

MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DISEÑO Y GESTIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS

NUMERICAL MODELING FOR DESIGN AND MANAGEMENT OF WATER RESOURCES SYSTEMS

A.N. Menéndez^a, N.D. Badano^a, P.E. García^b y L. Bindelli^b

^a *Hydronumerical Consultancy Services, Argentina, anmenendez@gmail.com,*
<https://www.hydronumerical.com/>

^b *Consultor Independiente, pabloegarcia@gmail.com*

Palabras clave: Modelación hidrodinámica, ciénagas, calibración, diseño, gestión ambiental.

Resumen. La modelación hidrodinámica bidimensional de flujos a escala geofísica ya está instalada como un paradigma para muchos estudios de ingeniería. En este trabajo se describe la modelación del sistema hídrico del Canal del Dique, en Colombia, constituido por ese extenso curso de agua artificial y una numerosa sucesión de ciénagas parcialmente interconectadas entre sí y con el canal, en el marco de los estudios para optimizar el diseño y la operación de obras de sistematización. La modelación planteó el desafío de combinar la pequeña escala espacial del flujo canalizado con la gran escala del flujo en las ciénagas. Además, incluyó la representación del régimen puramente fluvial en el tramo superior junto con el régimen mareal en el tramo inferior, y la interacción de flujo y reflujo entre canal y ciénagas, y entre las ciénagas. La calibración y validación del modelo se llevó a cabo en base a la comparación con mediciones de nivel de agua, velocidad de la corriente y caudales en distintas secciones, para diferentes condiciones hidrológicas. A continuación se ensayaron escenarios incluyendo las obras. Algunas simulaciones se extendieron sobre intervalos de tiempo de meses, debiéndose recurrir entonces a procesamiento de alta performance en la nube. El objetivo de la modelación fue contestar preguntas de diseño ingenieril y de gestión ambiental.

Keywords: Hydrodynamic modeling, marshes, calibration, design, environmental management.

Abstract. Two-dimensional hydrodynamic modeling of geophysical-scale flows is already established as a paradigm for many engineering studies. This paper describes the modeling of the Canal del Dique water system in Colombia, comprised of this extensive artificial watercourse and a numerous succession of partially interconnected marshes and the canal, within the framework of studies to optimize the design and operation of systematization works. The modeling challenged combining the small spatial scale of channeled flow with the large scale of flow in the marshes. It also included the representation of the purely fluvial regime in the upper reach, along with the tidal regime in the lower reach, and the interaction of ebb and flow between the channel and marshes, and between the marshes. The model was calibrated and validated based on comparisons with water level, current velocity, and flow measurements in different sections, under different hydrological conditions. Scenarios including the works were then tested. Some simulations extended over time intervals of months, requiring high-performance cloud processing. The objective of the modeling was to answer engineering design and environmental management questions.

1 INTRODUCCIÓN

El sistema hídrico del Canal del Dique, en Colombia, es un complejo entramado de un canal artificial principal y una serie de ciénagas interconectadas, que juegan un papel fundamental en la hidrología, ecología y socio-economía de la región Caribe colombiana (Figura 1). Se ha planteado un proyecto de sistematización para controlar el flujo de agua y sedimentos a lo largo del sistema, de modo de alcanzar un balance ambiental y social más satisfactorio que el del presente, mejorando la calidad de las aguas en zonas costeras críticas y reduciendo los riesgos de inundación, pero al mismo tiempo garantizando la navegabilidad y la provisión de agua para uso en las ciénagas. Para analizar a priori la eficacia de ese control, se encararon estudios de modelación numérica.

