado “PROYECCIÓN DE LOS NIVELES DE INUNDACION ACTUAL Y FUTURA EN EL SISTEMA DE CAÑOS Y LAGOS DE LA CIUDAD DE CARTAGENA”. Este trabajo tuvo como objetivo determinar los puntos y niveles de inundación en el sistema de caños y lagos de la ciudad de Cartagena proyectados para el año 2040 con la finalidad de sugerir estrategias claves para la mitigación de los impactos en la urbe; realizando un análisis del comportamiento de niveles de los cuerpos de agua obtenidos a través de nueve puntos de monitoreo ubicados estratégicamente en cada cuerpo y en las entradas de agua al sistema, cuya función era registrar las variaciones de nivel durante dos meses continuos con una frecuencia de cinco minutos desde el mes de agosto hasta octubre de 2016. Luego, esta información fue ingresada en el modelo matemático desarrollado a



través del software MIKE HYDRO RIVER. Se obtuvieron láminas de agua para la simulación más desfavorable de hasta 1.2 m (para el caño Juan Angola) por encima del borde, afectando gravemente los asentamientos donde se ubica una de las poblaciones más vulnerables de la ciudad, que en su mayoría son invasiones ilegales (Cañate & Guzmán, 2016).

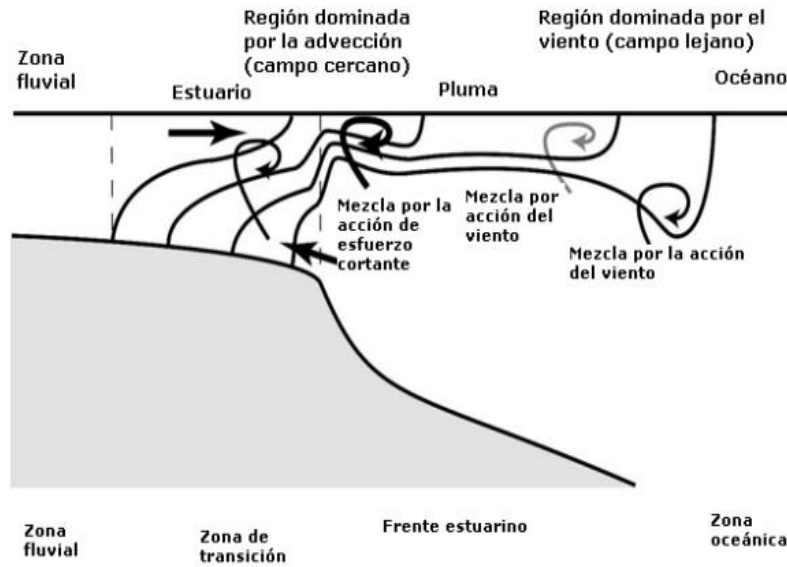
### **1.3.MARCO TEÓRICO**

En este subcapítulo se realiza la descripción sobre conceptos, aspectos matemáticos, consideraciones principales y herramientas de modelación para una adecuada caracterización de la zona de estudio en el presente proyecto de investigación.

A continuación, se presentan los resultados de una revisión general sobre conceptos, aspectos matemáticos, consideraciones principales y herramientas de modelación para una adecuada caracterización de la zona de estudio en el presente proyecto de investigación. Por lo que para el desarrollo de estos temas es completamente amplio, en este marco teórico se resumen los aspectos fundamentales acerca procesos hidráulicos en un cuerpo de agua.

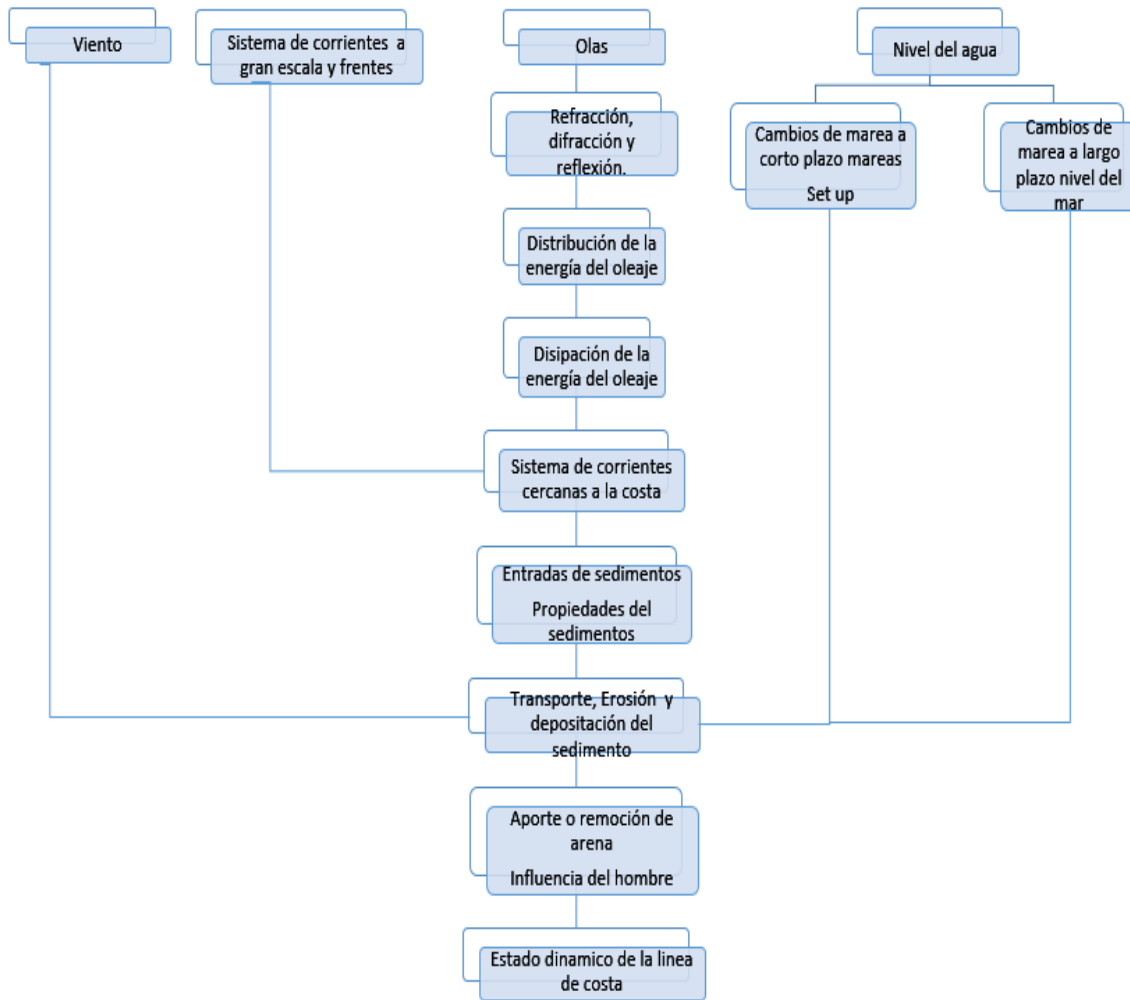
#### **1.3.1. Estuarios**

Los estuarios son zonas de transición entre el medio fluvial y el marino, donde el flujo de agua dulce se mezcla con el flujo de agua salada. Se producen gradientes espacio-temporales, a diferentes escalas, de la mezcla de agua dulce y salada. Se diferencian de un río por sus intercambios de agua, sedimentos, nutrientes y energía con la atmósfera y el océano, que determinan la dinámica y los procesos del estuario, y el desarrollo de una compleja y rica diversidad biológica (Serrano, 2013). A continuación, en la **Figura 1** se muestra un esquema de las zonas de un estuario. Sin embargo, cabe resalta que los procesos físicos que afectan y reforman la geometría de la zona costera, los cuales se ilustran esquemáticamente en la **Figura 2** (Mosso & Octavio, 2004).



**Figura 1.** Esquemas de las zonas de un estuario.

*Fuente: Montoya (2010).*



**Figura 2.** Factores involucrados en los procesos de los niveles de los cuerpos de agua.

**Fuente:** Mosso & Octavio (2004). Modificado por autores.

### 1.3.2. Mareas

Las mareas son ascensos y descensos periódicos de todas las aguas oceánicas, incluyendo las del mar abierto, los golfos y las bahías, resultado de la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol sobre el agua y la propia Tierra. Otros fenómenos ocasionales, como los vientos, las lluvias, el desborde de ríos y los tsunamis provocan también variaciones del nivel del agua, pero no pueden ser calificados como mareas. Para poder explicar de manera simplificada el fenómeno de la marea se considerará que la Tierra es una esfera sin continentes rodeada por una hidrosfera y que gira



alrededor del Sol en una trayectoria elíptica sin girar sobre su eje. Igualmente vamos a basar nuestras explicaciones en el caso solar, siendo análogo para el caso de la Luna (Serrano, 2013).

Cuando un astro está en órbita alrededor de otro, la fuerza de atracción gravitacional entre los dos viene dada por la ley de gravitación de Newton:

$$F_g = G \frac{M_1 M_2}{d^2} \quad (1)$$

Siendo G la constante de gravitación universal, M1 y M2 las masas de los dos cuerpos y d la distancia entre los centros de masas de los astros.

Esta fuerza de atracción es la fuerza centrípeta que hace que el astro describa una circunferencia.

$$F_c = M_2 \omega^2 R_1 = F_g = G \frac{M_1 M_2}{d^2} \quad (2)$$

Donde M2 es la masa del astro,  $\omega = 2\pi/T$  la velocidad angular del astro y T su período orbital; y R1 es la distancia entre el centro de masas del astro y el centro de rotación, que coincide con el centro de masas de los dos astros. Si el otro astro es mucho más masivo ( $M_1 \ll M_2$ ) el centro de rotación está muy cerca del centro de masas del astro masivo y  $R_1 \approx d$ . Es el caso que ocurre con la Tierra y el Sol (Serrano, 2013).

El valor de la aceleración de gravedad debida al Sol es exactamente el que corresponde a una órbita con la velocidad angular  $\omega$  y con el centro de masas terrestre a una distancia d del Sol. Todas las partes de la Tierra tienen la misma velocidad angular alrededor del Sol, pero no están a la misma distancia. Las que están más lejos que el centro de masas sentirá una aceleración de gravedad menor y la que están a una distancia inferior sentirán una aceleración mayor.

Si opta por utilizar un sistema de referencia inercial (inmóvil respecto a la estrellas), no se deben tener en cuenta las fuerzas centrífugas, que son fuerzas ficticias y que sólo aparecen en sistemas de referencia acelerados. Un observador en la Tierra ve fuerzas centrífugas porque la Tierra está en caída libre hacia el Sol. En cambio, para un observador exterior fijo, solo existen las fuerzas reales, como la fuerza de atracción que constituye la fuerza centrípeta.

El resultado de este pequeño desequilibrio de fuerzas hace que el agua de los océanos situada en el lado opuesto al Sol sienta una fuerza que la empuja hacia el exterior de la órbita, mientras que



el agua situada en el lado orientado hacia el Sol siente una fuerza que la empuja hacia dicho astro. La consecuencia es que la esfera de agua que recubre a la Tierra se alarga ligeramente y se transforma en un elipsoide de revolución cuyo eje mayor está dirigido hacia el Sol. Se verá que este alargamiento relativo es muy pequeño: del orden de uno entre diez millones (Serrano, 2013).

Algunas definiciones básicas para el adecuado desarrollo de este marco teórico son los siguientes (Léniz, 2008):

- *Pleamar*: Nivel máximo alcanzado por una marea creciente de un día cualquiera.
- *Bajamar*: Nivel mínimo alcanzado por una marea vaciante de un día cualquiera.
- *Hora de la Plea y de la Baja*: Instante que ocurre la pleamar o bajamar.

### **1.3.3. Fuerzas astronómicas de producción de mareas**

En la superficie de la Tierra, la atracción gravitacional de la Tierra actúa en dirección interna hacia su centro de masa y esto mantiene las aguas del océano confinadas a esta superficie. Sin embargo, las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol, y la fuerza centrífuga del sistema Sol-Tierra-Luna, actúan externamente sobre las aguas del océano de la Tierra. Estas fuerzas externas son ejercidas como fuerzas de producción de marea o fuerzas de tracción. Sus efectos son superpuestos a la fuerza gravitacional de la Tierra y actúan para delinear las aguas del océano horizontalmente a varios puntos de la superficie de la Tierra (Organización Hidrográfica Internacional, 2010).

#### **1.3.3.1. Mareas lunares.**

La Luna, al estar mucho más cerca de la Tierra que el Sol, es la causa principal de las mareas. Cuando la Luna está justo encima de un punto dado de la superficie terrestre, ejerce una fuerza de atracción del agua, que, por lo tanto, se eleva sobre su nivel normal. El agua que cubre la porción de Tierra más lejana de la Luna también está sometida a atracción; se forma así otra elevación que proporciona el fundamento de una segunda onda. La cresta de onda situada bajo la Luna se llama marea directa, y la del lado diametralmente opuesto de la Tierra se llama marea opuesta. En ambas crestas, prevalece la condición conocida como de marea alta, mientras que a lo largo de la



circunferencia formada por las zonas perpendiculares al eje de mareas directa y opuesta se producen fases de marea baja.

Las mareas alta y baja se alternan en un ciclo continuo. Las variaciones producidas de forma natural entre los niveles de marea alta y baja se denominan amplitud de la marea. En la mayoría de las costas del mundo se producen dos mareas altas y dos bajas cada día lunar, siendo la duración media de un día lunar 24 h, 50 min y 28 s. Una de las mareas altas está provocada por la cresta de marea directa y la otra por la cresta de marea opuesta. La diferencia de altura del océano provocada por diferencia de atracción debida a las distancias diferentes respecto a la Luna es:

$$h = G \frac{M_1 R^2}{d_i^3 g} \quad (3)$$

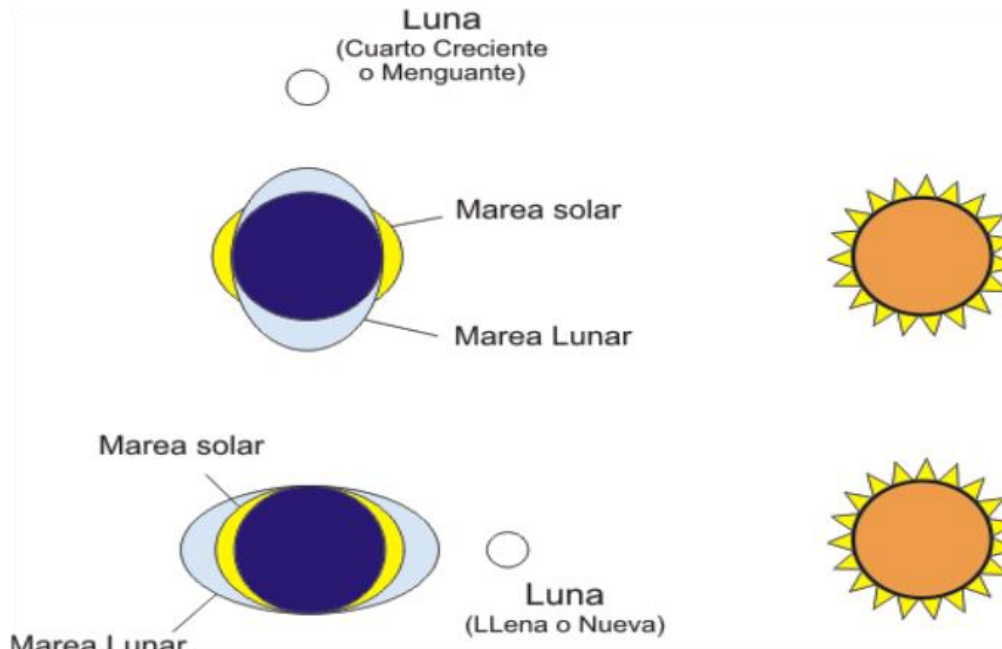
Donde  $M_1$  es la masa lunar,  $d_i$  la distancia entre la Tierra y la Luna. El cálculo numérico nos da una variación de 35,6 cm (Serrano, 2013).

### **1.3.3.2.Mareas solares.**

Asimismo, el Sol provoca el ascenso de dos crestas de onda opuestas, pero como el Sol está más alejado de la Tierra, su fuerza para crear mareas es un 46% menor que la Luna. El resultado de la suma de las fuerzas ejercidas por la Luna y el Sol es una onda compuesta por dos crestas, cuya posición depende de las posiciones relativas del Sol y de la Luna en un instante dado.

La aceleración solar da un aumento de la altura del océano de 16,28 cm. Con la suma de los dos efectos, el semieje mayor del elipsoide es 24,4 cm mayor que el semieje menor. Como la Tierra gira, un punto situado en el Ecuador ve la altura del mar llegar a un máximo (pleamar) dos veces por día: cada vez que dicho punto pasa por el semieje mayor. De la misma manera, cada vez que el punto pasa por un semieje menor, la altura del mar pasa por un mínimo (bajamar). La diferencia entre la pleamar y la bajamar es de 24,4 cm.





**Figura 3.** Mareas lunares y solares.

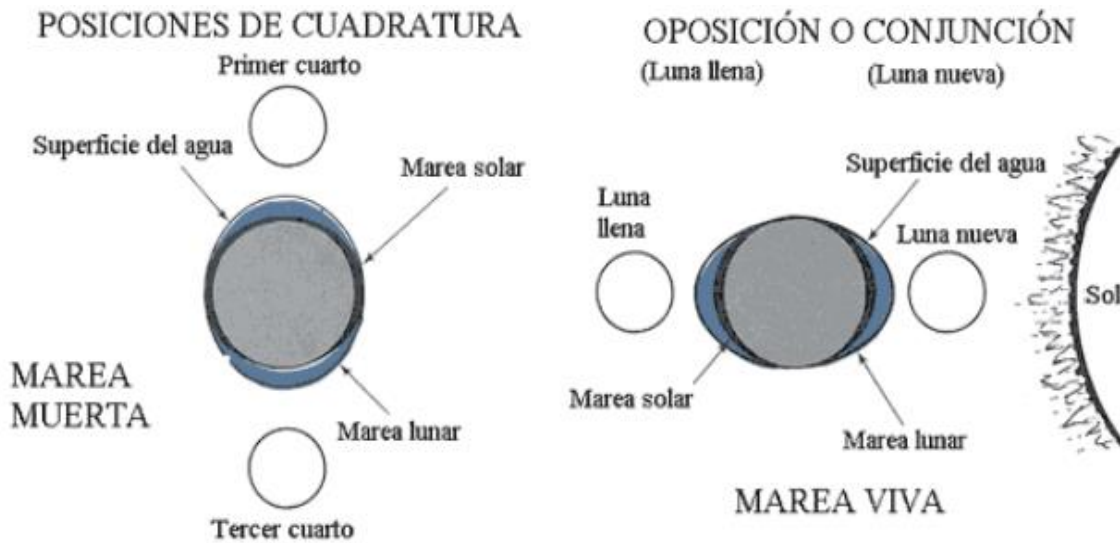
**Fuente:** Junta de Andalucía (s.f.).

#### 1.3.4. Fases lunares.

De acuerdo a la fase lunar, distinguimos dos tipos de marea: mareas vivas y mareas muertas, la amplitud de estas mareas varía en función de las posiciones del Sol y de la Luna para un mismo lugar, en la **Figura 4** se representan las fases lunares.

