

2025 | INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y AMBIENTAL



03

XLVI

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE
Revista científica del Centro de Investigaciones Hidráulicas

ISSN 2788-6050, RNPS 2066

La revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental tiene el propósito de divulgar el conocimiento y contribuir al intercambio de experiencias y la comunicación entre los profesionales y técnicos de habla española. Los temas de interés para la revista incluyen contenidos en la solución de problemas, aplicaciones y desarrollo de la ingeniería hidráulica.

Editor-Director

Dr. Luis Fermín Córdova López

Consejo Editorial

Dra. Daniela Córdova de Horta (*Directora*)

Msc. Jaime Ernesto Chiang Cruz (*Secretario de la publicación*)

Dr. Yoermes González Haramboure

Dr. Rafael Pardo Gómez

Dr. Norberto Marrero De León

Dr. Alcides Juan Felipe León Méndez

Dr. Mailén Virgen Gutiérrez Herrera

Consejo Asesor

Damir Brjanovic, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Daniel Prats Rico, *Universidad de Alicante, España*

Joaquín Moreno Caselles, *Universidad Miguel Enrique de Elche, España*

Nahún García Villanueva, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México*

Raúl Lopardo, *Instituto Nacional del Agua, Argentina*

Alejandro López, *Laboratorio Nacional de Hidráulica, Santiago de Chile*

Jaime Iván Ordóñez, *Universidad Nacional de Colombia, Colombia*

Rafael Guarga Ferro, *Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay*

Abrahán López, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Miguel A. Perozo Ynestroza, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Cristóbal Díaz Morejón, *Ministerio de Ciencia Tecnología y Medioambiente (CITMA), Cuba*

Alina Hernández Tur, *Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Cuba*

Rafael Feitó Olivera, *Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de Cuba (UNAICC), Cuba*

Julián Herrera Puebla, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Lorenzo E. Camejo Barreiro, *Universidad de Ciego de Ávila, Cuba*

Alfonso Suárez Reytor, *Universidad de Oriente, Cuba*

Eric Cabrera Estupiñán, *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador*

Luis Córdova López, *Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Cuba*

Yoel Martínez González, *Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicada, Cuba*

Ronnie Torres Hugues, *Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción, Cuba*

Eduardo López Bastida, *Universidad de Cienfuegos, Cuba*

Javier Orccosupa, *Universidad Tecnológica del Perú, Perú*

Natividad Ramírez Ramírez, *Universidad de Guanajuato, México*

Carlos M. López Vázquez, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Julio Iván González Piedra, *Universidad de La Habana, Cuba*

Carlos Javier Fernández de Córdova Webster, *Universidad del Azuay, Ecuador*

Lamberto Alvarez Gil, *Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba*

Felicita González, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Enrique Cisneros, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

01	Bryan Pérez León Luis F. Córdova López	PRECISIÓN Y EFICIENCIA COMPUTACIONAL EN LA SIMULACIÓN DE INUNDACIONES COSTERAS: COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS IBER Y SFINCS	3 12
02	Néstor Perico-Granados Evelyn Carolina Medina-Naranjo Carolina Tovar-Torres Néstor Rafael Perico-Martínez	PROPUESTAS PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA: CASO BETÉITIVA, BOYACÁ, COLOMBIA	13 22
03	Yaset Martínez Valdés Félix Riaño Valle	EL PROBLEMA DE LOS TRES TANQUES: UNA NUEVA VISIÓN (PARTE 1)	23 34
04	Roxana Aymeé Luis Winograd Daniela González Regalado	EVALUACIÓN CUANTITATIVA DEL BALANCE HÍDRICO SUBTERRÁNEO Y DIAGNÓSTICO DE EXPLOTACIÓN DE LA CUENCA HANÁBANA (CF1), CUBA	35 43
05	Mailén Virgen Gutierrez Herrera Edelsy Ramos Guilarte Dargen Tania Juan Carvajal	LA TRANSFORMACIÓN SOCIAL SOSTENIBLE DESDE LA PRÁCTICA LABORAL EN LA FORMACIÓN DEL INGENIERO HIDRÁULICO EN CUBA	44 52
06	Lisángela Espinosa Amador Roxana Aymeé Luis Winograd José Manuel Guzmán Menéndez	LA TELEDETECCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA EL MONITOREO AMBIENTAL DEL MANGLAR EN LA COSTA SUR DE ARTEMISA Y MAYABEQUE, CUBA	53 60
07	Dariel Francisco Chang Domínguez	ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA UBICADA AL SUR DE LA BAHÍA DEL MARIEL	61 74

Precisión y eficiencia computacional en la simulación de inundaciones costeras: comparación entre los modelos Iber y SFINCS

Bryan Pérez LeónE-MAIL: perezleonbryan856@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría

Luis F. Córdova LópezE-MAIL: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría

RESUMEN

Este estudio presenta una comparación entre los modelos hidrodinámicos Iber y SFINCS para la simulación de inundaciones costeras. Ambos modelos fueron aplicados a un mismo dominio utilizando una serie temporal hipotética del nivel total del mar con una duración de 10 horas y resolución temporal de un minuto, diseñada para representar un evento extremo con un nivel máximo de 3,29 m sostenido durante 3 horas. Se analizaron el comportamiento temporal del calado en puntos de observación, la extensión espacial de la inundación, el área inundada y los tiempos de simulación. Los resultados muestran una alta coherencia entre Iber B y SFINCS A en la evolución del calado y en la extensión de la inundación cuando se emplean resoluciones espaciales comparables. Sin embargo, las configuraciones de menor resolución en SFINCS presentan reducciones en la extensión de la inundación y retrasos en su propagación. Asimismo, SFINCS muestra tiempos de simulación significativamente menores, evidenciando su alta eficiencia computacional.

PALABRAS CLAVE: *inundación costera, Iber, SFINCS, modelación numérica, eficiencia computacional*

Accuracy and computational efficiency in coastal flood simulation: comparison between Iber and SFINCS

ABSTRACT

This study presents a comparison between the hydrodynamic models Iber and SFINCS for the simulation of coastal flooding. Both models were applied to the same computational domain using a hypothetical time series of total sea level with a duration of 10 hours and a temporal resolution of one minute, designed to represent an extreme event with a maximum level of 3.29 m sustained for three hours. The analysis focused on the temporal evolution of water depth at observation points, the spatial extent of flooding, the flooded area, and simulation times. Results show a high level of agreement between Iber B and SFINCS A in both water-depth evolution and flood extent when comparable spatial resolutions are used. However, lower-resolution SFINCS configurations show reductions in flood extent and delays in inundation propagation. Additionally, SFINCS exhibits significantly shorter simulation times, highlighting its high computational efficiency.

KEYWORDS: *coastal flooding, Iber, SFINCS, numerical modelling, computational efficiency*

01 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones costeras representan uno de los riesgos naturales más relevantes en zonas litorales, intensificados por el ascenso del nivel medio del mar. Estos eventos se producen cuando la marea y la marejada ciclónica—originada por los vientos de los ciclones tropicales y las bajas presiones atmosféricas— permiten la penetración



02-02-2025– RECIBIDO:

APROBADO: 08-07-2025

Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

del agua hacia tierra firme. A ello se suma el oleaje, cuyo comportamiento depende de sus características y de la batimetría de la costa, propagándose hacia la costa y, al romper, generando un ascenso de la masa de agua sobre el perfil costero, lo que amplifica el impacto de la inundación (Córdova de Horta et al., 2025). Pueden tener efectos devastadores en las sociedades, las economías y el medio ambiente al afectar zonas costeras bajas y densamente pobladas (Wadey et al., 2015).

Los ciclones tropicales (CT) y los ciclones extratropicales (CTE) son la causa de las inundaciones costeras más graves. Por ejemplo, el huracán Harvey, en 2017, es una de las tormentas más costosas en la historia de Estados Unidos, con daños estimados en 125 000 millones de dólares (Benito et al., 2025). Estudios realizados por Knutson et al. (2015) evidencian que, para la cuenca del Atlántico Norte, la intensidad de los CT aumentará mientras que su frecuencia disminuirá.

Este contexto ha impulsado el desarrollo y la aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos capaces de simular procesos de inundación costera con un alto nivel de detalle espacial y temporal. Tradicionalmente, estos modelos resuelven las ecuaciones completas de aguas someras, permitiendo representar de manera precisa la propagación del flujo, la interacción con la topografía y los gradientes de velocidad y profundidad del agua (Bates et al., 2010).

En respuesta a los altos costes computacionales de los modelos completos de inundación, se han desarrollado aproximaciones simplificadas que omiten términos menos críticos de las ecuaciones de flujo superficial, permitiendo simulaciones eficientes y manteniendo representaciones adecuadas de la inundación para aplicaciones a gran escala y sistemas de alerta temprana. Diversos estudios han mostrado que estas simplificaciones físicas pueden reducir el coste computacional de los modelos tradicionales, al tiempo que reproducen con razonable precisión la extensión de inundaciones en dominios extensos (Bates et al., 2010; Guo et al., 2021).

En este marco, el modelo Iber se ha consolidado como una herramienta robusta para la simulación bidimensional de inundaciones mediante la resolución completa de las ecuaciones de aguas poco profundas sobre mallas no estructuradas, siendo ampliamente utilizado en estudios fluviales y costeros por su capacidad para representar con detalle la hidrodinámica del flujo (Bladé et al., 2014). Por otro lado, el modelo SFINCS (*Super-Fast INundation of CoastS*) ha sido desarrollado específicamente para la simulación eficiente de inundaciones costeras y compuestas, integrando una formulación simplificada que permite reducir de forma significativa los tiempos de cálculo, manteniendo una adecuada representación de los procesos dominantes (Benito et al., 2025; Leijnse et al., 2021).

En este sentido, el presente trabajo se enfoca en la comparación del desempeño de los modelos Iber y SFINCS en la simulación de inundaciones costeras, con el fin de analizar sus capacidades y limitaciones.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del área de estudio

La sección de costa utilizada en el estudio forma parte del municipio Habana del Este, ubicado en la provincia de La Habana, en la región nororiental de la capital de Cuba. Su orientación abierta hacia el noreste expone directamente esta franja costera a la acción de marejadas asociadas tanto a ciclones tropicales como a frentes fríos, los cuales constituyen los principales forzantes meteorológicos responsables de las inundaciones costeras recurrentes en la zona.

2.2. Topobatimetría

Se dispone de un modelo topobatimétrico que abarca profundidades desde aproximadamente 13 m hasta el límite de la franja costera emergida, cubriendo un tramo costero comprendido entre la calle 12 en Santa María del Mar (límite occidental) y la Punta de Guanabo (límite oriental), lo que representa una extensión aproximada de 6 km de línea de costa. El modelo fue generado a partir de datos LIDAR y presenta una resolución espacial horizontal de 1 m, lo que permite una representación detallada de la topografía y batimetría del área de estudio (Fig. 2.1).

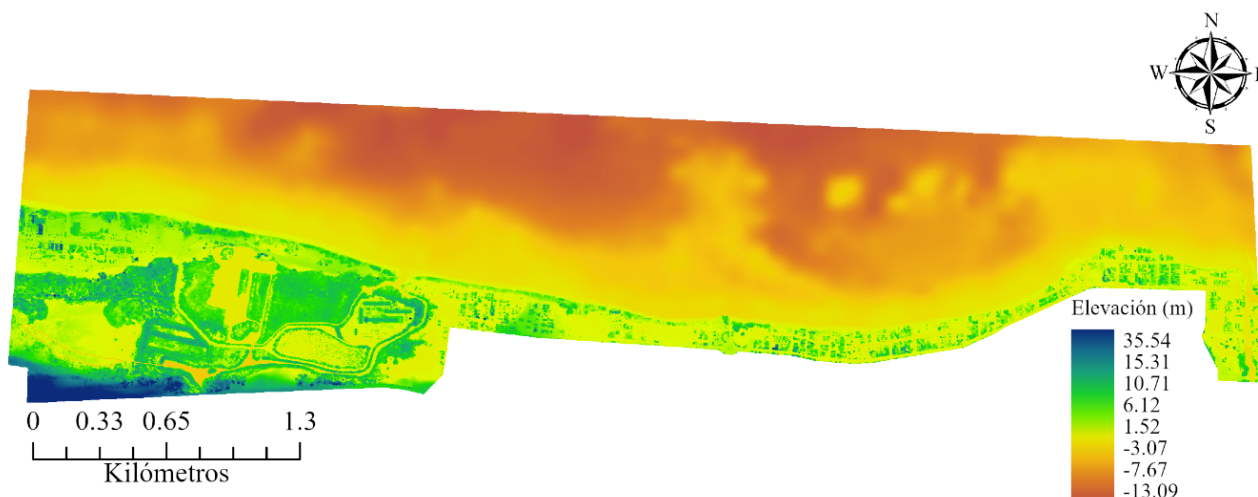


Figure 2.1. Topobatimetría del área de estudio.

2.3. Iber

Iber es un modelo numérico bidimensional desarrollado para la simulación de flujos con superficie libre y procesos de transporte bajo condiciones no estacionarias (Sañudo et al., 2020). Su módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones bidimensionales de aguas someras mediante un esquema de volúmenes finitos sobre mallas computacionales no estructuradas. Este solucionador incorpora un esquema numérico especialmente diseñado para aplicaciones hidrológicas, lo que permite la simulación acoplada de procesos de escorrentía superficial (hidrológicos) e inundación (hidráulicos) de forma simultánea (Cea & Bladé, 2015; Sañudo et al., 2020). Las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento que gobiernan el modelo se presentan en las ecuaciones (2.1)–(2.3):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = R - i \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -g h \frac{\partial z_b}{\partial x} - g n^2 \frac{|q| q_x}{h^{7/3}} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) = -g h \frac{\partial z_b}{\partial y} - g n^2 \frac{|q| q_y}{h^{7/3}} \quad (2.3)$$

donde h representa la profundidad del agua, q_x y q_y son las componentes del caudal unitario en las direcciones x e y , respectivamente, $|q|$ es su módulo, z_b corresponde a la elevación del fondo, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, g es la aceleración de la gravedad, R representa la intensidad de la precipitación e i la tasa de infiltración. En Iber, estas variables se resuelven en el marco de las ecuaciones bidimensionales de aguas someras, lo que permite una representación explícita de los procesos hidrodinámicos y su acoplamiento con los forzantes hidrológicos en entornos urbanos y costeros (Sanz-Ramos et al., 2025).

2.4. SFINCS

SFINCS (*Super-Fast INundation of CoastS*) es un modelo basado en procesos de complejidad intermedia y alta eficiencia computacional, capaz de simular inundaciones compuestas en zonas costeras. El modelo fue desarrollado por Maarten van Ormondt y se basa en el modelo LFP descrito por Bates et al. (2010). Su aplicación principal es la simulación de inundaciones compuestas a lo largo de líneas de costa de cientos a miles de kilómetros de extensión de forma computacionalmente eficiente.

La eficiencia computacional del modelo se logra mediante la inclusión exclusiva de los procesos esenciales que controlan la inundación compuesta, implementados en un solucionador numérico simple y rápido. De forma pre-

determinada, el modelo resuelve las ecuaciones inerciales locales (LIE; *SFINCS-LIE*) e incorpora formulaciones simplificadas para representar procesos de infiltración, descargas fluviales, precipitación y esfuerzos del viento. El modelo puede ser forzado mediante series temporales de nivel del agua en el límite costero para incluir la influencia de los niveles marinos y, de forma indirecta, los efectos asociados al oleaje, restringiendo el dominio de cálculo a la franja costera inmediata y a la zona continental inundable, con el fin de mejorar la eficiencia computacional. Para representar adecuadamente los procesos de sobrepaso por oleaje y la inundación asociada, puede activarse la advección mediante la resolución de una formulación simplificada de las ecuaciones de aguas someras (*SSWE*; *SFINCS-SSWE*). Adicionalmente, el desempeño numérico del modelo se optimiza mediante el uso de precisión simple y una sobrecarga computacional limitada (Leijnse et al., 2021).

La implementación original de las ecuaciones de aguas someras promediadas en la vertical en SFINCS consiste en un sistema desacoplado formado por una ecuación de continuidad bidimensional y dos ecuaciones unidimensionales de cantidad de movimiento. El sistema está compuesto por tres ecuaciones y tres incógnitas: el nivel del agua, η , y los flujos en las direcciones x e y , q_x y q_y , respectivamente. Al desprestigiar los términos de advección, Coriolis y viscosidad, especificar el término de fricción y emplear una linealización de las ecuaciones, se obtiene la formulación de las ecuaciones inerciales locales en forma conservativa (Bates et al., 2010; Leijnse, 2018):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + gn^2 \frac{|q_x| q_x}{h^{7/3}} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + gn^2 \frac{|q_y| q_y}{h^{7/3}} = 0 \quad (2.6)$$

con $h = \eta + d$, donde η es la elevación de la superficie libre (m) con respecto al nivel de referencia $z = 0$, h es la profundidad del agua (m) y d es la profundidad del fondo (m). Los términos q_x y q_y representan los flujos en las direcciones x e y (m^2/s). El parámetro n corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning ($\text{s m}^{-1/3}$) y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2). El término $\partial \eta / \partial t$ reemplaza a $\partial h / \partial t$ debido a que el nivel del fondo se considera constante en el tiempo (sin morfodinámica).

2.5. Establecimiento de los modelos

Con el objetivo de evaluar la influencia de la resolución espacial y del esquema de mallado en los resultados de la simulación, se establecieron cinco configuraciones de modelación para la comparación entre Iber y SFINCS. En el caso del modelo Iber, se definieron dos configuraciones. La primera (*Iber A*) empleó un esquema de doble mallado, compuesto por una malla principal en la zona terrestre con una resolución espacial de 3 m y una malla secundaria de transición con resolución de 10 m, la cual se extiende desde la cota 0 hasta aproximadamente 50 m mar adentro. La segunda configuración (*Iber B*) utilizó una malla uniforme con resolución de 3 m, definida a partir de la cota 0 hacia el interior del dominio terrestre.

Para el modelo SFINCS se implementaron tres configuraciones independientes, con resoluciones espaciales de 3, 5 y 10 m, respectivamente. En todos los casos, el dominio de cálculo se definió a partir de una profundidad inicial de 2 m en el sector marino, extendiéndose hacia tierra para la simulación de la inundación costera.

La Tabla 2.1 resume las principales características de cada configuración de modelación, incluyendo el tipo de malla, la resolución espacial, la rugosidad de Manning y el número total de nodos empleados.

Table 2.1. Características de cada configuración de modelación.

Configuración	Malla	Resolución	Rugosidad de Manning ($\text{s m}^{-1/3}$)	Cantidad de nodos
Iber A	Doble no estructurada	3 m y 10 m	0,023	329 472
Iber B	Simple no estructurada	3 m	0,023	313 631
SFINCS A	Estructurada	3 m	0,023	362 464
SFINCS B	Estructurada	5 m	0,023	130 526
SFINCS C	Estructurada	10 m	0,023	32 816

2.6. Forzamiento considerado en las simulaciones

En la configuración de ambos modelos se empleó como forzamiento una serie temporal hipotética del nivel total del mar, con una resolución temporal de un minuto y una duración total de 10 horas (Fig. 2.2). La serie fue diseñada para representar un evento extremo, definiéndose un nivel máximo del mar de 3,29 m, sostenido durante un período de 3 horas. Este forzamiento se impuso en el límite costero de los respectivos dominios de cálculo y permitió analizar la respuesta hidrodinámica simulada por cada modelo.

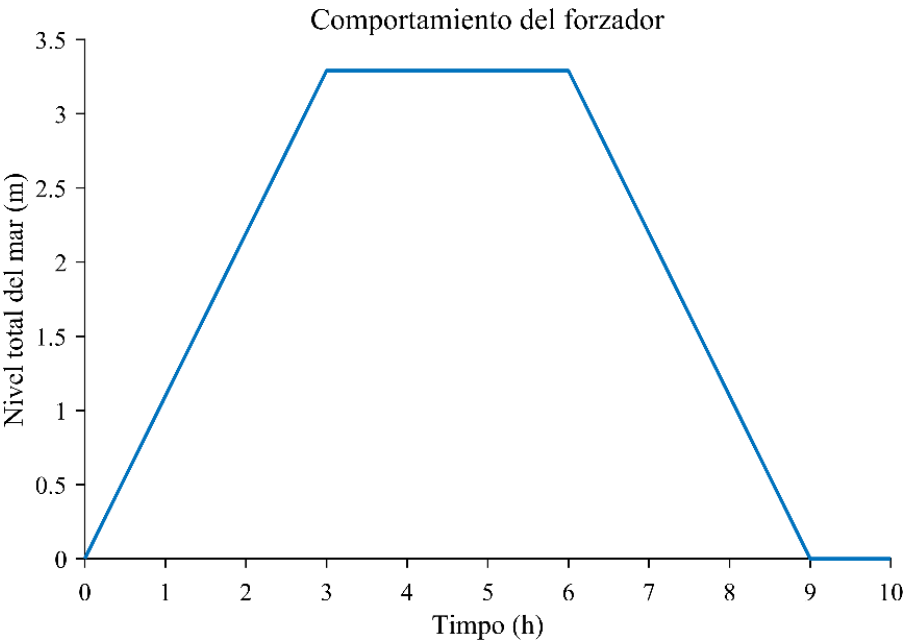


Figure 2.2. Comportamiento temporal del forzamiento empleado en las simulaciones.

03 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para el análisis del comportamiento de la inundación costera se definieron puntos de observación estratégicamente distribuidos dentro del área de estudio. La selección de estos puntos respondió al objetivo de representar distintos sectores de la franja costera y áreas urbanas vulnerables, permitiendo una evaluación integral de la dinámica de la inundación simulada por los modelos.

En total, se establecieron cuatro puntos de observación (Fig. 3.1): PO-1, ubicado en la desembocadura del río Boca Ciega; PO-2, en Guanabo, en la intersección de la calle 3ra y la calle 472; PO-3, en Guanabo, en la intersección de la calle 3ra y la calle 492; y PO-4, en Guanabo, en la intersección de la calle 1ra A y la calle 500. Estos puntos fueron empleados para analizar la evolución temporal del calado y comparar el desempeño de los modelos numéricos.



Figure 3.1. Localización de los puntos de observación utilizados para el análisis de los resultados.

3.1. Análisis del comportamiento de la inundación

La Figura 3.2 muestra la evolución temporal del calado en los diferentes puntos de observación definidos dentro del área de estudio. En términos generales, los resultados obtenidos presentan un comportamiento similar entre los modelos analizados, evidenciándose tres fases principales en la dinámica de la inundación: un incremento inicial del calado durante las primeras horas de simulación, un período de estabilización asociado al nivel máximo del forzamiento y una fase final de descenso cuando el nivel del mar comienza a disminuir.

Durante las primeras horas de la simulación se observa un incremento progresivo del calado en todos los puntos de observación, el cual se produce aproximadamente durante las dos primeras horas como respuesta al aumento del nivel del mar impuesto en el límite costero del dominio. Posteriormente, los valores de calado se mantienen relativamente constantes durante el período en el que el nivel máximo del mar permanece sostenido en la serie de forzamiento.

En general, la configuración Iber A alcanza valores de calado superiores a los registrados por el resto de los modelos. Este comportamiento se asocia principalmente a la configuración del dominio y al doble mallado empleado, donde la malla secundaria se extiende hacia el sector marino, permitiendo un mayor desarrollo de la onda antes de alcanzar la línea de costa. Como consecuencia, se generan niveles de agua superiores a los definidos en la serie temporal de forzamiento.

En el punto de observación PO-1, el modelo Iber B y las tres configuraciones del modelo SFINCS presentan un comportamiento muy similar. Las series muestran un ascenso progresivo del calado hasta alcanzar valores cercanos a 3,29 m, manteniéndose posteriormente estables durante gran parte del período de máxima inundación. Las diferencias entre las simulaciones en este punto son mínimas, lo que sugiere una alta coherencia entre los modelos en la representación de la dinámica de la inundación en este sector.

En los restantes puntos de observación se identifican diferencias más notables entre las simulaciones. En PO-2, se observa una clara divergencia entre las configuraciones de SFINCS con respecto a Iber B, destacándose que la configuración SFINCS C no registra valores de inundación en este punto. En PO-3, las configuraciones SFINCS A y SFINCS B presentan comportamientos similares, alcanzando valores de calado cercanos a 2,7 m, mientras que SFINCS C registra valores considerablemente menores, con máximos próximos a 2 m.

Las mayores diferencias entre modelos se observan en el punto PO-4, donde la discrepancia entre Iber B y SFINCS A resulta más evidente. Asimismo, se observa que en la configuración SFINCS B el inicio de la inundación se registra aproximadamente 20 minutos más tarde en comparación con SFINCS A, mientras que en la configuración SFINCS C el inicio del proceso de inundación ocurre aproximadamente dos horas después. Este retraso en el inicio de la inundación también se aprecia en otros puntos de observación, donde la configuración SFINCS C presenta tiempos de respuesta más tardíos respecto al resto de los modelos analizados.

En conjunto, estos resultados evidencian que la resolución espacial del modelo SFINCS influye significativamente en la representación temporal y en la magnitud de los calados simulados, observándose que resoluciones más gruesas tienden a retrasar el inicio de la inundación y a reducir los valores máximos alcanzados.

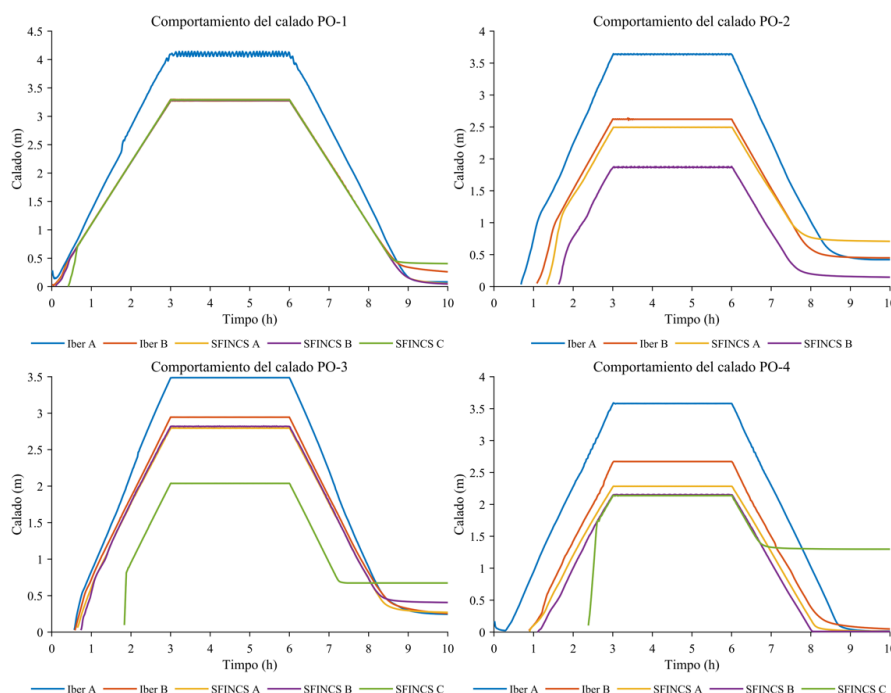


Figure 3.2. Evolución temporal del calado en los puntos de observación para las distintas configuraciones de modelación.

3.2. Análisis de errores entre modelos

Como se observa en la Tabla 3.1, los valores de error absoluto promedio (MAE) y raíz del error medio cuadrático (RMSE) muestran diferencias entre los puntos de observación al comparar los resultados del modelo Iber B con SFINCS A. El punto de observación PO-1 presenta las menores discrepancias, con un MAE de 0,04 m y un RMSE de 0,09 m, lo que confirma el comportamiento prácticamente idéntico observado en las curvas temporales. El mayor nivel de discrepancia se observa en el PO-4, donde se obtiene un MAE de 0,25 m y un RMSE de 0,24 m. Este comportamiento es consistente con lo mostrado en la Figura 4, donde se identifican diferencias más notables en la magnitud del calado entre las simulaciones.

Estas diferencias están asociadas al tipo de malla de cómputo empleada y a las particularidades de la formulación numérica de cada modelo. No obstante, los resultados muestran que las discrepancias entre Iber B y SFINCS A se mantienen dentro de un rango inferior a 0,30 m para ambos parámetros analizados, lo que evidencia una alta consistencia en la representación de la dinámica de inundación costera bajo condiciones de forzamiento equivalentes.

Table 3.1. Comparación de errores entre los modelos Iber B y SFINCS A.

PO	MAE (m)	RMSE (m)
1	0,04	0,09
2	0,15	0,19
3	0,10	0,10
4	0,25	0,24

3.3. Análisis del área inundada

La Figura 3.3 muestra la comparación de las líneas de máxima extensión de la inundación obtenidas con las diferentes configuraciones de los modelos Iber y SFINCS. La configuración Iber A presenta una extensión de inundación mayor respecto al resto de los modelos, lo cual puede atribuirse a la configuración del dominio y al doble mallado empleado, que permite un mayor desarrollo de la onda antes de alcanzar la línea de costa.

Por su parte, Iber B y SFINCS A muestran una alta similitud en la extensión de la inundación, evidenciando un comportamiento espacial consistente entre ambos modelos cuando se emplean resoluciones comparables. En contraste, las configuraciones SFINCS B y SFINCS C muestran una reducción progresiva en la extensión de la inundación hacia el interior del dominio. Este comportamiento evidencia la influencia de la resolución espacial del modelo, donde el uso de mallas más gruesas tiende a limitar la propagación de la inundación en tierra. No obstante, es importante señalar que el hecho de que la línea de máxima extensión alcance determinadas zonas no implica necesariamente que toda el área comprendida hasta ese límite se encuentre completamente inundada. Esto se debe a las características topográficas del terreno y a la presencia de edificaciones y otras estructuras urbanas que condicionan localmente la propagación del flujo.