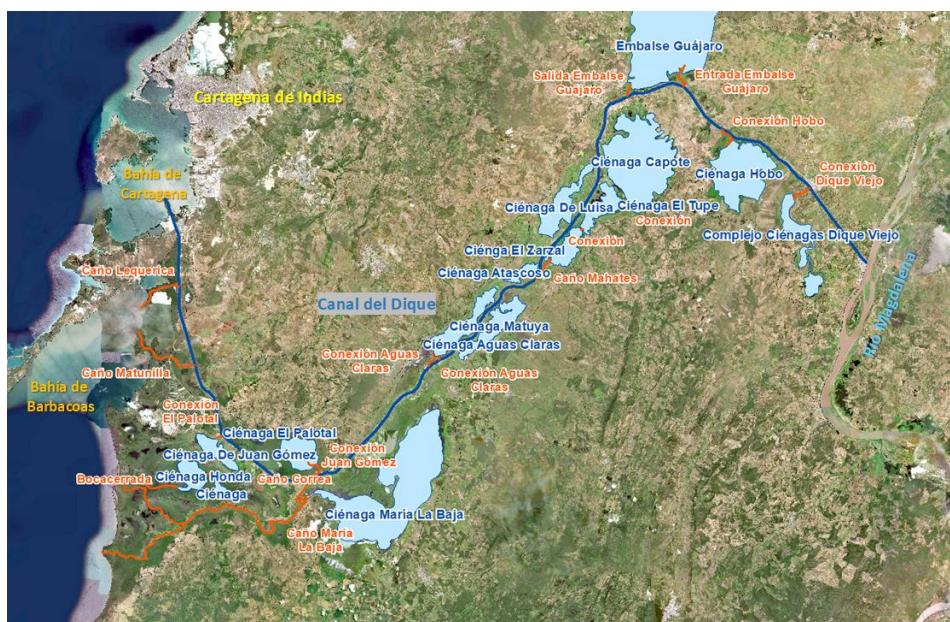


Figura 1: Sistema hídrico del Canal del Dique.

Como base se desarrolló un modelo hidrodinámico bidimensional (integrado en la profundidad) de toda la cuenca del Canal del Dique (870 km^2). Este combina la pequeña escala espacial del flujo canalizado con la gran escala del flujo en las ciénagas. Además, incluye la representación del régimen puramente fluvial en el tramo superior junto con el régimen mareal en el tramo inferior, y la interacción de flujo y reflujo entre canal y ciénagas, y entre las ciénagas.

En este trabajo se describen los criterios de implementación y calibración del modelo, que resultan útiles para su réplica en aplicaciones similares. También se presentan resultados de su aplicación a la situación de proyecto, que ilustran su uso para responder preguntas de diseño ingenieril y de gestión ambiental.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DEL CANAL DEL DIQUE

El Canal del Dique es una bifurcación artificial del río Magdalena, la principal arteria fluvial de Colombia, que desemboca en la Bahía de Cartagena (Figura 1). Su construcción se inició en la época colonial, con el objetivo de conectar el interior del país con la importante ciudad portuaria de Cartagena, evitando la difícil navegación por la desembocadura del río Magdalena en Bocas de Ceniza. A lo largo de los siglos ha sido objeto de diversas modificaciones, dragados y rectificaciones para mejorar su navegabilidad y capacidad de transporte. Actúa como una vía

fluvial crucial para el transporte de carga. También influye significativamente en la hidrología de las zonas aledañas y en el intercambio de agua dulce y salada con las ciénagas y la Bahía de Cartagena. Tiene una longitud de aproximadamente 115 kilómetros. Su caudal y régimen hidrológico están directamente influenciados por las variaciones del río Magdalena. Transporta grandes cantidades de sedimentos del río hacia las ciénagas y la bahía, generando problemas de sedimentación y afectando los ecosistemas.

A lo largo del Canal del Dique se encuentra una serie de importantes ciénagas o lagunas costeras, interconectadas entre sí y con el canal principal a través de “caños” o canales naturales y artificiales. Ellas cumplen funciones ecológicas vitales: hábitat de biodiversidad, regulación hídrica, filtro natural, soporte de pesca artesanal.

3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

La herramienta fundamental para el estudio del presente problema es la modelación numérica hidrodinámica, dotada de capacidad suficiente para representar las distintas escalas espaciales (desde el flujo encauzado al flujo distribuido) y temporales (desde el régimen fluvial al régimen mareológico) de los diversos procesos que tienen lugar. En particular, se ha planteado la implementación de un modelo hidrodinámico de tipo bidimensional (2D) – es decir, integrado sobre la profundidad – abarcando toda la cuenca del sistema hídrico, es decir, el canal y las ciénagas. La aproximación 2D es genuina, ya que las escalas espaciales de interés son mucho mayores que las profundidades de agua. El dominio de modelación se extiende desde el inicio del Canal del Dique hasta su desembocadura en el Océano a través de sus distintas bocas, incluyendo toda el área de ciénagas con la cual se intercomunica ([Figura 1](#)).

Se dispuso de un Modelo Digital de Elevación (MDE) integrado de la batimetría del CDQ y de la topografía del área territorial, incluyendo las ciénagas, con un paso de resolución de 1 m, reducido a 0.5 m sobre los canales y caños.

Se construyó una malla de discretización no estructurada, capaz de resolver mediante densificación los cursos de agua, utilizando la aplicación BlueKenu. El paso de malla varía desde alrededor de 5 m en las zonas de máxima densificación (cursos de agua) hasta 150 m en la de mínima densificación (áreas abiertas), lo que dio lugar a 888,000 celdas de cálculo. En la [Figura 2](#) se muestran algunas vistas de la malla. La generación de la malla no estructurada para este gran sistema fue un ejercicio trabajoso porque debe garantizarse su calidad (en cuanto a relación de aspecto de los elementos), lo cual requiere de intervenciones manuales que insumen muchas horas de trabajo. Adicionalmente, las corridas del modelo fueron muy costosas computacionalmente, por su alta resolución. Por lo tanto, se trabajó de entrada con una malla muy fina en relación a los anchos de flujo, para las cuales las buenas prácticas indican que los efectos del paso de malla son despreciables frente a los errores de las mediciones que se utilizan para calibrar/validar el modelo, con lo cual se evita efectuar costosos análisis de convergencia.