##### 1.3.4.1. Mareas vivas y mareas muertas.

Con respecto a las estrellas, el periodo de rotación del elipsoide solar es de un año. El elipsoide de la Luna es de 27,32 días. El resultado es que los ejes de los dos elipsoides se acercan cada 14,77 días. Cuando los ejes mayores de los dos elipsoides están alineados, la amplitud de las mareas es máxima y se llaman mareas viva. Esto sucede en las lunas nuevas y en las lunas llenas. En cambio, cuando el eje mayor de cada elipsoide está alineado con el eje menor del otro, la amplitud de las mareas es mínima. Esto sucede en los cuartos menguantes y los cuartos crecientes. Estas mareas se llaman mareas muertas (Serrano, 2013).



**Figura 4.** Posición del sol, la luna y la tierra en relación a sus mareas.

*Fuente:* Serrano (2013).

### 1.3.5. Tipos de mareas.

De acuerdo a la cantidad de pleas y bajamares en la **Tabla 1** se muestran los tipos de marea que se produzcan durante un día lunar, en un lugar específico.

Se distinguen los tipos de mareas:

**Tabla 1.** Tipos de Marea.

TIPO DE MAREA	DESCRIPCIÓN
SEMIDIURNA	Cuando se producen diariamente dos altas y dos bajas, con relativa igualdad de altura entre correspondientes altas y bajas. Este tipo de marea se produce en prácticamente toda la costa de los Océanos, que no tienen accidentes geográficos muy notables.



<b>TIPO DE MAREA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>DIURNA</b>	Cuando en un día se produce sólo una alta y una bajamar. Este tipo de mareas se produce generalmente en grandes golfos.
<b>MIXTA</b>	Este tipo de mareas se caracteriza por grandes desigualdades de altura entre altas o bajas consecutivas. Es posible que se produzcan dos altas y dos bajas el mismo día, pero en determinadas épocas pasan a ser diurnas. Mareas de este tipo, se producen en la boca oriental del Estrecho de Magallanes y en algunos otros lugares del mundo.

**Fuente:** Léniz (2008). Modificado por autores.

A continuación, en la **Figura 5** se representan las alturas de las mareas acorde a la distribución de las fases de las mismas.

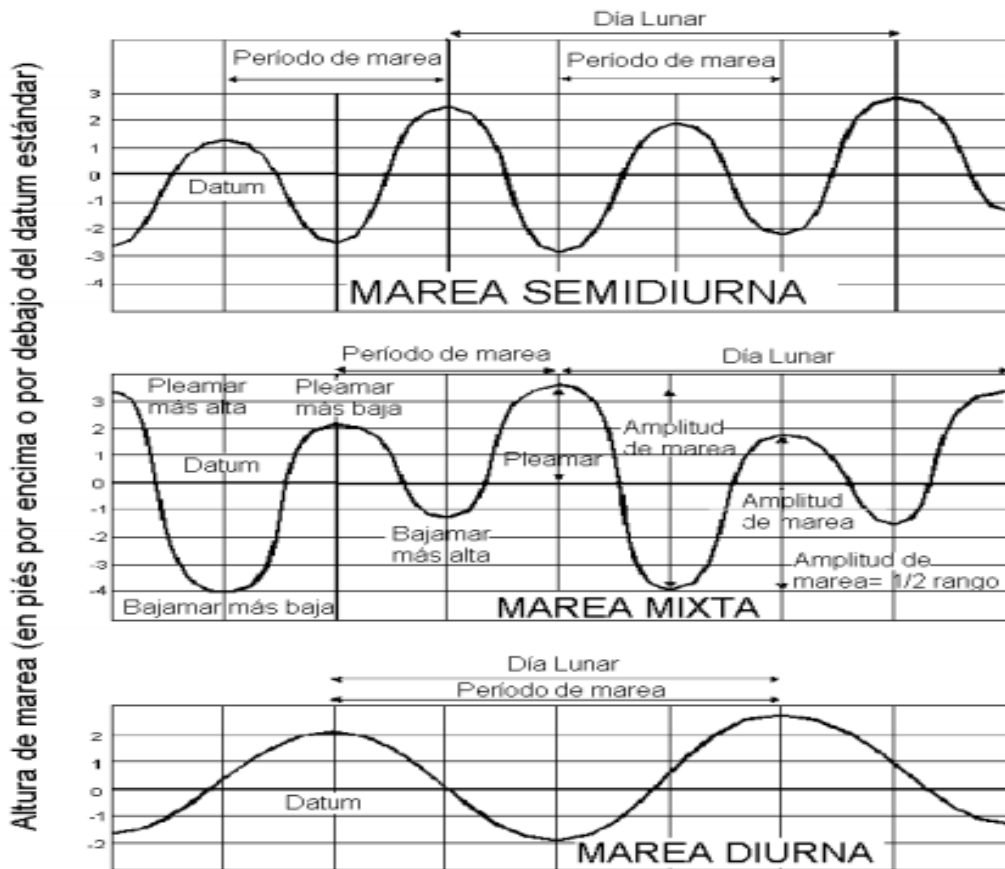
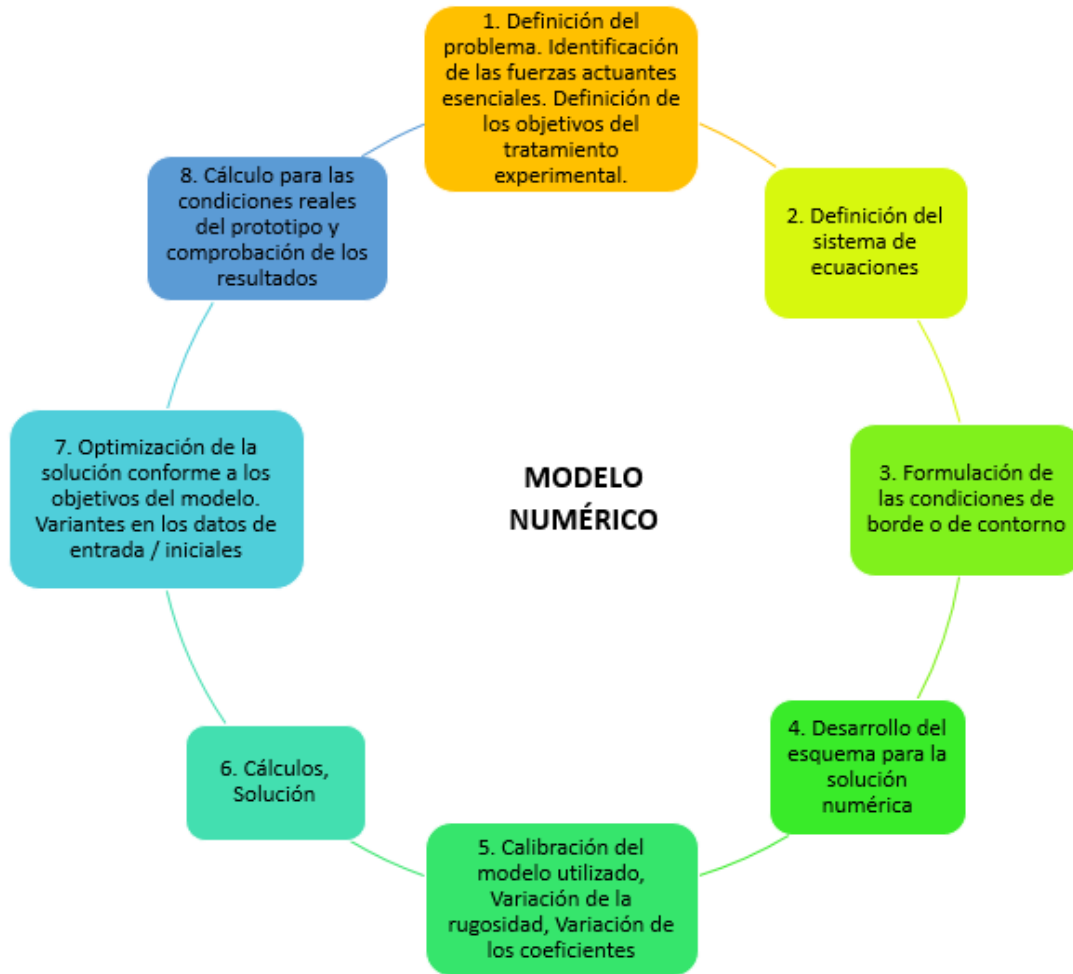


Figura 5. Distribución de las fases de las mareas.

Fuente: Organización Hidrográfica Internacional (2010).

### 1.3.6. Descripción de Modelos

Gracias al desarrollo de los recursos computacionales, los métodos numéricos han ganado relevancia en las últimas décadas pues permiten simular condiciones complejas con precisión y en periodos de tiempo relativamente cortos. Ya que muchos fenómenos físicos se modelan mediante sistemas de ecuaciones diferenciales, cuyas soluciones analíticas pueden ser complicadas.



**Figura 6.** Proceso de modelos numéricos.

*Fuente:* Organización Hidrográfica Internacional (2010). *Modificado por autores.*

Es importante considerar las restricciones que normalmente se presentan en estos modelos, en la **Figura 7** mediante un esquema son representados las restricciones principales y prácticas en un modelo numérico.

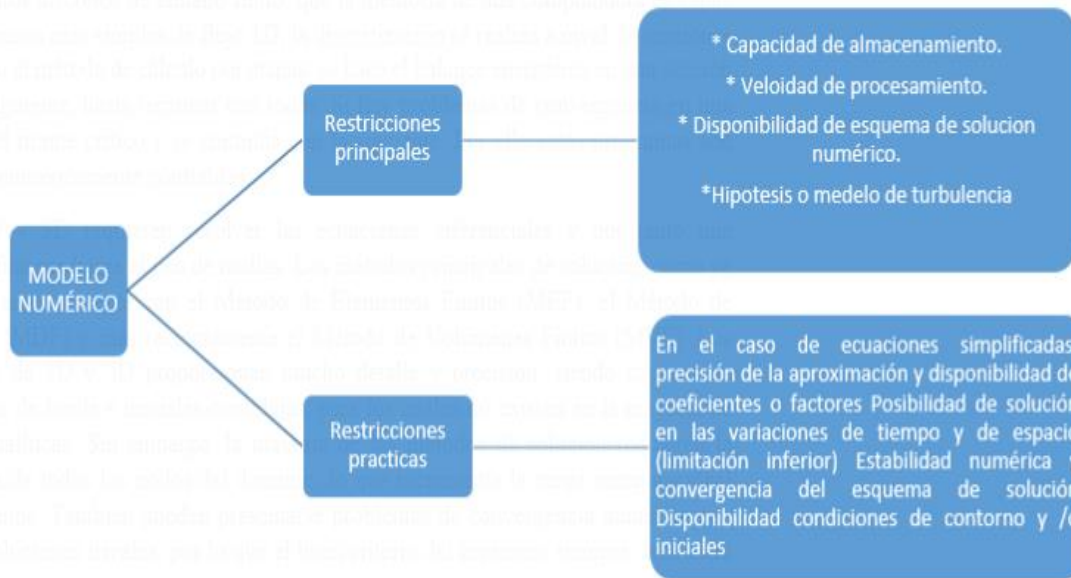


Figura 7. Restricciones Modelos numéricos.

Fuente: Poveda, Hidalgo, & Castro (2003). Modificado por autores.

### 1.3.7. Modelación hidráulica

La modelación hidráulica es la reproducción, a escala reducida, de fenómenos, estados o procesos relevantes del flujo del agua. Las magnitudes físicas o hidrodinámicas en el “modelo hidráulico” deben corresponder a las magnitudes en la naturaleza, bajo determinadas leyes, que reciben el nombre de “escalas”. La selección de las magnitudes más relevantes en la representación del fenómeno hidráulico analizado, permitirá una aplicación inmediata de los resultados en la solución de los problemas presentes en la zona de estudio (Poveda, Hidalgo, & Castro, 2003).

En la figura 8, en el esquema mostrado, se distinguen los parámetros que se tienen en cuenta para desarrollar un modelo Hidráulico.

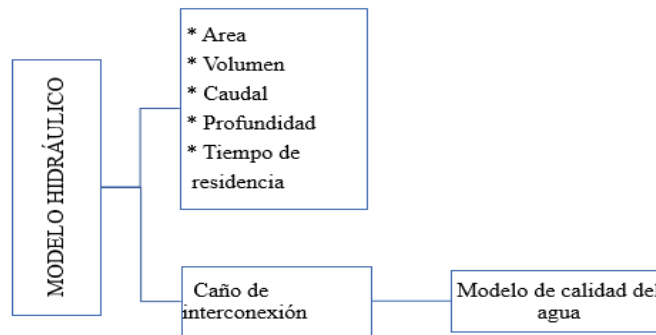


Figura 8. Parámetros Modelos hidráulicos.

Fuente: Mosso & Octavio (2004). Modificado por autores.

### 1.3.8. Planteamiento del modelo de simulación hidráulico de estuarios

Según lo planteado en el modelo matemático teórico que propuso el ingeniero Alfonso Arrieta para el MHE UdeC se basó en el siguiente planteamiento: “La circulación en los estuarios se ha planteado desde diversos puntos de análisis, los cuales incluyen, bidimensionales integrados en la profundidad, modelos tridimensionales, modelos estratificados, modelos matemáticos de balances hidrológicos, modelos hidrodinámicos, modelos de elementos finitos y modelos de múltiples variables que requieren una gran cantidad de información de campo para su calibración y validación, lo cual en muchos casos hace costosa su implementación (H. Wenrui, J. W. Kent, 2003). Por lo tanto, se planteó un modelo simplificado de tipo hidráulico, basado en los niveles de entrada e internos de La Laguna del Cabrero, cuyo único parámetro de calibración es el coeficiente de descarga de las Compuertas de entrada y salida al sistema. En la **Figura 9**, se muestra un corte esquemático del comportamiento de los niveles del agua cuando cruza por la compuerta de ancho  $B$ , y altura de lámina vertida  $Z$ ” (Arrieta Pastrana, 2016).

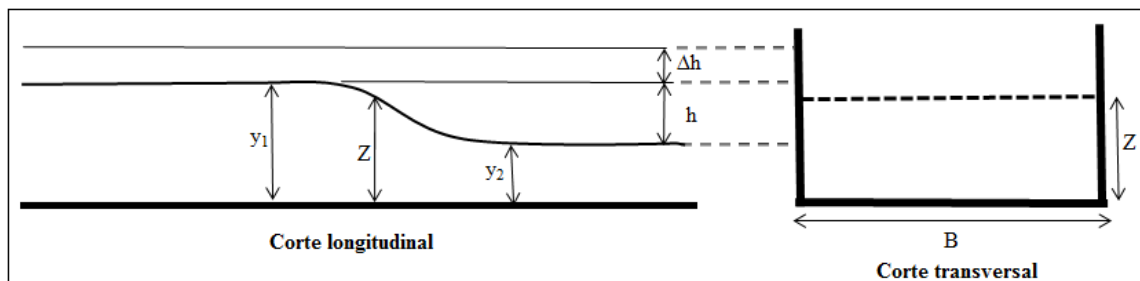
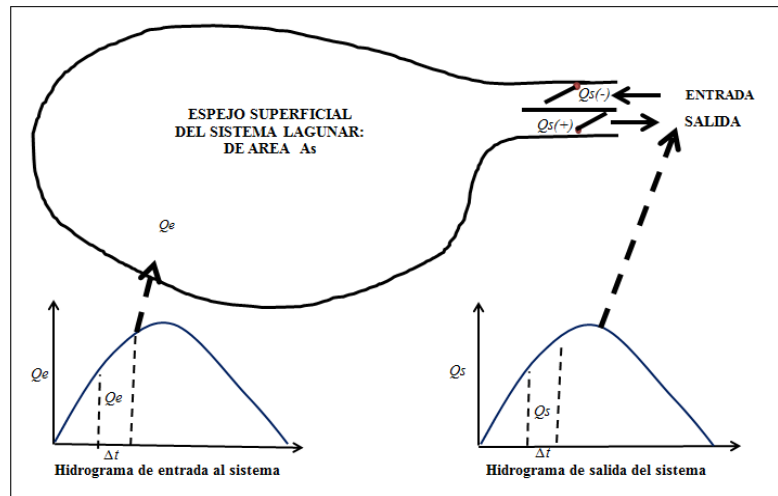


Figura 9. Corte transversal esquemático del flujo a través de una compuerta.

Fuente: Arrieta Pastrana (2016).



En la **Figura 10** se muestra la representación en planta del sistema estuario de una Laguna, en el cual se representan las compuertas de entradas y compuertas de salidas, asociadas a un hidrograma de salida con sentido positivo o negativo, y un hidrograma denominado de entrada correspondiente a ingresos por aguas lluvias u otras fuentes.



**Figura 10.** Representación esquemática en planta del sistema estuario.

**Fuente:** Arrieta Pastrana (2016).

Aplicando el principio de conservación de la masa, para un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , se tiene:  
Densidad de entrada \* Volumen de entrada – Densidad de salida \* volumen de salida =  
volumen almacenado \* Densidad del estuario (4)

Considerando que la densidad se mantiene constante (el valor numérico de la densidad del agua de mar en su ambiente natural varía solamente a partir del tercer decimal), el balance se reduce a un balance de volumen. Aplicando la ecuación de Bernoulli, y considerando que las pérdidas de energía en la compuerta son función de la carga de velocidad, se obtiene para el caudal en la compuerta la siguiente expresión:

$$Q = CBZ\sqrt{2gh} \quad (5)$$

Dónde:  $Q$ = Caudal de la compuerta,  $C$ = Coeficiente de contracción y otras pérdidas de la compuerta,  $B$ = Ancho libre del vano de la compuerta,  $Z$ = Profundidad media en el vano de la compuerta,  $g$ = Aceleración de la gravedad,  $h$ = Carga de la estructura (Diferencia de nivel entre aguas arriba y aguas abajo)” (Arrieta Pastrana, 2016).





El volumen que ingresa y sale del sistema se calcula como el área bajo la curva del hidrograma para un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , Para la estimación del almacenamiento se considera constante el área superficial ( $A_s$ ), área del vaso o depósito con relación a la altura (Arrieta Pastrana, 2016).

$$\frac{Q_e^t + Q_e^{t+\Delta t}}{2} \Delta t - \frac{Q_s^t + Q_s^{t+\Delta t}}{2} \Delta t = A_s \Delta h \quad (6) \quad \text{O} \quad Q_e^t + Q_e^{t+\Delta t} - Q_s^t - Q_s^{t+\Delta t} = 2A_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (7)$$

Para un instante de tiempo  $t$ , el caudal de salida por el puente está dado por:

$$Q_s^t = CBZ \sqrt{2gh} \quad (8)$$

Para un instante de tiempo  $t + \Delta t$ , el caudal de salida por la compuerta está dado por:

$$Q_s^{t+\Delta t} = CBZ \sqrt{2g(h+\Delta h)} \quad (9)$$

Donde  $\Delta h$  es el incremento de nivel entre el tiempo  $t$  y  $t + \Delta t$ .