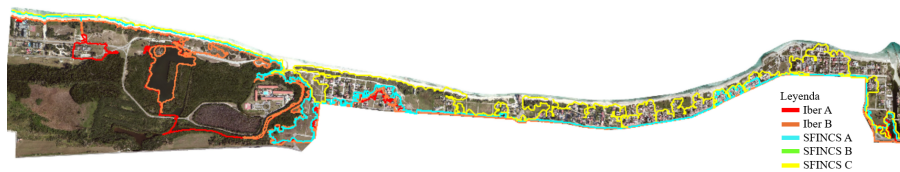


Figure 3.3. Comparación de la extensión máxima de inundación.

Como se muestra en la Tabla 3.2, la configuración Iber A presenta la mayor área inundada, alcanzando 87,71 ha, seguida por Iber B con 84,53 ha. Por su parte, el modelo SFINCS A muestra un área inundada menor (57,77 ha), mientras que las configuraciones SFINCS B y SFINCS C presentan reducciones significativas, con 19,7 ha y 3,09 ha, respectivamente. Esta tendencia evidencia la influencia de la resolución espacial del modelo en la estimación del área inundada, observándose que resoluciones más gruesas tienden a subestimar la propagación de la inundación hacia el interior del dominio.

Table 3.2. Área total inundada.

Configuración	Área inundada (ha)
Iber A	87,71
Iber B	84,53
SFINCS A	57,77
SFINCS B	19,70
SFINCS C	3,09

3.4. Tiempo de simulación

Como se observa en la Tabla 3.3, las configuraciones de los modelos presentan diferencias tanto en la discretización espacial como en los tiempos de simulación. En el caso de Iber, las simulaciones se realizaron con mallas no estructuradas de alta resolución, alcanzando 329 472 nodos en Iber A y 313 631 nodos en Iber B, lo que se traduce en tiempos de simulación entre 19 y 11,75 minutos.

Por su parte, SFINCS emplea mallas estructuradas con un número de nodos que varía en función de la resolución espacial, desde 362 464 nodos en SFINCS A (3 m) hasta 32 816 nodos en SFINCS C (10 m). A pesar de manejar un número de nodos comparable o incluso superior en la configuración de mayor resolución, los tiempos de simulación del modelo SFINCS resultan considerablemente menores, con valores de 4,48 min, 1,8 min y 0,82 min para las configuraciones A, B y C, respectivamente.

Estos resultados evidencian la elevada eficiencia computacional del modelo SFINCS, asociada a su formulación de física reducida, en contraste con Iber, que resuelve de forma más completa las ecuaciones hidrodinámicas.

Table 3.3. Tiempo de simulación de las diferentes configuraciones.

Configuración	Tiempo (min)
Iber A	19
Iber B	11,75
SFINCS A	4,48
SFINCS B	1,8
SFINCS C	0,82

04 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que ambos modelos reproducen de manera consistente la dinámica general de la inundación costera bajo condiciones de forzamiento equivalentes. En particular, la comparación entre Iber B y SFINCS A muestra una alta correspondencia en la evolución temporal del calado y en la extensión espacial de la inundación cuando se emplean resoluciones espaciales comparables.

Las diferencias observadas entre configuraciones se relacionan principalmente con la resolución espacial de las mallas de cálculo. En el caso de SFINCS, la disminución progresiva de la resolución (de 3 m a 10 m) se traduce en una reducción significativa tanto de la extensión como del área inundada, lo que evidencia la influencia de la discretización espacial en la representación de la topografía y en la propagación del flujo hacia el interior del dominio.

En cuanto a la eficiencia computacional, los tiempos de simulación muestran diferencias claras entre los modelos analizados. Las configuraciones de Iber presentan tiempos de 19 min y 11,75 min, mientras que SFINCS requiere 4,48 min, 1,8 min y 0,82 min para las resoluciones de 3 m, 5 m y 10 m, respectivamente. Estos resultados muestran que, aun utilizando resoluciones similares, SFINCS presenta tiempos de cálculo considerablemente menores, lo que resalta el potencial de los modelos de física reducida para la evaluación rápida de escenarios de inundación costera.

En conjunto, los resultados indican que SFINCS constituye una herramienta eficiente para estudios de inundación costera, especialmente en aplicaciones donde se requieran múltiples simulaciones o evaluaciones rápidas, mientras que Iber permite una representación hidrodinámica más detallada de los procesos de inundación.

05 REFERENCES

Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(1–2), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>

Benito, I., Aerts, J. C. J. H., Ward, P. J., Eilander, D., & Muis, S. (2025). A multiscale modelling framework of coastal flooding events for global to local flood hazard assessments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(7), 2287–2315. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-2287-2025>

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>

Cea, L., & Bladé, E. (2015). A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51(7), 5464–5486. <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>

Córdova de Horta, D., Pardo Picazo, M. Á., Prats Rico, D., & Córdova López, L. F. (2025). Modelado dinámico de inundaciones compuestas en áreas urbanas costeras. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 15(1), e1889–e1889.

- Guo, K., Guan, M., & Yu, D. (2021). Urban surface water flood modelling – a comprehensive review of current models and future challenges. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(5), 2843–2860. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2843-2021>
- Knutson, T. R., Sirutis, J. J., Zhao, M., Tuleya, R. E., Bender, M., Vecchi, G. A., Villarini, G., & Chavas, D. (2015). Global projections of intense tropical cyclone activity for the late twenty-first century from dynamical downscaling of cmip5/rcp4.5 scenarios. *Journal of Climate*, 28(18), 7203–7224. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0129.1>
- Leijnse, T. (2018). Computationally efficient modelling of compound flooding due to tropical cyclones with the explicit inclusion of wave-driven processes. <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:53037d4d-d7a9-4f71-9b22-8c329f2b384c>
- Leijnse, T., van Ormondt, M., Nederhoff, K., & van Dongeren, A. (2021). Modeling compound flooding in coastal systems using a computationally efficient reduced-physics solver: Including fluvial, pluvial, tidal, wind- and wave-driven processes. *Coastal Engineering*, 163, 103796. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103796>
- Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2020). Modelling pluvial flooding in urban areas coupling the models iber and swmm. *Water*, 12(9), 2647. <https://doi.org/10.3390/w12092647>
- Sanz-Ramos, M., Sañudo, E., López-Gómez, D., García-Feal, O., Bladé, E., & Cea, L. (2025). Evolución de la modelización numérica bidimensional del flujo en lámina libre a través del software iber. *Ingeniería del Agua*, 29(2), 114–131. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.23259>
- Wadey, M., Haigh, I. D., Nicholls, R. J., Brown, J., Horsburgh, K., Carroll, B., Gallop, S., Mason, T., & Bradshaw, E. (2015). A comparison of the 31 january–1 february 1953 and 5–6 december 2013 coastal flood events around the uk. *Frontiers in Marine Science*, 2, 84. <https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00084>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Bryan Pérez León <https://orcid.org/0009-0000-5820-5234>
Luis F. Córdova López <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Propuestas para mitigar el cambio climático en América Latina: caso Betétiva, Boyacá, Colombia

Néstor Perico-GranadosE-MAIL: Nestor.perico@uniminuto.edu.co

Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO

Evelyn Carolina Medina-NaranjoE-MAIL: Evelyn.medina-na@uniminuto.edu.co

Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO

Carolina Tovar-TorresE-MAIL: Carolina.tovar@uniminuto.edu.co

Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO

Néstor Rafael Perico-MartínezE-MAIL: nr.perico10@uniandes.edu.co

Universidad de los Andes

RESUMEN

Es una investigación mixta con entrevistas a profundidad, rejilla de observación y diario de campo, con base en las propuestas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO, y sobre su potencial desarrollo para Boyacá, Colombia. Se desarrollan las propuestas de la entidad y se precisan en cinco proyectos, que contribuyen a la sostenibilidad social, económica y ambiental: trinchos y terrazas; reforestación; reservorios; tajamares para regulación de aguas, y construcción de distrito de riego. Se ponen las posturas de unos líderes regionales, quienes quieren contribuir en la construcción de las obras, con la mano de obra no calificada. Se observaron las posibilidades de recursos para iniciar los diseños, construir unas de ellas e iniciar las otras en el periodo del 2024 al 2027.

PALABRAS CLAVE: *Cambio climático, Plan de desarrollo, Reforestación, Reservorios, Trinchos y terrazas*

Proposals to mitigate climate change in Latin America: Case Betétiva, Boyacá, Colombia

ABSTRACT

It is a mixed investigation with in-depth interviews, an observation grid and a field diary, based on the proposals of the Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, and on its potential development for Boyacá, Colombia. The entity's proposals are developed and specified in five projects, which contribute to social, economic and environmental sustainability: trenches and terraces; reforestation; reservoirs; cutwaters for water regulation, and construction of an irrigation district. The positions of some regional leaders are put forward, who want to contribute to the construction of the works, with unskilled labor. The resource possibilities were observed to start the designs, build some of them and start the others in the period from 2024 to 2027.

KEYWORDS: *Climate change, Development plan, Reforestation, Reservoirs, Trenches and terraces*

01 INTRODUCCIÓN

La investigación es útil a los ingenieros, profesionales, funcionarios municipales y a quienes tengan interés en mitigar el cambio climático y promover la sustentabilidad del planeta con sostenibilidad ambiental, social y

económica. En la tercera década del siglo XXI está la humanidad en la obligación de proponer acciones concretas para generar inflexiones y cambiar positivamente el rumbo para disminuir los efectos del calentamiento global (González-Gaudiano et al., 2022). Se requiere pasar a la acción y dejar de lado los diagnósticos apocalípticos del calentamiento global de la academia y de los gobiernos. Tuvo como objetivo la investigación hacer un análisis de los cinco principales aspectos, que a juicio de expertos de la Gobernación de Boyacá and FAO (1988) contribuyen a incrementar la producción, la productividad y los ingresos de los campesinos y a la vez aportan significativamente a mitigar el cambio climático, en una cuenca específica del río Chicamocha, denominada la cuenca de la quebrada de Otengá, en el municipio de Betétiva, Boyacá en Colombia. Tiene la virtud que se desarrolló con mucha participación de las comunidades, en varios cursos y talleres, en el diagnóstico y en las propuestas que se exponen.

Al respecto, contribuye la investigación en proponer elementos claves para la planeación de la inversión con acción estratégica de los recursos municipales y las transferencias, así como los que se puedan apalancar de otras instituciones y del gobierno nacional, para que los resultados se vean reflejados en la salud, bienestar y mejoramiento de todas las personas, especialmente las más vulnerables. La investigación parte de un caso específico, pero se puede extender a todas las poblaciones de media ladera que en América Latina se acercan al 50%, que requieren conservar los suelos y regular el agua. Al respecto, para Saldi and Petz (2015) la cantidad de cultivos, la producción y la productividad se llevan a cabo en función de la cantidad de agua disponible. Igualmente, si se trabaja comunitariamente los lazos entre vecinos se fortalecen y se ayudan en las actividades productivas y para ello son necesarios cimentar sólidos procesos educativos (Saldi & Petz, 2015).

En este sentido, en 1985 el Secretario de Planeación del departamento de Boyacá propuso un Proyecto a la FAO por un monto de 180 000 \$US. Hoy pueden ser cerca de 800 millones de pesos colombianos de 2024. En la investigación participaron cuatro técnicos internacionales: Jean Claude Griesbach de Francia, Doctor en Edafología, Hidrogeomorfología y Climatología; Julio Rea, de Bolivia, Magíster en Agronomía; José Munaiz de España, Magíster en desarrollo económico; Hernán Caycho, de Perú, Magíster en Sociología rural. El equipo lo completaron cuatro colombianos de calidades similares para construir conocimiento y transferencia de tecnología (Gobernación de Boyacá & FAO, 1988). Por las circunstancias de meteorización y erosión acentuadas, la producción es cada vez menor y la migración a las ciudades para buscar mejores oportunidades de vida se acentúa. En el año 1988 existían cuatro mil habitantes y hoy según el DANE solamente existen dos mil novecientos en el territorio en estudio. La población escolar igualmente cada vez se disminuye y los riesgos para cerrar centros escolares se avecinan, si antes no se hacen acciones concretas para que las personas tengan mejores oportunidades en el municipio.

Uno de los resultados del estudio fue el diagnóstico sobre erosión y recuperación de suelos para mejorar la agricultura y alimentación, en la cuenca de la quebrada de Otengá, desde el sitio de Las Puente hasta Cosgua, en la desembocadura en el río Chicamocha, del municipio de Betétiva. Este es un municipio que tiene en promedio dos mil cuatrocientos metros sobre el nivel del mar, con quince grados de temperatura y setecientos milímetros de lluvia al año en promedio, con una deforestación casi total y por consiguiente muy pocas fuentes de agua disponibles (Gobernación de Boyacá & FAO, 1988). Para Suárez-Díaz (2012) la prevención disminuye hasta en un 95% los desastres naturales y en este sentido, con respecto al cambio climático, siempre es mejor invertir en prevenir, dado que se pueden evitar pérdidas humanas, ambientales y económicas.

En los resultados se definieron unos aspectos claves para recuperar el agua y otros para recuperar los suelos. Con base en los análisis detallados de los expertos se encontró que con la ejecución del proyecto se incrementa en promedio entre el cien y el ciento treinta por ciento en producción, productividad e ingresos, para una población cercana a tres mil novecientos habitantes (Gobernación de Boyacá & FAO, 1988). En una visita de exploración y reconocimiento se observó que las condiciones siguen iguales, con tendencia al deterioro, dado que no se ha adelantado ningún tipo de proyectos de la naturaleza que se describe. ¿En este propósito se pregunta sobre las posibilidades de desarrollo de las propuestas para recuperar los suelos y regular el agua de forma natural y artificial? La metodología usada fue mixta dado que se utilizan cifras, estadísticas y a la vez se trabaja con entrevistas, diario de campo y rejillas de observación. Entre las propuestas que concretó la comisión de la FAO están las analizadas a continuación.

02 PROPUESTAS ANALIZADAS

En desarrollo de esta investigación, con base en las visitas, las entrevistas a profundidad y el diario de campo se encontraron que las personas del centro poblado y de las veredas coinciden con lo formulado por el proyecto de la Gobernación de Boyacá and FAO (1988) y privilegian los proyectos que pueden generar empleo, recursos económicos para su sostenibilidad y obras específicas que contribuyen a la sostenibilidad ambiental: trinchos y terrazas; reforestación con árboles nativos, frutales y exóticos; construcción de reservorios; ampliación de tajamares para desarrollar regulación de las aguas y construcción de un distrito de riego. Se ponen en citas y referencias a cuatro entrevistados, por espacio, pero se tomaron a doce personas, líderes de la comunidad. Con la implementación de estos proyectos se incrementa la humedad relativa, las áreas cultivadas, la disponibilidad del agua, su regulación natural y artificial y con ello se disminuyen las posibilidades de incendios provocados por el calentamiento global. Igualmente, con la regulación del agua se evitan en un alto porcentaje las avenidas torrenciales que causan fallecimientos de personas, pérdidas de animales y de enseres. Sin embargo, hasta entrada la tercera década del siglo XXI no han existido los recursos y la voluntad política para ponerlos en marcha. Con la nueva disponibilidad de presupuestos nacionales y de transferencias existe una buena opción para su ejecución total o parcial.

Al respecto, según González-Gaudio et al. (2022) aunque se hicieran todas las acciones necesarias para frenar el cambio climático, con base en los daños causados ya van a producir efectos negativos muy importantes a corto, mediano y largo plazo, con más impacto que los actuales. Entonces, el camino es educar en el cambio climático, hacer todo lo necesario y posible para evitar que se siga incrementando, pero a la vez desarrollar las actividades para la adaptación al mismo y a sus efectos. En este sentido, una de las rutas críticas es promover los estudios, diseños e implementación de las obras para la regulación natural del agua como la siembra y cuidado de árboles nativos y la construcción de reservorios y represas para almacenar el agua lluvia. Las obras hechas de forma apropiada disminuyen las posibilidades de incendios forestales y a la vez disminuyen los eventos de inundaciones y avalanchas.

Entre las acciones que deben promover los gobiernos y la academia para incentivar los procesos de sostenibilidad están los Bonos de carbono y las compensaciones voluntarias. Entre los primeros están la siembra y conservación de árboles, reciclar, reutilizar y procesar los residuos sólidos orgánicos. También se necesitan soluciones para mediano y largo plazo, pero se requiere que se inicie desde hoy mismo, con acciones educativas continuas y en los diferentes escenarios. En estos aspectos, conviene transformar los modos y los medios de producción para derivar en la construcción de un planeta fundamentado en la economía verde, con procesos, abonos e insumos naturales, producción y consumo centrado en la naturaleza, como procesos naturales renovables.

2.1. Elaboración de trinchos y terrazas

Son obras para recuperar los suelos, disminuir los sedimentos y mejorar la productividad. Se construyen con madera, guadua, metales u otros elementos de forma horizontal sostenidos por soportes verticales (Villadiego-Lorduy, 2020). Su efecto es el de transformar las laderas del terreno erosionado en terrazas con mínima pendiente para evitar que el agua siga lavando los finos y nutrientes y de esta manera se pueda seguir aprovechando el suelo para los procesos productivos. Así se evita que se siga el proceso de meteorización y queden descubiertas las estructuras rocosas y se tornen totalmente improductivas (Gobernación de Boyacá & FAO, 1988). Los trinchos y las terrazas en un principio sostienen el terreno, pero luego la misma vegetación se encarga de construir su retención con los esfuerzos que generan las raíces, al tiempo que se incrementa la fertilidad del suelo (Salazar-Gutiérrez & Hincapié-Gómez, 2013). Este tipo de obras se pueden construir con aportes gubernamentales y con la mano de obra comunitaria y para una mayor efectividad se necesita de procesos educativos constantes con la comunidad (Salazar-Gutiérrez & Hincapié-Gómez, 2013). Los trinchos y el terrazo se pueden desarrollar con el propósito de recuperar los suelos, pero la inversión tiene mayor rentabilidad si los terrenos recuperados se van a utilizar en procesos agrícolas. De lo contrario si solamente se pretende recuperar los suelos, la mejor inversión es llevar a cabo reforestación con especies nativas o exóticas de rápido crecimiento, como Nogales, Cedros, Nacederos, Robles, entre otros (Salazar-Gutiérrez & Hincapié-Gómez, 2013).

Al respecto, en Betéitiva las pendientes del terreno oscilan entre treinta y sesenta grados, con un promedio de cuarenta y cinco, en las siete veredas. Entonces, son terrenos aptos para promover el diseño y la construcción de trinchos y de terrazas tanto para la recuperación de los suelos como para la siembra de diferentes productos agrícolas y de frutales (Gobernación de Boyacá & FAO, 1988). Con muy pocas variantes y con bajas excepciones las características son parecidas en la totalidad de los municipios del departamento de Boyacá y más del cincuenta por ciento de las poblaciones de América del Sur, dado que el Continente lo atraviesa de Sur a Norte la estructura montañosa de Los Andes. En este sentido, es esencial como lo plantean Santana-Castro and Prehn-Garcés (2023) iniciar acciones concretas, dado que con el transcurrir del tiempo los eventos catastróficos, como incendios, remociones en masa e inundaciones, en Latinoamérica, generados por el cambio climático se incrementan en intensidad y en frecuencia. Entonces, es un deber proponer políticas públicas para comenzar a resolver estos problemas.

Al respecto, con estas obras los municipios pueden incrementar las áreas productivas para mejorar la seguridad alimentaria de estos países y contribuir parcialmente con mitigar el cambio climático. En este sentido, Pérez (2024), Cely and Cely (2024) y Vargas (2024) plantean que dadas las ventajas que ofrecen los trinchos y las terrazas, que permiten volver a la producción y productividad que se conoció en años anteriores, ellos están dispuestos a colaborar con mano de obra no calificada para adelantar estas obras y como líderes saben que los miembros de la comunidad harán lo mismo. La condición que ellos ponen es que el municipio o el gobierno nacional pongan la maquinaria y los materiales necesarios. Al respecto, los diseños son muy sencillos y para presentar el proyecto para obtener financiación del gobierno nacional, el municipio, a través de sus funcionarios pueden elaborar las memorias, los planos y demás requisitos que solicitan.

2.2. Reforestar con árboles nativos preferiblemente

Los árboles contribuyen en disminuir la presencia de CO₂ en el ambiente, lo convierten en oxígeno y acumulan carbono, y con ello ayudan a mitigar el calentamiento global y el cambio climático. Según Navarro-Navarro and Moreno Vázquez (2016) ellos prestan grandes beneficios ecológicos y servicios ambientales como la regulación de la temperatura, provee sombrío a otras especies vegetales y animales y regula los vientos. Ellos ayudan a formar suelo con las hojas que se desprenden, se convierte en humus y con ello almacenan el agua lluvia para convertirse en escorrentía en forma de quebradas o ríos y en agua subterránea que alimenta los acuíferos, que luego salen en los manantiales o llamados ojos de agua (Peirone-Cappri et al., 2020; Perico-Granados et al., 2021). Para la Gobernación de Boyacá and FAO (1988) es necesario en la cuenca reforestar con árboles nativos, exóticos y con frutales. Igualmente, ellos contribuyen en el aumento de la resistencia al corte de los suelos, en cerca del sesenta por ciento, para evitar deslizamientos y remociones en masa cuando se reforesta con Nacederos, Nogales u otros de raíces similares (Salazar-Gutiérrez & Hincapié-Gómez, 2013).

Las recomendaciones que hace la entidad es que se haga con nativos como Frailejones en las partes altas de más de dos mil novecientos metros. También con Romero, Guargueros, Mortiños, Alisos, Sauces, Mangles, Robles, Guayacanes, Cedros, Chicalás, Alcaparros, entre otros. Ellos contribuyen a la producción de humus (suelo) y a la retención, regulación e infiltración del agua, en las partes altas y pendientes de más de 45 grados para obtener recarga en acuíferos y quebradas. El agua no brota de la tierra, dado que ella sale por los acuíferos y que se ha infiltrado en los afloramientos en las partes altas. En este sentido, en los páramos y sitios altos vírgenes tiene hasta dos metros de capa vegetal con 1,8 m³ de agua por cada metro cuadrado y que se infiltra o baja en forma de escorrentía regulada (Perico-Granados et al., 2021).

Igualmente, la FAO recomienda sembrar árboles exóticos como la Acacia, el Eucalipto y el Pino para fijar el nitrógeno del aire en el suelo y así permite generar nuevos productos. Estos árboles ayudan a retener el suelo y contribuyen al crecimiento de sotobosque que construyen suelo y con su uso disminuye la presión en los árboles nativos. Sin embargo, le da un lugar especial a la reforestación con frutales para cumplir con casi los mismos propósitos. Adicionalmente, estos árboles contribuyen a la seguridad alimentaria de la región, genera empleo y produce ingresos económicos importantes (Navarro-Navarro & Moreno Vázquez, 2016).

Entonces, un segundo proyecto es reforestar con árboles nativos, con frutales y en unos casos para recuperar suelos con exóticos. Para Ponce-Vega (2015) es una forma de sembrar el agua en las partes altas y luego

cosecharla en los manantiales y ojos de agua. Al respecto, los gobiernos definen recursos para este tipo de obras y específicamente en el gobierno nacional existen recursos para que se puedan apalancar con proyectos cerca de 50 billones de pesos por cada uno de los cuatro años, específicamente para agricultura y alimentación (Congreso de Colombia, 2023). En las entrevistas se encontró que los habitantes pueden poner la mano de obra para la siembra de los árboles y se pueden comprometer a sembrar y cuidar cinco árboles nativos por cada árbol frutal que se les entregue (Cely & Cely, 2024; Pérez, 2024; Vargas, 2024).

Igualmente, Pérez (2024), Cely and Cely (2024) y Vargas (2024) proponen que se hagan talleres y cursos con los estudiantes, padres de familia y profesores del colegio, para que exista mayor responsabilidad en su cuidado posterior. Igualmente plantean que se exima del Impuesto predial por diez años, para quienes siembren entre el cuarenta y cincuenta por ciento de sus predios con árboles nativos, que siempre es deseable que se haga en los terrenos de sus predios con mayor pendiente. El Municipio puede sobre esos árboles redimir los bonos de carbono. En este sentido, los funcionarios del municipio pueden elaborar un mapa con los predios de las partes altas y cabeceras de drenajes para precisar la cantidad de árboles nativos que se pueden sembrar en esos sitios, toda vez que son terrenos erosionados y sobre los cuales paralelamente se pueden presentar también para bonos de carbono. El municipio puede presentar los formularios de este proyecto.

2.3. Reservorios

Los reservorios son depósitos de agua hechos artificialmente para usar el líquido en riego de cultivos o para uso doméstico. Se pueden hacer para uso comunitario o para uso individual y puede tener diferentes formas y tamaños. Están los diseñados desde cinco, diez y veinte metros cúbicos, aunque en diferentes países se han construido hasta de cincuenta mil metros cúbicos, con construcción y uso comunitario (Marcos & Álvarez, 2016). Según Ponce-Vega (2015) estas obras hidráulicas en conjunto con sus complementos en América Latina se han construido desde antes de la llegada de los españoles y se hicieron para riego y para consumo, en unos casos con cubiertas para disminuir la evaporación.

Es importante precisar que Zubieta et al. (2020) expresan la preocupación al ver las tendencias negativas frente a las cantidades de agua en el altiplano, con el transcurrir del tiempo, con disminuciones de 0,7 milímetros de lluvia por cada año, incremento de las temperaturas con 0,04 grados centígrados en el mismo periodo y evapotranspiración que aumenta cerca de 70 milímetros en los periodos secos. Entonces, una opción con carácter de urgente para disminuir el estrés hídrico es la construcción de reservorios para almacenar las aguas lluvias y regular su afluencia. Se requiere iniciar ya, dado que de lo contrario se siguen desertificando los terrenos, con todas las consecuencias que de ello se derivan.

Los suelos apropiados para construir reservorios son los arcillosos porque disminuyen las posibilidades de infiltración y como consecuencia los costos, dado que se evitan los geotextiles para el recubrimiento. En las entrevistas se encontró que los habitantes pueden colaborar en la mano de obra para los canales de llamada, desarenadores, vertederos y en la cerca para la seguridad de personas y animales. Igualmente, en poner el terreno que se requiera para su construcción. Existen varios reservorios construidos por sus habitantes y han comprobado su gran utilidad para recoger agua y usarla de diferentes maneras. Sin embargo, igual que en la construcción de los trinchos el municipio o el gobierno nacional pongan la maquinaria y los materiales. Ellos se comprometen al mantenimiento de los desarenadores y demás obras que lo requieran (Cely & Cely, 2024; Pérez, 2024; Vargas, 2024).

En las visitas y en las entrevistas los habitantes observan que los terrenos de todas las veredas son aptos para reservorios, tanto como en los demás municipios asentados en la Cordillera de Los Andes, porque están a media ladera, evitan cortes innecesarios y facilitan compensación de terraplenes y se puede incrementar los volúmenes para almacenar con menor costo. Se encontró que con la experiencia que los habitantes tienen saben que sus terrenos son apropiados porque tienen un alto contenido de arcillas, aspectos que disminuye la posibilidad de infiltraciones (Cely & Cely, 2024; Pérez, 2024). Los entrevistados consideran que sí se requiere de más talleres y cursos para el trabajo en equipo y para que desde la construcción y en el proceso de la administración de los reservorios siempre haya claridad, cooperación, colaboración y armonía. Al respecto, los diseños de los reservorios son relativamente sencillos, que de igual forma que los proyectos anteriores los pueden hacer el

municipio directamente o puede elaborar los términos de referencia para su elaboración.

2.4. Tajamares múltiples a lo largo de la quebrada de Otengá

En la quebrada de Otengá hoy solamente se desvía el caudal medio y mínimo sin regular una gota de agua lluvia. Adicionalmente, con el paso del tiempo disminuyen los caudales medios y mínimos, pero en los periodos de lluvias se incrementan los máximos porque los tiempos de concentración son menores, dado que hay cada vez menos vegetación que ayude a la infiltración y a la retención del agua (Zubieta et al., 2020). Entonces, una opción técnica es embalsar el agua lluvia, con tajamares o presas de mayor altura y con ello se regula y se aprovecha para las épocas de pocas lluvias. Se complementan los proyectos con riego por aspersión o por goteo, porque el que se hace por inundación es el más ineficiente y dañino para las tierras y para su productividad. En estos embalses se pueden usar las descargas de fondo, para regular con válvulas mecánicas y para conducir a las tuberías que permitan ampliar el área de aprovechamiento de cultivos.

Los embalses con descarga de fondo evitan la colmatación de sedimentos, pero también se pueden construir desarenadores en cada uno aguas arriba para el mismo propósito. A estas obras es necesario hacer el mantenimiento periódico. En el trayecto visitado permite hacer cerca de diez a doce presas con las alturas adecuadas para regular un buen porcentaje de las aguas lluvias. Entonces, con la elaboración de los proyectos como presas, con las especificaciones técnicas, es posible incrementar de forma sustancial las áreas para cultivos y para frutales y con ello se genera empleo, ingresos para sus habitantes y se están haciendo obras muy importantes que contribuyen a mitigar el cambio climático.

Se encontró que los habitantes del municipio son conscientes que los nuevos proyectos de riego se lleven a cabo por aspersión o por goteo para evitar el de inundación, que se sigue usando hasta el momento. Ellos expresan que se pierde mucha agua, como se hace hoy, y daña las tierras. En cambio, si se lleva por tubería y se hace el riego de las formas señaladas se ahorra agua y se incrementa en un alto porcentaje las áreas que se pueden regar (Cely & Cely, 2024; Pérez, 2024). Al respecto, se ha encontrado que en promedio se inunda el terreno cerca de tres metros, para que el agua avance y por aspersión se riegan los diez centímetros necesarios para los cultivos, pastos y forrajes. Cuando el proceso se hace por goteo el rendimiento se multiplica mucho más para frutales como: tomate de árbol, feijoa, chirimoyas, uchuvas, aguacates y guayabas, entre otros árboles que se pueden cultivar en varios sitios del municipio. Entonces, se incrementa el cultivo y consumo de frutales y se pueden montar agroindustrias. En los casos que sea indispensable hacer la conducción por canales, deben estar revestidos en concreto para evitar las infiltraciones.