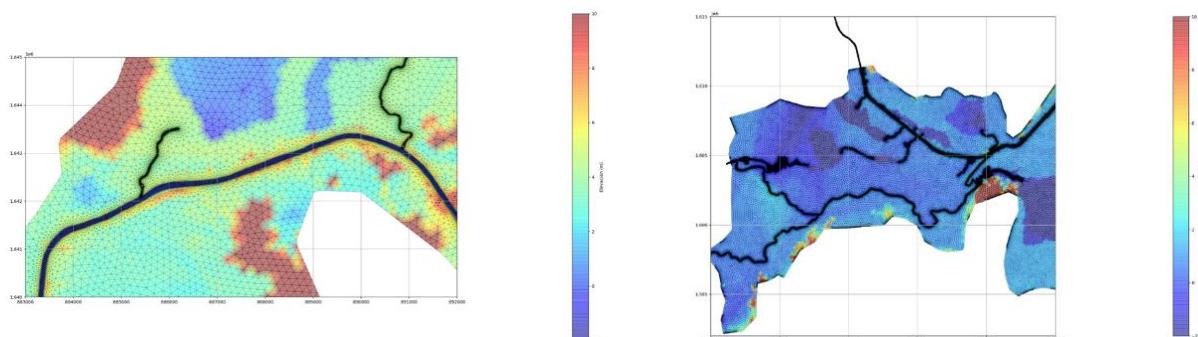


Figura 2: Vistas de malla de cálculo. Izquierda: zona media; derecha: zona del delta.

Se empleó el software de distribución libre a código abierto TELEMAC 2D¹, disponible bajo GPLv3, que resuelve numéricamente las ecuaciones de aguas poco profundas (Weiyan, 2012) utilizando el método de volúmenes finitos sobre una malla computacional no estructurada.

Se definieron cuatro zonas con texturas diferenciadas para representar la resistencia hidráulica del fondo, asignándose valores del coeficiente de rugosidad de Manning compatibles con las texturas de las superficies, condicionada eventualmente por la vegetación (Ven Te Chow, 1959): 0.035 para las planicies, 0.025 para el embalse y 0.050 para las ciénagas. Para el canal se estableció inicialmente un valor uniforme de 0.020, compatible con un lecho de material fino sin formas de fondo, pero esto fue ajustado durante la calibración (ver más abajo).

La viscosidad de torbellino se fijó en un valor constante y relativamente bajo, de 0.05 m²/s. No se detectó sensibilidad de los resultados a este parámetro, ya que no se producen zonas de altos gradientes de velocidad a esta escala de resolución.

Las condiciones de borde fueron las siguientes: (a) Ingreso al Canal del Dique: caudal; (b) Puntos de descarga hacia el Océano: nivel de la marea.

El nivel de agua en las ciénagas (y, en consecuencia, su extensión areal) está condicionado principalmente por los intercambios con el Canal del Dique y las ciénagas vecinas durante las crecidas, mecanismo resuelto por el modelo. Adicionalmente existe una acción climática directa (aporte de agua por precipitaciones y pérdida por evaporación) que genera una variación periódica de su nivel (y su área) de menor significación, y que se analizó por separado.

Se empleó un esquema implícito y una discretización espacial de segundo orden. El paso temporal se fijó en 2 segundos, que implica un número de Courant máximo de alrededor de 2 en términos de la celeridad de las ondas de gravedad, suficientemente bajo como para lograr una precisión adecuada en la simulación de la onda de marea.

4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Tal como se indicó anteriormente, el parámetro de calibración es el coeficiente de rugosidad de Manning para el canal, ya que la baja dinámica relativa en el resto de las zonas hace que los resultados sean muy poco sensibles a variaciones en el correspondiente valor de ese parámetro.

Para calibrar el modelo se utilizaron datos de mediciones de caudal, nivel de agua y velocidad de corriente, para distintos sitios a lo largo del sistema y para tres situaciones hidrológicas distintas caracterizadas por los caudales de ingreso al Canal del Dique.

Para definir los escenarios de ensayo se aprovechó como ventaja que la escala de tiempo de respuesta del Canal del Dique a cambios en el forzante dinámico (el caudal de ingreso) es mucho menor que la de las ciénagas. Entonces, se establecieron las siguientes condiciones: (i) se impuso el caudal de ingreso como condición de borde de aguas arriba constante en el tiempo; (ii) se fijó el nivel en las descargas al mar igual al nivel medio del mar, lo cual significa despreciar los efectos de la marea; (iii) se impuso como condición inicial un nivel muy bajo, igual al nivel medio del mar, en todo el sistema.