Aplicando la expansión del teorema del binomio, con una aproximación hasta el segundo término se tiene:

$$(h+\Delta h)^{1/2} \cong h^{1/2} + \frac{1}{2} h^{-1/2} \Delta h \quad (10)$$

Por lo tanto el caudal de salida en el tiempo  $t + \Delta t$ , se estima con la siguiente expresión.

$$Q_s^{t+\Delta t} = CBZ \sqrt{2g} h^{1/2} + CBZ \sqrt{2g} \frac{1}{2} h^{-1/2} \Delta h \quad (11)$$

Finalmente el balance de masa (considerando la densidad constante) se estima como:

$$Q_e^t + Q_e^{t+\Delta t} - Q_s^t = 2A_s \frac{\Delta h}{\Delta t} + Q_s^{t+\Delta t} \quad (12) \text{ o}$$

$$Q_e^t + Q_e^{t+\Delta t} - Q_s^t = 2A_s \frac{\Delta h}{\Delta t} + CBZ \sqrt{2g} h^{1/2} + CBZ \sqrt{2g} \frac{1}{2} h^{-1/2} \Delta h \quad (13) \text{ o}$$

$$Q_e^t + Q_e^{t+\Delta t} - Q_s^t = \Delta h \left( 2 \frac{A_s}{\Delta t} + \frac{1}{2} CBZ \sqrt{2g} h^{-1/2} \right) + CBZ \sqrt{2g} h^{1/2} \quad (14)$$

Simplificando se tiene:

$$\Delta h = \frac{Q_e^t + Q_e^{t+\Delta t} - Q_s^t - CBZ \sqrt{2g} h^{1/2}}{2 \frac{A_s}{\Delta t} + \frac{1}{2} CBZ \sqrt{2g} h^{-1/2}} = \frac{Q_e^t + Q_e^{t+\Delta t} - 2Q_s^t}{2 \frac{A_s}{\Delta t} + \frac{1}{2} CBZ \sqrt{2g} h^{-1/2}} \quad (15)$$

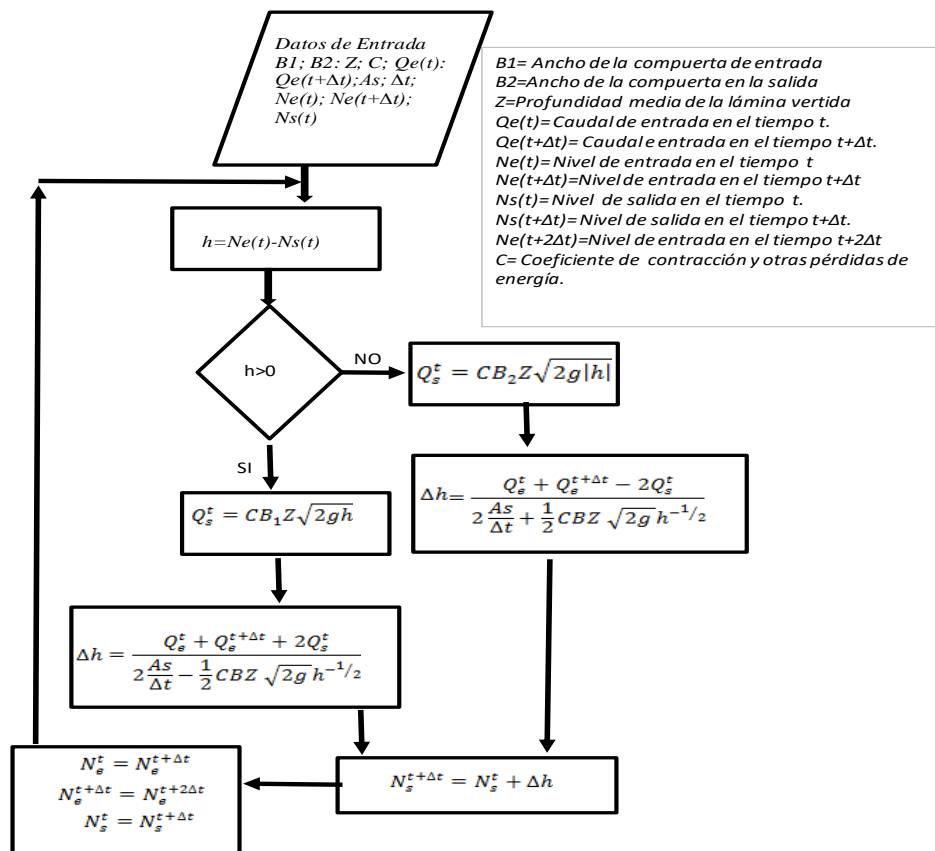
La expresión (15) anterior es válida cuando la marea está bajando y el caudal del cuerpo de agua está saliendo por las Compuertas. Mediante un análisis similar cuando la marea está subiendo el caudal ingresa por La Laguna y la expresión para la estimación de la variación de nivel es la siguiente:



$$\Delta h = \frac{Q_e^t + Q_e^{t+\Delta t} + 2Q_s^t}{2\frac{As}{\Delta t} - \frac{1}{2}CBZ\sqrt{2g}h^{-1/2}} \quad (16)$$

Dónde:  $Q_e^t$  = Caudal de entrada al sistema en el tiempo  $t$ ;  $Q_e^{t+\Delta t}$  = Caudal de entrada al sistema en el tiempo  $t+\Delta t$ ;  $Q_s^t$  = Caudal de salida al sistema en el tiempo  $t$ ;  $Q_s^{t+\Delta t}$  = Caudal de salida al sistema en el tiempo  $t+\Delta t$ ;  $As$  = Área superficial de la ciénaga;  $\Delta t$  = Intervalo de tiempo de simulación;  $\Delta h$  = Incremento de nivel del cuerpo de agua para un intervalo de tiempo  $\Delta t$ .

En la **Figura 11**, se muestra el diagrama de flujo para la estimación del nivel a la salida para un intervalo de tiempo  $t+\Delta t$ , y el proceso iterativo para la estimación de la serie de niveles, la cual es confrontada con los niveles medidos (Arrieta Pastrana, 2016). Cabe resaltar que el fin del diagrama se da cuando se cumple el periodo de simulación estipulado.



**Figura 11.** Diagrama de flujo para el proceso de simulación hidráulica del sistema.

**Fuente:** Arrieta Pastrana (2016).



### 1.3.9. MIKE HYDRO RIVER

Este es un software de modelización fluvial unidimensional, ha sido desarrollado durante décadas y utilizado en gran variedad de complejas aplicaciones en proyectos (MIKE Powered by DHI, 2016).

El modelo hidrodinámico planteado para la modelación por el software MIKE HYDRO RIVER se basa en un método de volumen finito de dos o tres dimensiones utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas sujetas a las hipótesis de Boussinesq y de la presión hidrostática para flujos incompresibles (densidad constante) de superficie libre en coordenadas cartesianas y considerando los postulados de Reynolds. Así, el modelo consiste de continuidad de caudal, de momento y de la temperatura. Para el modelo en 3D la superficie libre se toma en cuenta utilizando un enfoque de transformación a coordenadas cartesianas, así la ecuación de continuidad se escribe como (MIKE Powered by DHI, 2016):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (17)$$

Donde S es la magnitud de descarga en un punto; x, y, z las coordenadas cartesianas y u, v y w las componentes de velocidad del flujo respectivamente. La cantidad de movimiento en la dirección X y Y en un tiempo dado, se define en función de Z respectivamente:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} (V_t \frac{\partial u}{\partial z}) + u_s S \quad (18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial n}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} (V_t \frac{\partial v}{\partial z}) + v_s S \quad (19)$$

Donde t es el tiempo, f es el coeficiente de fricción del viento, g es la fuerza de gravedad, p es el caudal unitario,  $\rho$  la densidad y  $\eta$  es el coeficiente de Manning.

Cuyas aplicaciones típicas se encuentran:

- Pronosticos de inundacion en tiempo real.



- Analisis de rotura de presas.
- Optimizacion de embalses incluyendo operaciones de estructuras complejas.
- Evaluaciones ecológicas y de calidad de aguas en rios y humedales.
- Analisis de inundaciones y estudios de paliación de inundaciones.
- Pronósticos de calidad de aguas.
- Esudios de cambios de morfología fluvial a largo plazo y transporte de sedimentos.
- Introdución salina en rios y estuarios.

### **1.3.10. Coeficiente de correlación y de determinación**

Para realizar la calibración y validación de los datos procesados fue necesario calcular el coeficiente de correlación,  $r$ , y el de determinación que permitió comprobar la veracidad de la información.

$$\text{Coeficiente de correlación } (X, Y) = \frac{\sum(x-x^-)(y-y^-)}{\sqrt{\sum(x-x^-)^2 \sum(y-y^-)^2}} \quad (20)$$

Donde  $\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son las medias de los datos medidos y los simulados.

$$\text{Coeficiente de determinación} = r^2 \quad (21)$$



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento hidráulico del cuerpo de agua comprendido entre la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú de la ciudad de Cartagena, aplicando el Modelo Hidráulico de Estuarios Universidad de Cartagena (MHE UdeC) propuesto por el profesor Alfonso Arrieta Pastrana, con el fin de proporcionar un modelo confiable con el que se puedan realizar proyecciones de los niveles de los cuerpos de agua.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Recopilar información de los niveles en cada uno de los cuerpos de agua que serán estudiados, basados en estudios ya realizados.
- ✓ Utilizar los datos de campo obtenidos para la validación y calibración del modelo de simulación hidráulica y el software.
- ✓ Analizar las ventajas y desventajas de aplicar el modelo MHE UdeC para estudiar el comportamiento de los niveles máximos y mínimos del cuerpo de agua comprendido entre la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú de la ciudad de Cartagena, al contrastar los resultados obtenidos por el modelo con los que se obtengan al aplicar el software MIKE HYDRO RIVER del Danish Hydraulic Institute.



### 3. ALCANCE

La zona de estudio se encuentra localizada en el norte de Colombia en la ciudad de Cartagena. Este sector se encuentra dentro del casco urbano de la ciudad de Cartagena que corresponde a la Laguna del Cabrero y parte de la Laguna de Chambacú, en lo que a las Compuertas de Chambacú se refiere, entre las coordenadas  $10^{\circ}26'03.6''N$   $75^{\circ}32'05.3''W$  y  $10^{\circ}25'35.4''N$   $75^{\circ}32'36.6''W$ . La Laguna del Cabrero tiene una longitud aproximada de 1.38 Km., un espejo de agua de unas 26 hectáreas y una profundidad promedio de 2.3 m. Las Compuertas de Chambacú cuentan con una profundidad promedio de 2.2 m. En la **Figura 12** se observa de manera más detallada la localización de la zona de estudio.



**Figura 12.** Localización zona de estudio.

**Fuente:** Google Maps, 2017. Modificada por autores.



Esta investigación se desarrolló a lo largo del primer semestre de 2017 con una duración aproximada de cuatro meses. Inicialmente, se obtuvieron los datos correspondientes a las variaciones de los niveles de marea de la Laguna del Cabrero y de las Compuertas de Chambacú, determinados en un estudio realizado por estudiantes de la Universidad de Cartagena entre agosto y octubre de 2016. Luego, a partir de información secundaria, se obtuvieron los datos relacionados con los parámetros de entrada que se necesitaron para aplicar el MHE UdeC, tales como: coeficientes de descarga en las compuertas de entrada y salida, ancho de las compuertas de entrada y salida, área total de la zona de estudio, intervalo de simulación y profundidad media del agua en las compuertas de entrada y salida. Después, se calibró y validó el MHE UdeC con los datos obtenidos de las mediciones en campo realizadas en el año 2016, y así se obtuvieron los niveles estimados de marea. De igual forma, se aplicó este procedimiento con el software MIKE HYDRO RIVER y se obtuvieron los niveles estimados de marea. Por último, se analizaron las ventajas y desventajas de aplicar el MHE UdeC propuesto por el profesor Alfonso Arrieta Pastrana para analizar el comportamiento hidráulico de un cuerpo de agua comparando los niveles obtenidos con el MHE UdeC con los obtenidos con la aplicación del software MIKE HYDRO RIVER; para ello, se solicitó una licencia académica al Danish Hydraulic Institute (DHI), la cual fue otorgada con duración de un año para realizar el presente estudio.

El producto que se entregó consiste en una evaluación del comportamiento hidráulico de la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú, para establecer las ventajas y desventajas de aplicar un modelo de simulación hidráulica para estudiar la variación de los niveles en cuerpos de agua, y establecer la confiabilidad del MHE UdeC.

Las principales limitaciones que presentó el proyecto de investigación fueron espaciales y de información, debido a que solo se analizó el comportamiento hidráulico del cuerpo de agua comprendido entre la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú, y el desarrollo de este proyecto se basó en el uso de información secundaria y la información que suministró el profesor Alfonso Arrieta Pastrana referente al modelo de simulación hidráulica.



Para el MHE UdeC, las variables de entrada que requirió el modelo son: el ancho de las compuertas de entrada y salida, área de la zona de estudio, profundidad media del agua en las compuertas de entrada y salida, intervalo de tiempo de simulación, niveles de marea medidos en campo y tiempo en que se registró la medición, utilizando como parámetro de calibración el coeficiente de descarga de las compuertas. Las variables de salida que arrojó el modelo corresponden a los niveles estimados de la marea del cuerpo de agua a estudiar para el tiempo correspondiente.

Para el software MIKE HYDRO RIVER, las variables de entrada corresponden a: tiempo de simulación, niveles de marea medidos en campo y tiempo en que se registró la medición, utilizando como parámetros de calibración y validación los coeficientes de correlación y de determinación, respectivamente.

Este proyecto buscó sentar bases para futuras investigaciones encaminadas a analizar el comportamiento hidráulico del sistema de caños y lagos de la ciudad de Cartagena. A su vez, se realizará un aporte significativo al Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental (IHSA) y en especial al Grupo de Investigación en Hidráulica y Manejo Costero (GIHMAC) de la Universidad de Cartagena, debido a los aportes que se pueden proporcionar para futuras investigaciones relacionadas con el comportamiento hidráulico de los cuerpos de agua, específicamente hablando de la variación en los niveles de los mismos.



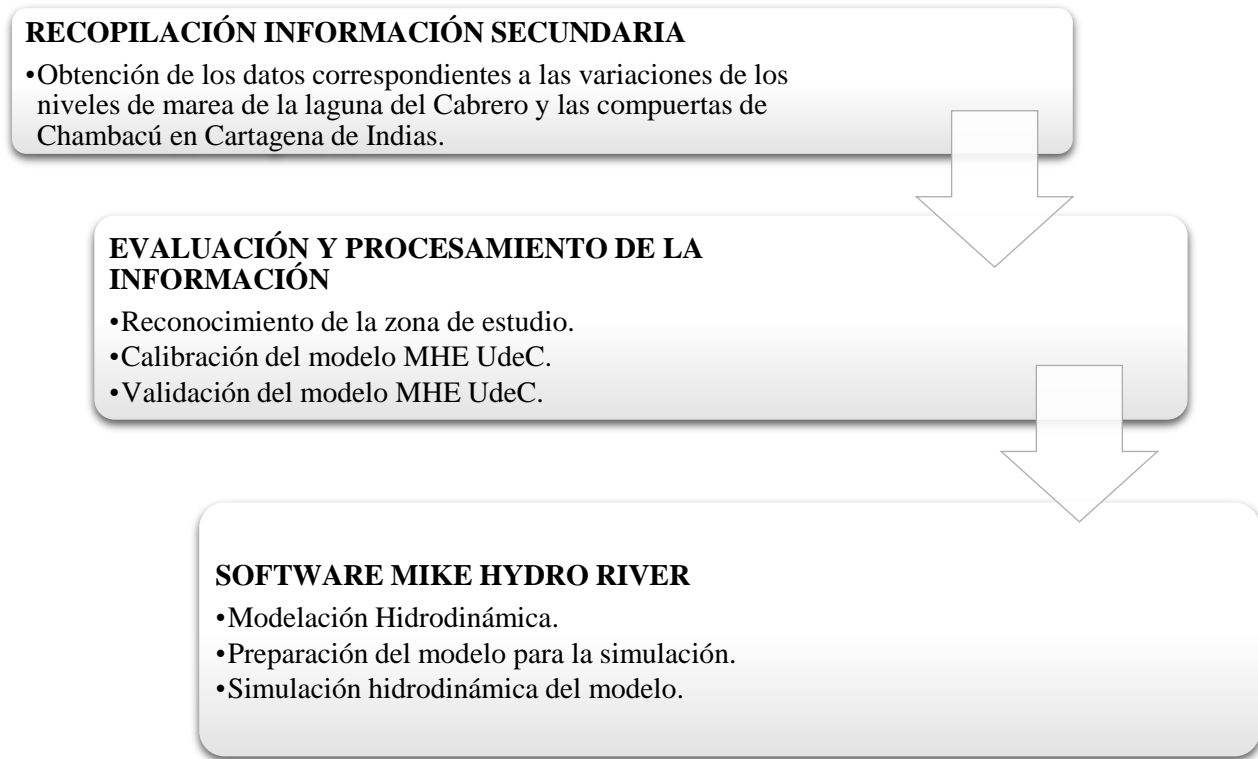


#### 4. METODOLOGÍA

El tipo de investigación realizada corresponde a un estudio correlacional, teniendo en cuenta que primero se calibró y validó el MHE UdeC, luego se simularon los niveles de los cuerpos de agua que son objeto de estudio y se compararon los resultados obtenidos con los niveles de los cuerpos de agua medidos anteriormente durante el año 2016 y con los datos que arroje la simulación que se realizará en el software MIKE HYDRO RIVER. Con base en esto, se podrá establecer qué tan preciso es el modelo de simulación hidráulica propuesto por el profesor Alfonso Arrieta.

El proyecto tiene un enfoque mixto, debido a que se compone de dos etapas, la primera cualitativa, en la que se describiera las características predominantes en el comportamiento de los niveles de los cuerpos de agua que serán estudiados según los datos recopilados, y como segunda etapa una investigación cuantitativa, en la cual se obtendrán los resultados de los niveles por medio del modelo de simulación hidráulica que se propone para luego ser comparados con los datos que se midieron en la anterior investigación y los arrojados por el MIKE HYDRO RIVER.

Para alcanzar los objetivos previstos en este proyecto, la metodología se constituyó por fases como se representa en la **Figura 13**, a continuación:



**Figura 13.** Esquema de la metodología del proyecto de investigación.

**Fuente:** Autores

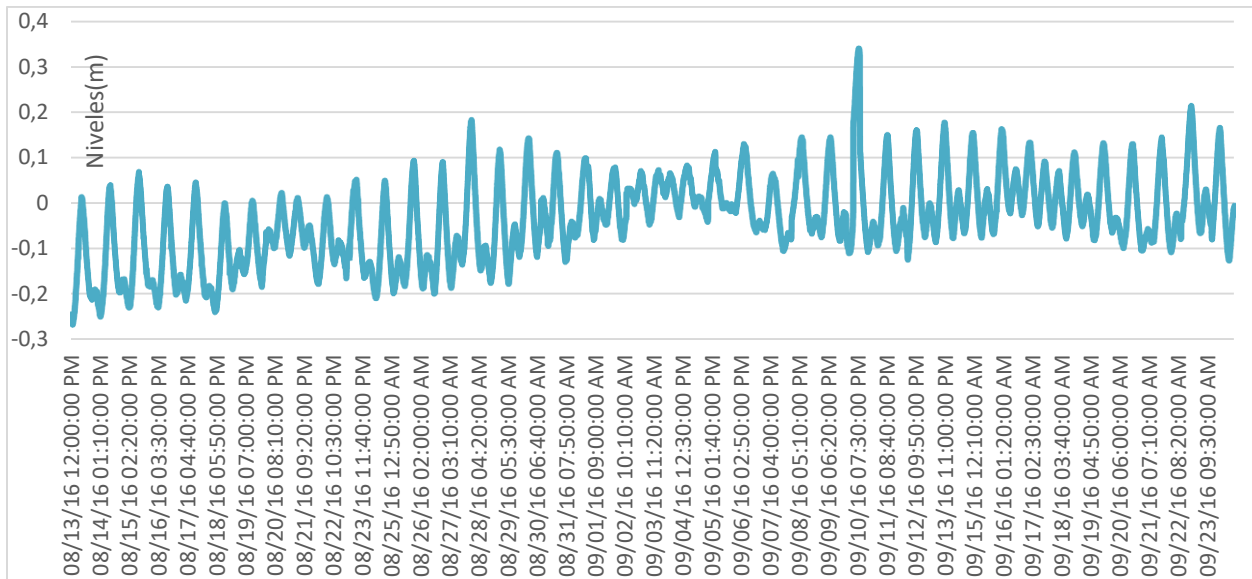
#### **4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA**

En esta etapa se obtuvieron los datos correspondientes a las variaciones de los niveles de la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú, determinados en un estudio realizado por Cañate & Guzmán entre agosto y octubre de 2016, investigación en la cual instalaron unos sensores para medir la variación de la marea en diferentes cuerpos de agua de la Ciudad de Cartagena durante estos meses, con estos datos se procedió a calibrar y validar el modelo.