Con la construcción de estas obras se pueden ampliar las opciones para montar pisciculturas, desde la parte alta, en el sector de Las Puentes, como lo plantea el estudio de la Gobernación de Boyacá and FAO (1988). Se hacen con obras de desvío, con el caudal necesario, de acuerdo al tamaño de la piscifactoría (Gobernación de Boyacá & FAO, 1988). Entonces, para tener estas nuevas oportunidades es urgente sembrar el agua en las partes altas, con reforestaciones, principalmente con árboles nativos y promover su regulación natural y artificial. Quienes participaron en las entrevistas en todas las posibles obras para diseñar y construir insisten en necesidad de trabajar con las comunidades, con talleres y cursos para cimentar mucho más el trabajo en equipo, la colaboración y la solidaridad (Cely & Cely, 2024; Pérez, 2024). En este sentido, dada su especialidad el municipio puede hacer los términos de referencia para que se pueda contratar los estudios y los diseños que corresponden.

2.5. Distrito de Riego del río Chicamocha

Por las circunstancias descritas de la erosión y sus consecuencias doscientos cincuenta usuarios han emprendido una labor asociativa, con legalización de sus documentos, para promover y construir un distrito de riego. En el estudio preliminar se toma el agua del río Chicamocha, cerca al sitio de la Higuera y allí lleva un caudal medio de seis metros cúbicos. Con base en los potenciales usuarios, para cerca de mil doscientas hectáreas, para distintos cultivos y con el tipo de suelo se prevén mil litros por segundo de caudal para tomar. En predios de La Higuera se puede construir la laguna de oxidación para el tratamiento del agua, dado que supera los límites establecidos en Sólidos suspendidos, Coliformes totales y Fósforos totales, datos tomados de la estación San Isidro, sobre el río Chicamocha, cerca al sitio mencionado (Perico-Granados et al., 2024).

En el mismo estudio preliminar se propone una estación de bombeo y una conducción de cerca de ochocientos metros en tubería de excelente calidad, enterrada para evitar daños por la presión del bombeo. Existen ofrecimientos para ceder los lotes para las diferentes obras de bombeo y tanque de almacenamiento y los permisos para enterrar la tubería. El tanque tiene unas dimensiones preliminares de $50 \times 50 \times 2,5 = 6\,250 \text{ m}^3$. La propuesta se complementa para llevar el agua en tubería de distribución y desarrollar el proyecto por aspersión, en unos casos y en otros, como los frutales, por goteo. Así será posible volver a sembrar trigo, cebada, alfalfa, maíz y frutales como la uchuva, tomate de árbol, feijoa y en las partes más cálidas, guayaba, aguacate Hass, chirimoya, entre otros.

Para este proyecto, como para todos los analizados con los habitantes, ellos tienen interés en colaborar con la mano de obra no calificada, por parte de los usuarios potenciales de cada obra (Cely & Cely, 2024; Pérez, 2024). Entonces, la tarea prioritaria es la de elaborar los estudios y los diseños de las obras descritas, con sus actuales funcionarios y otras por delegación contractual. Se necesita en el municipio un técnico con capacidad gerencial que apoye al alcalde, de tiempo completo y conocimientos para ello, para orientar los proyectos. Para cumplir con su plan de gobierno en agosto deberá estar llevando los proyectos a los ministerios respectivos y al Departamento de Planeación, para obtener su aprobación. De esta manera, el municipio contribuye a la sustentabilidad con sostenibilidad social, económica y ambiental y con una inversión relativamente pequeña puede apalancar recursos que le representan cerca del diez mil por ciento.

2.6. Talleres y cursos para el trabajo en equipo y líneas de inversión

La totalidad de los entrevistados proponen la ejecución de cursos y talleres para promover el trabajo en equipo, para la colaboración de la construcción de las obras analizadas y con mayor razón para su administración y funcionamiento (Cely & Cely, 2024; Pérez, 2024). El trabajo de los expertos de la Gobernación de Boyacá and FAO (1988) tuvo un componente importante en talleres con todas las comunidades, tanto para el diagnóstico como para la formulación de propuestas. Sin embargo, dado que muchos de los integrantes de sus comunidades ya no están, quienes hoy participan y vivieron esos momentos, si están muy interesados en que se lleven a cabo nuevamente los talleres descritos, porque facilitan mucho el trabajo en equipo, la participación y el compromiso con todo el proceso.

El gobierno nacional en el plan de desarrollo tiene varias líneas de inversión para el sector rural y que quieren fortalecer los procesos agrícolas e incrementar la seguridad alimentaria (Congreso de Colombia, 2023). Entre estas se encuentran el Desarrollo social: educación rural; Infraestructura y adecuación de tierras; Producción agropecuaria y Economía solidaria y cooperativa; Conservación de la biodiversidad y restauración de los ecosistemas para la resiliencia climática; Inclusión productiva y financiera de pequeños y medianos productores rurales; Promoción de la agroindustria sostenible y de la agricultura y ganadería regenerativa; Compra, acceso, ordenamiento, regularización y uso productivo del suelo rural; Agua potable y saneamiento básico; Acceso físico y económico para la disponibilidad y adecuación de los alimentos, y Ordenamiento territorial alrededor del agua y gobernanza para la resolución de conflictos territoriales, sociales, productivos, ambientales, y la adaptación climática. Con la sumatoria de los diferentes rubros se acerca a sesenta billones de pesos anuales (Congreso de Colombia, 2023). Entonces, es un deber de los municipios elaborar los estudios y diseños para apalancar los recursos del presupuesto nacional y que el sector rural requiere.

03 ANÁLISIS DE LAS PROPUESTAS

Los proyectos relacionados contribuyen a la sustentabilidad, específicamente a la sostenibilidad social, económica y ambiental: trinchos y terrazas; reforestación con árboles nativos, frutales y exóticos; construcción de reservorios; ampliación de tajamares para desarrollar regulación de las aguas y construcción de un distrito de riego. Todos se enmarcan dentro de las propuestas que desarrolló en sus cursos y talleres y luego dejó como recomendaciones el Convenio de la Gobernación de Boyacá y la Gobernación de Boyacá and FAO (1988). Igualmente, los proyectos están dentro de las opciones que enmarca el Plan de desarrollo (Congreso de Colombia, 2023). Según González-Gaudiano et al. (2022) además de educar sobre el cambio climático es una necesidad urgente

formar para la adaptación al mismo, específicamente con acciones concretas, que permitan a las personas tener un bienestar, a pesar de los cambios por el calentamiento global.

Las propuestas de construcción de trinchos y reforestaciones con árboles nativos, frutales y exóticos fueron analizados y recomendados en el estudio de la Gobernación de Boyacá and FAO (1988). Para Salazar-Gutiérrez and Hincapié-Gómez (2013) las terrazas y los trinchos son una de las mejores soluciones para disminuir la formación de cárcavas, el arrastre de sólidos y la desertificación de los terrenos y paralelamente mejoran la producción. En el mismo sentido, la siembra de árboles, especialmente vernáculos y frutales, es una necesidad impostergable, dado que es la forma apropiada para sembrar el agua y cosecharla en diferentes momentos por escorrentía, manantiales, embalses, reservorios y distritos de riego (Navarro-Navarro & Moreno Vázquez, 2016; Peirone-Cappri et al., 2020). Igualmente, los árboles permiten disminuir las posibilidades de inundaciones por la regulación e infiltración que ellos generan sobre el agua (Perico-Granados et al., 2021).

Según Marcos and Álvarez (2016) los reservorios y los tajamares son un mecanismo muy importante para almacenar el agua, a pesar que se han utilizado hace mucho tiempo, hoy siguen vigentes. Igualmente, para Ponce-Vega (2015) ellos contribuyen a la gestión del recurso, especialmente para aliviar el estrés hídrico que produce su ausencia en las épocas de pocas lluvias. También, Saldi and Petz (2015) plantean que los reservorios se deben privilegiar frente al uso del agua subterránea, tanto por costos como por facilidad para su explotación, pero especialmente porque permite que le llegue a muchas más personas. Igualmente, Suárez-Díaz (2012) y Santana-Castro and Prehn-Garcés (2023) expresan que es un deber gestionar el riesgo para evitar los desastres que causan, cuando los eventos se producen y las obras descritas permiten regular el agua tanto de forma natural con las reforestaciones, como artificial con la construcción de las obras.

Estos proyectos junto a la construcción de distritos de riego permiten incrementar la seguridad alimentaria y ayudan a la recuperación del ambiente para el bienestar de las personas (Villadiego-Lorduy, 2020). De la misma forma, es una manera de tomar precauciones ante las posibilidades de disminución con valor absoluto de las lluvias y el incremento de la temperatura, a lo largo del tiempo, desde las mediciones con el calentamiento global (Zubieta et al., 2020). Entonces, son acciones que comprometen al alcalde y a los secretarios del municipio, concejales y líderes de la población. En las entrevistas se encontró que las personas están dispuestas a poner la mano de obra no calificada y el municipio, a través de los proyectos que consiga los recursos, pongan la maquinaria y los materiales (Cely & Cely, 2024; Pérez, 2024).

04 CONCLUSIONES

Los estudios elaborados por el Convenio de la Gobernación de Boyacá y por la FAO fueron hechos de manera rigurosa y se consultó a las diferentes comunidades tanto para elaborar los diagnósticos, como para hacer las propuestas de las obras que se deben implementar, para mitigar el cambio climático, incrementar la producción y la productividad y los ingresos de las personas. Entonces, es un análisis que lleva a unas propuestas que se deben poner en práctica lo antes posible.

Los trinchos, las reforestaciones y los reservorios son acciones que en un alto porcentaje los puede emprender por administración directa el municipio y sus resultados pueden ser aportes como cofinanciación para apalancar con más facilidad el complemento de estas mismas obras como los tajamares y el distrito de riego. Al respecto, el municipio puede convocar a los usuarios y motivar y aprovechar el interés de ellos para emprender la construcción de estas obras.

A partir del plan de desarrollo y con el presupuesto del año 2024 se pueden poner los recursos para los diseños de los tajamares y del distrito de riego del río Chicamocha. Así se pueden apalancar los dineros necesarios con el gobierno nacional, a partir de los aportes que éste tiene dispuestos para la agricultura y la alimentación, específicamente para los sectores rurales. Entonces, las autoridades locales pueden convocar a las comunidades para precisar junto al concejo municipal las prioridades para las obras de producción de alimentos, regulación del agua y aportes a la sustentabilidad del planeta con sostenibilidad social, económica y ambiental.

05 REFERENCIAS

- Cely, O., & Cely, V. (2024). Entrevista a profundidad para conocer su perspectiva sobre las obras para la recuperación del suelo y del agua en betétiva [Entrevista].
- Congreso de Colombia. (2023). Ley 2294: Por el cual se expide el plan nacional de desarrollo 2022-2026 "colombia potencia mundial de la vida". <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-04-plan-plurianual-de-inversiones-2023-2026.pdf>
- Gobernación de Boyacá & FAO. (1988). *Control de la erosión y recuperación y manejo de suelos en el departamento de boyacá* (tech. rep. No. TCP/COL/6754(A)). FAO.
- González-Gaudio, E., Bello-Benavides, L., & Ochoa-Martínez, C. (2022). Educación y comunicación para el cambio climático en la escuela complutense latinoamericana. un análisis del antes y el después del curso. https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/14078/1/XIICongreso_AEC_GonzalezGaudio.pdf
- Marcos, J., & Álvarez, S. (2016). Campos de camellones y jagüeyes en ecuador: Una visión integral desde la arqueología al presente socioambiental. *ISSN 1850-373X*. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-373X2016000100002
- Navarro-Navarro, L., & Moreno Vázquez, J. (2016). Cambios en el paisaje arbolado en hermosillo: Escasez de agua y plantas nativa. *Región y Sociedad*, 28(67). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252016000300079
- Peirone-Cappri, L., Torres, R., & Estrabou, C. (2020). Reforestar en áreas agrícola-ganaderas: Un estudio de caso evaluando el desempeño de dos especies nativas del espinal. *Bol. Soc. Argent.*, 55(4). <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v55.n4.29183>
- Pérez, A. (2024). Entrevista a profundidad para conocer su perspectiva sobre las obras para la recuperación del suelo y del agua en betétiva [Entrevista].
- Perico-Granados, N., Acosta-Castellanos, P., Tovar-Torres, C., & Medina-Naranjo, E. (2024). Propuesta preliminar del distrito de riego en betétiva [Documento en prensa].
- Perico-Granados, N., Arévalo-Algarra, H., Reyes, C., Perico, C., Vera-Guarnizo, M., & Monroy, J. (2021). Sitios de inundaciones causadas por los ríos la vega y jordán, tunja (boyacá). *Tecnura*, 25(67). <https://doi.org/10.14483/22487638.15248>
- Ponce-Vega, L. (2015). Puquios, qanats y manantiales: Gestión del agua en el Perú antiguo. *Revista Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(3). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722015000300002
- Salazar-Gutiérrez, L., & Hincapié-Gómez, É. (2013). Conservación de suelos y aguas. In *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (pp. 285–320, Vol. 1). Cenicafe. https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4325/1/cenbook-0026_13.pdf
- Saldi, L., & Petz, I. (2015). Aguas ajenas, tierras extrañas. desigualdad hídrica al sur de la cordillera de los andes en mendoza (argentina) a principios del siglo xxi. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 12(75). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr12-75.aate>
- Santana-Castro, M., & Prehn-Garcés, C. (2023). Plan de contingencia ante el fenómeno de el niño en la ciudad de chone. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XLIV(2). <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/629/529>
- Suárez-Díaz, J. (2012). *Análisis geotécnico. tomo i. Erosion*. <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico/>
- Vargas, A. (2024). Entrevista a profundidad para conocer su perspectiva sobre las obras para la recuperación del suelo y del agua en betétiva [Entrevista].
- Villadiego-Lorduy, J. (Ed.). (2020). *Alternativas de sostenibilidad ambiental para comunidades en el departamento de córdoba*. UPB. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/7240>

Zubieta, R., Laqui, W., & Lavad, W. (2020). Modelación hidrológica de la cuenca del río ilave a partir de datos de precipitación observada y de satélite, periodo 2011-2015. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222018000500085&script=sci_arttext

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflicto de interés de alguna naturaleza.

ORCID de los autores

Néstor Perico-Granados	https://orcid.org/0000-0003-1768-793X
Evelyn Carolina Medina-Naranjo	https://orcid.org/0009-0001-2942-8516
Carolina Tovar-Torres	https://orcid.org/0000-0003-3019-9092
Néstor Rafael Perico-Martínez	https://orcid.org/0000-0003-1834-914X

El problema de los tres tanques: una nueva visión (Parte 1)

Yaset Martínez ValdésE-MAIL: yaset1977@gmail.com

Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). La Habana, Cuba.

Félix Riaño ValleE-MAIL: riano@tesla.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). La Habana, Cuba.

RESUMEN

El problema de los tres tanques es un problema clásico en la mecánica de los fluidos y su solución ha sido abordada por varias vías. El problema consiste en calcular los gastos y velocidades de circulación en los tres ramales que componen el sistema hidráulico uninodal, así como la cota piezométrica o nivel relativo del nodo con respecto a los niveles de las superficies libres del agua de los otros depósitos. En este artículo, el primero de dos sobre esta línea de investigación, se elabora una metodología de trabajo con enfoque analítico para la solución directa y explícita de este tipo de problema en sus diferentes esquemas de operación. Se brinda un formato de trabajo para una solución general del cálculo de la cota piezométrica en el nodo. Bajo este nuevo enfoque de análisis de estos tipos de sistemas hidráulicos, se plantea el problema de los tres tanques como un caso particular del problema de los n elementos. Se presenta un procedimiento para resolver el problema de la indeterminación del sentido de circulación del depósito o elemento intermedio, componente clave para una correcta definición del caso a resolver. Se expone la metodología de trabajo mediante la resolución de un ejemplo práctico muy presente en los sistemas fuentes por bombeo.

PALABRAS CLAVE: *problema, tres, tanques*

The three-tank problem: a new vision (Part 1)

ABSTRACT

The three-tank problem is a classic problem in fluid mechanics and its solution has been tackled in several ways. The problem consists of calculating the flow rates and velocities in the three branches that make up the one-node hydraulic system, as well as the piezometric level or relative level of the node with respect to the levels of the free surfaces of the water in the other tanks. In this article, the first of two in this line of research, a working methodology with an analytical approach is developed for the direct and explicit solution of this type of problem in its different operating schemes. A working format is provided for a general solution of the calculation of the piezometric level in the node. Under this new approach to the analysis of these types of hydraulic systems, the three-tank problem is presented as a particular case of the n -element problem. A procedure is presented to solve the problem of the indeterminacy of the direction of circulation of the tank or intermediate element, a key component for a correct definition of the case to be solved. The working methodology is presented by means of the resolution of a practical example that is very common in pumped water systems.

KEYWORDS: *problem, three-tanks*

01 INTRODUCCIÓN



2026-06-10– RECIBIDO:

APROBADO: 2026-06-10

Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Un sistema de tuberías ramificadas está constituido por dos o más tuberías que se ramifican, sucesivamente, sin intersectarse en cierto punto y no vuelven a unirse aguas abajo otra vez para formar circuitos (Giles et al., 2003). Los extremos finales de las ramificaciones pueden terminar en un depósito o descargar libremente a la atmósfera. Un ejemplo de una red abierta se muestra en la figura 1.1. De acuerdo a las cotas piezométricas y la diferencia de niveles de las superficies libres del agua entre los depósitos, así como las características hidráulicas de los conductos, se deberá conocer o suponer la dirección de los caudales de circulación en los distintos tramos o ramales (Sotelo, 1997).

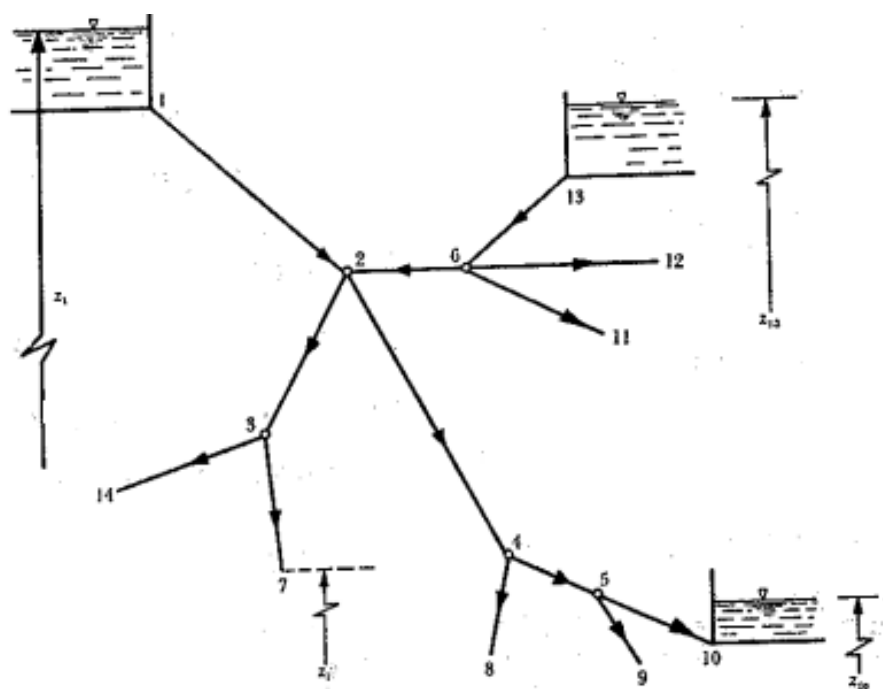


Figure 1.1. Esquema tipológico de una red abierta o ramificada (Sotelo, 1997).

Tomando como ejemplo el esquema de la figura 1.1, de acuerdo con la ecuación de energía aplicada entre el tanque superior y los extremos de descarga en las tuberías, resulta entonces:

$$Z_1 - \left(Z_j + \frac{v_j^2}{2g} \right) = \sum_{i=1}^j h_{ij} \quad (1.1)$$

Donde: Z_1 es la cota piezométrica en el punto 1 (m); Z_j es el nivel de la superficie libre del agua para el caso de una descarga libre en un depósito abierto a la atmósfera, o bien, la cota piezométrica de la línea central de la tubería si se trata de una descarga libre (m); el subíndice j corresponde a las características hidráulicas en el punto j ; v_j es la velocidad de circulación en el punto j en función del tipo de descarga que se realiza (m/s); mientras que el término de la sumatoria de h representa las pérdidas de carga en las tuberías que se encuentran en el recorrido de referencia, desde el punto 1 hasta el punto j (toma signo positivo para h en aquellos elementos en que la dirección del gasto coincide con la dirección del recorrido y negativo en caso contrario) (m). El término h_{ij} representa la suma de las pérdidas locales y de fricción en el tramo que va del nudo i al nudo j . Además, en cada punto de ramificación (nodo) se debe satisfacer la ecuación de Continuidad siguiente (Sotelo, 1997):

$$\sum_{i=1}^j Q = 0 \quad (1.2)$$

Estableciéndose como convención, que los gastos que lleguen al nodo, tengan signo negativo, y positivo los que

salgan de este. Se presentan entonces dos casos de análisis en estos sistemas: diseño y revisión o simulación. En el primer caso, donde se conoce el trazado, geometría y los gastos de circulación de cada tubería, se deberán elegir por lo menos $(l - m)$ diámetros de los l tramos que componen la red, siendo m el número de extremos finales, para evitar la indeterminación del problema, ya que las ecuaciones de nodo se convierten en identidades. Para el segundo caso, se tendrá un sistema de tantas ecuaciones del tipo (1.1) como extremos finales tenga la red; y de tantas ecuaciones del tipo (1.2) como nodos existan. Para la red de la figura 1.1 se pueden establecer ocho ecuaciones del primer tipo y cinco del segundo (Fuertes et al., 2002).

El problema de los tres tanques o depósitos es un sistema simple de tuberías ramificadas con una ramificación única, y consiste en tres depósitos a distintos niveles, unidos por tres conducciones o ramales, que forman un sistema de circulación en Y (esquema clásico), tal y como se muestra en la figura 1.2 en su planteamiento más conocido (Cabrera, 2009).

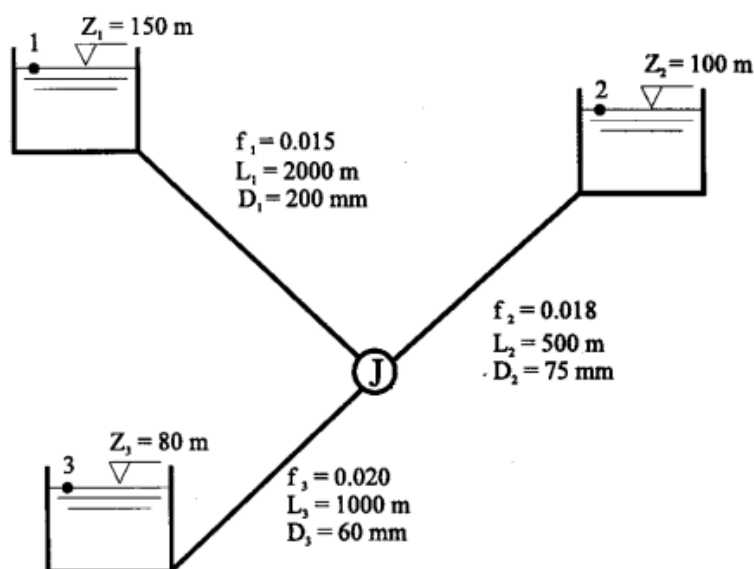


Figure 1.2. Planteamiento clásico del problema de los tres tanques o depósitos en configuración en Y.

Este es un problema clásico en la literatura y su solución ha sido abordada desde distintos enfoques, en su mayoría, por la vía iterativa. El problema se resume en determinar los caudales y velocidades de circulación en los tres ramales, así como la cota piezométrica o nivel relativo del nodo J con respecto a los niveles de las superficies libres del agua de los otros depósitos (véase la figura 1.2).

En este artículo, el primero de dos sobre este tema, se abordará un nuevo enfoque analítico para la solución directa y explícita de este tipo de problema en sus diferentes alternativas de operación. Se presentará una metodología de trabajo para la resolución de cada uno de los casos posibles a presentarse, brindando un formato de trabajo para una solución general. La misma se utilizará para realizar un ejemplo práctico ampliamente abordado en la literatura.

02 DESARROLLO

El problema de los tres tanques es un problema típico dentro del cálculo hidráulico de sistemas de tuberías. Se trata de calcular los caudales circulantes por cada una de las líneas, conocidas las características de las tuberías, las propiedades del fluido y las cotas topográficas o piezométricas de los depósitos. Por simplicidad del cálculo, puesto que el objetivo de este trabajo es presentar el modo de operación ante estos casos, se supondrá que las pérdidas menores estarán incluidas como longitud equivalente.

Para resolver el citado problema se deben satisfacer la ecuación de Bernoulli aplicada entre cada depósito y el nodo J (ver figura 1.2) y la ecuación de Continuidad aplicada en este. Esta última establece que el flujo hacia

el nodo debe ser igual al flujo hacia fuera de este, según se definió en la ecuación (1.2).

La solución se encuentra suponiendo primero una cota piezométrica en el nodo y luego calculando los caudales Q_1 , Q_2 y Q_3 y sustituyéndolos en la ecuación de Continuidad. Si el caudal hacia el nodo es muy grande, se supone una mayor cota piezométrica, lo cual reducirá el caudal afluente e incrementará el caudal de salida, y viceversa. El flujo será desde el depósito o depósitos más elevados hacia el o los tanques de menor cota piezométrica.

Para el caso más sencillo como el de la figura 1.2, según las características de la conducción 2 y el valor de la cota piezométrica del depósito 2 en comparación con la del nodo J , el caudal por la citada línea puede ser de 2 a J o viceversa. Por consiguiente, la ecuación de balance en el nodo podrá adoptar diferentes alternativas; se tendrían dos formulaciones: $Q_1 = Q_2 + Q_3$ o bien $Q_1 + Q_2 = Q_3$.

Por lo tanto, es necesario realizar una hipótesis previa de circulación. Si el sistema es irresoluble para esta hipótesis adoptada, la conclusión es que el sentido de circulación es el inverso al asumido. El sistema así obtenido cuenta con cuatro ecuaciones y otras tantas incógnitas (CP_n , Q_1 , Q_2 y Q_3). La forma de resolver el sistema es mediante un proceso iterativo, puesto que el sistema de ecuaciones propuesto no es lineal. Este método de iteración en el nodo puede ser resuelto por varias técnicas iterativas como las enunciadas anteriormente.

En la revisión de la amplia literatura sobre este tema, se ha podido constatar que el problema clásico, en sus casos más comunes, se aborda desde la perspectiva de tres tanques, y bombas y tanques (menos usual). Para cualquiera de las variantes, la solución iterativa es la que más se ha abordado y, en aislados casos, se ha esbozado una solución analítica que permite resolver los dos casos siguientes (Haestad Methods et al., 2003):

1. Determinación de caudales, conocidas las características de la red y las diferencias de cotas entre los depósitos; trabajando, por lo tanto, con tres ecuaciones con tres incógnitas.
2. Determinación de la diferencia de cotas entre los depósitos, conocidos los caudales y las características de la red; habrá por lo tanto dos ecuaciones con dos incógnitas, ya que las ecuaciones de los caudales son una identidad.

Luego de una profunda revisión crítica sobre los casos más abordados en la literatura, se pueden citar algunas consideraciones: el problema se ha enfocado sobre todo para resolver el esquema de tres tanques, y bombas y tanques (menos usual), siendo el número máximo de elementos considerados 4; se trabaja con valores constantes de los factores de fricción f o C , polinomios reducidos o incompletos de las curvas características de carga-capacidad de las bombas rotodinámicas; se emplea el método de solución gráfico-analítica por la vía iterativa, utilizando en muy contados casos soluciones analíticas bajo ciertas restricciones y comedimientos específicos. Sobre estas propuestas de soluciones analíticas se profundizará en este trabajo.

2.1. Metodología para la solución analítica del problema de los tres tanques

Aunque la propuesta de solución analítica se centrará para el caso de los tres tanques, se abordará el enfoque de solución para un número n de elementos asociados. Por elementos, deberá entenderse, sobre todo, bombas o bomba equivalente (simulación análoga de un acople de m bombas en paralelo) y depósitos. De esta forma, el problema de los tres tanques se considera un caso particular del que pudiera denominarse el problema de los n elementos.

En su concepción más general, el problema de los n elementos tendría un esquema topológico de varios elementos asociados a un único nodo. Aunque se ha tomado como referencia explicativa para la metodología que se presenta el ejemplo de la figura 1.2, estos tipos de sistemas pueden tener diversas variantes topológicas que varían en su complejidad en función del número de elementos. Este modelo que se ilustra es el más sencillo que se puede plantear, pero el procedimiento metodológico general es aplicable para cualquier topología por más compleja que sea.

Para el análisis de las soluciones propuestas para cada caso, el esquema que se tomará como modelo será el de un solo nodo, al cual estarán asociados n elementos. Cuando se suman más elementos al sistema, se dificulta aún más el problema de la indeterminación del sentido de circulación del tanque 2 o intermedio, aumentándose el inconveniente mientras más elementos existan. Para ir esbozando la solución general, se parte del hecho que siempre el depósito —no una bomba o bomba equivalente, ya que para este caso hay que verificarlo— más

elevado inyectará agua al sistema y el de menor cota piezométrica recibirá agua. Estos dos ramales son los únicos con los cuales se conoce *a priori* su sentido de circulación. Del resto, se desconoce su sentido de circulación.