Las corridas procedieron hasta la estabilización de los caudales en las diversas ramas y conexiones. Se generaron así condiciones de flujo quasi-estacionario en el Canal del Dique, mientras las ciénagas continuaban llenándose (las corridas se suspendieron antes de que las ciénagas se llenen), lo cual permitió entonces hacer la comparación con las mediciones asociadas a cada caudal de ingreso.

Se buscó el mejor acuerdo cuantitativo entre resultados del modelo y las observaciones. Dado que se trata de un problema de ajuste simultáneo a 9 juegos de mediciones (3 variables para 3 condiciones hidrológicas) en 12 estaciones a lo largo del canal, el proceso de ajuste fue visual. Se hizo con un criterio de prueba y error, apuntando al mejor acuerdo global. El valor

¹ <https://www.opentelemac.org/index.php/presentation?id=17>

óptimo del coeficiente de rugosidad de Manning para la zona canal resultó de 0.018. A título ilustrativo, la [Figura 3](#) muestra los resultados del ajuste para el caudal de ingreso de $370 \text{ m}^3/\text{s}$, observándose un acuerdo muy satisfactorio.

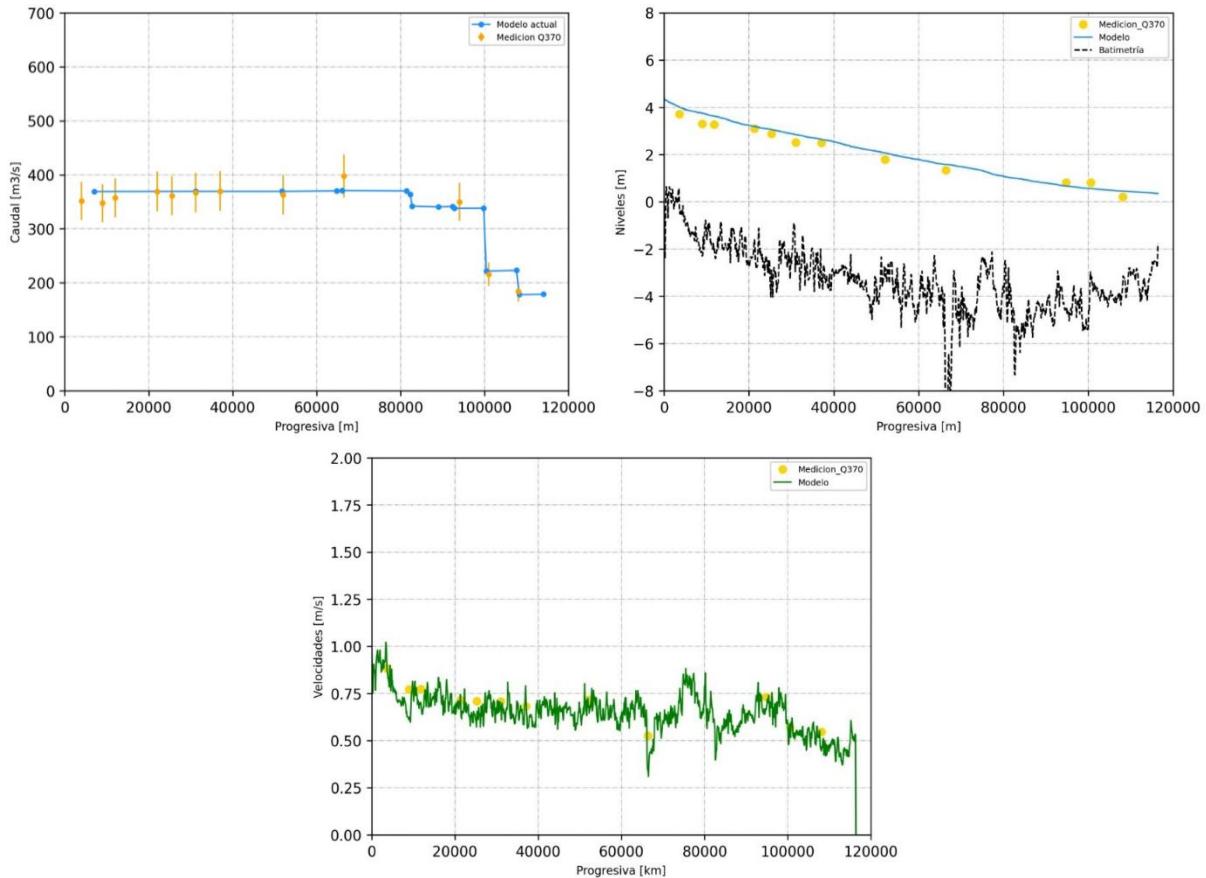
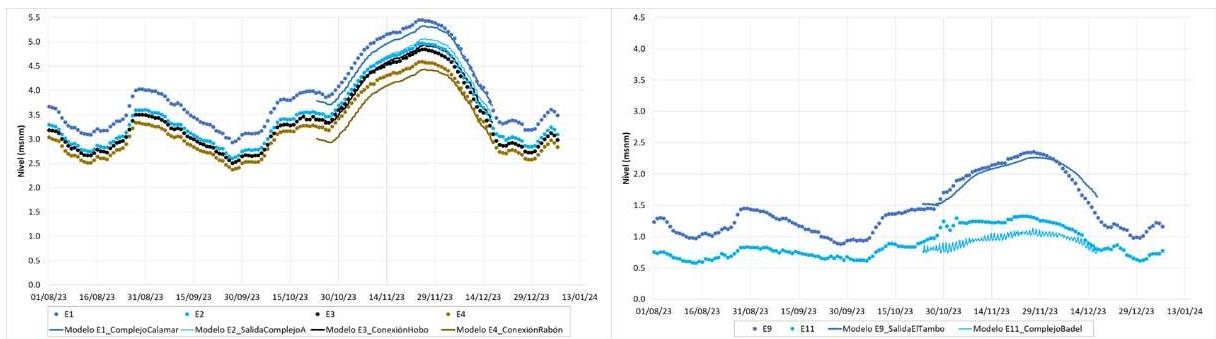