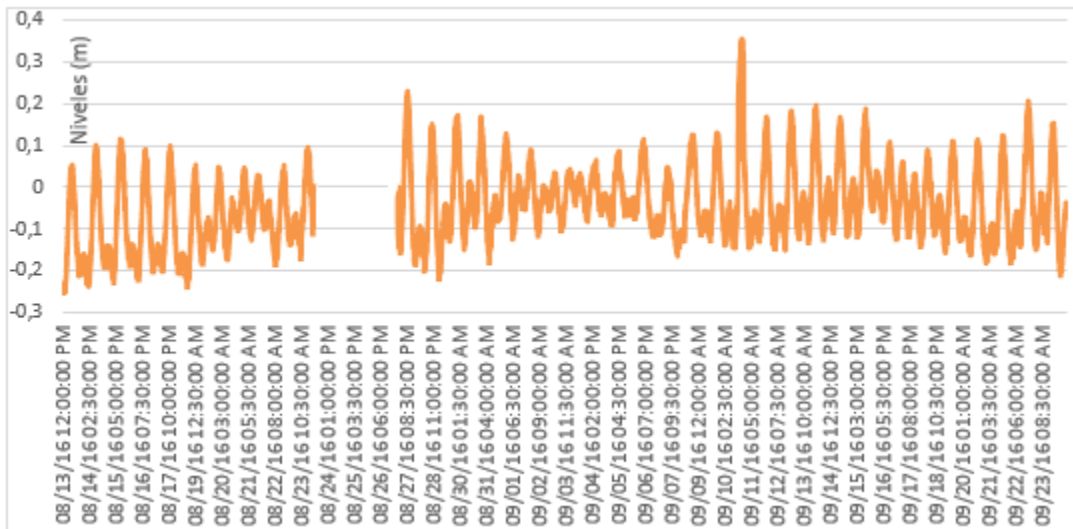
Para las mediciones obtenidas de la Laguna del Cabrero, las mediciones registradas abarcan desde el 13 de agosto a las 12:00 pm hasta el 23 de septiembre a las 04:00 pm, tal como se muestra en la **Figura 14**. Para las mediciones obtenidas de las Compuertas de Chambacú, se presentan dos condiciones particulares para la serie. El primer tramo de la serie se tomó desde el día 13 de agosto a las 12:00 pm hasta el día 23 de agosto a las 10:05 pm. El segundo sector comprende desde el día



27 de agosto a las 10:55am hasta el día 23 de septiembre a las 04:00 pm. Cabe resaltar que para el periodo comprendido entre el 23 de agosto a las 10:05pm hasta el 27 de agosto a las 10:55am, no hay mediciones registradas, tal como se muestra en la **Figura 15**.



**Figura 14.** Series de niveles para la Laguna del Cabrero.  
**Fuente:** Cañate & Guzmán (2016), modificado por autores.



**Figura 15.** Series de niveles para las Compuertas de Chambacú.  
**Fuente:** Cañate & Guzmán (2016), modificado por autores.



#### 4.2. EVALUACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

En esta etapa se desarrollaron tres fases, las cuales comprenden el reconocimiento de la zona de estudio, calibración y validación del modelo MHE UdeC.

Se obtuvieron las características de los cuerpos de agua que competen al presente proyecto de investigación, tales como: el área de la Laguna del Cabrero y la sección de la Laguna de Chambacú que forma parte de la zona de estudio, las características geométricas de las compuertas de entrada y salida, y la profundidad media del agua en las compuertas de entrada y salida.

En la **Tabla 2** se muestran los valores obtenidos para las características que se requirieron.

**Tabla 2.** Características de la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú.

Cuerpo de agua Características	Canal de Entrada	Canal de salida
Área aproximada	17,35 ha	
Ancho de las compuertas/ canal rectangular	1 canal rectangular de 9 m	2 unidades de 3 m cada una, que conforman la compuerta
Profundidad media del agua	3 m	

Cuando se hable de Laguna de Chambacú, nos referimos al área de objeto de estudio, esto es, las Compuertas de Chambacú. En la figura 16 se pueden observar el canal de entrada y el canal de salida del sistema.



**Figura 16.** Canal de entrada y canal de salida del sistema, respectivamente.  
**Fuente:** Google Earth, modificado por autores.

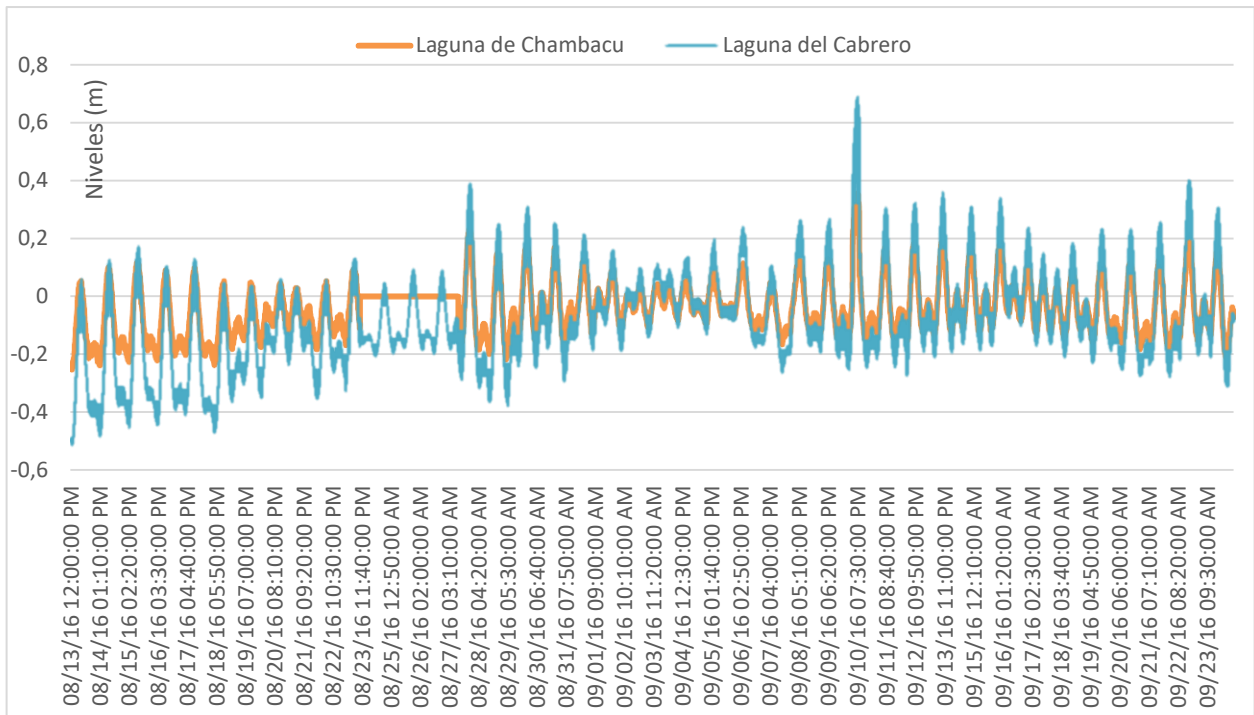
#### **4.2.1. Calibración del Modelo MHE UdeC**

En la **Figura 17** se muestran los niveles medidos en la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú. Las series mostradas corresponden a intervalos de tiempo de 5 minutos.

Como parámetros de entrada al modelo de simulación se consideraron las características geométricas de las compuertas de entrada y salida del cuerpo de agua. Para realizar el análisis en el MHE UdeC tenemos que se estudian compuertas de entrada y salida, al igual que canales rectangulares, para la zona de estudio se consideró como compuerta de entrada un canal



rectangular de dimensión 9 m de ancho y 3 m de profundidad y las compuertas de salida están formadas por 2 unidades de 3 m de ancho cada una y profundidad promedio de 3 m, Se tomó como serie de calibración, las mediciones tomadas entre los días 31 de agosto y el 5 de septiembre del año 2016.



**Figura 17.** Variaciones en los niveles en la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú.

Como criterio de calibración se fueron variando los coeficientes de descarga por medio del método ensayo y error hasta encontrar el menor error cuadrático medio calculado entre los niveles medidos para la ciénaga y los niveles estimados por el modelo, donde se fueron variando de manera aleatoria el coeficiente de contracción a la salida y el coeficiente de entrada tomando datos entre 0.6 y 1, esto con el fin de encontrar el menor error cuadrático posible y tomar los datos de los coeficientes de entrada y salida para realizar la simulación en el MHE UdeC.



#### **4.2.2. Validación del modelo MHE UdeC**

El modelo se validó mediante la simulación de los niveles del agua en la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú. El periodo de simulación efectuado fue de seis días, entre el 11 y 16 de septiembre del año 2016.

Se tomaron los datos de entrada de la compuerta de entrada y salida, para simular la marea durante el tiempo que se estipuló, para obtener la curva de validación que nos arroja la simulación y con esta se verifico que el MHE UdeC estuviera arrojando resultados confiables, cercanos al comportamiento de la marea.

### **4.3. SOFTWARE MIKE HYDRO**

Para realizar la simulación con el software, se utilizó la batimetría completa de los caños, lagos y ciénagas, realizada en el Diseño del Sistema Inteligente de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Distrito de Cartagena del año 2015 a través del convenio interadministrativo 0133-2015 de la Universidad de Cartagena con el Establecimiento Publico Ambiental (EPA). Esta información se encontró en el Tomo I. Planos Topográficos y Batimétricos del Sistema de Caños y Lagos Internos de la Ciudad de Cartagena.

#### **4.3.1. Modelación Hidrodinámica**

Para realizar la modelación hidrodinámica del cuerpo de agua en el software, fue necesario crear una malla que representara el área apropiada a modelar, la resolución adecuada de la batimetría, el flujo del agua y la definición de condiciones de contorno.

##### **4.3.1.1. Creación de la Malla inicial**

Para la creación de la malla, se utilizó la herramienta para generar mallas en el MIKE ZERO, como se puede observar en **Figura 18**.

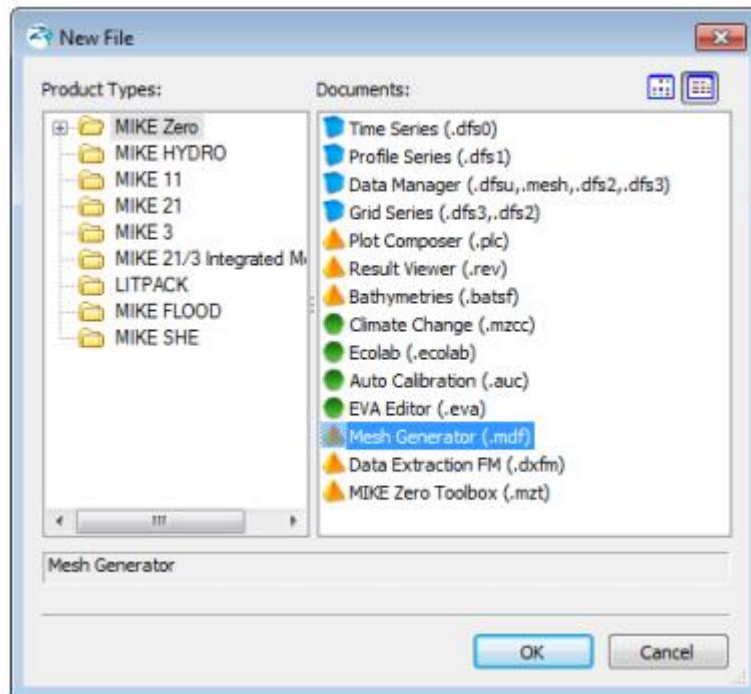


Figura 18. Herramienta para generar mallas en el MIKE ZERO.

Luego se definió el área de trabajo del proyecto, como se muestra en la **Figura 19**.

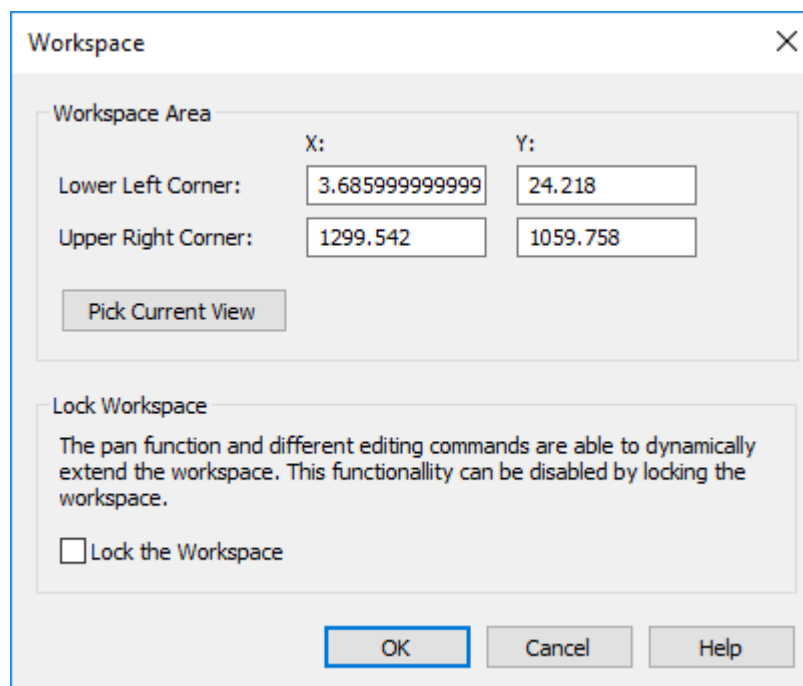
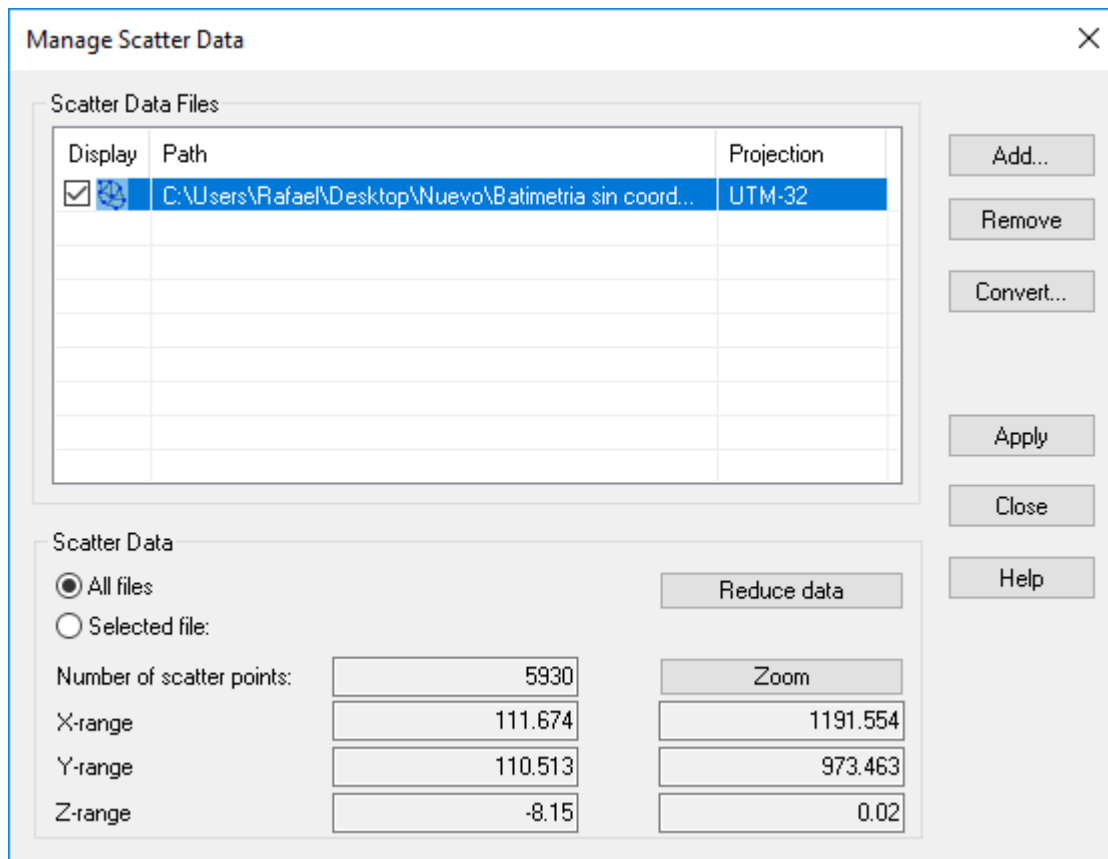


Figura 19. Definición del área de trabajo.





Para evaluar el contorno del área de modelación, se importaron todos los datos de dispersión disponibles, esto es, se utilizó la batimetría completa de los caños, lagos y ciénagas, realizada en el Diseño del Sistema Inteligente de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Distrito de Cartagena del año 2015 a través del convenio interadministrativo 0133-2015 de la Universidad de Cartagena con el Establecimiento Publico Ambiental (EPA). Esta información, disponible en archivos de extensión “.dwg”, se convirtió a formato “.xyz” de tal forma que pudiese ser ingresada en la herramienta generadora de mallas. Los datos de dispersión añadidos se observan en la Figura 20.



**Figura 20.** Importación de los datos de dispersión.

Posteriormente, se definió el dominio, se delimitaron las condiciones de contorno del cuerpo de agua estableciendo un arco alrededor del cuerpo de agua, como se muestra en la Figura 21. Este arco se estableció como el límite entre el terreno y el agua, al que se asignó tal comportamiento en el software, como se aprecia en la Figura 22. Este ajuste al límite se hizo para que el dominio pudiese ser triangulado para la posterior generación de la malla.

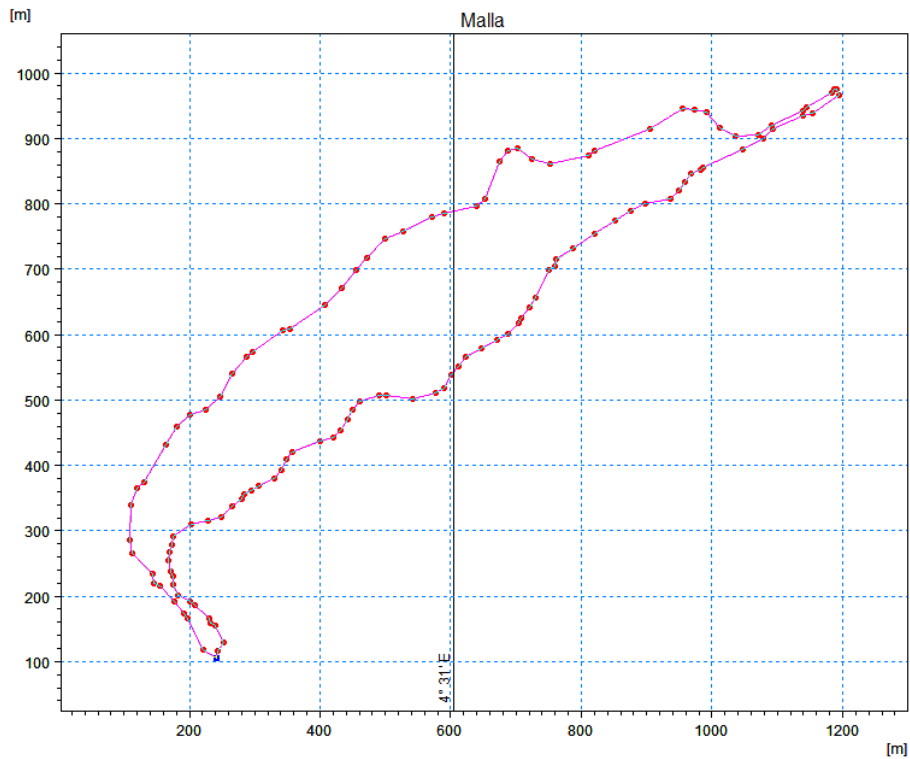


Figura 21. Límite entre el cuerpo de agua y el terreno.