Giles et al. (Giles et al., 2003) proponen una solución para, de cierta forma, resolver este problema para un esquema de tres tanques. Se asume en la primera iteración que la cota piezométrica en el nodo será igual a la cota piezométrica del tanque intermedio. De esta forma, se garantiza que el caudal en ese ramal sea cero, por lo cual se reduce el número de cálculos. Se procede a calcular los caudales desde el tanque superior hacia el nodo, y desde este, hacia el depósito más bajo. De los valores de estos caudales se infiere que la cota piezométrica en el nodo deberá aumentar o disminuir si el caudal hacia el nodo es mayor que el saliente y viceversa, respectivamente.

Giles et al. (Giles et al., 2003) aplican una solución gráfica-analítica particular, diferente a la solución gráfica tradicional (CP vs. ΔQ), pero igual de válida, la cual se muestra en la figura 2.1 junto al esquema habitual (imagen de la izquierda). Esta última está en función de la cota piezométrica en el nodo, mientras que la propuesta por Giles está en función del caudal hacia el nodo, Q_{hacia} . Para ambos casos, el término ΔQ representa el balance de caudales en el nodo.

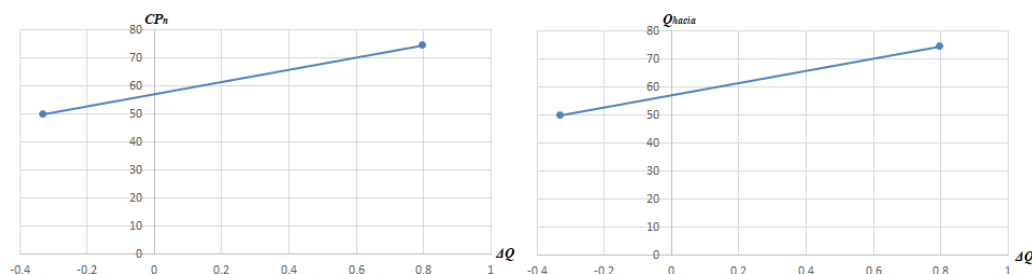


Figure 2.1. Gráficas de solución tradicional en función de la CP_n (izquierda) y la propuesta por Giles (derecha) (Giles et al., 2003).

2.2. Solución del problema de la indeterminación del sentido de circulación del depósito intermedio (elemento intermedio)

Se comenzará primero para el caso de tres elementos. Tomando como ejemplo el esquema de la figura 1.2, se plantea la ecuación de Bernoulli desde el depósito superior (1) hasta el nodo J y de este hacia el tanque receptor inferior (3):

$$Z_1 = CP_J + hf_1 = CP_J + K_1 Q^2 \quad (2.1)$$

$$CP_J = Z_3 + hf_3 = Z_3 + K_3 Q^2 \quad (2.2)$$

Donde: Z_1 y Z_3 son las cotas piezométricas de las superficies libres del agua en los depósitos 1 (superior) y 3 (inferior), respectivamente (m); CP_J es la cota piezométrica en el nodo J (m); hf_1 y hf_3 son las pérdidas de carga en las tuberías 1 y 3, respectivamente (m), y K_1, K_3 son los coeficientes característicos de las conducciones 1 y 3 (m^2/s^5).

Igualando ambas expresiones (2.1) y (2.2) en función de la cota piezométrica en el nodo J , queda:

$$Z_1 = Z_3 + hf_3 + hf_1 \rightarrow Z_1 - Z_3 = \Delta Z_{1-3} = K_3 Q^2 + K_1 Q^2 \rightarrow \Delta Z_{1-3} = Q^2 (K_3 + K_1) \quad (2.3)$$

Donde: ΔZ_{1-3} : diferencia de niveles entre los depósitos 1 y 3, (m).

Despejando el caudal de la expresión (2.3), se obtiene:

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta Z_{1-3}}{K_3 + K_1}} \quad (2.4)$$

Con este caudal, el calculado bajo la suposición de que el ramal 2 no existiese, sería el gasto que circula por el

sistema de tuberías en serie T1–J–T3. Luego con este se procede a determinar la cota piezométrica en el nodo J. Este cómputo puede realizarse por la ecuación (2.1) o (2.2). La rasante piezométrica definida para este sistema en serie sería la predominante del sistema general. Esta cota se tomará como referencia para decidir el sentido de circulación en la línea 2, de forma que, si la cota piezométrica en el depósito 2 es mayor a esta, el sentido de circulación será del tanque al nodo y viceversa.

Una vez definido el sentido de circulación en el ramal 2, se puede plantear la ecuación de balance en el nodo de forma correcta para su solución.

Cuando se tratare de varios tanques conectados al nodo, se deberán organizar estos de forma descendente en función de su cota piezométrica, exceptuando el de mayor y menor cota piezométrica del sistema. Es necesario aclarar que esta forma de organización pudiera resultar engañosa, máxime en sistemas que cuenten con varios elementos. Lo recomendable sería organizar la combinación de ramales en función del gasto (ecuación 2.4) de mayor a menor o de forma inversa, si se realizase según el coeficiente característico de la conducción, K , siempre para el caso de la línea que acompaña a la tubería que va hacia el depósito inferior (ej. tubería 3, según el modelo de la figura 1.2).

Luego de determinada la cota piezométrica en el nodo J por el procedimiento anterior, se procederá a comparar esta con la cota piezométrica del depósito 2, CP_2 , determinando su sentido de circulación en función de lo apuntado arriba.

Para el siguiente depósito, CP_3 , deberá calcularse previamente la cota piezométrica en el nodo, con el esquema de solución de los tres tanques (1, 2 y n). Esto es necesario hacerlo ya que deberá calcularse la nueva cota piezométrica en el nodo, la cual será mayor que la previamente determinada. Esta afirmación resulta del principio hidráulico de que, a medida que se sumen elementos que aporten al nodo, el caudal se incrementará a la vez que aumenta la cota piezométrica en este.

Si la nueva cota piezométrica en el nodo, resultado del aporte de los tanques 1 y 2, es inferior a CP_3 , entonces este depósito aportará al nodo, y a la inversa en caso contrario. Este procedimiento se irá repitiendo hasta encontrar el depósito cuya cota piezométrica sea inferior a la nueva calculada en el nodo. A partir de ese reservorio, hasta el tanque inferior, todos recibirán flujo desde el nodo, o sea, serán depósitos receptores.

Un caso particular es aquel sistema donde aparecen como parte de los elementos bombas o bombas equivalentes, trabajando solas contra un depósito o de conjunto con depósitos. Apoyándonos en el esquema de la figura 1.2, y suponiendo que en vez del depósito 1 tuviéramos una bomba, el procedimiento a desarrollar sería el mismo, solo que la ecuación para determinar el gasto del sistema en serie B1–J–T3 sería:

$$Q_{1,2} = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4K_c \Delta Z_{1-3}}}{2K_c} \quad (2.5)$$

Siendo:

$$\Delta Z_{1-3} = Z_3 - Z_{s1} - A \quad (2.6)$$

$$K_C = K_1 + K_3 - C \quad (2.7)$$

Donde:

- Q : caudal impulsado por la bomba o combinación de bombas en paralelo (bomba equivalente), (m^3/s).
- B y C : coeficientes del polinomio representativo de la curva H–Q de una bomba o de la combinación de bombas en paralelo, que están en función de las pérdidas de carga en el interior de la(s) bomba(s), (s/m^2), (s^2/m^5), respectivamente.
- K_C : coeficiente característico equivalente del sistema en serie B1–J–T3, (s^2/m^5).
- ΔZ_{1-3} : diferencia de niveles entre el nivel dinámico del pozo 1 y el depósito 3, (m).
- Z_{s1} : cota piezométrica del nivel dinámico en el pozo de la estación de bombeo 1, (m).
- A : coeficiente del polinomio representativo de la curva H–Q que define el valor de la carga que desarrolla la bomba o bomba equivalente para caudal cero o válvula cerrada, (m).

La ecuación general que modela la curva característica de carga-capacidad de las bombas rotodinámicas de iguales características hidráulicas en su formato general viene representada por (Martínez & Riaño, 2010):

$$H = A \pm \frac{B}{n_b} Q - \frac{C}{n_b^2} Q^2 \quad (2.8)$$

Donde:

- H : carga que desarrolla la(s) bomba(s) equivalente(s), (m).
- n_b : número de bombas trabajando en paralelo (si fuera el caso), adimensional.

Según Martínez (2011), para las bombas rotodinámicas de diseño normalizado con un valor de N_q de 53 a 57, el coeficiente B tiende a cero, por lo cual, para esos casos, se procedería a trabajar con el polinomio incompleto de la forma:

$$H = A - \frac{C}{n_b^2} Q^2 \quad (2.9)$$

2.3. Procedimiento metodológico para el cálculo de la cota piezométrica en el nodo

Para tratar los varios casos que se abordarán desde el punto de vista analítico, es necesario aclarar que todas estas variantes se pueden realizar también por la vía gráfica, con un trabajo más tedioso y menos preciso. El procedimiento propuesto se basa en la determinación directa de la cota piezométrica en el nodo, CP_n , el cual tendrá variaciones en su modelo, en función del número de elementos en el sistema y sus características hidráulicas. La metodología se realizará para los casos con tres elementos, cuatro y un número n de elementos. El procedimiento consta de una subrutina de cálculo intermedio para el cómputo del valor del coeficiente de fricción, f , determinado por la expresión de Swamee–Jain. Se intuye que las pérdidas de carga en las conducciones serán determinadas por la ecuación de Darcy–Weisbach.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (2.10)$$

Donde: ε es la rugosidad absoluta de la tubería asociada al material (m); D es el diámetro interior de la tubería (m); y N_R es el número de Reynolds que caracteriza el flujo en la conducción.

$$N_R = \frac{vD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D \nu} \quad (2.11)$$

$$h_f = 0,0826 f \frac{L_{eq}}{D^5} Q^2 = K_{WD} Q^2 \quad (2.12)$$

03 SOLUCIÓN GENERAL PARA n ELEMENTOS

La solución de este caso cuando participan varios elementos resulta de aplicar un método iterativo o bien utilizar la vía gráfica para encontrar el valor de CP_n , ya que no cuenta con una solución explícita directa.

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{\eta_i - \psi_i CP_n} + \sum_{j=1}^m \left(\omega_j \pm \sqrt{\beta_j - \phi_j CP_n} \right) - \sum_{k=1}^{\tilde{n}} \sqrt{\psi_k CP_n - \eta_k} = 0 \quad (3.1)$$

Es importante destacar que el segundo término de la ecuación (3.1) refleja la participación de m bombas en el sistema con sus respectivos caudales de bombeo, el cual se consideraría solo en aquellos casos donde hubiera estos equipos. El primer y último término, caracterizan los caudales de los n y $\tilde{n}$ depósitos que aportan y reciben en el sistema, respectivamente. Los distintos coeficientes se calcularían como sigue:

$$\eta_{i,k} = \frac{CP_{T_{i,k}}}{K_{WD_{i,k}}} \quad (3.2) \quad \omega_j = -\frac{B_j}{2(K_j - C_j)} \quad (3.3) \quad \beta_j = \frac{B_j^2}{4(K_j - C_j)^2} + \frac{Z_{sj} + A_j}{K_j - C_j} \quad (3.4)$$

$$\phi_m = \frac{1}{K_j - C_j} \quad (3.5)$$

$$\psi_{i,k} = \frac{1}{K_{WD_{i,k}}} \quad (3.6)$$

Para un número grande de elementos conectados al nodo, la solución iterativa se complejiza aún más. Sin embargo, en la práctica es habitual que a un nodo se conecten a lo sumo cuatro elementos, aprovechando la posibilidad de la instalación de una cruceta o algún accesorio hidráulico similar. El número de elementos y sus características hidráulicas particulares permitirá establecer posibles soluciones directas atendiendo a cada caso. Teniendo en cuenta esto, y trabajando con un máximo de cuatro elementos, la ecuación (2.12) podría operar con hasta cinco términos, dado que el número de estos puede ser igual o una unidad superior a la cantidad de elementos. En este caso, desde el punto de vista técnico no existe ningún problema, sin embargo, desde una visión matemática ocurre un problema de imposibilidad de la obtención de una solución analítica directa de forma explícita. Para estas variantes topológicas se desarrolla el fenómeno de la recurrencia del formato del polinomio irracional, lo cual limita la obtención de soluciones analíticas explícitas solo para los casos con hasta cuatro términos.

Para estas variantes, la solución puede obtenerse solamente por la vía iterativa o bien buscando algún subterfugio para disminuir los términos hasta el máximo de cuatro. Esto último solo se puede hacer si existieran bombas como parte de los elementos. Este tipo de elemento es representado generalmente con dos términos y, de forma excepcional, con uno solo cuando el coeficiente $B = 0$, mientras que los depósitos son simbolizados con un único término. Por ejemplo, en el caso de tres depósitos y una bomba (cuatro elementos), se cuenta de forma general con cinco términos, por lo cual, si se quisiera obtener una solución analítica directa explícita, se debería sustituir el polinomio representativo de la curva característica de carga-capacidad en su forma general (ecuación (2.8)) a un formato incompleto (ecuación (2.9)).

Este proceso de sustitución de polinomios equivalentes se realiza solamente para el dominio de las funciones comprendido en el rango de operación recomendada por el fabricante o, preferiblemente, dentro del rango de fiabilidad de la bomba. En términos prácticos, el dominio de análisis sería el rango de 40

Tomando como referencia el ejemplo del esquema de la figura 1.2, se plantean los siguientes casos, de los cuales, por una cuestión de extensión del trabajo, se obvia el proceso de deducción de las ecuaciones de solución. En este primer artículo se centrará el estudio en el análisis de los casos con tres elementos y tres términos. Las variantes dependen del número de elementos (3) y sus características hidráulicas, así como del régimen de circulación de los caudales del sistema de tuberías. De esta forma, se tienen los siguientes casos:

- Caso 1. Dos depósitos alimentan a un depósito (T1 y T2 abastecen a T3)
- Caso 2. Un depósito suministra agua a dos tanques (T1 abastece a T2 y T3)
- Caso 3. Dos bombas abastecen a un tanque (B1 y B2 alimentan a T1) (caso con $B = 0$)
- Caso 4. Una bomba abastece a dos depósitos (B1 alimenta a T1 y T2) (caso con $B = 0$)
- Caso 5. Una bomba abastece de conjunto con un depósito a un tanque (B1 y T1 brindan servicio a T2) (caso con $B = 0$)

Para todos los casos, la ecuación que modela la simulación hidráulica de estos esquemas de operación para la obtención de la cota piezométrica en el nodo CP_n viene dada por el siguiente polinomio cuadrático:

$$a_1 CP_n^2 + a_2 CP_n + a_3 = 0 \quad (3.7)$$

El cual se resuelve por la expresión (Teorema de Cardano-Vieta):

$$CP_n = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1} \quad (3.8)$$

Caso 1

$$a_1 = 4\alpha_3 - \alpha_2^2 \quad (3.9) \quad a_2 = 2\alpha_1\alpha_2 - 4\alpha_4 \quad (3.10) \quad a_3 = 4\alpha_5 - \alpha_1^2 \quad (3.11) \quad \alpha_1 = \sum_{i=1}^3 \eta_i \quad (3.12)$$

$$\alpha_2 = \sum_{i=1}^3 \psi_i \quad (3.13) \quad \alpha_3 = \psi_1\psi_2 \quad (3.14) \quad \alpha_4 = \eta_1\psi_2 + \eta_2\psi_1 \quad (3.15) \quad \alpha_5 = \eta_1\eta_2 \quad (3.16)$$

Caso 2

Los coeficientes $a_1, a_2, a_3, \alpha_1, \alpha_2$ coinciden con el Caso 1:

$$\alpha_3 = \psi_2\psi_3 \quad (3.17) \quad \alpha_4 = \eta_3\psi_2 + \eta_2\psi_3 \quad (3.18) \quad \alpha_5 = \eta_2\eta_3 \quad (3.19)$$

Caso 3

$$a_1 = \alpha_2^2 - 4\alpha_3 \quad (3.20) \quad a_2 = 2\alpha_2\alpha_1 + 4\alpha_4 \quad (3.21) \quad a_3 = \alpha_1^2 - 4\alpha_5 \quad (3.22) \quad \alpha_1 = \beta_1 + \beta_2 - \eta_1 \quad (3.23)$$

$$\alpha_2 = \psi_1 - \phi_1 - \phi_2 \quad (3.24) \quad \alpha_3 = \phi_1\phi_2 \quad (3.25) \quad \alpha_4 = \phi_1\beta_2 + \phi_2\beta_1 \quad (3.26) \quad \alpha_5 = \beta_1\beta_2 \quad (3.27)$$

Caso 4

Los coeficientes a_1, a_2 y a_3 coinciden con el Caso 3, según las ecuaciones (3.20), (3.21) y (3.22).

$$\alpha_1 = \eta_1 + \eta_2 - \beta_1\psi_2 \quad (3.28) \quad \alpha_2 = \phi_1 - \psi_1 - \psi_2 \quad (3.29)$$

$$\alpha_3 = \psi_1\psi_2 \quad (3.30) \quad \alpha_4 = \psi_1\eta_2 + \psi_2\eta_1 \quad (3.31) \quad \alpha_5 = \eta_1\eta_2 \quad (3.32)$$

Caso 5

$$a_1 = \alpha_2^2 + 4\alpha_3 \quad (3.33) \quad a_3 = \alpha_1^2 + 4\alpha_5 \quad (3.34) \quad \alpha_1 = \beta_1 - \eta_1 - \eta_2 \quad (3.35)$$

El coeficiente a_2 coincide con el definido para el Caso 1 y se obtiene mediante la ecuación (3.10).

$$\alpha_2 = \psi_1 + \psi_2 - \phi_1 \quad (3.36) \quad \alpha_3 = \psi_1\phi_1 \quad (3.37) \quad \alpha_4 = \eta_1\phi_1 + \beta_1\psi_1 \quad (3.38) \quad \alpha_5 = \beta_1\eta_1 \quad (3.39)$$

A continuación, se desarrolla un ejemplo práctico donde se expone la metodología de trabajo en uno de los casos analizados.

3.1. Aplicación de la metodología de trabajo como procedimiento de simulación hidráulica para un sistema fuente por bombeo.

Como información del sistema fuente por bombeo se conoce que el servicio de abasto será continuo durante las 24 horas con un caudal constante. En la Tabla 3.1 se brinda información sobre las características hidráulicas del sistema fuente por bombeo. Para ilustrar el esquema del sistema hidráulico, se utilizará como referencia la Figura 1.2, donde se sustituye el depósito 2 por una bomba rotodinámica (B1).

La cota piezométrica del nivel del agua en el tanque de regulación es $Z_t = 7,000$ m (cota de descarga de la tubería en el depósito). Se emplearán tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD). La rugosidad absoluta del material PEAD es de $2,5 \times 10^{-6}$ m. La presión nominal de diseño de dichas tuberías será de 5 atm (PN 5). Se ha tomado como valor indicativo para el diseño y la operación del sistema un rango de velocidad recomendable de 1–1,8 m/s (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), 2006). Asimismo, se considera un valor de viscosidad cinemática de 10^{-6} m²/s.

El polinomio representativo de la curva característica de carga-capacidad de la bomba, ajustado a una ecuación de segundo grado según la expresión (2.8), viene dado por (con Q en m³/s y H en m):

Bomba 1:

$$H_{B1} = 15,12083 - 1,14146 Q - 47,77357 Q^2 \quad (3.40)$$

El esquema topológico nos puede indicar que pueden corresponder a los casos 4 o 5. Para cualquiera de estos casos, se analiza la variante de tres elementos con tres términos, por lo cual se hace necesario sustituir el polinomio representativo de la curva característica de carga-capacidad, por una forma análoga con la restricción de que $B = 0$.

Antes de proceder en este sentido, se debe resolver primero el problema de indeterminación del sentido de

Table 3.1. Información de las características hidráulicas del sistema fuente por bombeo

Longitud de tuberías (m)		Cotas y niveles dinámicos (m)	
Conductora principal CP (Línea 3)	3000,00	Nodo, Z_n	5,000
Conductora secundaria 1 CS1 (Línea 1)	1500,00	Pozo 1, Z_{S1}	7,000
Conductora secundaria 2 CS2 (Línea 2)	1000,00	Depósito 1, Z_{T1}	15,000
Diámetros de las tuberías del sistema hidráulico (m)			
D_{CS1}	D_{CS2}	D_{CP}	
$D_{int} = 0,5908$ ($D_{ext} = 630$ mm)	$D_{int} = 0,5252$ ($D_{ext} = 560$ mm)	$D_{int} = 0,9378$ ($D_{ext} = 1000$ mm)	

circulación en las líneas 1 y 2, con lo cual quedaría determinado cuál caso se está abordando, el 4 o el 5. Con este proceder, se podrá determinar si la bomba 1 aporta caudal al nodo, si abastece a ambos depósitos o si ambos elementos aportan al tanque 2.

En este sentido, la solución de la incógnita del sentido de circulación se puede analizar tanto por el sistema en serie (B1–J–T2) como por la vía del depósito superior (T1–J–T2). La Figura 1.2 representa el esquema hidráulico de referencia.

Primeramente, se calculan los caudales para ambas alternativas a través de las ecuaciones (2.4)–(2.7). Los resultados se muestran en la Tabla 3.2.

Table 3.2. Resultados del análisis hidráulico de los sistemas en serie (B1–J–T2) y (T1–J–T2)

Sistema B1–J–T2		Sistema T1–J–T2	
Gasto de circulación Q_{2-3} (m ³ /s)	0,438228	Gasto de circulación Q_{1-3} (m ³ /s)	0,582291
Coefficiente de fricción f_2	0,011613	Coefficiente de fricción f_1	0,011298
Coefficiente de fricción f_3	0,012741	Coefficiente de fricción f_3	0,012138
Velocidad v_2 (m/s)	2,023	Velocidad v_1 (m/s)	2,124
Velocidad v_3 (m/s)	0,634	Velocidad v_3 (m/s)	0,843
Cota piezométrica CP_n (m)	7,836	Cota piezométrica CP_n (m)	8,406

Debido a que el gasto de circulación mayor corresponde al sistema en serie por la vía (T1–J–T2), esta define la rasante piezométrica predominante. Por tanto, se adopta la mayor cota piezométrica.

Se verifica la contribución de la bomba al nodo mediante la condición:

$$Z_{S1} + A_1 > CP_n$$

resultando:

$$7,000 + 15,121 = 22,121 \text{ m} > 8,406 \text{ m}$$

por lo cual se confirma que la bomba aporta al nodo y se trata del Caso 5.

Antes de iniciar el procedimiento de cálculo de la cota piezométrica en el nodo, se hace necesario obtener un polinomio sustitutivo de la ecuación 3.40 con la restricción $B = 0$, satisfaciendo el requisito de tres elementos y tres términos. Para ello se trabaja en el intervalo de caudal $0,4Q_d$ a $1,4Q_d$ mediante el método de mínimos cuadrados. Los resultados se muestran en la Tabla 3.3.

Resolviendo la ecuación 3.8, se obtienen los valores tras un proceso iterativo para la determinación de los coeficientes de fricción de cada tubería (iniciando con $f = 0,02$):

$$CP_n = 10,099 \text{ m}; \quad f_1 = 0,011589796; \quad f_2 = 0,011783862; \quad f_3 = 0,011309861; \quad (3.41)$$

Table 3.3. Datos característicos de la curva carga-capacidad y su equivalente reducida H_{e1}

Q (m ³ /s)	Q_a (%)	H_{B1} (m)	H_{e1} (m)	Error (%)
0.000	0	15,121	–	–
0.060	20	14,880	–	–
0.120	40	14,296	14,280	0,111
0.180	60	13,367	13,380	0,093
0.240	80	12,095	12,120	0,206
0.300	100	10,479	10,500	0,203
0.360	120	8,518	8,520	0,018
0.420	140	6,214	6,180	0,550
0.480	160	3,566	–	–
Error medio del intervalo (%)				0,197

$$Q_1 = 0,495615 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_2 = 0,400053 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_3 = 0,895668 \text{ m}^3/\text{s}; \quad (3.42)$$

$$v_1 = 1,808 \text{ m/s}; \quad v_2 = 1,847 \text{ m/s}; \quad v_3 = 1,297 \text{ m/s}. \quad (3.43)$$

Si se utiliza la vía iterativa resolviendo la ecuación 3.1, empleando la curva completa o su aproximación, mediante SOLVER de Excel se obtiene:

$$CP_n = 10,101 \text{ m}; \quad f_1 = 0,011590109; \quad f_2 = 0,011782295; \quad f_3 = 0,011309367; \quad (3.44)$$

$$Q_1 = 0,495530 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_2 = 0,400383 \text{ m}^3/\text{s}; \quad Q_3 = 0,895912 \text{ m}^3/\text{s}; \quad (3.45)$$

$$v_1 = 1,807 \text{ m/s}; \quad v_2 = 1,848 \text{ m/s}; \quad v_3 = 1,297 \text{ m/s}. \quad (3.46)$$

El error relativo en la cota piezométrica es de 0,015%. Comparando ambos métodos, se observa que el procedimiento propuesto reduce aproximadamente a la mitad el tiempo de cómputo respecto a la herramienta SOLVER de Microsoft Excel.

04 CONCLUSIONES

La simulación hidráulica de sistemas de tuberías ramificadas constituye una herramienta fundamental para la adecuada gestión y operación de este tipo de infraestructuras. Un caso ampliamente conocido dentro de esta clase de sistemas es el denominado problema de los tres tanques, el cual corresponde a un esquema de operación asociado a sistemas mononodales. Sin embargo, no se ha encontrado en la literatura especializada una propuesta de solución analítica directa para este tipo de configuraciones ramificadas, a pesar de su presencia frecuente en obras hidráulicas de abastecimiento de agua.

Este artículo, primero de una serie de dos trabajos dedicados a esta temática, se ha centrado en la formulación de una metodología para el cálculo directo y explícito de la cota piezométrica en el nodo de sistemas hidráulicos uninodales. Se han analizado diversas variantes de resolución reportadas en la literatura, desde métodos iterativos (incluyendo enfoques gráfico-analíticos, los más habituales) hasta formulaciones analíticas en función del caudal, demostrándose que el método propuesto constituye una alternativa más rápida y eficiente.

Como parte de la metodología desarrollada, se propone un procedimiento para resolver una de las principales dificultades presentes en cualquiera de los enfoques existentes: la indeterminación del sentido de circulación en el elemento intermedio del sistema. Este procedimiento se fundamenta en una nomenclatura generalizada de los elementos hidráulicos del sistema. Desde una reinterpretación del enfoque de análisis de estos sistemas, se

plantea además que el problema de los tres tanques puede considerarse como un caso particular del problema general de n elementos interconectados. Finalmente, se desarrolla un ejemplo práctico que permite ilustrar la aplicación de la metodología propuesta.

05 REFERENCIAS

- Cabrera, E.** (2009). *Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua* (3ra, Vol. t. 1 y 2). Editorial Unidad Docente Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia.
- Fuertes, V. S., et al.** (2002). *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua* (1ra). Editorial Grupo de Mecánica de los Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia.
- Giles, R. V., Evett, J. B., & Cheng, L.** (2003). *Mecánica de los fluidos e hidráulica* (3ra). Editorial McGraw-Hill.
- Haestad Methods et al.** (2003). *Advanced water distribution modeling and management* (First). Editorial Haestad Press.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).** (2006). *Instructivo para la utilización de tuberías y accesorios de pead.* La Habana, Cuba.
- Martínez, Y.** (2011). *Metodología para el diseño hidráulico de las estaciones de bombeo para acueducto* [Doctoral dissertation, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (Cujae)].
- Martínez, Y., & Riaño, F.** (2010). Características peculiares de la operación de bombas rotodinámicas en paralelo [Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez (UNAH), Mayabeque, Cuba]. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(2), 38–43.
- Sotelo, G.** (1997). *Hidráulica general* (Vol. Vol. 1). Editorial Limusa.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflicto de interés de alguna naturaleza.

ORCID de los autores

Yaset Martínez Valdés <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Félix Riaño Valle <https://orcid.org/0000-0003-0000-0000>

Evaluación cuantitativa del balance hídrico subterráneo y diagnóstico de explotación de la cuenca Hanábana (CF1), Cuba

Roxana Aymeé Luis Winograd

E-MAIL: roxluis87@gmail.com

Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). La Habana, Cuba.

Daniela González Regalado

E-MAIL:

Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). La Habana, Cuba.

RESUMEN

Las aguas subterráneas son un recurso estratégico cuya disponibilidad se ve afectada por la disminución de las precipitaciones y el aumento de las demandas. Esta investigación reevaluó el potencial hídrico de la cuenca Hanábana (CF1), en Cienfuegos, Cuba, aplicando el método de Bindeman (oscilaciones de niveles) y el método de balance hídrico de un acuífero. Se procesaron datos de 12 pluviómetros, 55 pozos de observación, las demandas de los principales usuarios (MINAG, AZCUBA, INRH y MININT) y parámetros hidrogeológicos, con los software MapInfo Pro 16.0 y Surfer 27.1.229. El balance hídrico de 2023 arrojó un potencial de 108,767 hm³ y el método de Bindeman un recurso explotable de 94,102 hm³, con una diferencia del 13,5 %. La demanda total anual fue de 111,354 hm³, superando ambas estimaciones, y el método de Bindeman indicó sobreexplotación del acuífero ($\beta = 2,077$). Se concluye que, independientemente del método, existe un déficit hídrico en la cuenca, lo que constituye una alerta para la planificación de las demandas futuras ante la tendencia decreciente de las precipitaciones.