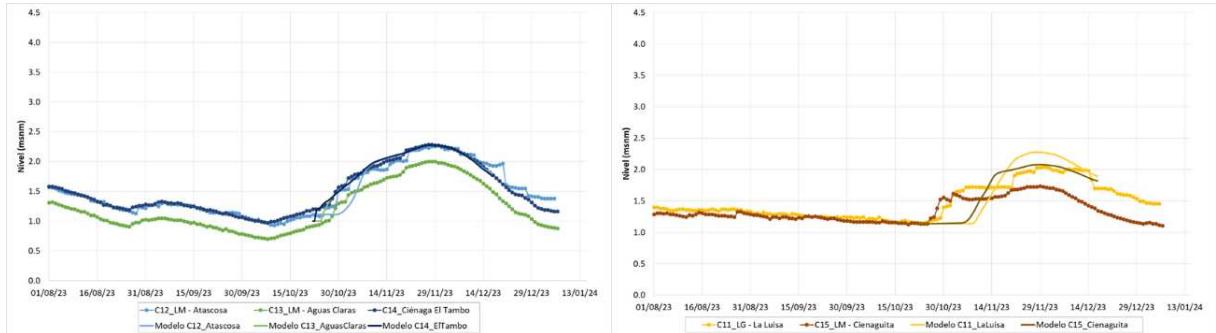
Figura 3: Distribución longitudinal de variables hidrodinámicas a lo largo del Canal del Dique para el caudal de ingreso de $370 \text{ m}^3/\text{s}$. Arriba-izq: caudal; arriba-der: nivel; abajo: velocidad.

Se efectuaron varios ensayos de validación. En primer lugar, se analizaron condiciones de flujo cuasi-estacionario en el Canal del Dique, comparando datos de mediciones de caudal, nivel de agua y velocidad de corriente para otro caudal de ingreso, y comparando los aforos de caudal con la relación nivel-caudal en la ex estación Incora K7. En ambos casos se obtuvieron acuerdos muy satisfactorios.

En segundo lugar, se consideró una situación dinámica, a saber, el pasaje de un pulso de crecida. Como escenario de ensayo se seleccionó la ventana temporal que se extiende desde el 22/oct/23 al 16/dic/23. Esta incluye un periodo inicial de alrededor de 1 semana con una relativa estabilidad tanto en el Canal del Dique como en las ciénagas, indicando poco intercambio de agua entre ellos, seguido de un pulso de crecida que eleva el nivel en la mayoría de las ciénagas. Como condición de borde de aguas arriba se impuso la serie temporal de caudal en el ingreso. En los límites de aguas abajo se fijó la onda de marea registrada en Cartagena. Se requirió un período de entrada en régimen de 3 días. La [Figura 4](#) muestra la comparación entre los niveles observados y calculados sobre el Canal del Dique. El acuerdo se considera satisfactorio, ya que captura el pulso de crecida en todas las estaciones, con errores considerados aceptables en función de la complejidad del sistema y los posibles errores de referenciación vertical en algunas escalas.



En la [Figura 5](#) se presenta la comparación entre los niveles observados y calculados sobre algunas ciénagas. Se observa que: (a) las comparaciones para las ciénagas Atascosa, Aguas Claras y El Tambo se consideran muy satisfactorias; la diferencia sistemática que muestran los registros en Aguas Claras respecto de las otras dos posiblemente se deba a un error de referenciación; (b) en el caso de las ciénagas La Luisa y Cienaguita se captura correctamente la dinámica de ambas; el pulso de elevación inicial que se registró en ambas se adjudica a la precipitación.