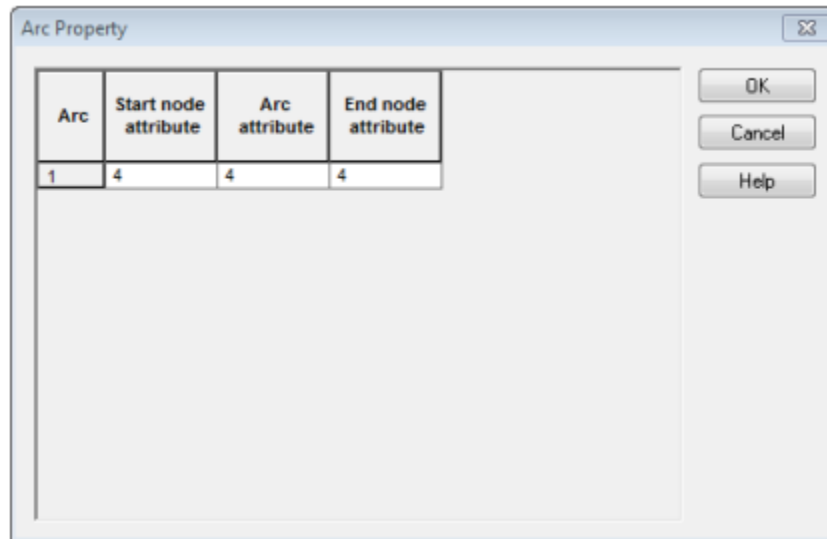
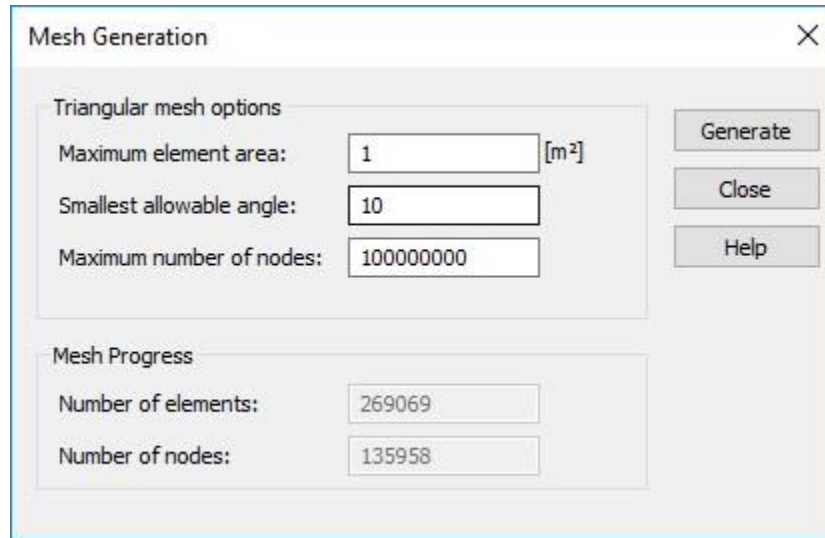


Figura 22. Propiedades del arco limite.

Finalmente, se procedió a generar la malla en la herramienta. Para ello, se triangulo el dominio discretizando el área total en volúmenes de  $1\text{m}^2$ , es decir, la modelación del cuerpo de agua se



dividió en 269069 cuerpos más pequeños interconectados por medio de 135958 nodos, los cuales incluyen la información geográfica correspondiente, formando superficies y comportándose como volúmenes de control independientes. En las Figuras 23 y 24 se observa la malla triangular generada para el cuerpo de agua.



**Figura 23.** Opciones de triangulación.

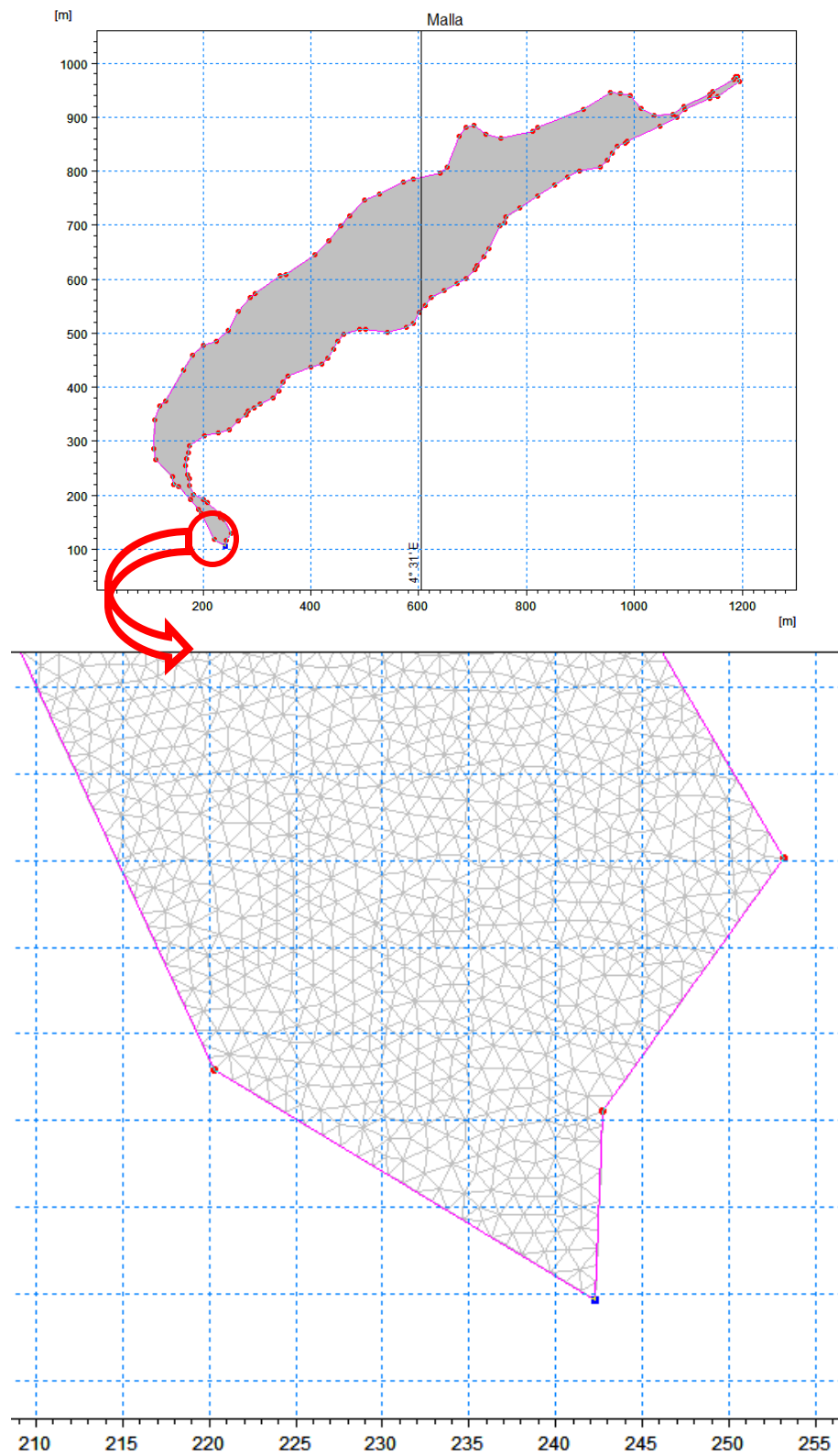
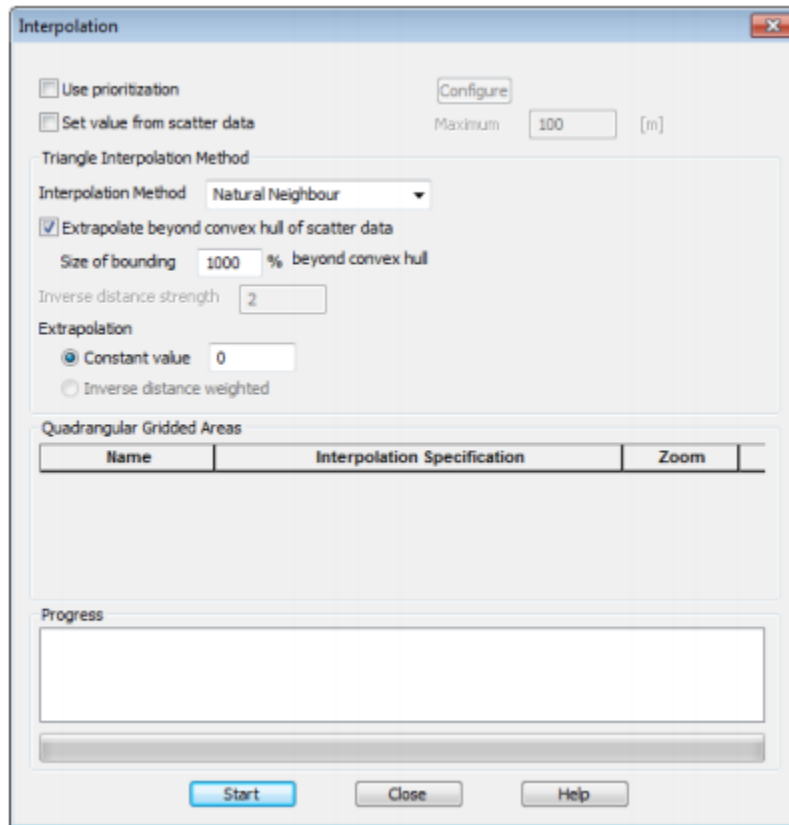


Figura 24. Triangulación de la malla.

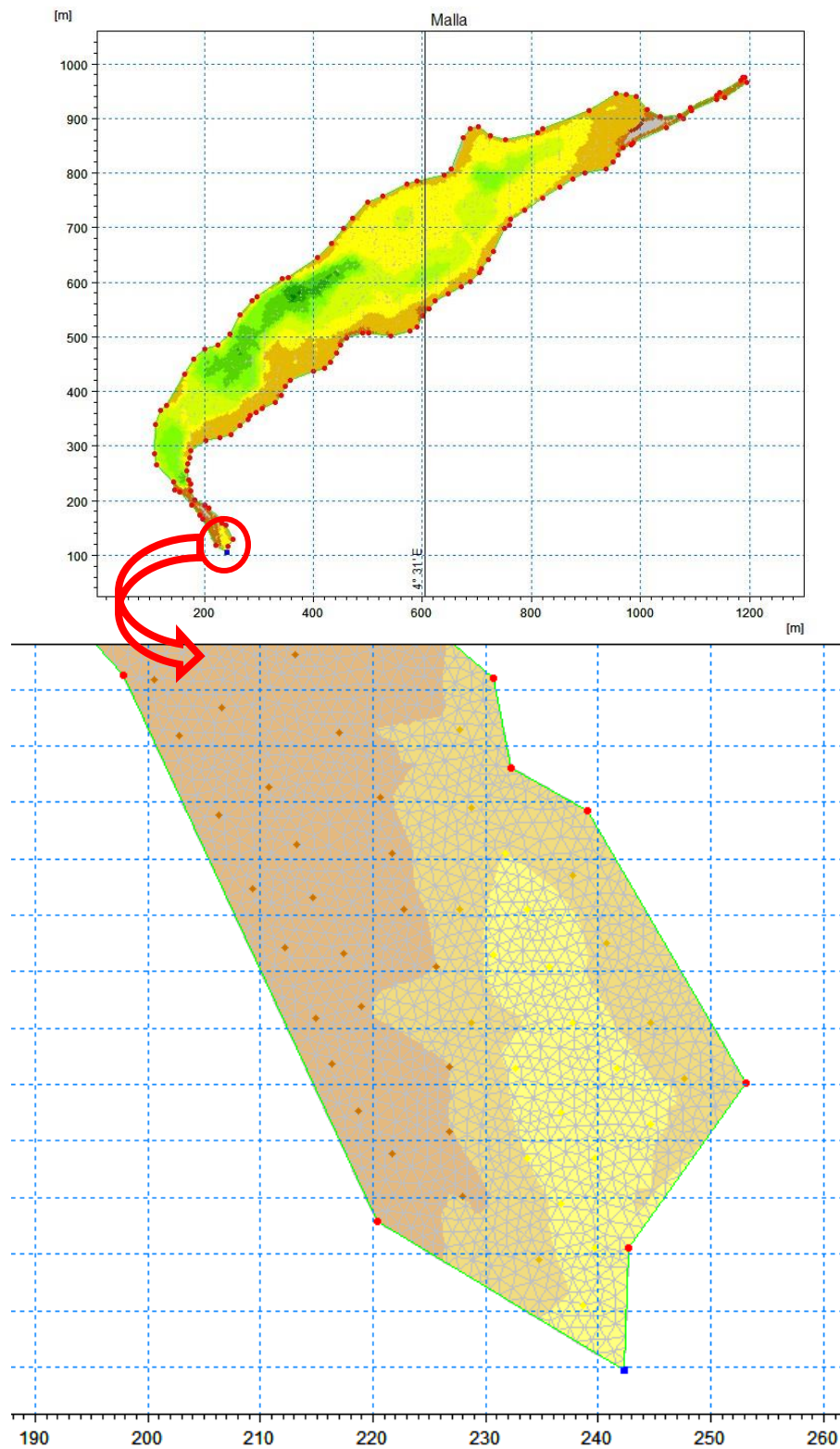


#### 4.3.1.2. Creación de la Malla final

A partir de la malla inicial, se creó la batimetría inicial de todo el cuerpo de agua mediante la interpolación de los datos de dispersión. En la Figura 25 se aprecian las consideraciones utilizadas para la interpolación y en la figura 26 se observa el resultado de la interpolación.



**Figura 25.** Interpolación de la batimetría para todo el dominio.

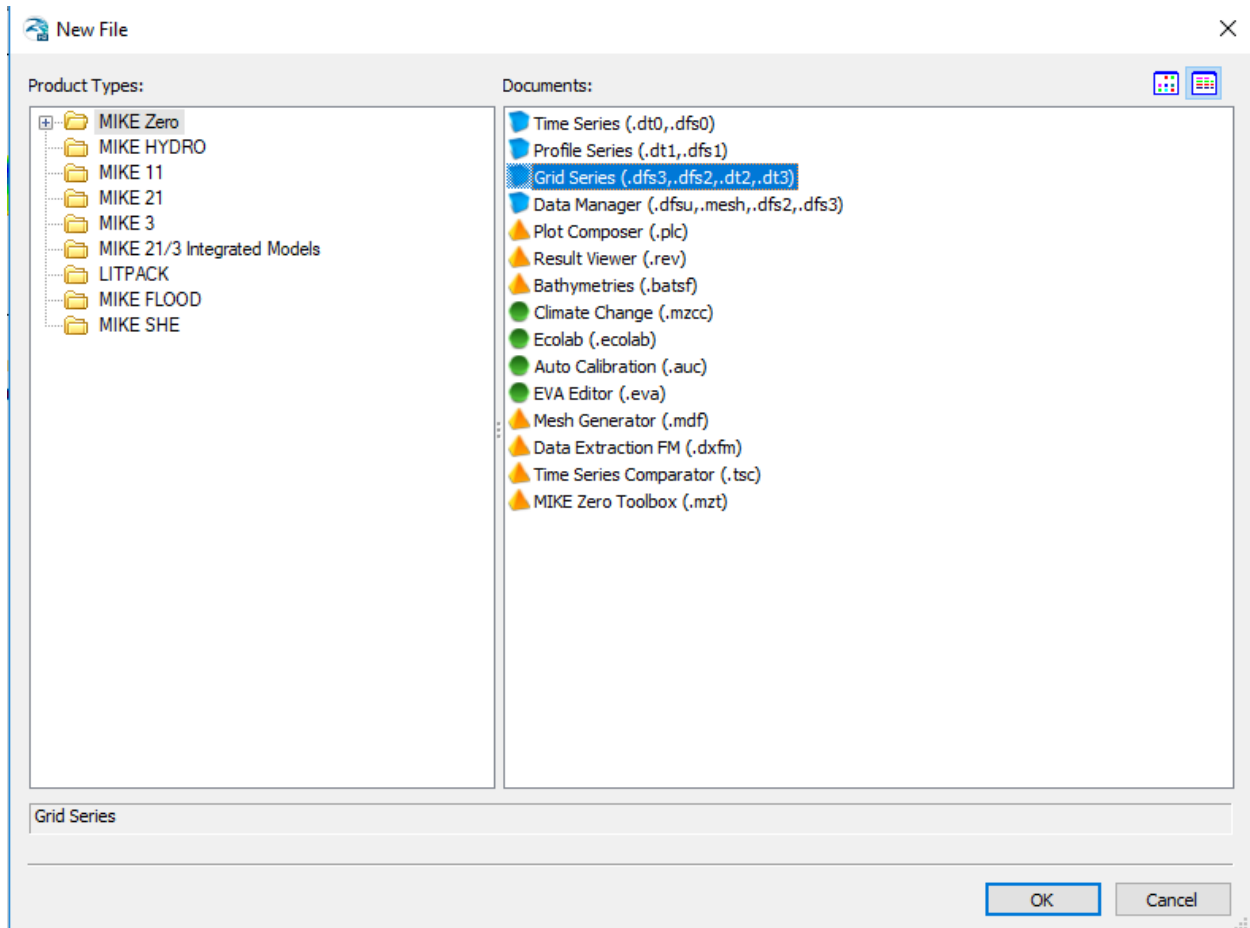


**Figura 26.** La malla tal como aparece en el generador de malla después de interpolar los datos de la profundidad del agua en la malla.



Luego de generar la malla esta se exportó como archivo de formato “.dsfu” para posteriormente convertirla al formato “.dfs2” y poder utilizar la batimetría generada en la modelación hidrodinámica.

Para ello, se utilizó la herramienta editora de cuadrículas en el MIKE ZERO, como se muestra en las Figuras 27 y 28:



**Figura 27.** Editor de mallas.

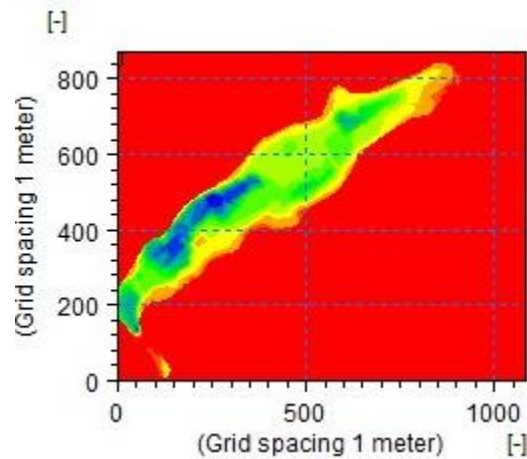


Figura 28. Malla en forma de cuadrícula.