PALABRAS CLAVE: *balance hídrico, cuenca hidrogeológica, potencial hídrico, método de Bindeman, aguas subterráneas, Cienfuegos*

Quantitative assessment of the groundwater balance and exploitation diagnosis of the Hanábana basin (CF1), Cuba

ABSTRACT

Groundwater is a strategic resource whose availability is affected by decreasing rainfall and rising demands. This research reassessed the water potential of the Hanábana basin (CF1), in Cienfuegos, Cuba, applying the Bindeman method (water level fluctuation) and the aquifer water balance method. Precipitation data from 12 rain gauges, 55 observation wells, the demands of the main users (MINAG, AZCUBA, INRH, and MININT), and hydrogeological parameters were processed using MapInfo Pro 16.0 and Surfer 27.1.229 software. The 2023 water balance yielded a potential of 108.767 hm³ and the Bindeman method an exploitable resource of 94.102 hm³, with a 13.5% difference. Total annual demand was 111.354 hm³, exceeding both estimates, and the Bindeman method indicated aquifer overexploitation ($\beta = 2.077$). It is concluded that, regardless of the method, a water deficit exists in the basin, constituting a warning for the planning of future demands given the decreasing rainfall trend.

KEYWORDS: *water balance, hydrogeological basin, water potential, Bindeman method, groundwater, Cienfuegos*

01 INTRODUCCIÓN



2025-03-10– RECIBIDO:

APROBADO: 2025-06-10

Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia [Creative Commons](#).

Las aguas subterráneas constituyen la reserva de agua dulce líquida más importante del planeta, representando aproximadamente el 97 % del volumen total disponible, excluyendo glaciares y casquetes polares (Cristo, 2023; Marín, 2014). Su papel es fundamental para el mantenimiento de los caudales base de los ríos, la sustentación de humedales y la mitigación de los efectos de las sequías (Caraballo, 2012). Cuba, un archipiélago con un 67 % de su territorio compuesto por rocas carbonatadas kársticas de alta permeabilidad, depende en gran medida de sus aguas subterráneas para el abastecimiento a la población, la agricultura y la industria (Báez, 2020; Valdés, 2011). La provincia de Cienfuegos, a pesar de contar con condiciones favorables en cuanto a disponibilidad de agua, enfrenta desafíos en la gestión de sus recursos hídricos (Flores, 2021). La cuenca subterránea Hanábana (CF1), ubicada al oeste de la provincia, es una de las más importantes, con un área de 980,8 km² y un recurso explotable históricamente estimado en 140 hm³. En los últimos años se ha observado un régimen de precipitaciones descendentes en la región, con períodos de sequía prolongados (Sánchez, 2009), lo que unido al aumento paulatino de las demandas para la agricultura, la industria azucarera y el abasto humano, genera incertidumbre sobre el estado actual de las reservas. Investigaciones previas (Suárez, 2020) ya señalaban un comportamiento crítico de la cuenca al finalizar períodos secos. El desconocimiento del estado actual de las reservas hídricas puede conducir a una gestión inadecuada, fomentando la sobreexplotación y poniendo en riesgo la sostenibilidad del recurso a largo plazo. El objetivo de la presente investigación es reevaluar el potencial hídrico de la cuenca CF1 aplicando el método de Bindeman y el método de balance hídrico de un acuífero, para proporcionar información actualizada que permita una correcta gestión del recurso hídrico en el territorio.

02 REFERENTES TEÓRICOS

El estudio de los recursos hídricos subterráneos se sustenta en principios hidrológicos e hidrogeológicos fundamentales. El ciclo hidrológico, impulsado por la energía solar y la gravedad, comprende cinco etapas esenciales: evapotranspiración, condensación, precipitación, infiltración y escorrentía (Cristo, 2023). La infiltración, proceso mediante el cual el agua penetra a través de las capas permeables del suelo, está gobernada por las fuerzas de gravedad y capilaridad, y depende de factores como la textura del suelo, la cobertura vegetal y la intensidad de la precipitación (Marín, 2014). El agua que alcanza la zona saturada pasa a formar parte de las aguas subterráneas, almacenadas en formaciones geológicas permeables denominadas acuíferos.

Las aguas subterráneas desempeñan funciones ecológicas y socioeconómicas de primer orden: mantienen los caudales base de los ríos durante el estiaje, sustentan humedales y mitigan los efectos de las sequías (Caraballo, 2012). Sin embargo, su condición de recurso “invisible” conlleva riesgos, ya que la sobreexplotación —extracción superior a la recarga natural— puede tardar en hacerse evidente, provocando agotamiento de reservas, incremento de costos de bombeo, deterioro de la calidad por intrusión salina y afectación de ecosistemas dependientes (Valdés, 2011).

El balance hídrico, fundamentado en el principio de conservación de la masa, constituye la herramienta conceptual esencial para la evaluación cuantitativa de los recursos hídricos. Su expresión general establece que la variación del volumen almacenado en un sistema (ΔV) es igual a la diferencia entre las entradas y las salidas (Báez, 2020). Para un acuífero, las entradas típicas incluyen la precipitación infiltrada, la recarga desde cursos superficiales y los aportes de acuíferos colindantes, mientras que las salidas comprenden la explotación mediante pozos, la evapotranspiración desde el nivel freático y el escurrimiento subterráneo (Flores, 2021).

El método de Bindeman —también conocido como método de las oscilaciones del nivel freático— ocupa un lugar destacado por su capacidad para estimar la infiltración eficaz y los recursos explotables a partir del análisis de los registros de niveles en pozos de observación (Sánchez, 2009). Desarrollado para condiciones de flujo lineal en acuíferos libres, este método se fundamenta en la ecuación de continuidad expresada en términos de volumen y en el concepto de porosidad efectiva (μ). A partir de los limnigramas se determinan la recarga neta (Δh) y la descarga total (Δz), calculándose la infiltración eficaz como:

$$W = \mu \times \frac{\sum(\Delta h + \Delta z)}{t} \quad (2.1)$$

Multiplicando por el área de la cuenca (F) se obtiene el Recurso Hídrico Subterráneo Explotable (RHSE). Adicionalmente, el coeficiente de capacidad útil ($\beta = h/\Delta H$), donde h es la oscilación hiperanual de los niveles y ΔH la alimentación media aparente, permite diagnosticar el estado de explotación: valores de $\beta > 2$ indican sobreexplotación (Suárez, 2020).

Por su parte, el método de balance hídrico de un acuífero adopta un enfoque de caja negra que cuantifica explícitamente las entradas y salidas del sistema. Para su aplicación se requiere información sobre precipitaciones, coeficientes de infiltración, volúmenes de explotación y parámetros hidrogeológicos como la transmisividad y el gradiente hidráulico, que permiten estimar el escurrimiento subterráneo mediante la Ley de Darcy como se muestra en la ecuación (2.2) (Fernández, 2012).

$$Q = T \times I \times B \quad (2.2)$$

Donde: Q es el caudal subterráneo ($\text{m}^3/\text{día}$); T es la transmisividad del acuífero en la zona costera ($\text{m}^2/\text{día}$); I es el gradiente hidráulico (adimensional), calculado como $I = (H_1 - H_2)/L$; y B es el ancho de la sección de salida (m).

La reevaluación periódica de los recursos hídricos subterráneos constituye una práctica esencial para la gestión adaptativa de los acuíferos. Los sistemas hidrogeológicos no son estáticos: las condiciones climáticas varían, las demandas evolucionan y el conocimiento sobre el funcionamiento del acuífero se incrementa con nuevas investigaciones (Peñalver, 1999). En Cuba, con un 67 % del territorio constituido por rocas carbonatadas kársticas y más del 70 % del agua destinada al abasto público procedente de fuentes subterráneas, la actualización periódica de las evaluaciones del potencial hídrico resulta indispensable para una gestión sostenible del recurso (Planos et al., 2013).

03 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica del área de estudio

La cuenca subterránea Hanábana (CF1) se localiza en la provincia de Cienfuegos, Cuba, entre los 225 420 °N y 325 420 °N de latitud y los 499 638 °E y 599 638 °E de longitud como se muestra en la figura 3.1. Limita al norte con la provincia de Matanzas, al este con las cuencas Cartagena (CF4) y Abreus (CF3), y al sureste con la cuenca Juraguá (CF2). Ocupa un área de 980,8 km² y se encuentra seccionada en cinco tramos hidrogeológicos (Yaguaramas-Aguada, Charcas-Yaguaramas, Aguada-Damuji, Abreus y Juraguá) con una variada constitución geológica donde predominan rocas del Cretácico (Formaciones Cantabria y Arabo), Mioceno (Formación Güines) y depósitos del Cuaternario (Rodríguez, 2018).

El clima es tropical marítimo, con dos estaciones bien definidas: período húmedo (mayo-octubre) y período seco (noviembre-abril). La temperatura media anual es de 24,6 °C y la humedad relativa promedio del 80 % (Departamento de Meteorología de Cienfuegos, 2016). La arteria fluvial más importante es el río Hanábana, de curso perenne, que discurre sobre las calizas cavernosas del Mioceno alimentando las aguas subterráneas y se pierde en la Ciénaga Oriental de Zapata.

3.2. Datos utilizados y fuentes de información

Para la realización de este estudio se recopilieron las siguientes fuentes de información:

- Registros diarios de precipitación del año 2023 correspondientes a 12 estaciones pluviométricas pertenecientes a la red del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) distribuidas en la cuenca (Tabla 3.1).
- Datos de niveles freáticos de 55 pozos de observación, de los cuales 19 cuentan con mediciones mensuales y 36 con mediciones semestrales.
- Información sobre volúmenes de extracción por organismos (demandas) proporcionada por la Empresa de

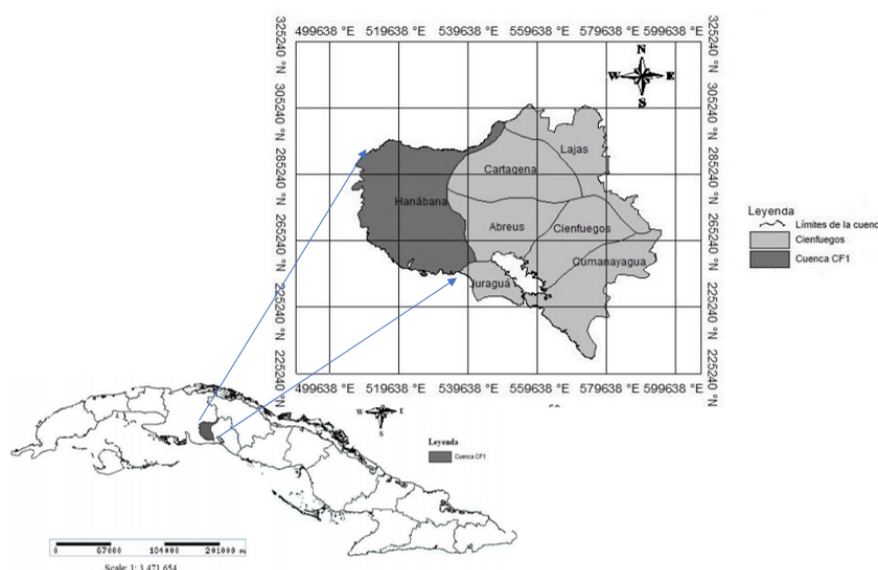


Figure 3.1. Ubicación del área de estudio.

Aprovechamiento Hidráulico (EAH) de Cienfuegos para el año 2023.

- Parámetros hidrogeológicos de las formaciones presentes (coeficiente de almacenamiento $\mu = 0,07$, conductividad hidráulica según valores tabulados por Fernández (Fernández, 2012)).
- Cartografía digital escala 1:50 000 del Instituto de Geografía Tropical.

Table 3.1. Estaciones pluviométricas de la cuenca CF1.

No. de control	Nombre	Altitud (m)	Municipio
4	Pozo Cercado	13,6	Aguada de Pasajeros
8	María Victoria	22,3	Aguada de Pasajeros
19	Rincón Campiña	36,1	Aguada de Pasajeros
20	Manguito	9,1	Abreus
32	El Corojo	46,6	Rodas
35	Charcas	11,9	Abreus
414	Chucho Milagros	42,2	Aguada de Pasajeros
517	Esles de Venero	50,0	Aguada de Pasajeros
555	La Cristina	20,0	Aguada de Pasajeros
562	Embalse Galindo	17,1	Abreus
925	Jocuma	3,5	Aguada de Pasajeros
959	Embalse Voladora	58,4	Rodas

3.3. Procesamiento de la información con Sistemas de Información Geográfica

Los datos espaciales fueron procesados mediante el software MapInfo Professional versión 16.0. Se georreferenciaron todos los puntos de muestreo (pluviómetros y pozos) asignándoles coordenadas planas en el sistema de proyección Cuba Norte, generando capas temáticas que permitieron visualizar la distribución espacial de los puntos de control y delimitar el área de la cuenca.

Para la interpolación espacial de las variables hidrogeológicas (niveles freáticos, cotas topográficas) se utilizó el software Surfer versión 27.1.229. Se aplicó el método de Kriging, seleccionado por su capacidad para generar superficies continuas a partir de datos puntuales minimizando la varianza del error. Se definió un tamaño de celda de 100 m $\times$ 100 m y con los archivos grid generados se elaboraron mapas de hidroisohipsas para los períodos húmedo y seco, así como modelos digitales de elevación del terreno.

3.4. Método de balance hídrico de un acuífero

El balance hídrico del acuífero se determinó aplicando la ecuación de continuidad adaptada a las condiciones del área de estudio:

$$\Delta V = (P \times \alpha \times F) - (E_x + E_{sm}) \quad (3.1)$$

Donde: ΔV es la variación del volumen almacenado (hm^3); P es la precipitación media mensual (mm); α es el coeficiente de infiltración (adimensional, tomado como 0,25 según estudios previos (Suárez, 2020)); F es el área de la cuenca ($980,8 \text{ km}^2$); E_x es el volumen extraído por explotación (hm^3); y E_{sm} es el escurrimiento subterráneo al mar (hm^3).

La precipitación media mensual se calculó mediante el método de la media aritmética, promediando los valores registrados en los 12 pluviómetros. Las demandas (E_x) corresponden a los volúmenes reportados por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico para cada mes, desglosados por organismo: Ministerio de la Agricultura (MINAG), Ministerio del Azúcar (AZCUBA), INRH (abasto a la población) y Ministerio del Interior (MININT). El escurrimiento subterráneo al mar (E_{sm}) se estimó mediante la ecuación (2.2); la transmisividad se obtuvo de la ecuación:

$$T = K \times H \quad (3.2)$$

Donde K es la conductividad hidráulica (m/día) según valores tabulados para cada tipo de roca (Fernández, 2012) y H es el espesor saturado del acuífero (m). El gradiente hidráulico se determinó a partir de los mapas de hidroisohipsas elaborados con Surfer.

3.5. Método de Bindeman (oscilaciones de niveles freáticos)

El método de Bindeman se aplicó siguiendo la metodología propuesta por Bindeman (Bindeman, 1963) y adaptada por Peñalver (Peñalver, 1999) para condiciones de acuíferos libres. Se seleccionaron 14 pozos de observación con series completas de niveles para el período de estudio, asegurando su representatividad espacial. A partir de los limnigramas de cada pozo se determinaron visualmente los siguientes parámetros: Δh , ascenso neto del nivel durante el período de recarga (m); Δz , descenso del nivel durante todo el año por efectos combinados de explotación y drenaje natural (m); ΔZ_s , descenso durante el período seco (noviembre-abril); y ΔZ_h , descenso durante el período húmedo (mayo-octubre).

La alimentación total aparente (ΔH) se calculó como:

$$\Delta H = \sum \Delta h + \sum \Delta Z_h \quad (3.3)$$

La descarga total (ΔZ) como:

$$\Delta Z = \sum \Delta Z_s + \sum \Delta Z_h \quad (3.4)$$

La infiltración eficaz (W) para cada pozo se obtuvo mediante:

$$W = \mu \times \frac{\sum \Delta h + \sum \Delta Z}{t} \quad (3.5)$$

Donde: μ es el coeficiente de almacenamiento (adimensional), tomado como 0,07 según estudios previos en la región (Suárez, 2020); y t es el tiempo total de observación (365 días).

La infiltración eficaz media de la cuenca (W_{media}) se calculó promediando los valores obtenidos para los 14 pozos mediante:

$$W_{media} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \quad (3.6)$$

El Recurso Hídrico Subterráneo Explotable (RHSE) se determinó como:

$$RHSE = F \cdot W_{media} \quad (3.7)$$

3.6. Evaluación del estado de explotación

Para evaluar si el acuífero se encuentra en equilibrio dinámico se calculó el coeficiente de capacidad útil (β) propuesto por Bindeman:

$$\beta = \frac{h}{\Delta H} \quad (3.8)$$

Donde: h es la oscilación hiperanual de los niveles (diferencia entre el nivel máximo histórico y el nivel mínimo registrado) (m); y ΔH es la alimentación media aparente (m).

El criterio de interpretación establece que si $\beta < 2$ el acuífero está subexplotado, y si $\beta > 2$ el acuífero está sobreexplotado.

Adicionalmente, como $\beta > 2$, se calculó el nivel mínimo admisible mediante la fórmula de Armesto Pons:

$$N_{adm} = N_{min\ histrico} + 2\Delta H - h \quad (3.9)$$

04 RESULTADOS

4.1. Comportamiento espacial de los niveles freáticos

La topografía de la cuenca CF1 presenta cotas que oscilan entre 0 y 70 m s. n. m., con las máximas elevaciones localizadas al noroeste del área de estudio, mientras que hacia el sureste las cotas descienden paulatinamente hasta alcanzar los límites costeros. El análisis de los mapas de niveles freáticos elaborados para los períodos húmedo y seco mostró variaciones significativas: durante el período húmedo los niveles variaron entre 0 y 55 m s. n. m., mientras que en el período seco el rango se redujo a 0-50 m s. n. m. La dirección general del flujo subterráneo es hacia el suroeste, coincidiendo con la pendiente topográfica y la dirección de drenaje hacia la Ciénaga de Zapata y el mar.

4.2. Balance hídrico por el método del acuífero

La precipitación acumulada en la cuenca durante el año 2023 alcanzó un valor de 1 354,9 mm, inferior a la media histórica de 1 447,9 mm. La distribución mensual de las lluvias mostró los mayores valores en los meses de mayo a septiembre, coincidiendo con el período húmedo, aunque julio presentó valores notablemente bajos dentro de este período.

Las demandas totales de los usuarios para el mismo período ascendieron a 111,354 hm³, distribuidas principalmente entre el Ministerio de la Agricultura (MINAG) con 93,645 hm³ (84,1 %), el Ministerio del Azúcar (AZCUBA) con 10,877 hm³ (9,8 %), el abasto a la población (INRH) con 6,106 hm³ (5,5 %) y el Ministerio del Interior (MININT) con 0,726 hm³ (0,6 %).

El escurrimiento subterráneo hacia el mar se calculó en 1,5 hm³ anuales, valor obtenido a partir de la aplicación de la Ley de Darcy considerando una transmisividad media de 100 m²/día, un gradiente hidráulico promedio de 0,001 y un ancho de sección de salida de 40 km.

El balance hídrico mensual (Tabla 4.1) mostró que en siete meses del año (enero, febrero, marzo, abril, noviembre, diciembre y julio) el volumen infiltrado fue inferior a la demanda extraída, siendo enero y febrero los meses con mayor déficit. El volumen final al cierre del período, considerando un volumen inicial nulo a efectos comparativos, resultó en un déficit de -2,587 hm³.

4.3. Resultados del método de Bindeman

El análisis de los limnigramas de los 14 pozos de control permitió determinar los parámetros de balance interno. La Tabla 4.2 presenta los valores de infiltración eficaz (W) y los parámetros para el cálculo del coeficiente β para los pozos seleccionados. La infiltración eficaz media anual (W_{media}) para el conjunto de los pozos fue de 0,096 m/año.

Table 4.1. Balance hídrico mensual de la cuenca CF1 para el año 2023.

Mes	Precipitación (mm)	V. Infiltrado (hm ³)	Demanda Total (hm ³)	Esc. Mar (hm ³)	Balance Mensual (hm ³)
Enero	2,5	0,490	9,279	0,125	-8,9
Febrero	3,0	0,588	9,279	0,125	-8,8
Marzo	55,7	10,917	9,279	0,125	1,5
Abril	163,2	31,987	9,279	0,125	22,5
Mayo	384,0	75,264	9,279	0,125	65,8
Junio	227,6	44,610	9,279	0,125	35,2
Julio	64,8	12,701	9,279	0,125	3,2
Agosto	264,2	51,783	9,279	0,125	42,3
Septiembre	186,6	36,574	9,279	0,125	27,1
Octubre	93,4	18,306	9,279	0,125	8,9
Noviembre	54,0	10,584	9,279	0,125	1,1
Diciembre	59,5	11,662	9,279	0,125	2,2
Total	1354,9	108,767	111,354	1,5	-2,5

Table 4.2. Valores de infiltración eficaz y coeficiente β en pozos seleccionados.

Pozo	μ	W (m/año)	h (m)	ΔH (m)	$\beta = h/\Delta H$
A-275A	0,07	1,516	13,00	6,26	2,08
P-58	0,07	1,541	14,50	6,98	2,08
P-42	0,07	0,707	9,60	4,62	2,08
A-353	0,07	0,766	10,20	4,90	2,08
A-64	0,07	0,656	8,90	4,28	2,08
P-37	0,07	1,329	12,80	6,15	2,08
P-52	0,07	0,519	7,80	3,75	2,08
L-11	0,07	1,499	13,20	6,35	2,08
L-13	0,07	1,218	11,90	5,72	2,08
A-85	0,07	1,763	14,80	7,12	2,08
A-143	0,07	1,107	11,20	5,38	2,08
A-468	0,07	1,107	11,20	5,38	2,08
P-51	0,07	1,120	11,30	5,43	2,08
P-41	0,07	2,827	18,50	8,89	2,08
Promedio	0,07	0,096	–	–	2,077

Aplicando la ecuación (3.7), el Recurso Hídrico Subterráneo Explotable (RHSE) para la cuenca CF1 se estimó en:

$$\text{RHSE} = 980,8 \text{ km}^2 \times 0,096 \text{ m/año} = 94,102 \text{ hm}^3/\text{año} \quad (4.1)$$

Los parámetros de descarga del período seco (ΔZ_s) y del período húmedo (ΔZ_h) obtenidos de los limnigramas se presentan en la Tabla 4.3. Se observa que la descarga total (ΔZ) varía entre 0,69 m y 2,98 m para los diferentes pozos, mientras que la alimentación total aparente (ΔH) oscila entre 0,77 m y 3,26 m.

Table 4.3. Parámetros de descarga en período seco y húmedo.

No.	Pozo	Δh	ΔZ_h	ΔZ_s	ΔH	ΔZ
1	A-275A	1,20	0,58	0,94	1,78	1,52
2	P-58	0,70	1,11	1,81	1,81	1,11
3	P-42	0,32	0,51	0,83	0,83	0,51
4	A-353	0,33	0,57	0,18	0,90	0,75
5	A-64	0,23	0,54	0,38	0,77	0,92
6	P-37	1,15	0,41	1,15	1,56	2,26
7	P-52	0,18	0,43	0,26	0,61	0,69
8	L-11	0,73	0,70	0,60	1,43	1,30
9	L-13	0,68	0,76	0,64	1,44	1,40
10	A-85	1,59	0,48	1,35	2,07	1,83
11	A-143	0,94	0,50	0,82	1,44	1,32
12	A-468	0,30	0,25	0,30	0,55	0,55
13	P-51	0,23	0,30	1,60	0,53	1,90
14	P-41	1,82	0,65	0,63	2,47	1,28

4.4. Evaluación del estado de explotación

El coeficiente de capacidad útil (β) promedio obtenido mediante la ecuación (3.8) fue de 2,077. Dado que este valor es superior a 2, se concluye que el acuífero se encuentra en un estado de sobreexplotación, lo que indica que el nivel máximo registrado está por debajo del nivel crítico histórico.

Utilizando la ecuación (3.9) se calculó el nivel mínimo admisible, obteniendo un valor promedio de 3,957 m, lo que representa la cota por debajo de la cual no deberían descender los niveles para evitar daños irreversibles al acuífero.

4.5. Comparación de resultados y demanda actual

La comparación entre ambos métodos muestra una diferencia de 14,665 hm³ (aproximadamente 13,5 %), siendo el método de Bindeman más conservador (94,102 hm³) que el balance hídrico (108,767 hm³). Ambas estimaciones resultan inferiores a la demanda total anual de 111,354 hm³.

La actualización con respecto al estudio realizado en 2020 (Suárez, 2020), que también empleó el método de Bindeman, revela una disminución del recurso explotable en aproximadamente 6,568 hm³, evidenciando una tendencia al agotamiento de las reservas.

05 CONCLUSIONES

Se reevaluó el potencial hídrico de la cuenca subterránea Hanábana (CF1) mediante dos métodos independientes, determinándose que los recursos hídricos explotables oscilan entre 94,102 hm³/año (método de Bindeman) y 108,767 hm³/año (balance hídrico de acuífero), valores que resultan insuficientes para satisfacer la demanda total anual de 111,354 hm³. La aplicación del método de Bindeman permitió clasificar el acuífero como sobreexplotado ($\beta = 2,077$), indicando que el ritmo de extracción supera la capacidad de recarga natural del sistema. La comparación con estudios previos evidencia una disminución de 6,568 hm³ en el recurso explotable desde 2020,

confirmando una tendencia al agotamiento que, unida al régimen decreciente de precipitaciones observado, constituye una alerta crítica para la gestión del agua en el territorio. Se recomienda implementar medidas de gestión de la demanda, especialmente en el sector agrícola, así como monitorear continuamente la evolución de los niveles y la calidad del agua, prestando especial atención al avance de la intrusión salina en la zona costera.

06 REFERENCIAS

- Báez, E. G. (2020). *Análisis de procedimientos y metodologías para la evaluación y gestión de los recursos hídricos subterráneos* [Tesis]. Universidad de la República.
- Bindeman, N. N. (1963). *Evaluación de reservas de aguas subterráneas*. Editorial Nedra.
- Caraballo, M. P. (2012). *Manual de agua subterránea* (1st ed.).
- Cristo, N. M. (2023). El agua subterránea: Clave para abastecer a la población mundial. *UNAM Global Revista*.
- Departamento de Meteorología de Cienfuegos. (2016). Series históricas de temperatura y humedad.
- Fernández, C. d. (2012). *Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales*. Digital Universitaria Moa.
- Flores, H. (2021). Balance hidrológico.
- Marín, C. M. (2014). La energía del cambio [En línea].
- Peñalver, I. (1999). *Manual práctico de campo hidrogeológico*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- Planos, E., Vega, R., & Guevara, A. (2013). *Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en cuba*. Instituto de Meteorología.
- Rodríguez, Y. S. (2018). *Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en la cuenca hanábana* [Tesis de Maestría]. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- Sánchez, R. d. l. C. (2009). *Evaluación cuantitativa de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca sagua la grande* [Tesis Doctoral]. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- Suárez, L. E. (2020). *Análisis cualitativo de la cuenca cf1 hanábana* [Tesis de Diploma]. Universidad de Cienfuegos.
- Valdés, A. O. (2011). Recursos hidráulicos subterráneos: Observaciones sobre su evaluación y gestión en cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 32(3).

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Roxana Aymé Luis Winograd <https://orcid.org/0000-0002-4758-4045>

Daniela González Regalado <https://orcid.org/0009-0004-0641-3735>

La transformación social sostenible desde la práctica laboral en la formación del ingeniero hidráulico en Cuba

Dr.C. Mailén Virgen Gutierrez HerreraE-MAIL: mailengh77@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae.

Ing. Edelsy Ramos Guilarte

E-MAIL:

Empresa de Mantenimiento y Rehabilitación de Obras Hidráulicas de Occidente (EMARHO).

Dr.C. Dargen Tania Juan Carvajal

E-MAIL:

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae.

RESUMEN

La investigación analiza el impacto de la Práctica Laboral II en Construcciones Hidráulicas de la carrera de Ingeniería Hidráulica en la CUJAE, durante el curso 2024-2025. Con un enfoque cualitativo se valoran las experiencias de los estudiantes en obras de rehabilitación, edificaciones sociales y turísticas, vinculando la transformación del espacio físico con la sostenibilidad hídrica y la mejora de la calidad de vida. Los resultados muestran que la práctica laboral constituye un espacio formativo que integra conocimientos técnicos y responsabilidad social, generando efectos, resultados y cambios duraderos. Se evidencia la correspondencia con las proyecciones del INRH para 2025 y el Programa Hidráulico Nacional hasta 2030, consolidando la pertinencia académica y social de la carrera y preparando profesionales comprometidos con el desarrollo sostenible del país.

PALABRAS CLAVE: *construcciones hidráulicas, impacto, ingeniería hidráulica, práctica laboral, transformación*

Sustainable social transformation from work practice in the training of hydraulic engineers in Cuba

ABSTRACT

The research analyzes the impact of Work Practice II in Hydraulic Constructions within the Hydraulic Engineering program at CUJAE during the 2024-2025 academic year. Using a qualitative approach, the study evaluates students' experiences in rehabilitation projects, social and tourist buildings, linking the transformation of physical spaces with water sustainability and improving quality of life. The results show that work practice constitutes a training space that integrates technical knowledge and social responsibility, generating lasting effects, results and changes. The alignment with the INRH projections for 2025 and the National Hydraulic Program until 2030 is evident, consolidating the academic and social relevance of the program and preparing professionals committed to the sustainable development of the country.