En tercer lugar, a título de una validación de tipo cualitativo, se verificó que el modelo representa correctamente la dinámica de llenado de los sistemas de ciénagas Luisa/Atascosa/Aguas Claras, por un lado, y Capote/Tupe/Zarzal, por el otro, desde el Canal del Dique durante una crecida, que lo hacen desde abajo hacia arriba.

5 APPLICACIÓN DEL MODELO

5.1 Descripción de las obras

El proyecto de sistematización comprende las siguientes obras ([Figura 6](#)): (i) obra de Calamar (Km 3 del Canal del Dique), que consiste en una estructura de control para regular el flujo de agua, una esclusa para permitir el paso de las embarcaciones y un pasaje de peces; (ii) obra de Puerto Badel (Km 95 del Canal del Dique), que consiste en una compuerta para bloquear el flujo de agua hacia las bahías de Cartagena y Barbacoas, junto con una esclusa para permitir el paso de las embarcaciones; (iii) obras en las ciénagas, que incluyen canales de conexión, diques de cierre, alcantarillas, compuertas para regular el flujo, rebases para confinar los desbordes, ampliación de entradas y salidas para facilitar el flujo, y cierre de caños existentes.



Figura 6: Ubicación de obras. Izquierda: zona superior; derecha: zona inferior.

El patrón de regulación del caudal de la obra de Calamar es el siguiente: (a) caudal de base mínimo permanente, del orden de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, para garantizar un nivel de agua no menor al superado el 95% del tiempo, de modo de viabilizar la navegación, abastecer de agua a la ciénaga Juan Gómez (que provee de agua para consumo a la ciudad de Cartagena) y evitar la intrusión salina en el área del delta; (b) caudal medio, de entre aproximadamente 500 y $700 \text{ m}^3/\text{s}$ (típicamente en el período mayo-julio), para llenar parcial o totalmente el reservorio Guájaros (que provee agua para consumo); (c) caudal alto, de entre aproximadamente 700 y $900 \text{ m}^3/\text{s}$ (típicamente en el período noviembre-diciembre), de modo de que ingrese agua a través de las tomas y laven las ciénagas, sin que el agua supere un nivel máximo para evitar inundaciones. Ante el cierre que genera la obra de Badel, el flujo de agua se redirecciona hacia el mar por los caños Correa y Palotal, y eventualmente como escurrimiento sobre el terreno a través del delta. Las obras en las ciénagas apuntan a mejorar y controlar el intercambio de agua con el Canal del Dique, interconectarlas para incentivar el flujo de agua, interrumpir conexiones indeseadas, proteger contra inundaciones de poblados y garantizar la salida de agua hacia el mar.

5.2 Implementación de las obras

En la representación de las obras de Calamar y Badel en el modelo se tuvieron en cuenta la esclusa y la estructura de control. En ambos casos la esclusa se consideró siempre cerrada, ya que su operación eventual sólo produce una perturbación mínima al flujo. En el caso de Badel, las compuertas también se consideraron siempre cerradas, ya que esa es la situación normal. Para Calamar la representación de la estructura de control puede variar dependiendo del escenario de ensayo.

La implementación de las obras de las ciénagas en el modelo implicó las siguientes acciones: (a) la reconstrucción de la malla de cálculo de modo de representar con precisión la batimetría a lo largo de las conexiones; (b) la introducción de leyes hidráulicas nivel-caudal para incluir las alcantarillas, impuestas como un par de contornos sumidero-fuente en los bordes extremos de la estructura; (c) la representación explícita de los umbrales y los diques como sobre elevación del terreno o como contornos impenetrables. En la [Figura 7](#) se ilustra con algunas vistas.

La performance de cálculo es de 2.5 horas de CPU por día de simulación en un equipo Dual Processor Intel Xeon Silver 4114 de 24 núcleos, lo cual es un indicador de la gran envergadura del modelo.

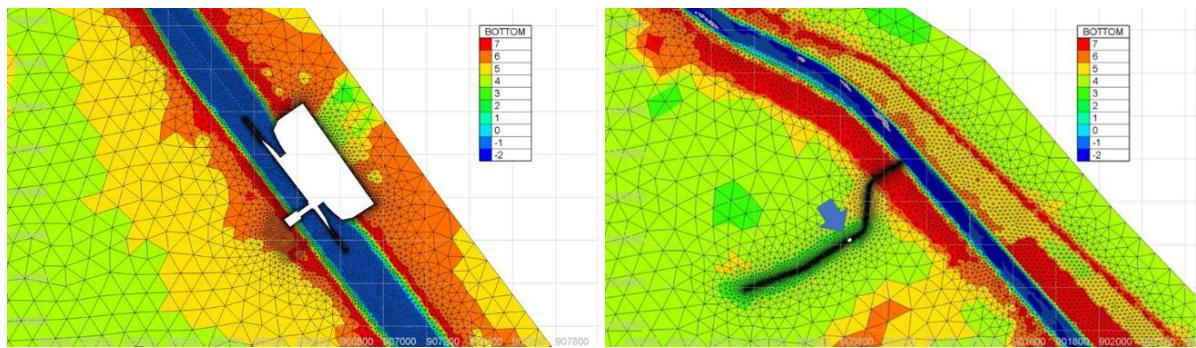


Figura 7: Vistas locales de malla con obras. Izquierda: obra Badel; derecha: obra B1-Conexión Canal-Hobo.