#### 4.3.2. Preparación del modelo para la simulación

Para realizar la simulación de la variación de los niveles del cuerpo de agua en el software, fue necesario seguir los pasos que se van a describir a continuación para establecer un modelo de río simple. Para ello, se utilizó la herramienta MIKE HYDRO (ver Figura 29).

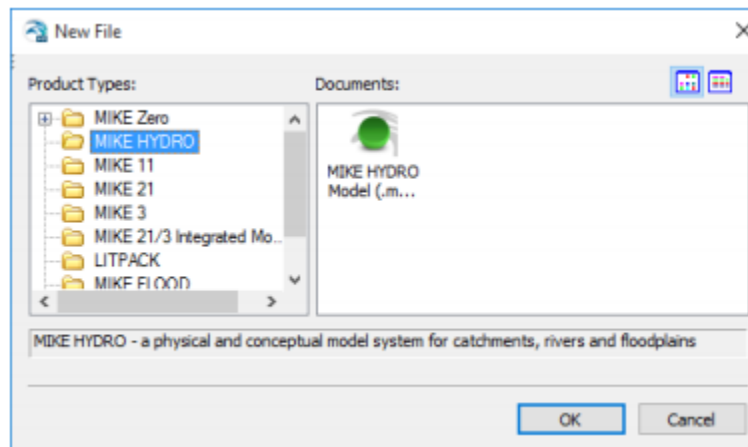


Figura 29. Creación de un nuevo documento MIKE HYDRO.

Luego se definieron los parámetros iniciales para establecer el documento, tales como el tipo de modelo para la simulación, sistema de coordenadas, entre otros, como se puede observar en la Figuras 30 y 31. Para el tipo de modelo, se eligió la opción “Río”.



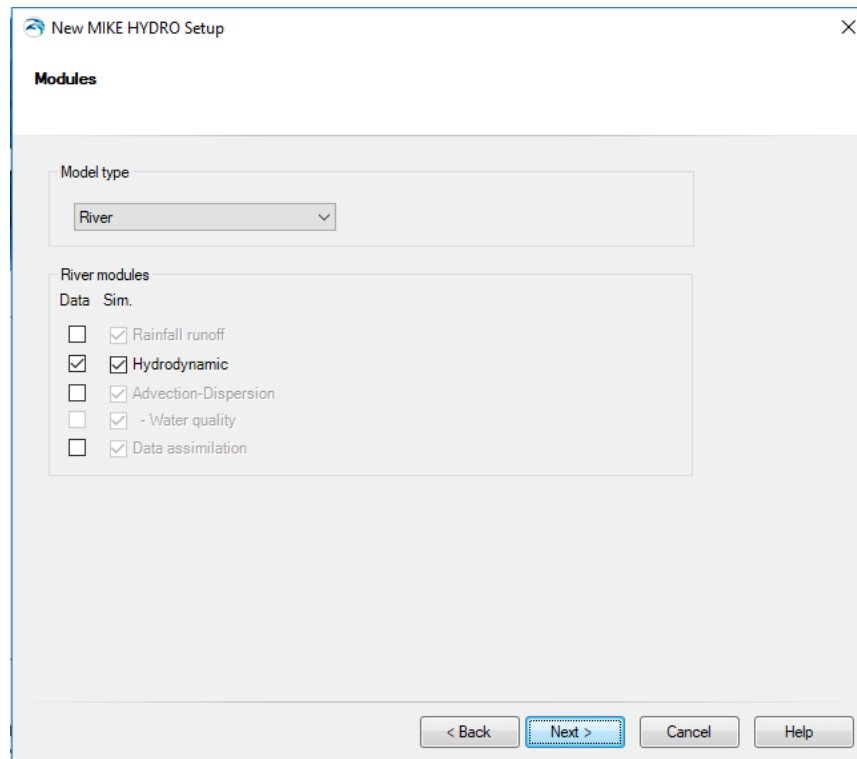


Figura 30. Tipo de modelo del documento.

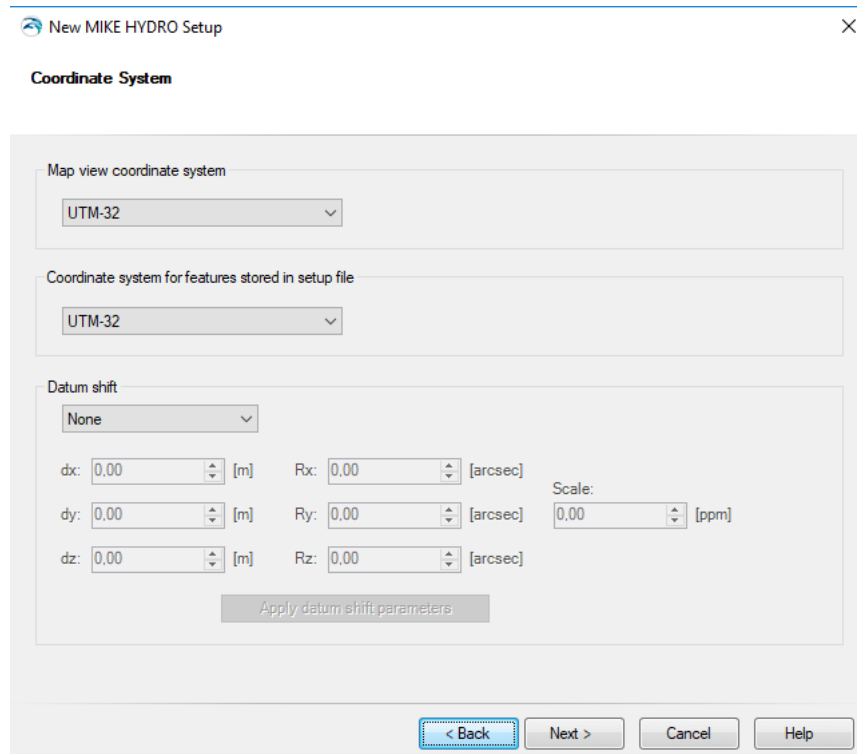


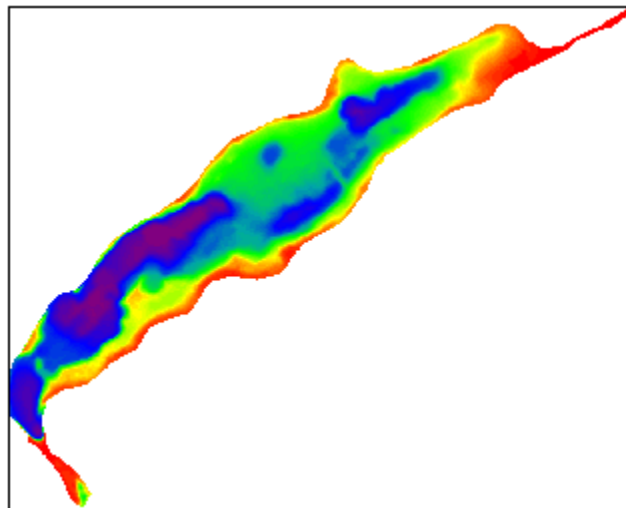
Figura 31. Sistema de coordenadas utilizado.



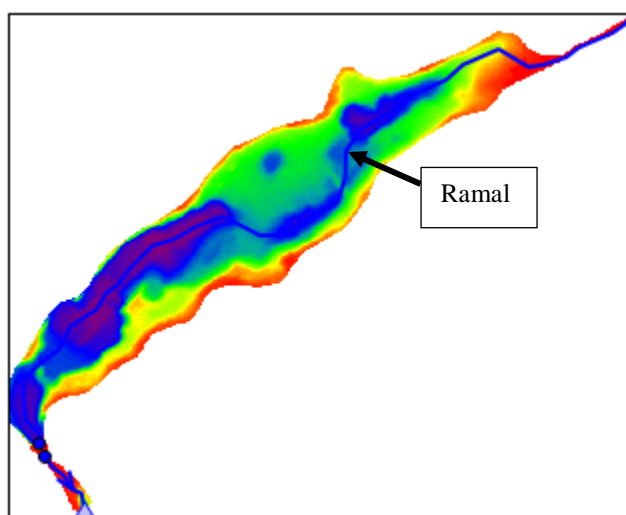
Después, la batimetría generada en formato “.dfs2” fue ingresada a través de la opción “Modelo Digital de Elevación (DEM en inglés)”, y se procedió a trazar un ramal para cada cuerpo de agua, tal como se observa en las Figuras 32 a 34.



**Figura 32.** Modelo digital de elevación.



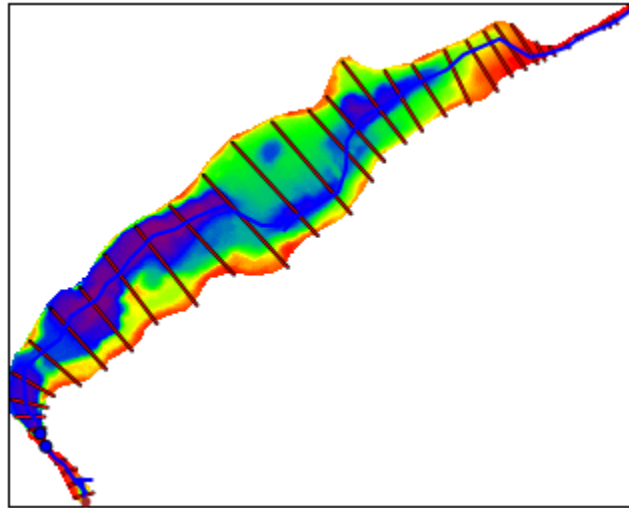
**Figura 33.** Batimetría ingresada al software.



**Figura 34.** Ramal definido para la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú.

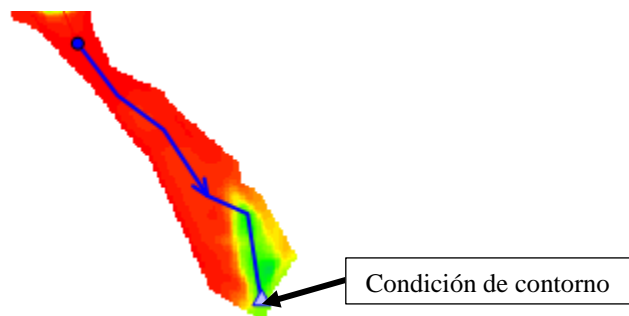


Posteriormente, se trazaron las secciones transversales a lo largo de ambos cuerpos de agua, teniendo como criterio el seleccionar las secciones con mayores irregularidades en la batimetría de cada cuerpo de agua y con áreas variables, es decir, que presentarían anchos superficiales y profundidades diferentes con el fin de tener una mejor idea de la lámina de agua (ver figura 35).



**Figura 35.** Secciones transversales trazadas.

Seguidamente, fue necesario definir tanto las condiciones de contorno como las condiciones iniciales del modelo. En lo que a las condiciones de contorno respecta, estas se definieron en la compuerta de entrada, es decir, en el canal rectangular de 9 m de ancho y 3 m de profundidad, y en las compuertas de salida del sistema, es decir, en las compuertas de Chambacú. El inicio se denominó como “Laguna del Cabrero” mientras que el final como “Compuertas de Chambacú”, por lo tanto, en los siguientes numerales al usar dichos términos hacemos referencia a estos puntos (ver Figura 36).



**Figura 36.** Condición de contorno en Chambacú.

Para ambas, se estableció el tipo de condición como “Nivel del Agua” y el tipo de entrada como “Variable en el tiempo”, como se observa en la Figura 37.



Standard boundaries (2)

Boundary ID: Entrada chambacu

Type: Water level

Location type: Open

Location Branch name: Chambacu

Chainage: 1632.88

Dwstr. chainage: 1632.88

HD boundary

Include boundary

Input type: Time varying

Scale: 1

File: \\Rafael\Desktop\Nuevo\Simulacion\Calibracion chambacu.dfs0

Item: Chambacu

Figura 37. Condiciones de contorno en el ramal.

Como requisito para el tipo de entrada definido, fue necesario crear una serie de tiempo para cada condición, lo cual se hizo utilizando los datos de las variaciones de nivel medidos por Cañate & Guzmán (2016) para el periodo comprendido entre 31/08/2016 00:00:00 hasta 5/09/2016 11:55:00 p.m., tal como se observa en la Figura 38.

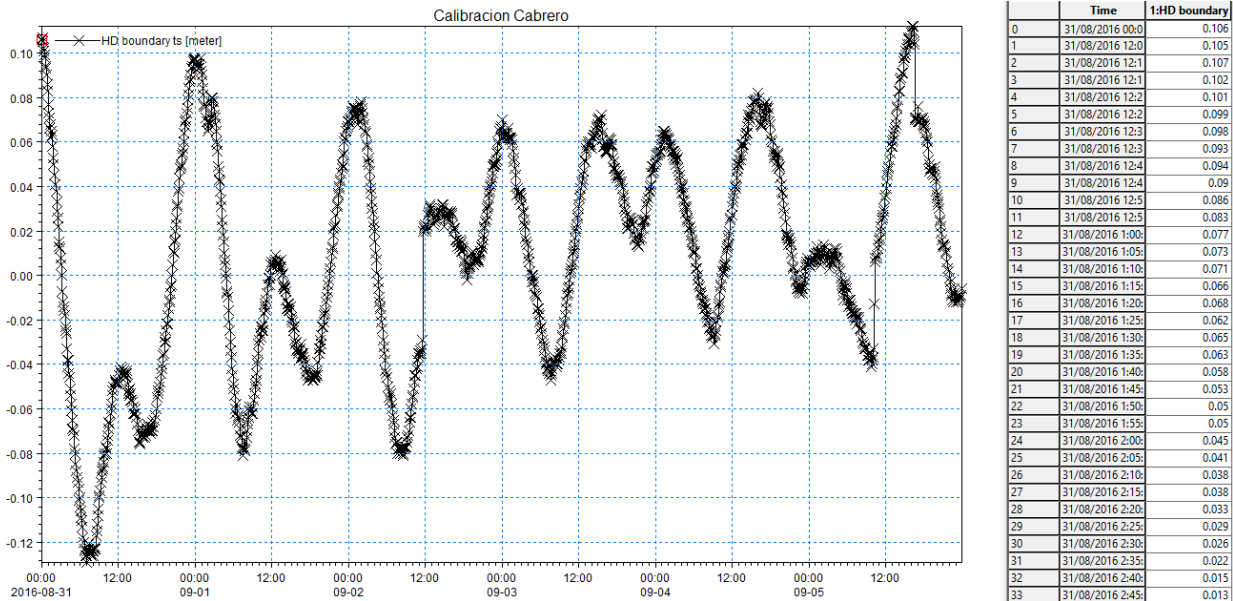


Figura 38. Serie de tiempo para la Laguna del Cabrero.

Las condiciones iniciales del modelo se definieron para “Nivel del agua”. El nivel inicial de Chambacú en el periodo escogido corresponde a 0.107 mientras que para Cabrero corresponde a 0.106 (ver Figura 39).



<input checked="" type="checkbox"/> Local values							
+ - x							
	<input type="checkbox"/>	Branch name	Chainage	Level type	Level / depth	Discharge type	Discharge
	<input type="checkbox"/>	Chambacu	1632,88	Water level	0,107	Natural flow	0
	<input type="checkbox"/>	Cabrero	0	Water level	0,106	Natural flow	0

Figura 39. Condiciones iniciales para la simulación.

Por último, se definieron los parámetros de control computacional para dirigir el comportamiento del motor de cálculo del MIKE HYDRO, como se puede observar en la Figura 40.

Figura 40. Parámetros de control computacional del MIKE HYDRO.

En la Tabla 3 se aprecia los parámetros involucrados en la simulación, su definición y por qué se utilizó el valor establecido.

Tabla 3. Parámetros computacionales involucrados.

Parámetro	Condición Inicial	Definición	Justificación
Aproximación de la onda	Difusiva	Supone que no hay fuerzas de inercia (es decir, los términos inerciales son eliminados de la	Mejora la eficiencia computacional del modelo.



Parámetro	Condición Inicial	Definición	Justificación
		ecuación de momento) (DHI, 2015).	
Coeficiente de centrado temporal para el término de gravedad (Delta):	1	Las inestabilidades son menos probables con valores Delta más altos. El valor grande de Delta (hacia 1.0) tiene un efecto disipativo que puede influir significativamente en la dinámica del modelo (DHI, 2015).	Recomendación del DHI, por el cual se reducen las inestabilidades.
Coeficiente de distribución de velocidad (Alfa):	1	Se utiliza en el término de aceleración convectiva de la ecuación de momento (DHI, 2015).	Este es el valor límite utilizado generalmente en secciones transversales de tamaño regular.
Factor de ponderación, ecuación de momento (Theta):	1	Se utiliza en la parte cuadrática del término de aceleración convectiva de la ecuación de momento (DHI, 2015).	Valor recomendado.
Umbral de pendiente del nivel de agua para onda difusiva aprox. (Eps):	0.0001	Si la pendiente superficial del agua llega a ser mayor que Eps, el esquema computacional se desplegará completamente hacia arriba. El parámetro se puede utilizar para controlar la estabilidad del cálculo (DHI, 2015).	Valor recomendado.
Coeficiente mínimo de pérdida de carga (ZetaMin):	0.1	El coeficiente mínimo de pérdida de carga permitido en el cálculo del flujo sobre las estructuras (DHI, 2015).	Valor recomendado.
Número máximo de iteraciones en las estructuras (MaxIterStruc):	10	El número máximo de iteraciones permitidas en cada paso de tiempo para obtener una solución en una estructura (DHI, 2015).	Valor recomendado. Valores muy altos pueden ralentizar el cálculo para la



Parámetro	Condición Inicial	Definición	Justificación
			solución de las estructuras.
Umbral de profundidad para la creación de ranuras (Delh):	0.1	El factor Delh controla las dimensiones de una "ranura" artificial, que se introduce en una sección transversal para evitar el "secado" de la sección. Permite que un pequeño volumen de agua permanezca en la sección (DHI, 2015).	Recomendación del DHI. Valores bajos evitan las inestabilidades computacionales.
Número de iteraciones en cada paso de tiempo (NoIter):	1	Cada paso de tiempo en una simulación incluye como mínimo una secuencia de resolución de las ecuaciones hidrodinámicas. Por lo tanto, se utiliza la variable Número de iteraciones en cada paso de tiempo para definir el número de iteraciones adicionales realizadas en cada paso de tiempo (DHI, 2015).	El valor predeterminado es 1, lo que significa que se realiza una iteración adicional.
Factor de excedencia máxima para profundidades sobre el nivel del banco (MaxBankDepth):	100	El factor de superación máximo permitido para las profundidades simuladas de agua en comparación con la profundidad máxima en secciones transversales se puede controlar ajustando la variable (DHI, 2015).	Valor recomendado.

#### 4.3.3. Simulación hidrodinámica del modelo

Para la ejecución de la simulación se definió el periodo de simulación, en este caso correspondiente al periodo de calibración que va desde 31/08/2016 00:00:00 a.m. y el 5/09/2016 11:55:00 p.m. (ver **Figura 41**). En esta configuración, la única restricción en el periodo de simulación es el límite del nivel de agua definido anteriormente y el periodo de simulación que se ajusta automáticamente a la extensión del archivo de la serie de tiempo.



Simulation period

Simulation start: 2016-08-31 00:00:00

Simulation end: 2016-09-05 11:55:00

**Figura 41.** Periodo de simulación.

Finalmente, se estableció el paso de tiempo al ir al 'Control de paso de tiempo', correspondiente a un paso de tiempo fijo de 5 minutos como se observa en la **Figura 42**.