KEYWORDS: *hydraulic constructions, impact, hydraulic engineering, work practice, transformation*

01 INTRODUCCIÓN

La formación del ingeniero hidráulico en Cuba se encuentra estrechamente vinculada con los retos de la transformación social sostenible que todo profesional debe proyectar, en ella se pone de manifiesto la concepción de la

política educativa del Partido y del Estado cubanos que se sintetiza en el Documento Base para la Elaboración del Plan de Estudio E (Ministerio de Educación Superior, 2016) y se materializa en la concreción del Plan de Estudios para la Formación del Ingeniero Hidráulico (2018). En un contexto nacional donde el agua constituye un recurso estratégico para el desarrollo, la práctica laboral se convierte en un espacio esencial para articular la teoría con la realidad profesional y social. La carrera de Ingeniería Hidráulica en la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE (en lo adelante CUJAE), ha impulsado acciones pedagógicas que integran la práctica en construcciones hidráulicas como un eje formativo orientado a fortalecer conocimientos, habilidades y valores sociales en los estudiantes (Gutiérrez & Chang, 2023).

La transformación social sostenible desde la gestión hidráulica implica, entre otros aspectos, un compromiso ético y social con la preservación de los ecosistemas y la mejora de la calidad de vida de la población. En este sentido, los trabajadores hidráulicos cubanos han definido metas estratégicas, que incluyen la gestión responsable del agua y la promoción de proyectos que contribuyan al bienestar comunitario (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), 2025). Estas metas se convierten en referentes para la práctica laboral de los estudiantes, quienes participan en solución de problemas profesionales de mediana complejidad, buscando soluciones innovadoras y sostenibles a los problemas sociales.

En este sentido, desde la práctica laboral de los estudiantes, se devela la preparación de los futuros ingenieros hidráulicos para integrar los conocimientos adquiridos en asignaturas precedentes, con una visión humanista y de responsabilidad social. El modelo profesional diseñado en Cuba para esta carrera enfatiza la formación integral, donde la práctica laboral constituye un espacio de aprendizaje que fomenta la conciencia crítica y la participación en procesos de cambio social (Gutiérrez et al., 2017). De esta manera, se contribuye a la construcción de un profesional comprometido con el desarrollo sostenible del país.

En la CUJAE, la Práctica Laboral II Construcciones Hidráulicas (PLII CH), está concebida y se desarrolló en el segundo periodo del segundo año académico de la carrera Ingeniería Hidráulica, distribuidas en cuatro semanas. En este contexto y para esta investigación, las autoras proponen como objetivo analizar el impacto de la PLII CH en la carrera de Ingeniería Hidráulica de la CUJAE durante el curso 2024-2025 (para los estudiantes del tercer año académico ya que por ajustes curriculares no fue posible su realización cuando les correspondía), con énfasis en la transformación del ambiente físico y social sostenible y la capacidad de integración de los estudiantes al entorno laboral. La necesidad de este estudio se fundamenta en que, a diferencia de investigaciones anteriores, como la de Ramos y Gutiérrez (Ramos & Gutiérrez, 2025), orientada a la elaboración de acciones para fortalecer los modos de actuación en empresas constructoras, y la de Gutiérrez y Chang (Gutiérrez & Chang, 2023), centrada en describir el desarrollo de la práctica laboral en un periodo específico, la actual propuesta trasciende el plano descriptivo y operativo para situarse en un enfoque transformador. En este sentido, se busca develar cómo la práctica laboral contribuye no solo al desarrollo de habilidades profesionales, sino también a la formación de ingenieros comprometidos con la sostenibilidad y la responsabilidad social.

La presente investigación posee un enfoque cualitativo, es decir, sus resultados no son producto de una generalización estadística, sino de “la comprensión profunda y detallada de fenómenos específicos en contextos determinados” (Vizcaíno et al., 2023, p. 9749). Se centra en comprender y argumentar cómo esta práctica laboral impacta en la formación de los estudiantes de Ingeniería Hidráulica desde una perspectiva integral. Este enfoque resulta pertinente porque permite interpretar experiencias, percepciones y transformaciones que ocurren en el proceso formativo. Al analizar la práctica en relación con la sostenibilidad del ambiente físico y social, así como con la capacidad de integración al entorno laboral, se requiere explorar significados, valorar testimonios y reconstruir procesos vividos por los estudiantes y profesores.

En lo metodológico tuvo en cuenta la selección de una muestra no probabilística “por conveniencia” (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018). Se estudiaron 31 documentos: 9 informes de la PLII CH (9 equipos con 21 integrantes en total), 21 diarios de obra personal de cada estudiante de 2do. año académico y el plan de estudio “E”; de este último el plan analítico de la asignatura declarado para la formación de este profesional y el modelo del profesional.

Como métodos empíricos fundamentales se utilizaron el análisis de documentos, la observación participante de las autoras durante el desarrollo de la práctica laboral y el analítico-sintético, su combinación o aplicación según

el momento de la investigación, favoreció la observancia de la conexión entre la práctica laboral en la formación, así como la valoración de su influencia en la transformación social; se apreció la vivencia de los estudiantes en la aplicación de normativas, y en la solución a los problemas que se presentaban en la comunidad. Asimismo, se constató la relación entre los objetivos de la práctica, el fortalecimiento de la identidad profesional y la transformación en su formación como futuros ingenieros hidráulicos.

02 IMPACTO DE LA PRÁCTICA LABORAL EN LA TRANSFORMACIÓN DEL AMBIENTE FÍSICO Y SOCIAL SOSTENIBLE Y LA INTEGRACIÓN LABORAL

La formación de los estudiantes de Ingeniería Hidráulica en la CUJAE se inserta en un contexto nacional donde el agua y el saneamiento constituyen prioridades estratégicas. El Informe de Trabajo Anual del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) del año 2024, subraya que las acciones del organismo se alinean con los Lineamientos de la Política Económica y Social 2021-2026, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para el 2030 y las directrices de la máxima dirección del país, consolidando el papel rector del INRH en la gobernanza del agua y en la transformación de los territorios vulnerables (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), 2025). En este escenario, la práctica laboral de los estudiantes adquiere relevancia como espacio de integración mediante el vínculo universidad-empresa.

Las prioridades para 2025 establecen la necesidad de aplicar resultados de ciencia, tecnología e innovación, modernizar la infraestructura hidráulica y fortalecer la gestión sostenible de los recursos hídricos. Estas metas se corresponden con los proyectos que el INRH ejecuta en materia de abasto, saneamiento y gestión integrada de las aguas terrestres, donde se destacan avances en la rehabilitación de redes, instalación de equipos de bombeo y ampliación de sistemas de tratamiento de residuales (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), 2025). La PLII CH al vincular a los estudiantes con estas acciones, les permite desarrollar habilidades profesionales en un entorno real, contribuyendo a la solución de problemas profesionales de mediana complejidad, que afectan directamente a la población y a la economía nacional.

El Programa Hidráulico Nacional hasta 2030 reafirma la voluntad política del Estado de garantizar el derecho al agua como un bien público y estratégico. Este programa plantea como objetivos ordenar, ampliar y sostener los servicios de agua potable y saneamiento, mejorar la resiliencia frente al cambio climático y asegurar la sostenibilidad de los ecosistemas relacionados con el agua. En este marco, la PLII CH se convierte en un instrumento pedagógico que conecta a los estudiantes con proyectos de impacto social y ambiental, fortaleciendo su capacidad de integración laboral y su compromiso con la transformación sostenible del país.

En consecuencia, el análisis del impacto de PLII CH no se limita a evaluar la adquisición de habilidades por parte de los estudiantes, sino que se orienta a valorar su contribución a la transformación del ambiente físico y social sostenible y a la preparación de profesionales capaces de insertarse en el mercado laboral con una visión crítica y responsable. Este enfoque responde a las prioridades estatales y a los objetivos estratégicos de desarrollo, consolidando la pertinencia académica de la carrera y reafirmando el papel de la universidad como agente activo en la construcción de un futuro sostenible para Cuba.

La valoración del impacto está permeada por un amplio espectro de puntos de vista y metodologías que se desarrollan según el contexto en que se apliquen; no obstante, todas convergen en el análisis de la “aplicación de una acción en un grupo, que indaga en todo tipo de efectos, tanto los buscados, de acuerdo con los objetivos de la acción, como otros no planificados” (Liberta, 2007, p. 7), lo que justifica la diversidad de indicadores que pueden observarse en la literatura especializada.

En el contexto educativo, la valoración de impacto, se aprecia la reiteración de la búsqueda del resultado del proceso formativo en el desarrollo de la personalidad del educando, por lo general, sobre la base de la recogida de información orientada a la emisión de juicios de valor respecto a una intervención con relevancia educativa. A juicio de Parra and Ruiz (2020) distinguen tres modelos:

- Orientado a los resultados; por lo general se enfocan hacia la relación docente, profesionales y clientes, los cuales aportan la vinculación del participante, el docente y la organización; hacia los beneficios monetarios, cuyos resultados se derivan del cálculo del retorno de la inversión. También pueden aparecer modelos que

incluyen una valoración mixta de aspectos cualitativos y cuantitativos, cuyos resultados se enuncian o recogen en la evaluación en el puesto de trabajo y de la organización; o aquellos en los que el análisis de los impactos se realiza en tres niveles, el personal, el de la organización o el social.

- Orientados a la valoración por proceso; en los que pueden aparecer distintos tipos, dentro de ellos, los que se focaliza en la persona y sus atributos, que aportan la influencia de las características de las personas en la efectividad de la formación; los que se centran en los factores influyentes en el proceso formativo o los que requieren de una revisión de los factores y de los niveles de transferencias, cuyos resultados se valoran por niveles educativos o por las condiciones del entorno laboral; o los que se enfocan en los niveles de impacto sobre las personas participantes, la docencia, y la institución educativa, su aporte se orienta hacia la formación del personal docente.
- Modelos de evaluación integrados; se caracterizan por ser sistémicos, integradores y concatenados en sus dimensiones, ente sus aportes se distinguen la coherencia y el enfoque pedagógico; el valor añadido, el incremento y la empleabilidad; así como la valoración de la influencia del entorno interno y externo.

La concepción que se sintetiza y evidencia en estos modelos permite declarar que el impacto puede comprenderse como el conjunto de efectos, resultados y transformaciones que se derivan de una acción o intervención, ya sea planificada o no. En este sentido, no se limita únicamente a medir logros cuantitativos, sino que abarca la valoración cualitativa de los cambios producidos en las personas, los procesos y los entornos donde actúa. Evaluar el impacto implica reconocer tanto los efectos buscados, alineados con los objetivos iniciales, como aquellos no previstos que enriquecen o modifican la práctica (Bravo et al., 2017). Bajo esta perspectiva, la PL II CH de los estudiantes se convierte en un espacio privilegiado para observar cómo sus experiencias contribuyen a la sostenibilidad y a la integración social y profesional. A partir de este marco conceptual, se abre la posibilidad de analizar de manera detallada los lugares específicos (Tabla 2.1) donde los estudiantes estuvieron insertados, identificando las transformaciones que su participación generó en cada contexto.

Table 2.1. Transformaciones de los estudiantes en la PL II CH

Cantidad de estudiantes	Objeto de obra	Principales actividades realizadas
3	Hotel calle 1ra. entre B y C, en el Vedado, municipio Plaza de la Revolución, en La Habana, Ejecutado por la empresa inmobiliaria ALMEST	Transformación en el espacio físico. Los estudiantes participaron en la ejecución de redes de abasto de agua, drenaje pluvial y residual, sistemas contra incendios y piscinas, comprendiendo cómo estas instalaciones se integran en la infraestructura hotelera. Utilizaron la Estación Total y escáner láser para replantear tuberías y cisternas, aprendiendo a transformar el espacio físico en un sistema hidráulico funcional y sostenible. Vivenciaron cómo la cimentación hidráulica garantiza estabilidad frente a cargas y humedad del terreno, relacionando la obra civil con la protección del recurso agua. Interiorizaron el cumplimiento de normas de construcción sobre consumo de agua y otras regulaciones cubanas, entendiendo que el espacio físico se transforma bajo criterios de sostenibilidad y seguridad hídrica. Observaron cómo se instalan oficinas y estructuras ligeras (facilidades temporales) que permiten gestionar el proyecto sin afectar el entorno, mostrando la relación entre logística constructiva y sostenibilidad.

Cantidad de estudiantes antes	Objeto de obra	Principales actividades realizadas
		Transformaciones sociales sostenibles. Se integraron con ingenieros hidráulicos, proyectistas y técnicos, aprendiendo dinámicas de cooperación y comunicación relacionado con los sistemas de agua y saneamiento. Comprendieron que las obras hidráulicas no son solo técnicas, sino que garantizan acceso seguro al agua, higiene en cocinas, áreas comunes, y protección contra incendios, impactando directamente en la calidad de vida. Interiorizaron la importancia de minimizar pérdidas de agua, optimizar diámetros de tuberías y garantizar eficiencia en cisternas y sistemas de bombeo. Reforzaron su visión de la ingeniería hidráulica como carrera que conecta requerimientos técnicos y demandas de la sociedad, vinculando su práctica con el bienestar colectivo y el desarrollo urbano sostenible.
1	Construcción del Círculo Infantil, Complejo Educativo Quiebra Hacha zona A-9 de la Zona Especial de Desarrollo Mariel por la Empresa de Construcción y Montaje del Mariel	Transformación en el espacio físico. Participó en la construcción de un círculo infantil dentro del Complejo Educativo Quiebra Hacha, comprendiendo cómo se transforma un terreno en instalaciones sociales con redes hidráulicas integradas. Fue partícipe del movimiento de tierra, construcción de la cimentación, el encofrado, el hormigonado y las terminaciones de fino sobre resano. Estos procesos le mostraron cómo se materializan los planos en estructuras físicas. Aprendió técnicas básicas de replanteo (regla, plomada, nivel de agua) para ubicar cimientos y redes hidráulicas, trasladando datos técnicos al espacio real. Se familiarizó con tuberías plásticas (PVC, PE, CPVC, PEX, polipropileno), comprendiendo cómo cada tipo se adapta a distintos usos: agua potable, drenaje pluvial, alcantarillado y sistemas de riego. Interiorizó lo relacionado con el Reglamento del Proceso Inversionista, entendiendo que el espacio físico se construye bajo estándares técnicos y ambientales que garantizan sostenibilidad hídrica. Transformaciones sociales sostenibles. Comprendió que las instalaciones hidráulicas garantizan agua potable, drenaje seguro y condiciones higiénicas en cocinas y áreas comunes, mejorando la calidad de vida de niños y familias. Reconoció que el proyecto educativo genera empleo, dinamiza la economía local y promueve equidad social, vinculando la ingeniería hidráulica con el bienestar colectivo. Interiorizó la importancia de reducir pérdidas de agua, optimizar diámetros de tuberías y aplicar materiales eficientes para garantizar un uso racional del recurso. Reforzó su visión del ingeniero hidráulico como garante de infraestructura social sostenible, capaz de diseñar y mantener sistemas de agua y saneamiento que transforman comunidades.

Cantidad de estudiantes	Objeto de obra	Principales actividades realizadas
4 integrados en dos equipos	La construcción de piscinas para el hotel Chapelín Taínos, Varadero Matanzas ejecutada por la Asociación Económica Internacional ARCOS-BBI	Participaron en la ejecución de piscinas, comprendiendo cómo se construyen instalaciones hidráulicas recreativas dentro de un complejo turístico. Vivenciaron las actividades del movimiento de tierra, las cimentaciones, el encofrado, el refuerzo en el hormigón y el hormigonado, lo que les permitió entender la secuencia constructiva de la obra y la importancia de la calidad estructural en instalaciones hidráulicas. Trabajaron con planos generales y específicos de piscinas y redes hidráulicas, aprendiendo a trasladar diseños al espacio físico y a coordinar con otras especialidades. Interiorizaron regulaciones cubanas como la NC 775-2010 y la NC 220-4 (hidráulica), además de normas internacionales (ASTM para CPVC en agua caliente), comprendiendo que el espacio físico se construye bajo estándares de eficiencia energética, seguridad y sostenibilidad hídrica. Se familiarizaron con tuberías plásticas modernas (PVC, CPVC, PE, PEX) y sistemas de recirculación de agua, reconociendo cómo cada material transforma el espacio físico en redes hidráulicas funcionales. Transformaciones sociales sostenibles. Comprendieron que las instalaciones hidráulicas garantizan confort, higiene y seguridad en un hotel que impacta en la economía local y el turismo nacional. Se integraron en brigadas multidisciplinarias (ingenieros, proyectistas, obreros), desarrollando cooperación y comunicación efectiva en torno a sistemas hidráulicos. Interiorizaron la importancia de cumplir licencias ambientales y sanitarias, optimizar el uso del agua en piscinas y reducir impactos ecológicos. Reforzaron su visión del ingeniero hidráulico como garante de infraestructura turística sostenible, vinculando su práctica con el bienestar colectivo y el desarrollo económico-social del país.

Cantidad de estudiantes antes	Objeto de obra	Principales actividades realizadas
13 integrados en cuatro equipos	Rehabilitación del conducto de 16" en avenida Carlos Manuel de Céspedes, en el municipio Plaza de la Revolución, La Habana, ejecutado por la Empresa de Mantenimiento y Rehabilitación de Obras Hidráulicas de Occidente (EMARHO).	Transformación en el espacio físico. En la sustitución de tuberías antiguas de hierro fundido por tuberías modernas de PEAD (polietileno de alta densidad), con diámetros de 315 mm, 400 mm, 500 mm y hasta 800 mm, garantizando mayor resistencia y durabilidad. Observaron la excavación con zanjadoras y retroexcavadoras, movimiento de tierra, compactación, hormigonado y encofrado. También presenciaron pruebas de presión y control de calidad en soldaduras por termofusión. Aprendieron a interpretar planos lineales y registros de obra, comprendiendo cómo se traslada el diseño hidráulico al espacio urbano real. Interiorizaron el cumplimiento del Decreto 327/2014 sobre el proceso inversionista y normas cubanas de construcción hidráulica (NC 969/2013 para tuberías, regulaciones de pavimentos hidráulicos y asfálticos). Vivenciaron roturas accidentales de tuberías durante la excavación, defectos en piezas de PEAD y salideros en ventosas, aprendiendo cómo se corrigen mediante rediseños y válvulas especiales. Transformaciones sociales sostenibles. Estas obras hidráulicas beneficiaron a más de 70 000 habitantes de municipios como Plaza de la Revolución y Cerro, además de instituciones críticas como hospitales y el Teatro Nacional, garantizando agua potable y saneamiento. Comprendieron que rehabilitar conductoras no es solo aplicar conocimientos técnicos, sino asegurar salud pública, higiene y calidad de vida, reduciendo riesgos de enfermedades transmitidas por el agua. Se integraron en brigadas multidisciplinarias junto al personal técnico de la Empresa Aguas de La Habana, la Unión Eléctrica, ETECSA y la Defensa Civil, aprendiendo la importancia de la coordinación en las obras urbanas. Interiorizaron la necesidad de minimizar pérdidas de agua, optimizar materiales y cumplir con regulaciones ambientales y de seguridad vial durante la ejecución en espacios públicos. Reforzaron su visión del ingeniero hidráulico como garante de infraestructura vital para la sociedad, vinculando su práctica con el bienestar colectivo y el desarrollo sostenible.

Fuente: elaboración propia

Sucintamente se devela que la PL II CH de los estudiantes de Ingeniería Hidráulica generó un impacto significativo, viéndose como efecto, resultado y cambio en los espacios físicos y sociales donde se insertaron. En el plano físico, los estudiantes participaron en obras que transformaron hoteles, círculos infantiles, instalaciones turísticas y redes urbanas, aplicando normas técnicas y tecnologías modernas que garantizan eficiencia y sostenibilidad hídrica. En el plano social, vivenciaron cómo estas obras repercuten directamente en la calidad de vida de comunidades, instituciones educativas y sectores estratégicos como el turismo, reforzando su visión del ingeniero hidráulico como agente de bienestar colectivo y desarrollo sostenible. Este impacto, en la línea de lo planteado por Bravo et al. (2017), no se limita a logros técnicos inmediatos, sino que se traduce en transformaciones

duraderas en las personas, procesos y contextos.

El impacto tiene disimiles miradas, en la mayoría de los casos se aprecia una perspectiva que facilita la observación del comportamiento de un fenómeno social y se valora la transformación ocurrida, ya sea positiva o negativa. La aplicación de la medición del impacto, como tendencia, está encaminada a la identificación de mejoras, desarrollo, y/o avances (Bravo et al., 2017).

Para el análisis del impacto del desarrollo de esta práctica laboral, visto como un proceso social y como tendencia, se identifican tres regularidades: es un efecto, un resultado y un cambio. Como efecto se aprecia el desarrollo de las mismas en condiciones complejas por el déficit de recursos económicos, materiales y financieros; como resultado la magnitud cualitativa del cambio (binomio estudiante-profesionales de la producción), crecimiento en variantes de solución a problemas específicos de construcción con la combinación armónica de aspectos técnicos, económicos y medioambientales durante el proceso formativo como parte del vínculo universidad-empresa; y como cambio se manifiesta la perfección de la formación del ingeniero hidráulico en la solución de problemas profesionales manifestos en el eslabón de base, en correspondencia con el contexto histórico concreto.

Al vincular estas experiencias con las proyecciones de trabajo del INRH para el 2025, se observa una correspondencia con: la modernización de la infraestructura hidráulica, la eficiencia en el uso del agua y la aplicación de ciencia e innovación son prioridades que los estudiantes ya vivenciaron en sus prácticas. La rehabilitación de conductoras urbanas, la construcción de instalaciones educativas y turísticas, y la integración en brigadas multidisciplinarias reflejan cómo la práctica laboral se articula con los objetivos estratégicos del organismo y con el Programa Hidráulico Nacional hasta 2030, que busca garantizar agua segura, resiliencia frente al cambio climático y sostenibilidad ambiental.

Así, el impacto de estas prácticas no solo fortalece la formación académica, sino que contribuye directamente a las metas estatales, preparando profesionales capaces de insertarse en proyectos que transforman el ambiente físico y social de Cuba.

03 CONCLUSIONES

En la Práctica Laboral II de Construcciones Hidráulicas, los estudiantes vivenciaron una transformación física al integrarse en obras de rehabilitación de conductoras y sistemas de abastecimiento de agua. El contacto directo con procesos como excavación, movimiento de tierra, soldadura por termofusión de tuberías de PEAD, pruebas de presión y hormigonado les permitió comprender cómo el diseño hidráulico se materializa en el espacio urbano. Esta experiencia les dio una visión clara de la importancia de aplicar normas técnicas y de calidad, así como de enfrentar y resolver problemas constructivos reales, fortaleciendo su capacidad práctica y su formación como futuros ingenieros hidráulicos. El impacto de estas acciones se reflejó en la mejora tangible de la infraestructura hídrica, asegurando un servicio más eficiente y confiable.

Desde el punto de vista social sostenible, la práctica les mostró que cada acción en la obra hidráulica tiene un impacto directo en la comunidad. Al participar en proyectos que garantizan agua potable y saneamiento para hospitales, instituciones y miles de habitantes, interiorizaron la responsabilidad social de su profesión. Aprendieron a trabajar en brigadas multidisciplinarias, a coordinar con diferentes entidades y a valorar la sostenibilidad hídrica como un eje central de su labor. Esta vivencia consolidó en ellos una identidad profesional comprometida con el bienestar colectivo y el desarrollo sostenible, entendiendo que la ingeniería hidráulica es tanto desarrollo profesional como servicio social, y que su impacto trasciende lo técnico para convertirse en un aporte esencial a la salud pública y la calidad de vida.

04 REFERENCIAS

Bravo, B., Fernández, C., & Mainegra, D. (2017). La evaluación de impacto del proceso de formación de profesores [Disponible en: <http://mendive.upr.edu.cu/index.php/MendiveUPR/article/view/1002>]. *Revista Mendive*, 15(1), 41–56.

- Gutiérrez, M. V., & Chang, D. F. (2023). La práctica laboral de construcciones hidráulicas en la formación del ingeniero hidráulico en la habana. *Referencia Pedagógica*, 11(3), 45–56.
- Gutiérrez, M. V., Juan, D. T., Martínez, Y., & Cordiez, A. (2017). El modelo del profesional para la formación del ingeniero hidráulico en cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(3), 78–87.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Education.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). (2025, January). Metas de los trabajadores hidráulicos cubanos para el 2025: Compromiso y sostenibilidad [INRH Noticias, 6 de enero de 2025].
- Liberta, B. E. (2007). Impacto, impacto social y evaluación de impacto [Disponible en: <http://sld.cu/pdf/aci/v15n3/aci08307.pdf>]. *Acimed*, 15(3), 1–9.
- Ministerio de Educación Superior. (2016). *Documento base para la elaboración del plan de estudio e*. La Habana, Cuba.
- Parra, R., & Ruiz, C. (2020). Evaluación de impacto de los programas formativos: Aspectos fundamentales, modelos y perspectivas actuales. *Revista Educación*, 44(2), 1–13. <https://doi.org/10.15517/revedu.v44i2.40281>
- Ramos, E., & Gutiérrez, M. V. (2025). La práctica laboral en la empresa de mantenimiento y rehabilitación de obras hidráulicas de occidente. *XII Convención Científica Internacional CIUM 2025, Simposio 1: Innovación e inclusión educativa para el desarrollo sostenible*.
- Vizcaíno, P. I., Cedeño, R. J., & Maldonado, I. A. (2023). Metodología de la investigación científica: Guía práctica. *Ciencia Latina. Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 9723–9762. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Dr.C. Mailén Virgen Gutierrez Herrera <https://orcid.org/0000-0002-9319-0653>
Ing. Edelsy Ramos Guilarte <https://orcid.org/0009-0009-8087-5205>
Dr.C. Dargen Tania Juan Carvajal <https://orcid.org/0000-0002-8281-8169>

La teledetección como herramienta para el monitoreo ambiental del manglar en la costa sur de Artemisa y Mayabeque, Cuba

Lisángela Espinosa AmadorE-MAIL: lisangelaespinosaamador2002@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), La Habana, Cuba.

Roxana Aymé Luis Winograd

E-MAIL:

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), La Habana, Cuba.

José Manuel Guzmán Menéndez

E-MAIL:

Agencia de Medio Ambiente (AMA), Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), La Habana, Cuba.

RESUMEN

Los manglares constituyen ecosistemas costeros de vital importancia por sus funciones ecológicas y su papel en la adaptación al cambio climático. Sin embargo, enfrentan crecientes amenazas antrópicas y climáticas que demandan un monitoreo sistemático y preciso. El presente estudio evalúa el uso de la teledetección, específicamente imágenes satelitales Sentinel-2, para el monitoreo de la cobertura vegetal del manglar en la costa sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba, entre 2017 y 2025. Mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la aplicación de técnicas de clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest, se generaron mapas de cobertura que permitieron cuantificar la dinámica espaciotemporal del ecosistema. Los resultados demostraron la efectividad de la teledetección para detectar cambios en la extensión y salud del manglar, evidenciando su alta resiliencia y recuperación post-perturbaciones. Se concluye que las herramientas satelitales, integradas en un flujo de trabajo de acceso abierto, son fundamentales para el monitoreo ambiental y la gestión adaptativa de estos ecosistemas en el contexto de proyectos de restauración como “Mi Costa”.

PALABRAS CLAVE: Cuba, Manglar, Monitoreo ambiental, NDVI, Random Forest, Sentinel-2, Teledetección

Remote sensing as a tool for environmental monitoring of mangroves on the south coast of Artemisa and Mayabeque, Cuba

ABSTRACT

Mangroves are coastal ecosystems of vital importance due to their ecological functions and their role in climate change adaptation. However, they face increasing anthropogenic and climate threats that demand systematic and precise monitoring. This study evaluates the use of remote sensing, specifically Sentinel-2 satellite imagery, for monitoring mangrove vegetation cover on the south coast of the provinces of Artemisa and Mayabeque, Cuba, between 2017 and 2025. By calculating the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and applying supervised classification techniques with the Random Forest algorithm, land cover maps were generated that allowed quantifying the spatiotemporal dynamics of the ecosystem. The results demonstrated the effectiveness of remote sensing in detecting changes in mangrove extent and health, evidencing their high resilience and post-disturbance recovery. It is concluded that satellite tools, integrated into an open-access workflow, are essential for environmental monitoring and adaptive management of these ecosystems in the context of restoration projects such as “Mi Costa”.

KEYWORDS: Cuba, Environmental monitoring, Mangrove, NDVI, Random Forest, Remote sensing, Sentinel-2

01 INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de manglar, situados en la interfase tierra-mar, se encuentran entre los más productivos y estratégicos del planeta. Proveen servicios ecosistémicos esenciales como la protección costera contra la erosión y eventos extremos, el hábitat para una vasta biodiversidad, el almacenamiento de carbono (conocido como “carbono azul”) y el mantenimiento de la calidad del agua (Fernández & López, 2019; Zhu et al., 2020). En regiones insulares como Cuba, donde los acuíferos costeros son la principal fuente de agua dulce, los manglares también desempeñan un papel biofísico crucial al interactuar con la hidrología subterránea y actuar como una barrera natural que puede modular la intrusión salina (Espinosa Amador, 2026).

A pesar de su importancia, estos ecosistemas enfrentan crecientes presiones derivadas del cambio climático, como el ascenso del nivel del mar, la intensificación de huracanes y las sequías prolongadas, así como por actividades antrópicas directas (Temmerman et al., 2023). Esta situación exige el desarrollo e implementación de sistemas de monitoreo continuo y espacialmente explícito que permitan evaluar su estado de salud, detectar cambios en su cobertura y comprender su dinámica frente a perturbaciones. El monitoreo tradicional, basado en parcelas de campo, es limitado en extensión y frecuencia, lo que dificulta una visión integral a escala de paisaje.

En este contexto, la teledetección emerge como una herramienta indispensable. La observación de la Tierra mediante sensores satelitales ofrece la capacidad de obtener información sinóptica, periódica y multiespectral de grandes extensiones, permitiendo un monitoreo ambiental efectivo y de bajo costo (Pipia et al., 2021). El presente trabajo enmarcado en el proyecto “Mi Costa” (Tarea Vida), tiene como objetivo demostrar la aplicabilidad de la teledetección con imágenes Sentinel-2 para el monitoreo de la dinámica espacial y temporal de la cobertura del manglar en un sector de la costa sur de Artemisa y Mayabeque, Cuba.