5.3 Caudal límite

La operación anual de la obra de control de Calamar debe apuntar al llenado de las ciénagas durante el pasaje del pulso de crecida mayor del río Magdalena, sin que se superen niveles máximos establecidos en puntos críticos ubicados en las ciénagas y/o a lo largo del Canal del Dique. Se efectuaron ensayos con el modelo hidrodinámico regional para caudales de ingreso de 900 y 1000 m³/s. Se planteó un escenario conservador, fijando un nivel de marea fijo en su máximo valor de pleamar, y adicionando el incremento del nivel medio del mar a un horizonte de 100 años. Se observó que los niveles máximos no llegan a superarse en ningún sitio, pero que se alcanzan valores cercanos en algunos de ellos. Por seguridad se adoptó como caudal límite 900 m³/s.

5.4 Niveles extremos en la obra de Badel

El modelo hidrodinámico se utilizó para determinar los niveles de retenida máximo y mínimo en la obra de Badel, que son parámetros de diseño. Esta constituye un corte del flujo del Canal del Dique, lo cual se traduce en un efecto de remanso. Para el caso del nivel máximo se planteó un escenario en el cual circula por el Canal del Dique el caudal máximo, de 900 m³/s, con la marea en su valor máximo y con la adición del incremento del nivel medio del mar por Cambio Climático. En el caso del nivel mínimo el escenario planteado es el del caudal mínimo de regulación, de 150 m³/s, con la marea en su valor mínimo.

5.5 Interacción entre ciénagas y Canal del Dique

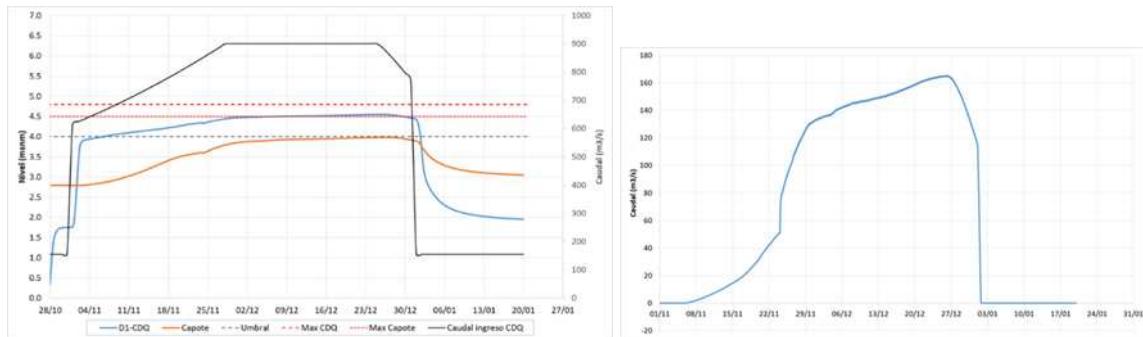
El control del intercambio de agua entre el Canal del Dique y las ciénagas es vital para garantizar los objetivos ambientales del proyecto. Para estudiar esta problemática se plantearon escenarios sintéticos de series temporales de caudales de ingreso al Canal del Dique representativos de distintas condiciones hidrológicas, y se las ‘filtró’ de modo de cumplir con la política de operación. A continuación, se empleó el modelo hidrodinámico para simular la evolución del sistema.

La política de operación de la obra de control de Calamar debe: (a) mantener un caudal de base de 155 m³/s, mediante la operación de las compuertas; (b) dejar pasar los dos pulsos de crecida, abriendo las compuertas; (c) limitar el caudal máximo pasante a 900 m³/s, operando las compuertas.

La operación anual de la obra de control de Calamar debe apuntar al llenado de las ciénagas durante el pasaje del pulso de crecida mayor del río Magdalena, sin que se superen los niveles máximos establecidos. Se ensayó el pasaje del segundo pulso de crecida para el escenario de caudal medio, que se injectó en el modelo hidrodinámico como condición de contorno de aguas arriba. A las ciénagas se les asignó niveles iniciales relativamente bajos, por debajo de las cotas