Time step control

Time step

Time step type: Fixed time step

Time step definition

Rainfall runoff time step multiplier: 1

Time step length: 5 Minutes

**Figura 42.** Paso de tiempo establecido.

Con esto, se establecieron todos los parámetros y se siguieron todos los pasos indicados para ejecutar la simulación, obteniendo así las variaciones para los cuerpos de agua.





## 5. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo, se presentan los resultados que corresponden a la determinación de los niveles en la Laguna del Cabrero y las Compuertas de Chambacú, comparando los resultados obtenidos al aplicar el MHE UdeC y al realizar la modelación hidrodinámica con sus respectivos parámetros ajustados en el MIKE HYDRO.

### 5.1. MHE UdeC

En la **Tabla 4**, se presentan los parámetros de calibración inicial y operación del modelo hidráulico, cuyos resultados se obtuvieron mediante un análisis de sensibilidad de los coeficientes de entrada y salida.

Cabe resaltar que, para llevar a cabo la simulación hidráulica al aplicar el MHE UdeC, se tuvieron en cuenta las siguientes suposiciones:

- Se analizaron las Compuertas de Chambacú y la Laguna del Cabrero como un cuerpo de agua, siendo la entrada al sistema por la Laguna del Cabrero y la salida del sistema por las Compuertas de la Laguna de Chambacú.
- Se tienen compuertas de entrada en la Laguna del Cabrero, se tomó la sección rectangular de 9 m de ancho.
- Las compuertas de salida son las compuertas en la Laguna de Chambacú. Correspondientes a 2 unidades de 3 m cada una.

**Tabla 4.** Parámetros de entrada al modelo hidráulico del cuerpo de agua.

Parámetros de Modelación	Unidad	
Coefficiente de descarga en las compuertas de salida	Adimensional	0,85
Coefficiente de descarga en las compuertas de entrada	Adimensional	1
Ancho de las compuertas de salida	Metros	6
Ancho de las compuertas de entrada	Metros	9
Área del cuerpo de agua	Hectáreas	17,35
Intervalo de tiempo de simulación	Minutos	5
Profundidad media de las compuertas de entrada y salida	Metros	3

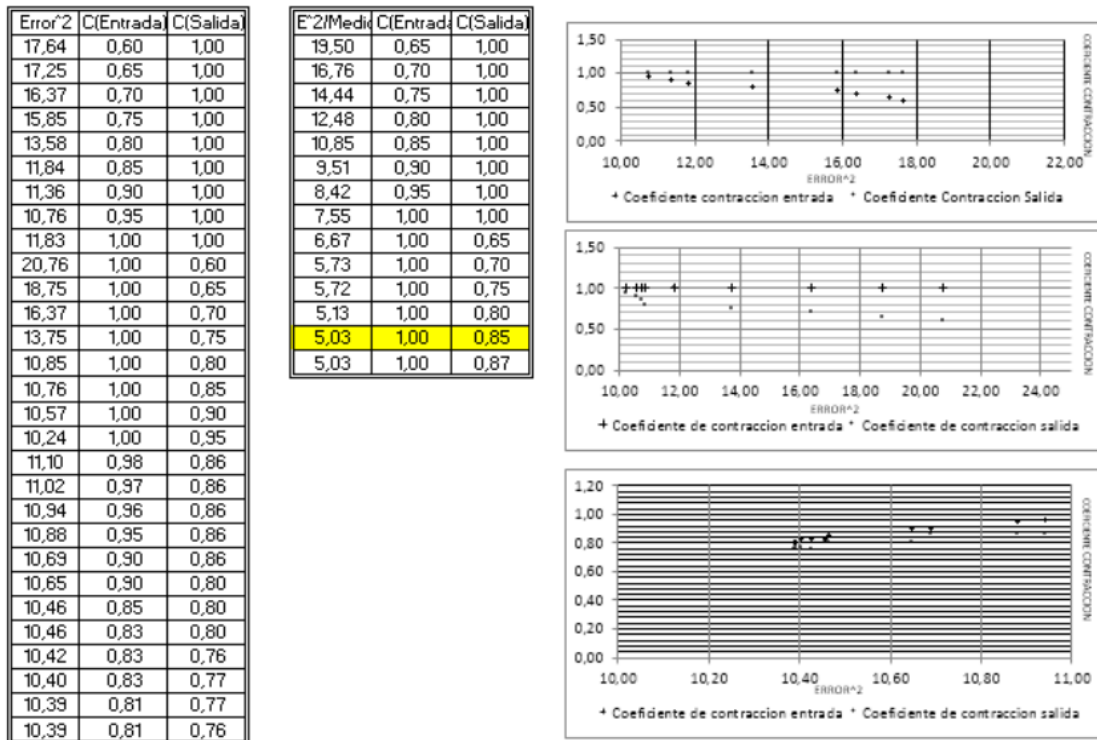


Para la calibración del modelo se consideró como parámetro el coeficiente de descarga de las compuertas. En la **Figura 43** se muestra el mecanismo de calibración del modelo, esto se realizó por el método de ensayo y error, donde se fueron variando de manera aleatoria el coeficiente de contracción a la salida y el coeficiente de entrada tomando datos entre 0.6 y 1, esto con el fin de encontrar el menor error cuadrático posible y tomar los datos de los coeficientes de entrada y salida para realizar la simulación en el MHE UdeC

$$E^2 = (\text{Nivel Medido} - \text{Nivel Simulado})^2 \quad (22)$$

$$E^2_{\text{medio}} = \frac{\sum E^2}{\# \text{ de mediciones}} \quad (23)$$

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

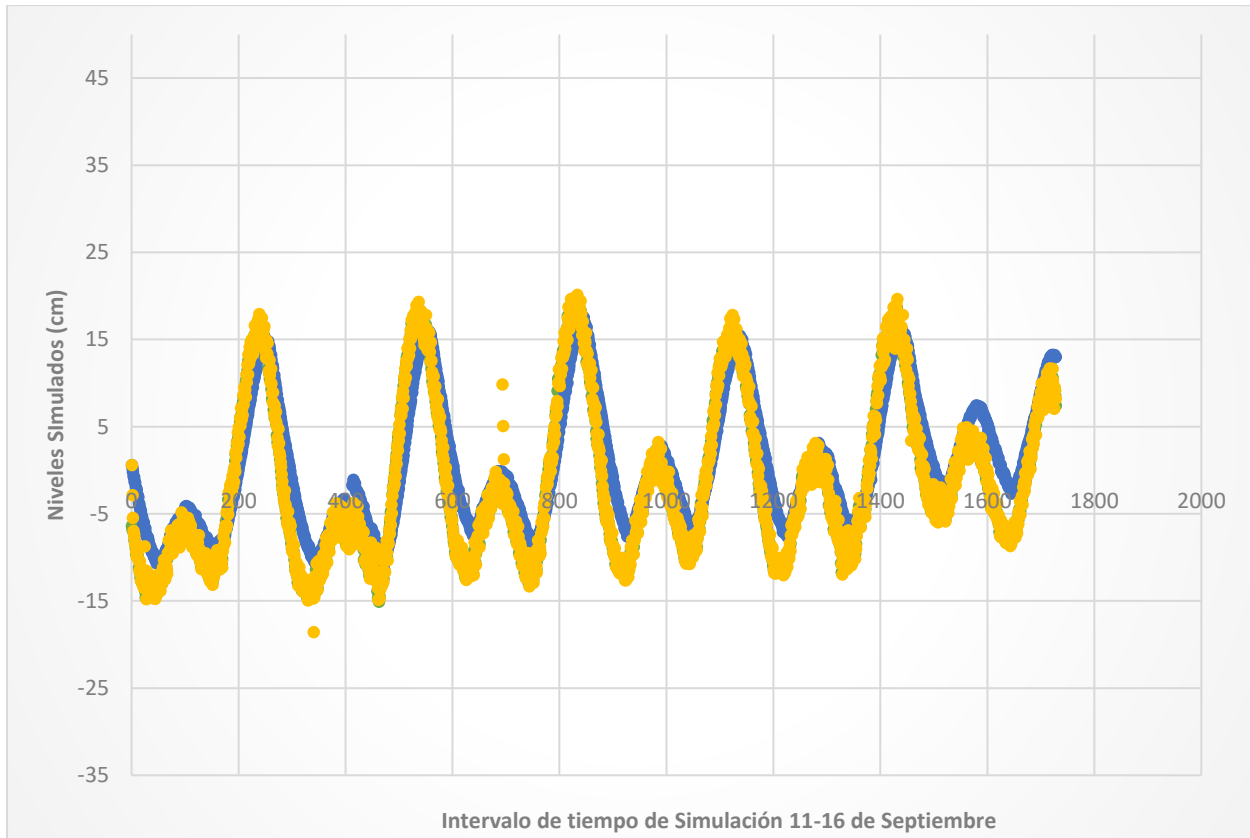


**Figura 43.** Síntesis de resultados de la calibración de los coeficientes de descarga de las compuertas.

Se obtuvo como resultado 0.85 para las compuertas de salida y 1 para las compuertas de entrada, con esos coeficientes obtenidos se pudo proceder a realizar la validación del MHE UdeC, para el



intervalo de tiempo seleccionado y se graficaron en la **Figura 44** esto para luego realizar la comparación con los resultados del software MIKE HYDRO RIVER.



**Figura 44.** Simulación hidráulica.

Como se puede observar en la gráfica anterior tenemos que la curva de validación tiene un comportamiento similar a las gráficas que se tienen de los niveles medidos en campo, estos resultados son los que se compararon con el MIKE HYDRO para medir que tan acertados son los resultados que se obtienen con el MHE UdeC.

El MHE UdeC propuesto en primera instancia tuvo que ser sometido a un proceso de calibración, para luego realizar la simulación. Luego, los resultados fueron comparados con los datos que se midieron en campo y con esta información se realizó la gráfica de los niveles simulados y la curva suavizada (ver **Figura 45**) que contiene la variación de los niveles a través del tiempo que arroja el MHE UdeC.

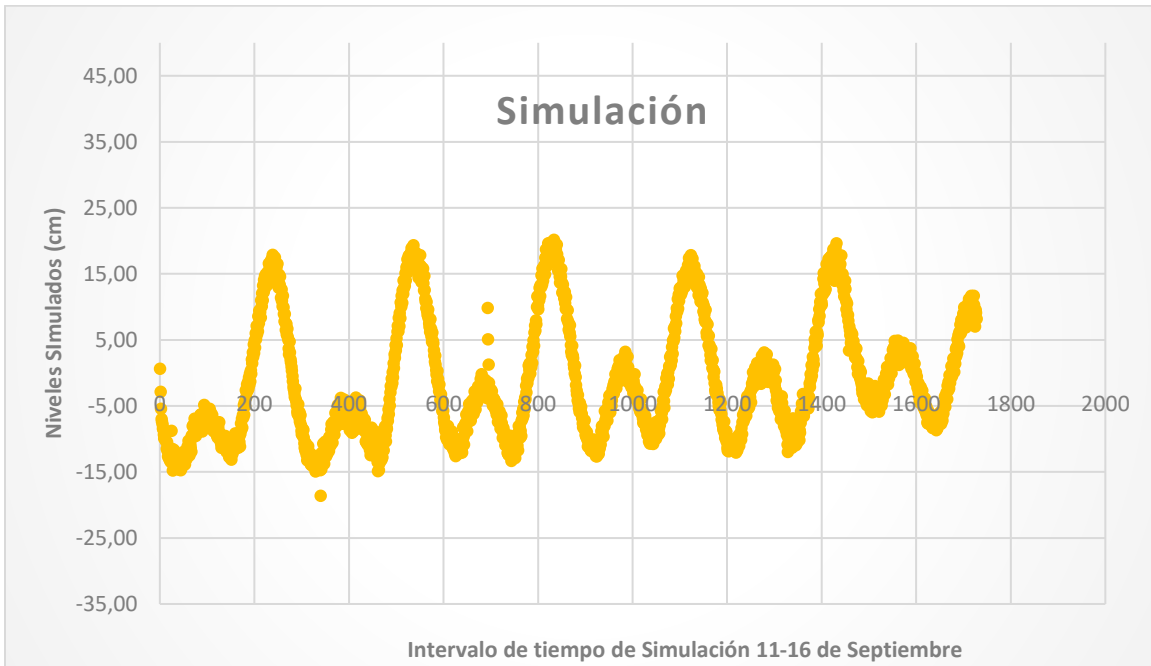


Figura 45. Simulación Hidráulica del Cuerpo de Agua, con la curva suavizada.

## 5.2. MIKE HYDRO

Para la validación se definió el periodo de simulación, en este caso correspondiente al periodo que va desde 11/09/2016 00:00:00 a.m. hasta 16/09/2016 11:55:00 p.m.

Por tanteo de los parámetros computacionales como el coeficiente de centrado temporal para el término de gravedad, coeficiente de distribución de la velocidad, umbral de pendiente del nivel de agua para onda difusiva aproximado y rugosidad, se simuló hasta obtener la menor discrepancia posible evidenciada por el coeficiente de correlación y determinación calculados a través de las ecuaciones 19 y 20.

En las Figuras 46 y 47 se muestra el comportamiento de los datos de las variaciones arrojados por el software y los datos observados durante seis días de monitoreo. En este proceso se observan diferencias en los niveles simulados en los primeros intervalos de tiempo del periodo de simulación en las Compuertas de Chambacú debido a que el comportamiento inicial del modelo empieza en una cota de nivel de agua distinta a la medida. Sin embargo, en la Laguna del Cabrero los resultados fueron los esperados, situación que se puede evidenciar al observar la Figura 47 puesto que no es posible diferenciar la serie de datos obtenida de la simulación con la serie de datos medidos.

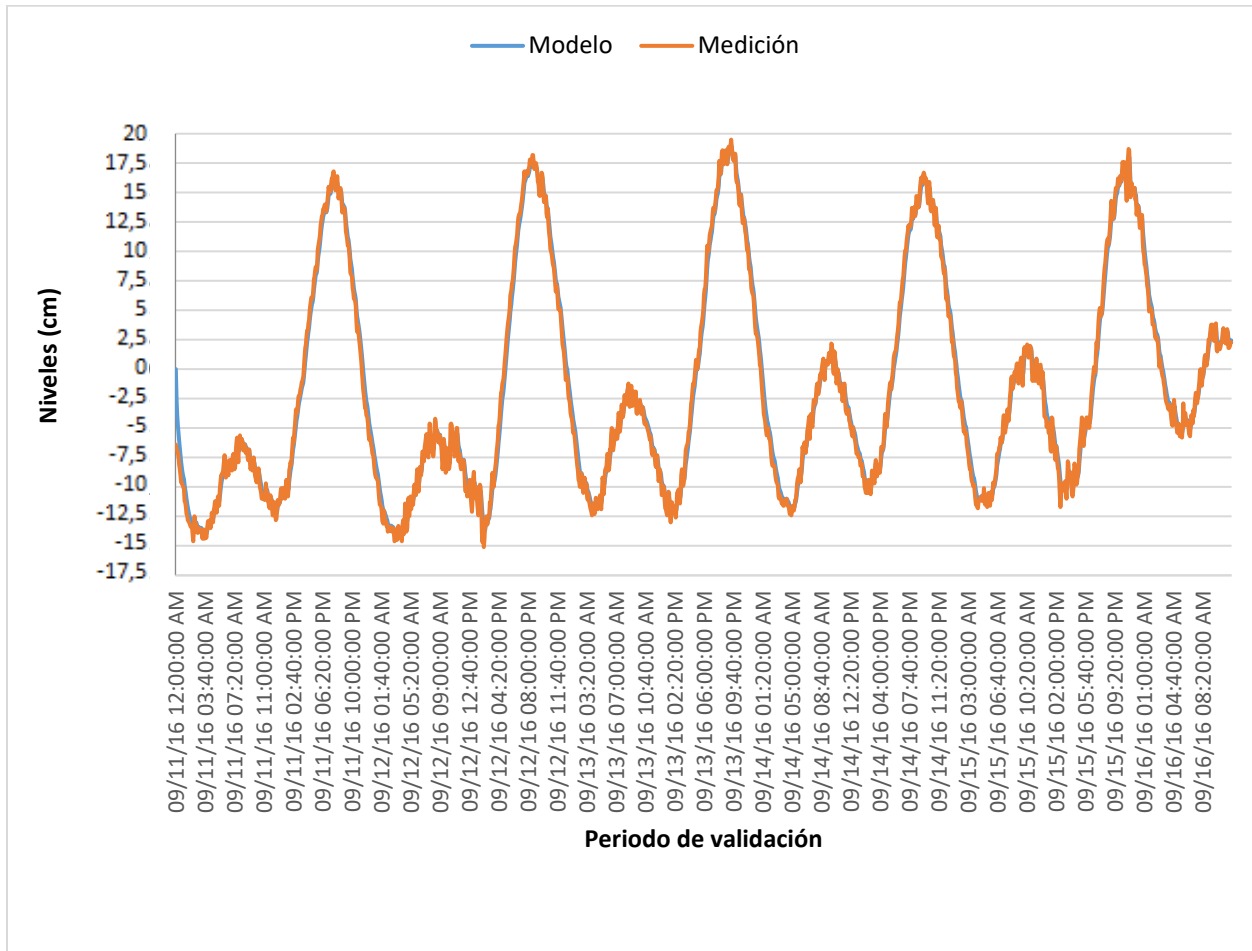
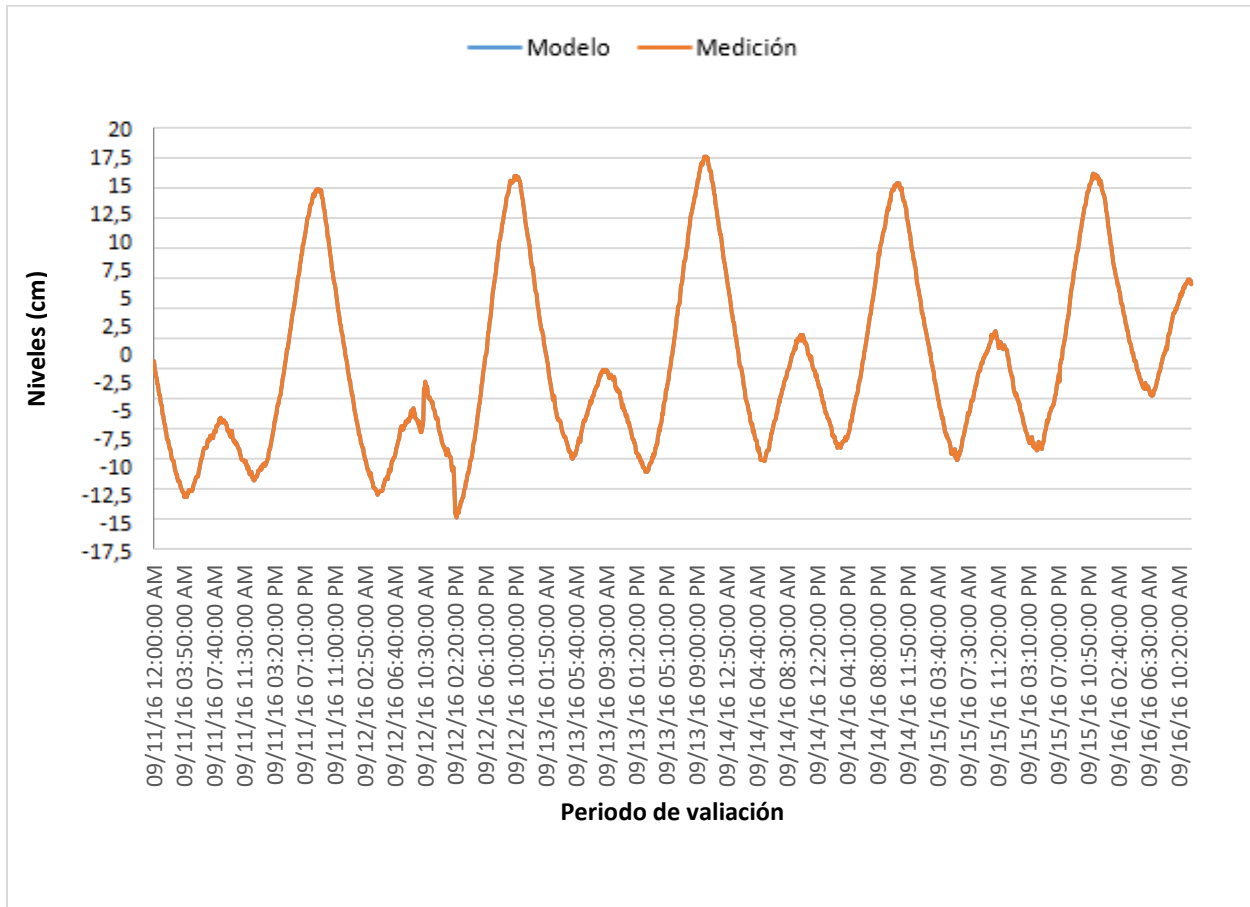


Figura 46. Niveles obtenidos en la validación vs niveles medidos en campo para las Compuertas de Chambacú en el MIKE.