02 REFERENTES TEÓRICOS

El uso de sensores remotos para el estudio de ecosistemas de manglar tiene una trayectoria consolidada a nivel internacional. Diversas investigaciones han empleado imágenes de distintas resoluciones espaciales y espectrales para mapear su extensión, clasificar especies, evaluar su biomasa y detectar cambios en el tiempo (Kuenzer et al., 2011). La disponibilidad gratuita de datos de los satélites de la constelación Sentinel-2 (Agencia Espacial Europea – ESA), con su resolución espacial de 10 m en bandas del visible e infrarrojo cercano y una resolución temporal de cinco días, ha revolucionado el monitoreo de ecosistemas costeros, permitiendo análisis detallados a escalas antes inalcanzables con sensores de mayor resolución espacial pero menor cobertura temporal o con sensores de menor resolución espacial como Landsat (Pipia et al., 2021).

Para el análisis de la vegetación, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es uno de los indicadores más ampliamente utilizados. Su capacidad para cuantificar el vigor y la densidad de la biomasa fotosintéticamente activa, basándose en el contraste entre la reflectancia en el rojo (absorbida por la clorofila) y el infrarrojo cercano (fuertemente reflejada por la estructura foliar), lo convierte en una herramienta fundamental para discriminar áreas de manglar saludable de otras coberturas o de zonas degradadas (World Meteorological Organization (WMO), 2012). En el área de estudio, el NDVI se emplea para diferenciar las densas masas de bosque de mangle de otras formaciones vegetales como el herbazal de ciénaga o el bosque semideciduo.

Junto a los índices espectrales, las técnicas de clasificación digital de imágenes son esenciales para transformar la información espectral en mapas temáticos de cobertura del suelo. Dentro de estas, los algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) han demostrado una superior precisión frente a los métodos paramétricos clásicos. El algoritmo Random Forest, desarrollado por Breiman (2001), se ha posicionado como uno de los más robustos y eficaces en teledetección. Al construir un gran número de árboles de decisión a partir de subconjuntos aleatorios de datos y variables, Random Forest reduce el sobreajuste y maneja eficientemente datos multidimensionales, lo que lo hace ideal para clasificar coberturas complejas como los humedales (Breiman, 2001; Espinosa Amador,

2026).

En el contexto cubano, los estudios de vegetación se han apoyado históricamente en el sistema de clasificación fisonómico-florístico-ecológico propuesto por Capote and Berazaín (1984), que establece las bases para identificar las formaciones vegetales del archipiélago. Investigaciones recientes, como la presente tesis, integran este marco conceptual con las tecnologías geoespaciales actuales. Específicamente, el proyecto “Mi Costa” y su antecesor “Manglar Vivo” han creado un escenario propicio para aplicar estas herramientas, con el objetivo de evaluar el éxito de las acciones de restauración y comprender la resiliencia del ecosistema ante eventos climáticos extremos, como los huracanes que periódicamente afectan la región (Espinosa Amador, 2026).

La combinación de imágenes Sentinel-2 de alta resolución, el cálculo de índices espectrales como el NDVI, y la clasificación mediante algoritmos de machine learning como Random Forest, constituye una metodología de vanguardia y de acceso abierto que permite no solo cartografiar el manglar, sino también monitorear su dinámica anual y su respuesta a perturbaciones, proporcionando información crucial para la gestión y la toma de decisiones en materia de conservación y adaptación al cambio climático en zonas costeras.

03 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en la costa sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba, dentro del Tramo 1 del proyecto “Mi Costa” (Tarea Vida). Comprende los municipios de Alquizar, Güira de Melena (Artemisa), Güines, Melena del Sur y Batabanó (Mayabeque), desde playa Majana hasta playa Rosario. Geográficamente queda delimitada por las coordenadas X_{min} : 311776, Y_{min} : 314523 y X_{max} : 326255, Y_{max} : 401475 (sistema Cuba Norte NAD 27) (Figura 3.1). Esta franja costera se caracteriza por un perfil bajo, pantanoso y la presencia de extensos manglares que forman parte de la Llanura Cársica Meridional (Espinosa Amador, 2026).



Figure 3.1. Ubicación del área de estudio.

3.2. Imágenes satelitales

Se emplearon imágenes del satélite Sentinel-2 (Agencia Espacial Europea – ESA), provenientes de la constelación de dos satélites (Sentinel-2A y Sentinel-2B), que proporcionan una resolución temporal de 5 días y una resolución espacial variable entre 10 y 60 m. Para este estudio se seleccionaron un total de nueve imágenes correspondientes al período 2017–2025, todas adquiridas durante la época seca (noviembre-abril) con el fin de minimizar la influencia de la nubosidad y estandarizar las condiciones fenológicas de la vegetación. El criterio de selección priorizó escenas con un porcentaje de nubosidad inferior al 10% sobre el área de interés.

Las bandas utilizadas fueron:

- Banda 2 (azul, 10 m)

- Banda 3 (verde, 10 m)
- Banda 4 (rojo, 10 m)
- Banda 8 (infrarrojo cercano, 10 m)

Las imágenes fueron descargadas en formato nivel 2A (reflectancia de fondo corregida atmosféricamente) desde el portal Copernicus Open Access Hub, por lo que no requirieron correcciones radiométricas o geométricas adicionales.

3.3. Procesamiento digital

El procesamiento se realizó íntegramente con el software de código abierto QGIS (versión 3.40). Las etapas seguidas fueron:

Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés).

El NDVI se calculó para cada imagen mediante la expresión:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (3.1)$$

Donde, $B8$ y $B4$ corresponden a las reflectancias en el infrarrojo cercano y el rojo, respectivamente. El NDVI permitió identificar áreas con vegetación activa y discriminar entre coberturas densas y escasas, de acuerdo con la clasificación propuesta por la World Meteorological Organization (WMO) (2012).

3.4. Clasificación supervisada con Random Forest

Se implementó una clasificación supervisada utilizando el algoritmo Random Forest (Breiman, 2001) mediante la herramienta *dzetsaka* disponible en Quantum Geographic Information System (QGIS por sus siglas en inglés). Las firmas espectrales de entrenamiento se obtuvieron a partir de Regiones de Interés (ROIs) definidas por criterio de experto sobre composiciones en color verdadero e infrarrojo, así como con el apoyo del NDVI. Se definieron cuatro clases de cobertura, basadas en la clasificación de formaciones vegetales de Cuba (Capote & Berazaín, 1984):

- Bosque de mangle
- Herbazal de ciénaga
- Bosque semideciduo
- Bosque de ciénaga

Para cada año se generaron entre 50 y 100 píxeles de entrenamiento por clase, distribuidos homogéneamente en el área de estudio. El algoritmo Random Forest se ejecutó con 100 árboles y una profundidad variable, validándose visualmente la consistencia de los resultados.

3.5. Análisis de cambios

A partir de los mapas clasificados se calcularon las superficies (en hectáreas) de cada clase de cobertura para los años 2017 a 2025. Estos valores se tabularon y se analizaron sus tendencias temporales en relación con eventos climáticos extremos registrados (huracanes y sequías intensas).

04 RESULTADOS

4.1. Mapas de cobertura vegetal

La clasificación supervisada permitió obtener mapas anuales de la distribución de las formaciones vegetales en la zona costera (Figuras 4.1, 4.2 y 4.3). Se observa una clara dominancia del herbazal de ciénaga y del bosque de mangle, que juntos constituyen más del 80% de la cobertura vegetal en la mayoría de los años analizados.

Distribución de los tipos de cobertura del humedal en la costa sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque para el año 2018

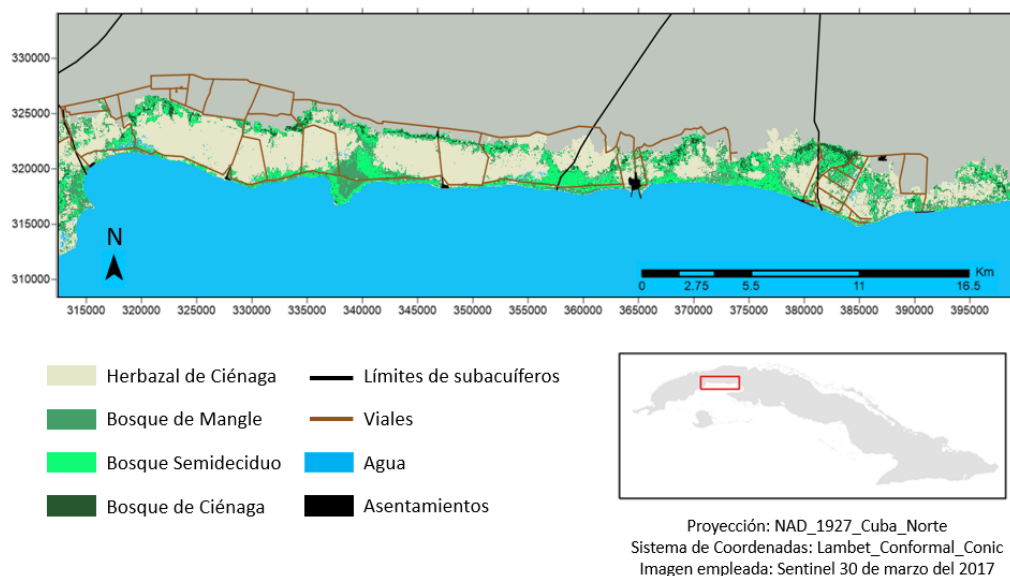


Figure 4.1. Distribución de la cobertura vegetal en el año 2018.

Distribución de los tipos de cobertura del humedal en la costa sur de las provincias de Artemisa y Mayabeque para el año 2024

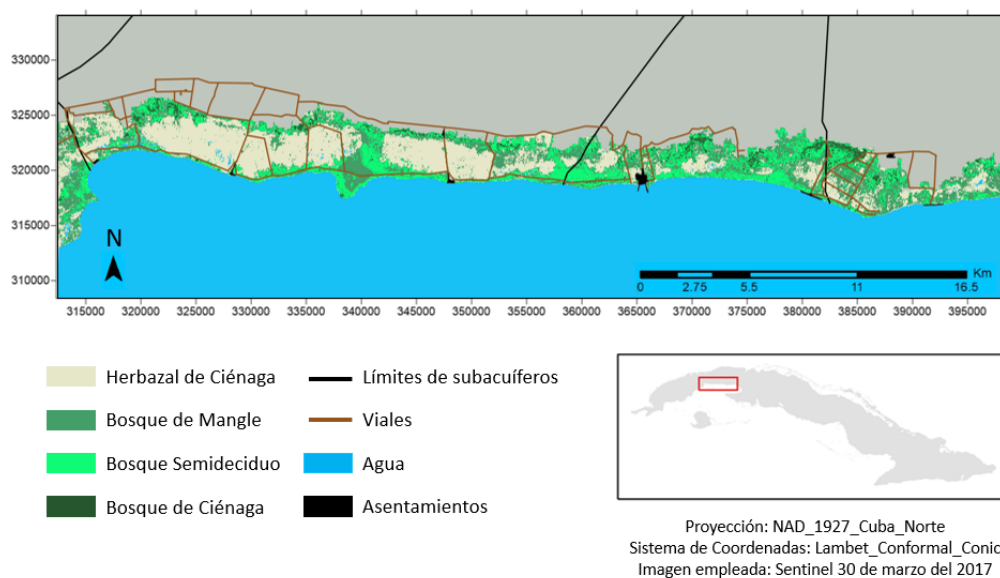


Figure 4.2. Distribución de la cobertura vegetal en el año 2024 (post-huracán Rafael).

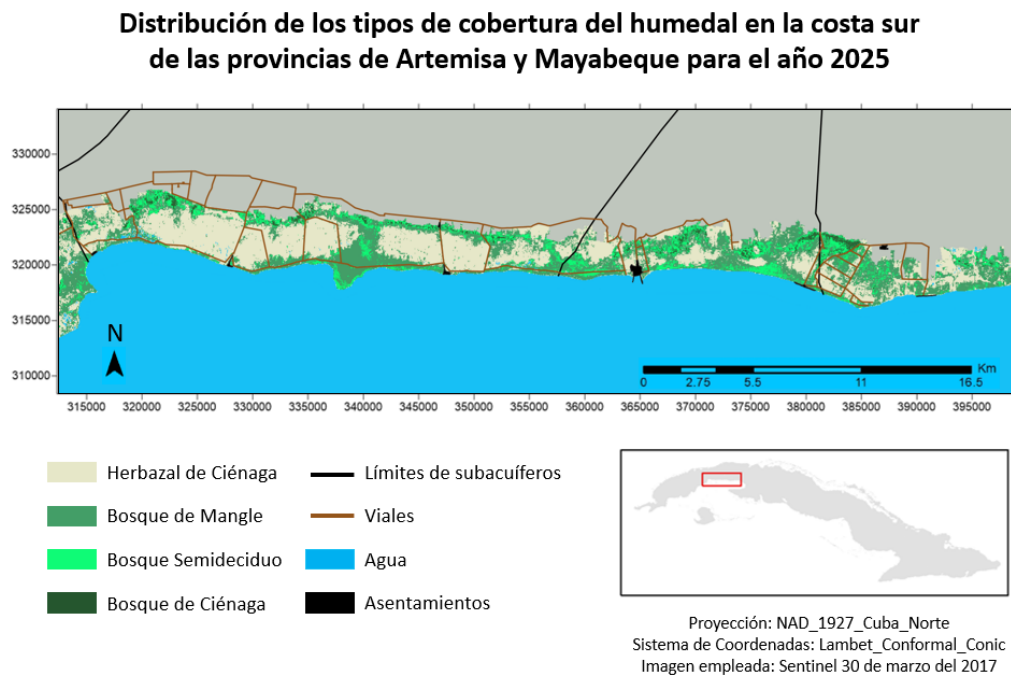


Figure 4.3. Distribución de la cobertura vegetal en el año 2025.

4.2. Evolución de las superficies

La Tabla 4.1 resume las áreas calculadas para cada tipo de cobertura entre 2017 y 2025.

Table 4.1. Áreas de los tipos de cobertura vegetal en la costa sur de Artemisa y Mayabeque (2017–2025)

Año	Área (ha)			
	Bosque de mangle	Herbazal de ciénaga	Bosque semideciduo	Bosque de ciénaga
2017	10 192,69	21 704,32	3 506,66	2 190,37
2018	7 231,66	21 755,99	7 056,34	1 401,44
2019	7 430,87	20 411,45	8 253,57	1 533,02
2020	7 815,40	20 375,27	8 538,49	713,95
2021	11 489,89	18 780,79	2 721,60	791,89
2022	13 249,83	17 867,09	3 086,31	1 030,55
2023	8 620,00	18 235,72	11 115,34	1 165,81
2024	11 622,00	14 989,62	9 538,44	1 811,65
2025	14 814,42	18 235,72	4 920,78	1 165,95

La dinámica temporal muestra fluctuaciones notables. El bosque de mangle experimentó una reducción significativa entre 2017 y 2018, seguida de una recuperación progresiva hasta 2022, un nuevo descenso en 2023 y un repunte histórico en 2025, alcanzando las 14 814,42 ha. Estos cambios están asociados al impacto de fenómenos meteorológicos extremos, como el huracán Rafael (2024) que afectó directamente la costa sur de Artemisa, causando una disminución de la cobertura de manglar en 2023, pero evidenciando una rápida recuperación al año siguiente. El herbazal de ciénaga mantiene una tendencia general a la disminución, mientras que el bosque semideciduo presenta un comportamiento errático, posiblemente influenciado por la dinámica hídrica y la intervención antrópica.

4.3. Resiliencia del manglar

Los resultados confirman la alta resiliencia del ecosistema de manglar. A pesar de las afectaciones por huracanes (como Ian en 2022 y Rafael en 2024) y períodos de sequía intensa (2019-2020), el bosque de mangle ha mostrado capacidad de regeneración natural, alcanzando su máxima extensión en 2025. Este comportamiento sugiere que las medidas de restauración implementadas por los proyectos “Manglar Vivo” y “Mi Costa” pueden estar potenciando la recuperación del ecosistema.

05 CONCLUSIONES

La teledetección, mediante imágenes Sentinel-2 y el índice NDVI, constituye una herramienta eficaz y de bajo costo para el monitoreo ambiental del manglar en la costa sur de Artemisa y Mayabeque. La clasificación supervisada con el algoritmo Random Forest permite obtener mapas temáticos precisos y consistentes a lo largo del tiempo.

Se evidencia una marcada dinámica espacio-temporal de la cobertura de manglar, con fluctuaciones interanuales vinculadas a eventos climáticos extremos (huracanes y sequías). A pesar de estas perturbaciones, el ecosistema demuestra una elevada resiliencia, recuperándose y alcanzando su máxima extensión registrada en 2025.

Los resultados cuantitativos y cartográficos generados brindan una línea base fundamental para la gestión adaptativa del ecosistema y para evaluar el impacto de las acciones de restauración en el marco del proyecto “Mi Costa”.

06 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con el monitoreo sistemático utilizando esta metodología, incorporando en el futuro índices espectrales adicionales, por ejemplo, el Índice de Vegetación Mejorado (EVI por sus siglas en inglés) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI por sus siglas en inglés) y validación de campo para mejorar la precisión de las clasificaciones y comprender mejor los procesos ecológicos subyacentes.

07 REFERENCIAS

- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Capote, R. P., & Berazaín, R. (1984). Clasificación de las formaciones vegetales de cuba. *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 5(2), 27–75.
- Espinosa Amador, L. (2026). *Determinación de la relación entre intrusión marina y la respuesta adaptación del manglar* [Tesis de diploma]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE.
- Fernández, A., & López, T. (2019). Manglares y su función como barrera biofísica ante la intrusión salina. *Revista Cubana de Ingeniería Hidráulica*, 12(3), 45–58.
- Kuenzer, C., Bluemel, A., Gebhardt, S., Quoc, T. V., & Dech, S. (2011). Remote sensing of mangrove ecosystems: A review. *Remote Sensing*, 3(5), 878–928. <https://doi.org/10.3390/rs3050878>
- Pipia, L., Amin, E., & Gómez-Chova, L. (2021). Sentinel-2 data for land cover mapping. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112–128.
- Temmerman, S., Horstman, E. M., & Bouma, T. J. (2023). Coastal wetlands and their role in climate adaptation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 123–140.
- World Meteorological Organization (WMO). (2012). *Standardized precipitation index user guide* (tech. rep. No. WMO-No. 1090). World Meteorological Organization.
- Zhu, Z., Vuik, V., Visser, P. J., Soens, T., van Wesenbeeck, B., van de Koppel, J., Jonkman, S. N., Temmerman, S., & Bouma, T. J. (2020). Historic storms and the hidden value of coastal wetlands for nature-based flood defence. *Nature Sustainability*, 3(10), 853–862. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0556-z>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Lisángela Espinosa Amador <https://orcid.org/0009-0003-9885-6850>
Roxana Aymée Luis Winograd <https://orcid.org/0000-0002-4758-4045>
José Manuel Guzmán Menéndez <https://orcid.org/0000-0002-4989-870X>

Estudio hidrológico de la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel

Dariel Francisco Chang DomínguezE-MAIL: changdariel@gmail.com

Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). La Habana, Cuba.

RESUMEN

El estudio hidrológico de la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel en la provincia de Artemisa tiene como objetivo identificar las áreas propensas a inundaciones en la cuenca para la prevención de peligros para la sociedad y economía del territorio. Se hace la caracterización general de la cuenca, así como procesar estadísticamente la calidad de los datos de los pluviómetros cercanos de la cuenca. Se confeccionó los hietogramas para probabilidades de ocurrencia de eventos calibrando para la probabilidad del 8,33 %. Se hizo la simulación hidrológico – hidráulica mediante el software Iber v3.3 confirmando valores entre moderados y altos en el río lo cual implica tomar medidas para no implantar estructuras aledañas y restringir el tránsito por el mismo, así como en la zona costera.

PALABRAS CLAVE: *cuenca, escurrimiento, hietograma, período de retorno, precipitación*

Hydrological study of the basin located south of Mariel Bay

ABSTRACT

The hydrological study of the basin located south of Mariel Bay in the province of Artemisa aims to identify flood-prone areas within the basin to prevent hazards to the territory's society and economy. A general characterization of the basin is carried out, as well as a statistical processing of the quality of data from nearby rain gauges in the basin. Hyetographs were prepared for event occurrence probabilities, calibrated for the 8.33% probability level. The hydrological-hydraulic simulation was performed using the Iber v3.3 software, confirming values ranging from moderate to high in the river, which implies the need to take measures such as avoiding the construction of nearby structures and restricting transit along it, as well as in the coastal zone.

KEYWORDS: *basin, runoff, hyetograph, return period, precipitation*

01 INTRODUCCIÓN

“La modelación hidrológica de las cuencas hidrográficas permite realizar pronósticos de las posibles afectaciones de una zona debido a la ocurrencia de lluvias extremas máximas, es por ello que estudios de este tipo toman auge y se hace uso de herramientas aplicadas de última generación como son los casos de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) y los modelos de simulación hidrológica.” (Carreras, 2013, pág. 1)

Los modelos matemáticos son los más difundidos y utilizados en la práctica hidrológica internacional, ya que permiten comprender el comportamiento de los sistemas en situaciones que ocurren en la realidad, y otras que aún no han sucedido. Los modelos de simulación hidrológica se utilizan para estudiar situaciones extremas difícilmente observables en la realidad. Ejemplo de ellos son los efectos de precipitaciones muy intensas y prolongadas en cuencas hidrográficas en su estado natural, o en las que se ha intervenido con obras como canales, represas, diques de contención, puentes, etc. (Carreras, 2013)

En esta investigación se abordará el estudio hidrológico aplicado a la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel en la provincia Artemisa con el objetivo de prevenir los peligros para la sociedad y economía de la localidad.

Se calcula y mapea las zonas propensas a inundaciones por lluvias intensas para la probabilidad del 8,33 %, así como su calibración. Identificar estas zonas permite tomar decisiones en cuanto a la protección y seguridad de las estructuras existentes y con proyección al futuro para el desarrollo económico del territorio.

02 DESARROLLO

2.1. Materiales y métodos

Límites de la cuenca

Se establece los límites de una cuenca hidrológica es un proceso que implica la identificación de las áreas que drenan hacia un punto específico, como un río, lago o embalse; para lograr este objetivo se necesitan los datos detallados de la topografía, geología y los datos climatológicos de la zona. El análisis del estudio topográfico realizado conduce a la posibilidad de identificar la divisoria de las aguas, que es la línea imaginaria que limita la cuenca. Esta información unida con las herramientas de sistemas de Información Geográfica (GIS) y la ubicación de los pluviómetros disponibles brindados por la plataforma Sistema de Gestión Integral del Agua (SGIA) (Tabla 2.1) permiten un análisis más preciso, que se completa al utilizar el software QGIS, propicio para la modelación de la cuenca de estudio.

A partir del levantamiento topogeodésico en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel y desde el parteaguas al sur respectivamente, según los servicios de Geomática se obtuvo la imagen satelital, delimitación del área de la cuenca mediante hojas cartográficas, la ubicación de los pluviómetros más cercanos a la zona de estudio y la creación del modelo digital del terreno con resolución de 10 m x 10 m (Fig. 2.1).

Table 2.1. Coordenadas de las estaciones pluviométricas obtenidas por la plataforma Sistema de Gestión Integral del Agua (SGIA).

Estación pluviométrica	NC	Estado	<i>x</i>	<i>y</i>	Altitud	Tipo Red
Embalse Pinillo	433	Habilitada	317389,82	345844,99	33	Básica
Acueducto Guanajay	390	Habilitada	327382,22	345043,54	106	Básica
Embalse Mosquito	355	Habilitada	323591,43	352650,52	80	Básica

Caracterización morfológica de la cuenca

La cuenca objeto de estudio se localiza entre las coordenadas 22°95'N y 82°74' entre el sur de la bahía del Mariel y al norte del municipio de Guanajay, ocupando un área total de 21,13 km² y un perímetro de 28,92 km (Fig. 2.1). Según tamaño se clasifica como cuenca pequeña ya que su área es menor a 100 km² y exorreica debido a su red de drenaje hacia el mar. Según el Atlas Nacional de Cuba (Instituto de Geografía Tropical [IGT], 2015), la cuenca se distribuye en un 25 % representando la zona costera por medio de llanuras aluviales y manglares, el 50 % de la zona intermedia por colinas bajas con cotas entre 50 y 130 metros sobre el nivel del mar con suelos calcáreos y la zona sur abarcando el 25 % de valles entre montañas con sedimentos cuaternarios. El relieve se encuentra dividido en llanuras costeras con elevaciones de 0 a 20 metros sobre el nivel del mar, formada por depósitos marinos y fluviales, colinas kársticas con cota de 150 metros sobre el nivel del mar, con pendientes del 10 al 15 %, modeladas por procesos de disolución de calizas y valles aluviales representando zonas planas con suelos fértiles, dedicadas a la agricultura (Pérez Aragón, 2003). Se obtuvo otros parámetros esenciales mediante el software HEC-HMS v4.13, los cuales se presentan en la Tabla 2.2.

Análisis de registros históricos de precipitación en la cuenca

Según las estaciones pluviométricas ubicadas en el terreno según la figura 2.1 se encuentran fuera del área de la cuenca, no obstante, se utilizaron dichos pluviómetros denominados Embalse Pinillo, Embalse Mosquito y Acueducto Guanajay, por la cercanía al área de estudio como se mostró anteriormente en la Tabla 2.1. Para el análisis del comportamiento de las precipitaciones se adquirió la información a partir de la plataforma Sistema de Gestión Integral del Agua (SGIA) <https://sgia.hidro.gob.cu>, la cual contiene los registros históricos de

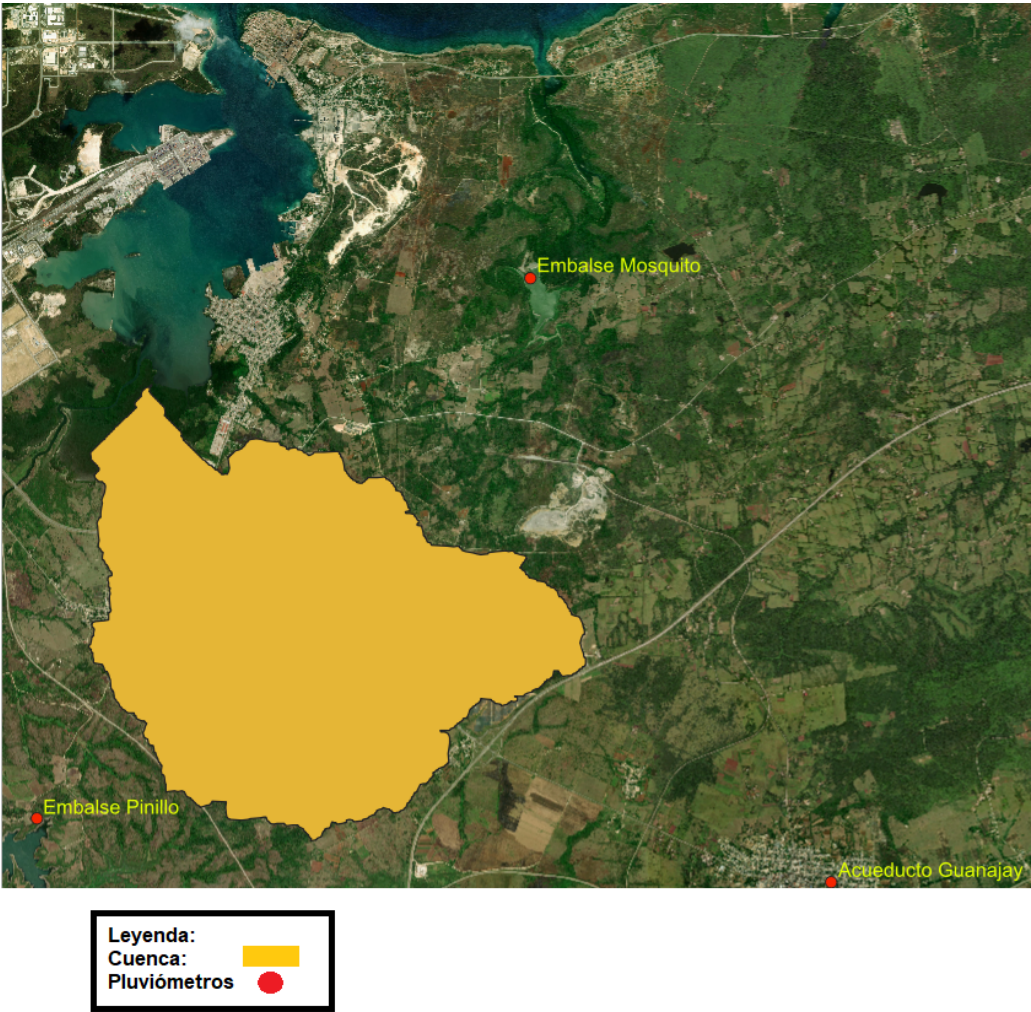


Figure 2.1. Ubicación geográfica de la cuenca al sur de la bahía del Mariel en la provincia de Artemisa.

Table 2.2. Características extraídas a partir del modelo hidrológico mediante el software HEC-HMS v4.13.