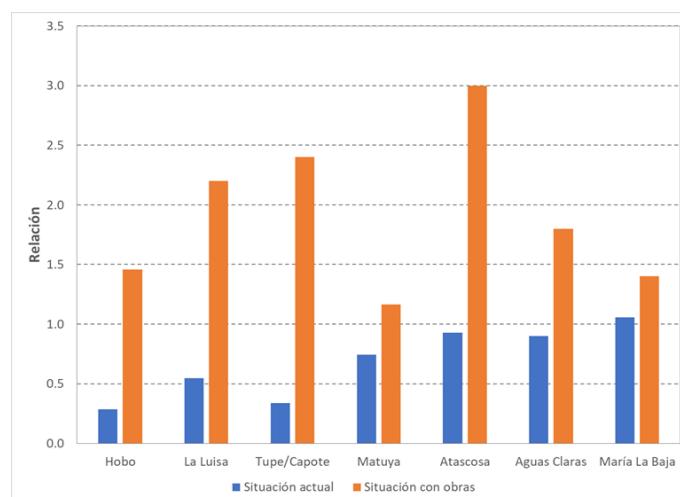
de los umbrales de las obras de conexión, de modo de determinar si el trasvase de agua desde el Canal del Dique es el suficiente como para completar un llenado satisfactorio.

A título ilustrativo, la [Figura 8](#) muestra las series temporales de nivel de agua y caudal resultantes para la obra D1 (entrada a ciénaga Capote). En el gráfico de niveles se incluye el valor del umbral de la obra de conexión, junto con los niveles máximos permisibles. Se observa que el pulso de crecida produce un nivel en el Canal del Dique que supera el umbral, generándose un flujo desde el canal hacia la ciénaga Capote (caudal positivo). Al cortarse el pulso de crecida, el nivel del canal decrece rápidamente (hasta alcanzar su nivel de equilibrio con el caudal de base), mientras que el de Capote lo hace más lentamente por desagüe hacia aguas abajo del complejo, ya que su nivel no supera el umbral de la obra. Ni el Canal del Dique ni Capote alcanzan sus respectivos niveles máximos permisibles.



5.6 Dinámica de las ciénagas

Se analizó el cambio en la amplitud de variación del nivel en las ciénagas durante el pasaje de un pulso de crecida por la construcción de las obras. Para la situación actual se utilizaron los registros diarios de nivel en las distintas estaciones para el período entre agosto de 2023 y mayo de 2024. Para la situación con obras se utilizaron los resultados del modelo hidrodinámico para el segundo pulso de crecida asociado a condiciones hidrológicas de caudal medio. La [Figura 9](#) muestra la comparación entre la relación de amplitudes para las situaciones actual y con obras, donde queda claramente representado el efecto dinamizador de las obras para las ciénagas.



6 CONCLUSIONES

Se ha descripto la implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional (2D) regional del sistema del Canal del Dique, incluyendo las ciénagas, para representar la dinámica hídrica actual. Se ha explicado la selección de pasos espaciales de malla para representar desde la pequeña escala del flujo canalizado a la gran escala del flujo en las ciénagas, y la del paso temporal para representar tanto el régimen puramente fluvial en el tramo superior como el régimen mareal en el tramo inferior.

Se ha descripto la calibración del modelo en base al objetivo de replicar satisfactoriamente la información de campo obtenida durante el presente estudio (niveles de agua, caudales y velocidades de la corriente en distintos puntos y para diferentes condiciones hidrológicas). Se ha explicado su validación, incluyendo una situación dinámica de respuesta de las ciénagas durante el pasaje de un pulso de crecida.

La performance del modelo para la situación actual lo certifica como una herramienta apta para asistir en el diseño de las obras de sistematización, y en la cuantificación de los impactos producidos por esas obras. Se indicaron entonces resultados de su aplicación a esa condición futura de modo de establecer: (i) el caudal máximo de ingreso a regular con la obra de Calamar, de modo de cumplir con las restricciones sobre los niveles máximos admisibles para evitar inundaciones en centros poblados; (ii) los niveles máximo y mínimo de retenida en la obra de Badel, que constituyen parámetros de diseño; (iii) la performance de las obras en las ciénagas durante el pasaje del pulso mayor de crecida, con el cambio de sentido de flujo en los sistemas de ciénagas superiores (D y E), y alcanzando niveles altos en las ciénagas (necesarios para satisfacer su uso social y ambiental) sin superar los valores máximos establecidos (para evitar inundaciones en zonas críticas); (iv) el aumento de la amplitud de variación del nivel en las ciénagas durante el pasaje de un pulso de crecida (efecto dinamizador) por la construcción de las obras.

Se considera que lo aportado ilustra una metodología muy útil para estudios de diseño hidráulico y gestión ambiental, que puede replicarse para situaciones similares.

REFERENCIAS

- Chow, V.T., *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, 1959.
Weiyan, T., *Solution for a Two-dimensional System of Shallow Water Equations*, Elsevier Science, 2012.

RECONOCIMIENTOS

Este estudio fue efectuado en el marco de la consultoría para la compañía multinacional de infraestructuras y servicios Sacyr (España), a través de la consultora Lande Ingeniería (Argentina).