**Figura 47.** Niveles obtenidos en la validación vs niveles medidos en campo para la Laguna del Cabrero en el MIKE.

En la Tabla 5, se muestran los coeficientes de correlación y de determinación determinados a partir de los datos simulados y medidos durante el proceso de la validación.

**Tabla 5.** Coeficiente de correlación y de determinación entre los datos simulados y medidos.

Cuerpo de agua	Validación	
	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación ( $r^2$ )
Compuertas de Chambacú	0,996	0,993
Laguna del Cabrero	0,998	0,997

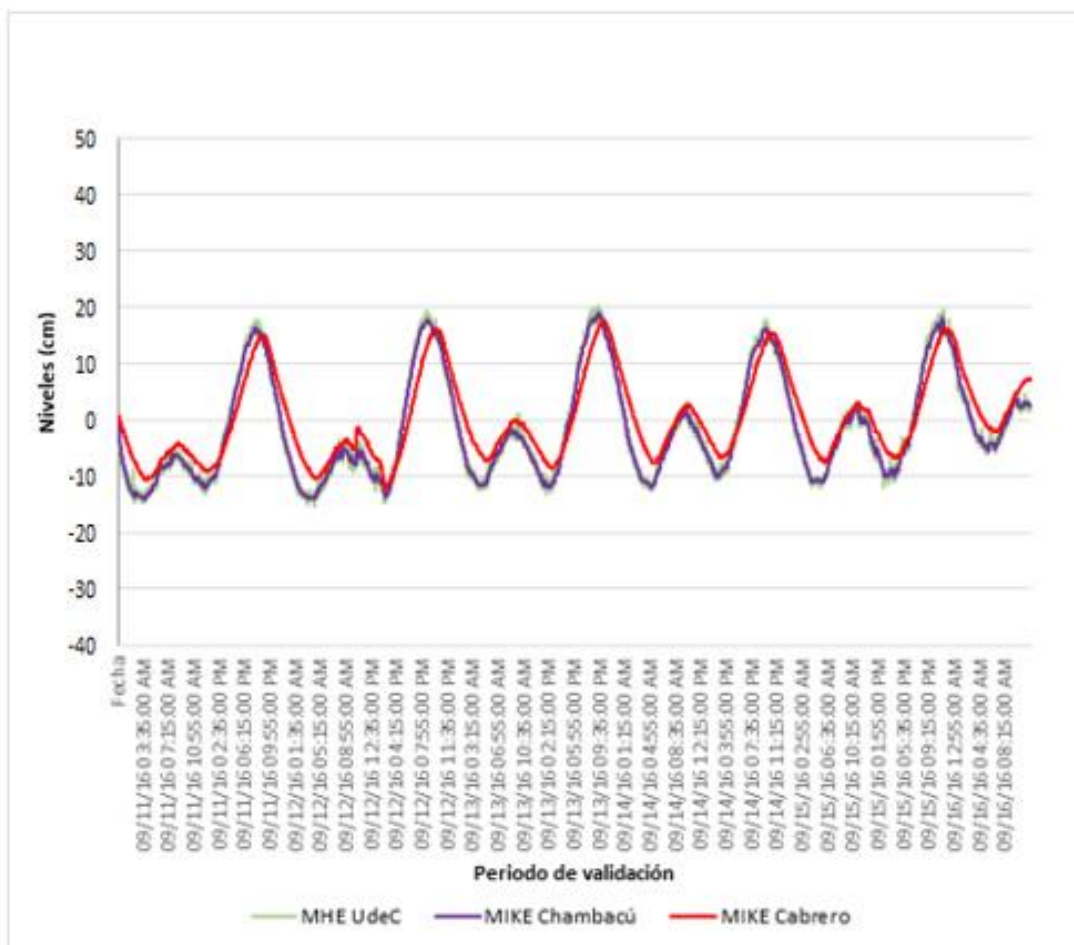
En el proceso de validación, el coeficiente de correlación más alto fue de 0.998 en la Laguna del Cabrero; con respecto al coeficiente de determinación, el valor más alto se obtuvo para la Laguna del Cabrero con 0.997.



A partir de lo anterior se puede deducir que existe una relación alta (0.99+) entre los datos simulados y los medidos tanto para la Laguna del Cabrero como las Compuertas de Chambacú, lo que respalda la veracidad de la modelación hidrodinámica.

### 5.3. CONTRASTE DE RESULTADOS

A continuación se resalta la comparación entre el MHE UdeC y el MIKE HYDRO, con el fin de visualizar la discrepancia entre los resultados obtenidos. Para ello, se graficó la serie de niveles obtenida por el MHE UdeC y las obtenidas para las Compuertas de Chambacú y la Laguna del Cabrero por el software MIKE HYDRO, tal como se observa en la Figura 48.



**Figura 48.** Comparación entre los niveles obtenidos por el MHE UdeC y el MIKE HYDRO.

Se puede observar en la figura que la diferencia entre los niveles obtenidos en el MHE UdeC y el MIKE HYDRO para los cuerpos de agua no es muy grande. Esto se puede verificar con el coeficiente de correlación, el cual es de 0,989 al comparar los resultados obtenidos con los niveles



obtenidos para las Compuertas de Chambacú y de 0,86 al comparar con la Laguna del Cabrero, lo que indica un alto grado de relación entre los datos.

Con el fin de verificar la validez de la información obtenida por el MHE UdeC, se compararon los resultados obtenidos de las mediciones y los resultados obtenidos con un software diseñado, entre otras actividades, para la simulación hidrodinámica de cuerpos de agua (ver Figura 49). Se obtuvo que los datos medidos por el MHE UdeC guardan estrecha relación tanto con los datos medidos en campo y el MIKE HYDRO, lo que demuestra que el MHE UdeC es una herramienta confiable para la simulación de cuerpos de agua, tal como se muestra en la Figura 50.

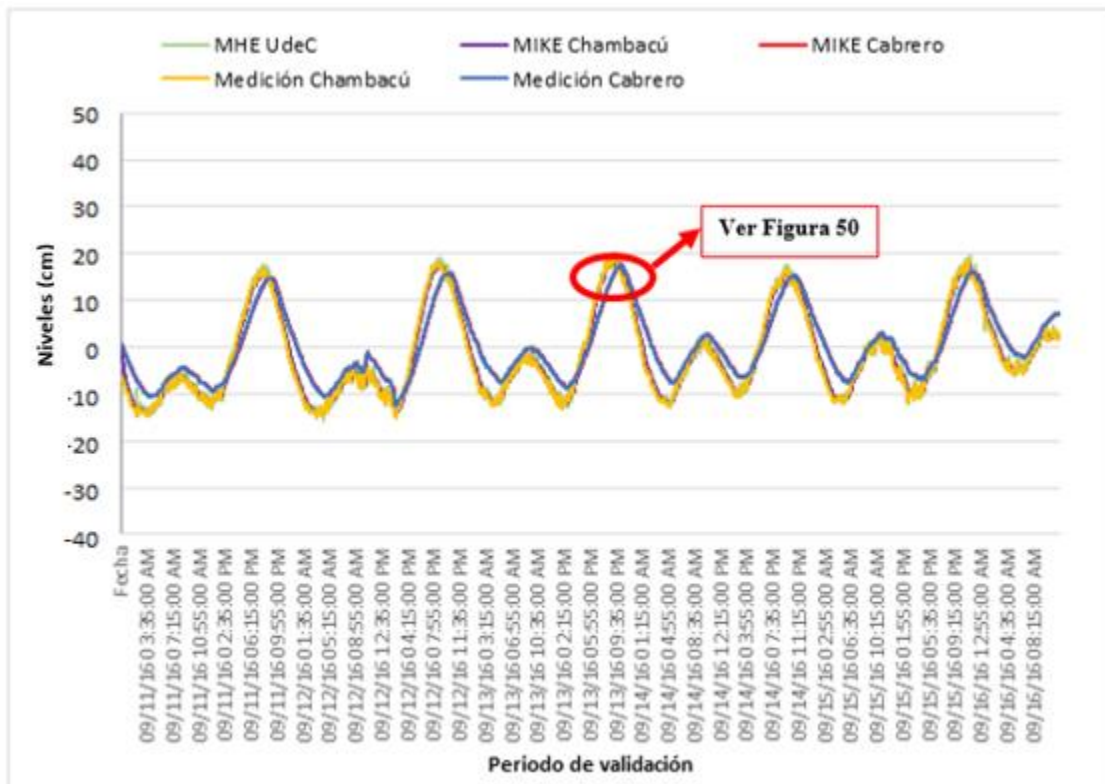
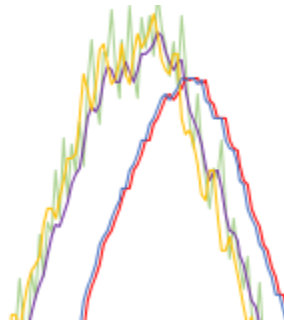


Figura 49. Comparación entre los niveles medidos en campo, el MHE UdeC y el MIKE HYDRO.





**Figura 50.** Comparación entre los niveles medidos en campo, el MHE UdeC y el MIKE HYDRO (Zoom).



## 6. CONCLUSIONES

El Modelo Hidráulico de Estuarios Universidad de Cartagena (MHE UdeC) es sencillo y fácil de calibrar, es por esta razón que se tiene como resultado un modelo de simulación hidráulica que se implementó sobre uno de los cuerpos de agua más importantes de la Ciudad y nos ofrece la oportunidad de simular el comportamiento para el mismo de manera que al contrastar los resultados obtenidos sean lo más cercanos a la realidad.

Este modelo trabajó tomando todo el cuerpo de agua como un grupo completo, desde el punto de entrada hasta las compuertas de salidas, esto permite que se pueda analizar los cuerpos de agua con mayor facilidad.

Al momento de contrastar los resultados obtenidos por el MHE UdeC con los datos medidos por Cañate y Guzmán (2016), se evidencian resultados muy similares en cuanto al comportamiento de los niveles durante el tiempo, con esto podemos afirmar que la herramienta que fue motivo de estudio en esta investigación, cumple los objetivos, obteniendo de esta manera una herramienta que permite simular y estimar los niveles de los cuerpos de agua de la ciudad a través del tiempo.

Sin embargo, se debe resaltar que el MHE UdeC tiene limitaciones debido a que no se tienen en cuenta algunos parámetros y variables que afectan de manera directa el comportamiento de la marea como es el viento, las basuras, la sedimentación, la erosión, entre otros factores, lo que responde a una de las preguntas de investigación, la cual se pudo responder al comparar con la simulación que realizó el software MIKE HIDRO RIVER, ya que este último arroja resultados más parecidos a la realidad debido a que en este se tienen en cuenta muchos de los factores que anteriormente se mencionaron.

Entre las ventajas que nos proporciona el MHE UdeC tenemos que es un modelo muy práctico y confiable que puede ser utilizado para realizar estudios sobre los niveles de la marea en los cuerpos de agua de la ciudad de Cartagena, con esto se puede tener información base para los estudios de inundaciones, el MHE UdeC permite que se tenga una idea clara de cuando se presentan variaciones bruscas de la marea y en qué momento la zona está propensa a sufrir inundaciones, con esto se pueden tomar medidas de prevención y actuar de forma anticipada a los problemas que estas variaciones en los niveles puedan traer. Así mismo, se presenta que la compuerta de



*Simulación hidráulica de los cuerpos de agua comprendidos entre La Laguna del  
Cabrero y las Compuertas de Chambacú de la ciudad de Cartagena – Colombia*

---



Chambacú cuya función es la de regular el flujo del agua en un solo sentido, es manipulada por las personas de los alrededores y pescadores que abren o cierran en su totalidad las compuertas modificando así la función de estas, motivo por el cual los resultados que se obtengan pueden ser no tan acertados al ser analizados con el paso del tiempo en campo.



## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arrieta Pastrana, A. (2016). Simulación hidráulica de las compuertas de marea estabilizada de la Ciénaga de la Virgen de la ciudad de Cartagena - Colombia.
- Arrieta, A., Rejtman, P., & Escorcía, H. (2003). *VALIDACIÓN DE UNA NUEVA METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DE ESTUARIOS Y BAHÍAS EN LA CIÉNAGA DE LA VIRGEN DE LA CIUDAD DE CARTAGENA*. Universidad de Cartagena. ECOCIENCIAS. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/agua2003/escor.pdf>
- Betancur, G. (2013). *Metodología para la selección de modelos hidrodinámicos tridimensionales*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/11664/1/1035830208.2014.pdf>
- Bladé, E., Cea, L., & Corestein, G. (2014). MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE INUNDACIONES FLUVIALES. *Ingeniería del agua*, 18(1), 71-82. doi:<https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>
- Cañate, D., & Guzmán, M. (2016). *PROYECCIÓN DE LOS NIVELES DE INUNDACION ACTUAL Y FUTURA EN EL SISTEMA DE CAÑOS Y LAGOS DE LA CIUDAD DE CARTAGENA*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. (08 de Marzo de 2010). Recuperado el 4 de Marzo de 2017, de Guía para la ejecución técnica, administrativa y financiera de los proyectos financiados con recursos de COLCIENCIAS: <http://www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/documentos/guiaInformesColciencias.pdf>
- DHI. (Noviembre de 2015). MIKE HYDRO: River User Guide.
- García, F., Palacio, C., & García, U. (2012). *SIMULATION OF HYDRODYNAMIC CONDITIONS AT SANTA MARTA COASTAL AREA (COLOMBIA)*. DYNA, 79(174), 119-126. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532012000400016&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532012000400016&lng=en&tlng=en)
- H. Wenrui, J. W. Kent. (2003). Field experiment and hydrodynamic modeling of an stratified estuary in Florida, USA. *Estuaries and Coasts Int. Conf*, pág. 611- 617. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.7717&rep=rep1&type=pdf>
- Junta de andalucia. (s.f.). *Junta de andalucia*. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de [http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/41700038/mediawiki/index.php?title=Las\\_mareas](http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/41700038/mediawiki/index.php?title=Las_mareas).



- Léniz, R. (2008). *Apuntes de Navegación Costera*. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://navegacion.tripod.com/Apuntes2008/Cap07Mareas.pdf>
- Martín, J., López, S., Moreta, P., Simarro, G., & Ferrández, G. (2003). USO DE MODELOS UNI Y BIDIMENSIONALES EN LLANURAS DE INUNDACIÓN. APLICACIÓN AL CASO DEL RÍO TAJO EN TALAVERA DE LA REINA. *Ingeniería del agua, [S.l.]*, v. 10, n. 1, p. 49-58, mar. 2003. ISSN 1886-4996, 49-58. doi:<https://doi.org/10.4995/ia.2003.2576>
- Materón, H., García, J., Arango, D., & Parra, D. (2006). MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA APLICADA A ESTUDIOS DE INUNDABILIDAD EN CAUCES NATURALES CASO DE ESTUDIO: URBANIZACIÓN RÍO NIMA. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 27-38. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231117589003>
- MIKE Powered by DHI. (1 de Junio de 2016). *issuu*. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <https://issuu.com/dhigroup/docs/softwarecatalogue2016es>
- Misaico, G. (2014). *MODELAMIENTO HIDRAULICO DEL RIO LIRCAY EN EL TRAMO DE LA CIUDAD DE OCOPA*. Lircay: Universidad Nacional Huancavelica. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/240/TP%20-%20UNH%20CIVIL%200024.pdf?sequence=1>
- Montoya, L. (2010). *Dinámica oceanográfica del golfo de Urabá y su relación con los patrones de dispersión de contaminantes y sedimentos*. Doctorado thesis, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/5226/1/Cap.1-5.pdf>
- Mosso, A., & Octavio, C. (2004). *Estudio numérico-experimental de la dinámica de la zona cercana a la costa*. Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://hdl.handle.net/10803/6389>
- Organizacion Hidrográfica Internacional. (2010). *Manual de Hidrografía*. Mónaco: Bureau hidrográfico internacional.
- Palacio, C., García, F., & García, U. (2010). *CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO 2D PARA LA BAHÍA DE CARTAGENA*. *DYNA*, 77(164), 152-166. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532010000400016&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532010000400016&lng=en&tlng=es)
- Poveda, R., Hidalgo, X., & Castro, M. (Agosto de 2003). Sobre la modelación hidráulica en obras de saneamiento básico. *AIDIS*, 1-22. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/ecuador10/leo.pdf>



- Santos, A., Cubillos, C., & Vargas, A. (Mayo de 2008). Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 45-54. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://www.redalyc.org/pdf/1450/145016896005.pdf>
- Serrano, J. (2013). *APLICACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO LÍNEAL AL ESTUARIO DEL GUADALQUIVIR MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE PRANDLE DE CLASE I PARA GEOMETRÍAS EXPONENCIALES*. Sevilla: Escuela superior de ingeniero de Sevilla. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://0-bibing.us.es.fama.us.es/proyectos/abreproy/5392/fichero/5.pdf>
- Timbe Castro, L., & Patrick, W. (2011). DESEMPEÑO DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS 1D Y 2D PARA LA SIMULACION DE INUNDACIONES. *Maskana*, 2(1). Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5401/1/MASKANA%20si5938%20%282%29.pdf>
- Torres, E., & Gonzalez, E. (2011). APLICACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA HEC-RAS PARA LA EMISIÓN DE PRONOSTICOS HIDROLÓGICOS DE INUNDACIONES EN TIEMPO REAL, EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ - SECTOR ALICACHIN. *Revista Ingenio Libre*. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista10/articulos/aplicaci%C3%B3n-del-modelo-de-simulacion-hidr%C3%A1ulica-hec-ras.pdf>
- Universidad de Cartagena, EPA. (2015). *DISEÑO DE SISTEMA INTELIGENTE DE MONITOREO DE CALIDAD AMBIENTAL DEL DISTRITO DE CARTAGENA*. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://observatorio.epacartagena.gov.co/ftp-uploads/dt-tomo-ii-estudio-integral.pdf>
- Velasquez, A. (2015). *MODELAMIENTO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DEL RIO SANTA, TRAMO ASENTAMIENTO HUMANO LAS FLORES, DISTRITO DE CARHUAZ, ANCASH*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ingeniería Agrícola. Dpto. Acad. Recursos Hídricos. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1836>