Parámetro	Valor
Longitud máxima del cauce principal (km)	11,5486
Pendiente del cauce principal (m/m)	0,01134
Longitud de la trayectoria del flujo centroidal (km)	6,68079
Pendiente de la trayectoria del flujo centroidal (m/m)	0,00359
Longitud de la trayectoria del flujo (km)	8,66145
Pendiente de la trayectoria del flujo (m/m)	0,00716
Pendiente de la cuenca (m/m)	0,11011
Relieve de la cuenca (m)	131
Relación de relieve	0,01134
Relación de elongación	0,44922
Densidad de drenaje (km/km²)	1,70576

los acumulados diarios de las estaciones en la provincia de Artemisa para el período comprendido (julio/2006 - diciembre/2025). Si en las series históricas se observa datos faltantes, se procede al completamiento de los datos de lluvia por medio de los pluviómetros aledaños que presentan la información suficiente en el período analizado aplicando una interpolación de tipo polinómica para rellenar los registros. Posteriormente se calcula la serie de lluvia histórica distribuida para la cuenca mediante el software HEC-HMS v4.13 por el método denominado “Distancia Inversa” introduciendo las series correspondientes a cada pluviómetro con sus coordenadas.

Cálculo de la serie de precipitación máxima diaria anual

Se determina la serie de precipitaciones máximas diaria anual a partir de la extracción de los valores máximos diarios por año en el período analizado según la precipitación distribuida en la cuenca.

Ajuste a una distribución de probabilidad

Se realiza el análisis de homogeneidad a la serie de lluvia histórica por las diferentes pruebas de hipótesis tales como t-Student, Cramer, Spearman, Helmer, Secuencias o Corridas y Kruskal-Wallis. Posteriormente se determina cual es la función de probabilidad que más se ajusta mediante la prueba de bondad de ajuste “Smirnov-Kolmogorov” a la serie de lluvia histórica.

Estimación de la precipitación máxima probable (PMP)

Se aplica la metodología propuesta por Campos Aranda (1992) acorde a la función de probabilidad de mejor ajuste y posteriormente se aplica la corrección del intervalo fijo (CIF) partiendo del estudio de miles de estaciones de datos de lluvia, Weiss citado por Campos Aranda (1992) encontró que los resultados de un análisis probabilístico llevado a cabo con lluvias máximas diarias anuales tomadas en un único y fijo intervalo de observación, para cualquier duración comprendida entre 1 y 24 horas, al ser incrementados en un 13 % conducían a magnitudes más aproximadas a las obtenidas en el análisis basado en lluvias máximas verdaderas y entonces, con tal corrección la lluvia representativa se convierte en lluvia máxima en 24 horas (para determinado período de retorno).

Planos et al. (2011) en su estudio de grandes e intensas precipitaciones en el archipiélago cubano, establece el coeficiente de reducción de la precipitación no al área de la cuenca, sino al área donde se distribuye. Dicho coeficiente tiene un valor significativo para la interpretación de las relaciones espaciales. Para el archipiélago cubano, Planos et al. (2011) plantean coeficientes de reducción (CR) máximos y mínimos en función del área donde se distribuye la precipitación. En este sentido:

$$CR_{min} = \exp(-0,0008 A^{0,8}) \quad (2.1)$$

$$CR_{max} = \exp(-0,00046 A^{0,8}) \quad (2.2)$$

Por tanto, en este estudio la corrección a la PMP se ha concebido formalmente como:

$$PMP = CIF \cdot CA \cdot PMP = 1,13 \cdot \frac{CR_{min} + CR_{max}}{2} \cdot PMP \quad (2.3)$$

Obtención de las curvas Intensidad -- Frecuencia -- Duración (IFD)

Según las relaciones o cocientes a la lluvia de 24 horas se emplean para duraciones de varias horas. Campos Aranda (1992) propone los siguientes cocientes (Tabla 2.3):

Table 2.3. Valores para las relaciones a la lluvia de duración 24 horas. Fuente: Campos Aranda (1992).

Duración (h)	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
Cociente	0,30	0,39	0,46	0,52	0,57	0,61	0,68	0,80	0,91	1,00

Estos cocientes se aplican a la PMP para los períodos de retorno, obteniéndose las precipitaciones para diferentes

duraciones. Posteriormente se calculan los valores de intensidad a partir de la división entre la precipitación y la hora que le corresponde obteniéndose las curvas.

Se obtiene la ecuación que describe como es la intensidad de las precipitaciones teniendo en cuenta el comportamiento de las curvas IFD ajustándose a los tiempos de retorno según el método de Aparicio:

$$I = \frac{k \cdot T^a}{D^b} \quad (2.4)$$

Siendo: I la intensidad (mm/h); T el tiempo de retorno (años); y k , a y b los parámetros de ajuste.

Obtención de hietogramas de precipitación

Para la obtención del hietograma de la precipitación se empleó el método de la intensidad instantánea desarrollado por Keifer and Chu (1957) citado y analizado en detalle por Chow et al. (1994). Los hietogramas de precipitación son obtenidos a partir de la expresión de intensidad descrita anteriormente en función de la duración de la tormenta y los períodos de retorno. Para lograr una mayor confiabilidad y corrección de estos hietogramas se procede a la calibración de un modelo hidrológico adaptable a la cuenca mediante el software HEC-HMS v4.13. Para el procedimiento de la calibración se adquirió los caudales horarios por la plataforma Geoglows <https://hydroviewer.geoglows.gob.org> primeramente seleccionando el cauce aguas abajo de la bahía y automáticamente sale una interfaz con el código que lo identifica (Fig. 2.2).

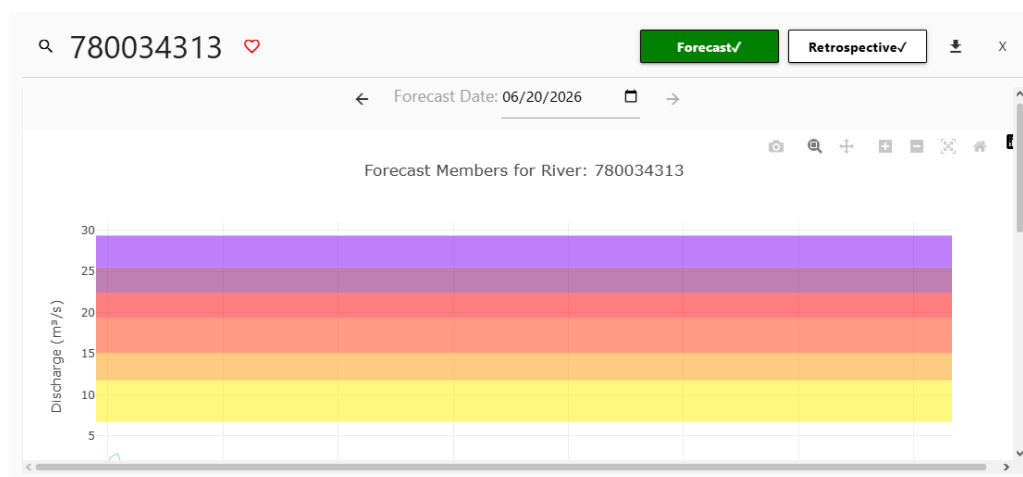


Figure 2.2. Código del cauce aguas abajo de la cuenca al sur de la bahía del Mariel por la plataforma Geoglows.

Posteriormente se accede a los datos horarios retrospectivos del cauce de descarga hacia la bahía (Fig. 2.3) por una hoja de código por medio del siguiente vínculo en el período analizado: https://colab.research.google.com/drive/1eYhmjL8TV9VATyYk_w6o5EJeS-naGK1D?usp=sharing

Según la figura anterior podemos observar que los dos eventos extremos máximos de precipitación ocurrieron en el año 2008 y 2020, lo cual indica un tiempo de retorno de 12 años resultando propicio el análisis del período (julio/2006 - diciembre/2025).

Según la figura anterior seleccionamos los caudales horarios del mayor evento extremo registrado en 24 horas y calibramos mediante el software HEC-HMS v4.13 los parámetros denominados tiempo de retraso (Lag time) y la Curva Número (CN) declarando un intervalo (Tabla 2.4) por el método simplex y ajustando el hietograma generando un escurrimiento similar al observado para el completamiento de la calibración y validación del modelo hidrológico.

Determinación de las zonas de inundación

Para determinar las zonas de inundación de la cuenca en estudio se utilizará el software Iber. Es un software de simulación numérica desarrollado en España, diseñado específicamente para modelar flujos en ríos y áreas inundables con la aplicación de las ecuaciones de Saint-Venant de forma bidimensional para flujo no permanente

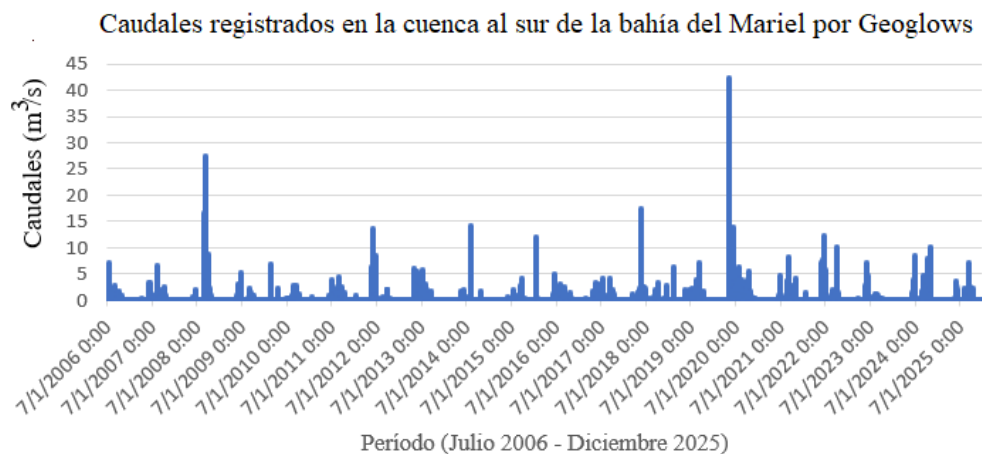


Figure 2.3. Caudales registrados en la cuenca al sur de la bahía del Mariel en el período analizado (julio/2006 - diciembre/2025).

Table 2.4. Valor inicial y extremos de las variables a calibrar mediante el software HEC-HMS v4.13.

Parámetro	Valor inicial	Valor mínimo del intervalo	Valor máximo del intervalo
Curva Número (CN)	84	50	99
Tiempo de retraso (Lag time)	88,58	0	3000 minutos

basándose en las expresiones de la conservación de la masa y momentum. Para la configuración del modelo hidrológico se representó la superficie del terreno, el mapa de uso de suelo para introducir los coeficientes de rugosidad de Manning acorde a los diferentes elementos, la malla bidimensional con resolución 10 m x 10 m y 155282 nodos para realizar cálculos numéricos (Fig. 2.4) y se estableció los límites del área de estudio, como zonas de entrada y salida del flujo. Se establece una modelación en régimen no estacionario considerando escorrentía superficial, estado del cauce seco y poca infiltración en áreas verdes para un evento lluvioso con período de retorno de 12 años en 24 horas, mediante la aplicación del hietograma adecuado y declarando una condición de salida analizando el comportamiento de la elevación del mar dentro de la bahía alcanzando una máxima elevación de 0,67 m (Fig. 2.5) información registrada actualmente en aplicaciones climáticas en la provincia de Artemisa.

2.2. Resultados

Según las series históricas adquiridas por las estaciones pluviométricas, aspectos abordados en la sección de materiales y métodos, se hace el completamiento de estas y según las coordenadas de cada estación se aplica el método denominado “Distancia Inversa” mediante el software HEC-HMS v4.13 y se obtiene la serie histórica diaria distribuida en toda la cuenca (Fig. 2.6) desde el período (julio/2006 - diciembre/2025). En la figura 2.6 se aprecia en los registros históricos diarios de las estaciones pluviométricas valores máximos de precipitación entre 180,07 y 235,37 mm en noviembre del año 2006 y en junio del año 2012. Estos valores máximos de precipitación registrados por las series anteriores tienen referencia con respecto a valores reportados por la plataforma EcuRed como eventos meteorológicos relevantes en Artemisa en el municipio Bauta con un acumulado de 136,2 mm y por el centro de pronósticos del Instituto de Meteorología (INSMET) en el año 2012 como fuertes e intensas lluvias en Artemisa en la Presa Pinillo en Mariel con 249 mm y en la Empresa de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de Artemisa con 201 mm. La obtención de las precipitaciones máximas diarias anuales es fundamental en dicho estudio para el análisis de las inundaciones a la cuenca de referencia. De igual forma será obtenida la precipitación máxima probable (PMP) para el período de retorno de 12 años para una duración de 24 horas de lluvias intensas, obteniéndose

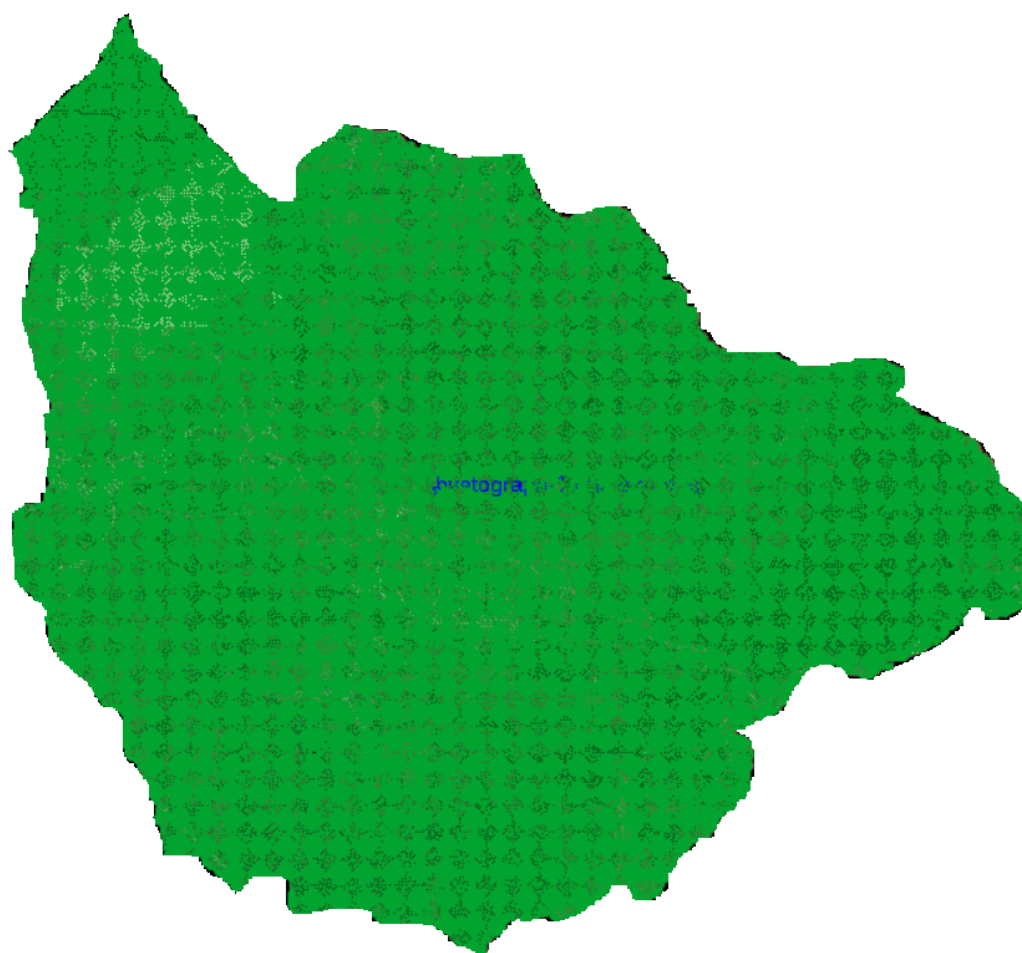


Figure 2.4. Malla bidimensional declarada en la cuenca al sur de la bahía del Mariel.

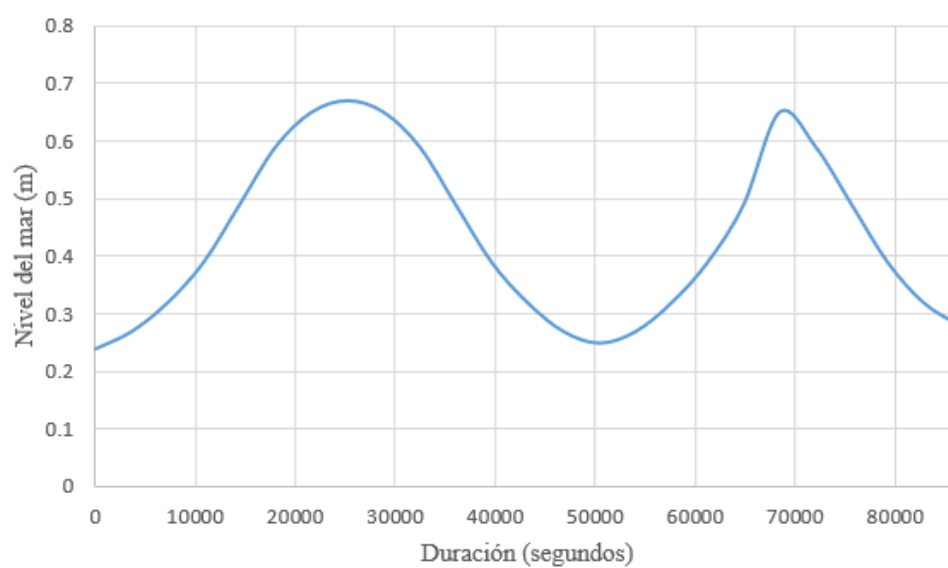


Figure 2.5. Comportamiento máximo del nivel del mar al sur de la bahía del Mariel.

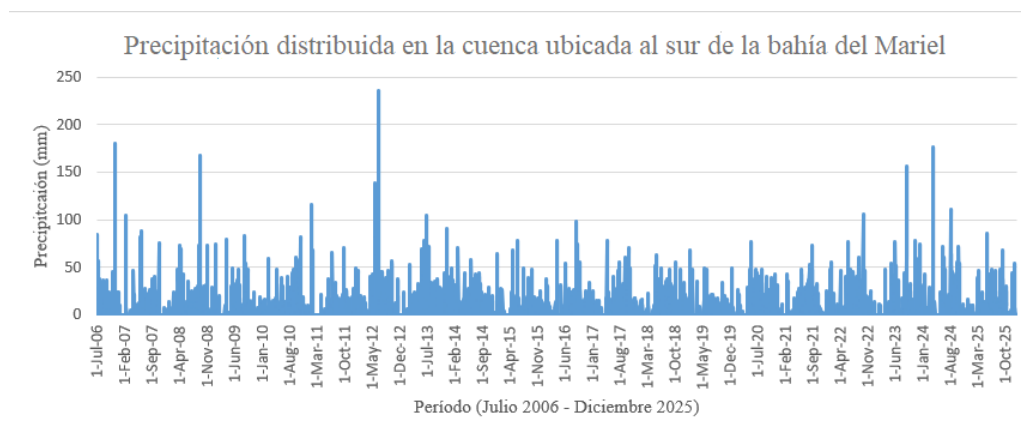


Figure 2.6. Precipitación diaria distribuida en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel.

finalmente las curvas de Intensidad – Frecuencia – Duración (IFD) con el propósito de diseñar sistemas de drenaje adecuados para evacuar los escurrimientos calculados para la protección contra las inundaciones en los poblados cercanos al cauce según las normas cubanas de drenaje.

Se determinó la serie de precipitaciones máximas diaria anual (Fig. 2.7) según la sección de materiales y métodos descrita anteriormente.

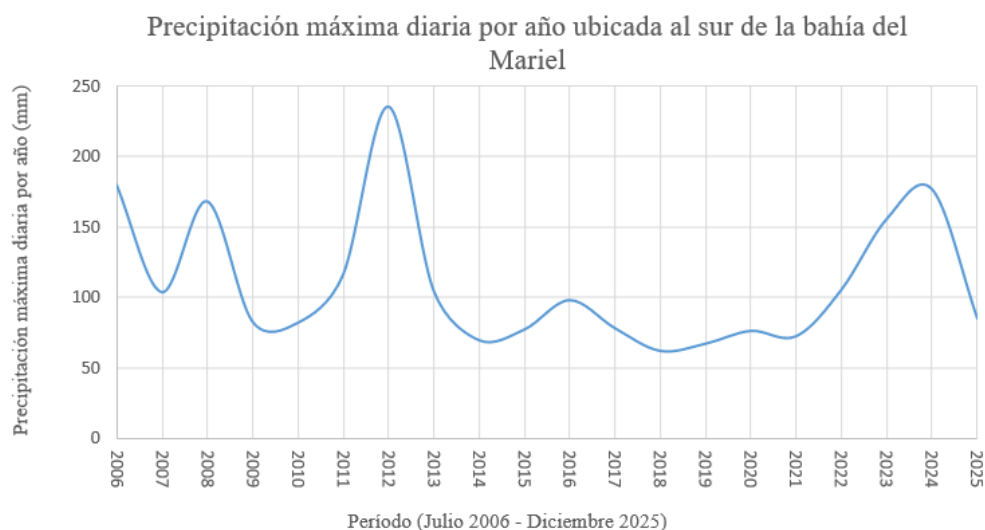


Figure 2.7. Precipitación máxima diaria por año en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel.

De la figura anterior se obtiene el valor medio de la serie siendo 42,41 mm con una desviación estándar de 32,73 mm. Se puede decir que la serie anual es generalmente la más utilizada, debido primeramente a su rapidez y facilidad de integración, pero además tal serie representa una base teórica sólida para la extrapolación de los eventos, más allá del intervalo de observación, a través del concepto de Período de Retorno según Campos *et al.* (1998).

De acuerdo con Chow *et al.* (1994), una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante el ajuste a una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información probabilística en la muestra puede resumirse en forma compacta en la función y en sus parámetros asociados. Según la serie histórica que se tiene comprende las lluvias máximas en un período de 20 años para hacer el análisis de homogeneidad de la serie y determinar la función de probabilidad que mejor se ajusta.

Se le realizó el análisis de homogeneidad a la serie de lluvias histórica por las pruebas de hipótesis y arrojó como resultado ser homogénea por t-Student, Cramer, Spearman, Helmer, Secuencias o Corridas y Kruskal-Wallis. Seguidamente se procedió al análisis exploratorio de la función probabilística más representativa, ajustándose a la distribución Log-Normal la cual puede expresarse formalmente como:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2} \quad (2.5)$$

Siendo $\mu_y = 2$ y $\sigma_y = 0,162$ parámetros ajustados.

Para caracterizar los registros anuales de las lluvias máximas diarias de la cuenca, por intercomparación se seleccionaron los máximos absolutos de la cuenca y hacer una estimación más realista de los parámetros que ajustan la distribución probabilística. En la figura 2.8 se muestran los ajustes correspondientes.

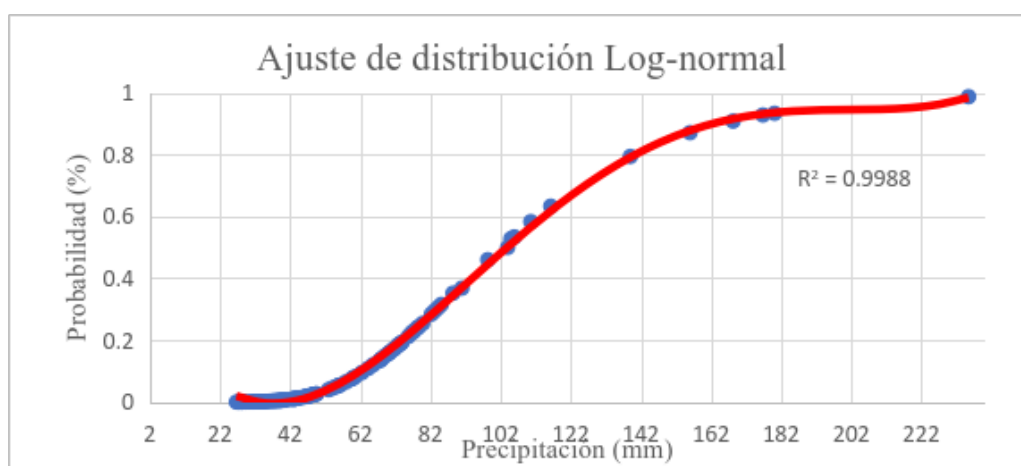


Figure 2.8. Ajuste de la distribución Log-Normal para la serie máxima diaria por año en la cuenca.

Acorde con Chow et al. (1994), así como Sarkar and Maity (2020), la PMP es la mayor lámina de precipitación para una duración dada, meteorológicamente posible para una cuenca o un área de tormenta específica en una ubicación particular y en un momento particular del año, sin considerar las tendencias climáticas a largo plazo. Según la metodología propuesta por Campos Aranda (1992) para la distribución Log-Normal, se propone la ecuación básica para la estimación de la PMP:

$$\log(X_{PMP}) = \mu_y + Z_y \sigma_y \quad (2.6)$$

donde X_{PMP} es la estimación de la PMP para una ubicación (serie creada) particular en la cuenca, μ_y es la media logarítmica de la serie de lluvias máximas diarias de M años, σ es la desviación estándar logarítmica y Z_y es el factor de frecuencia para esa ubicación y $F(x)$ es el cuantil inverso de la probabilidad p (en este caso $p = 1 - \frac{1}{T}$ siendo T el período de retorno en años), el cual se calcula a partir de la distribución de probabilidades ajustada en la sección anterior.

A partir de la metodología en la sección de materiales y métodos la serie de registros anuales de lluvias máximas diarias por año es aplicada al método propuesto por Campos Aranda considerando las correcciones planteadas, observándose su tendencia en la figura 2.9. En este caso el área de la cuenca es 21,13 km² observándose que la precipitación máxima probable es 190 mm para un tiempo de retorno de 12 años.

Las curvas IFD entre múltiples aplicaciones facilitan que los diseños ingenieriles de obras civiles y en particular las hidráulicas sean más confiables (Gutiérrez et al., 2015 y Balbastre, 2018). Constituyen una herramienta de análisis y planificación en el corto mediano y largo plazo.

Se obtuvo la ecuación que describe como es la intensidad de las precipitaciones teniendo en cuenta el comportamiento de las curvas IFD ajustándose a los tiempos de retorno según el método de Aparicio y la representación de la curva para el tiempo de retorno de 12 años:

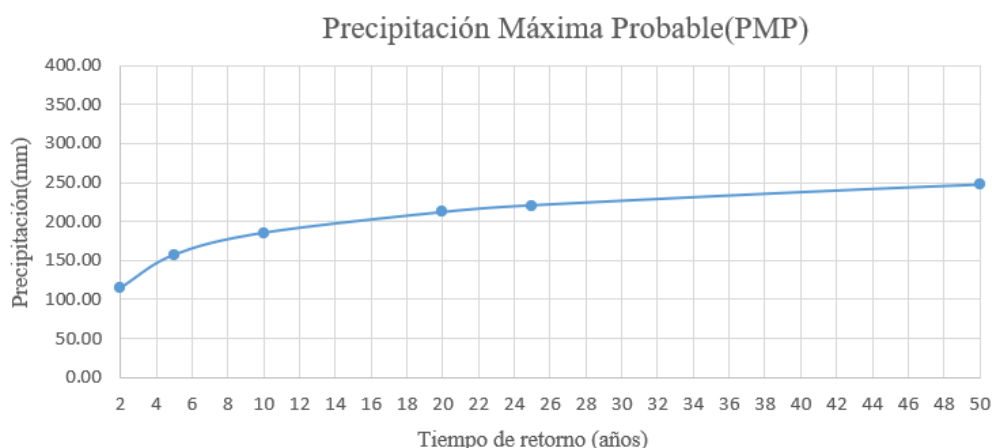


Figure 2.9. Valores de la PMP para diferentes períodos de retorno.

$$I = \frac{432,11 \cdot T^{0,1868}}{D^{0,5902}} \quad (2.7)$$

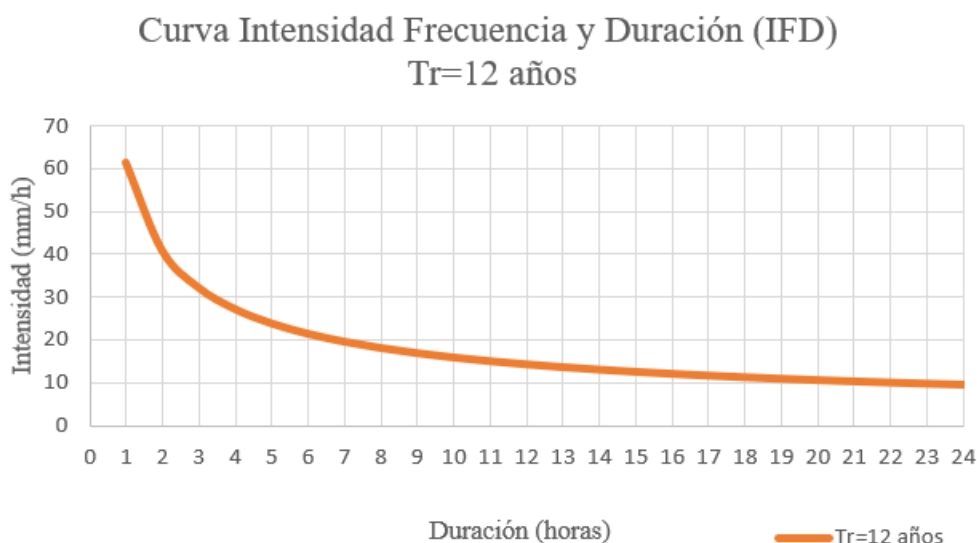


Figure 2.10. Curva IFD de la serie de precipitación máxima diaria para el tiempo de retorno 12 años.

Según estudios realizados con respecto a la región occidental de Cuba las lluvias (convectivas) con alta intensidad y corta duración son generadas en la etapa de verano por tormentas locales y huracanes. Los hietogramas representan picos abruptos de alta intensidad en cortos períodos de tiempo provocando inundaciones repentinas, planteándose la distribución de la lluvia con picos máximos entre la segunda y tercera hora transcurrido dicho evento según plantea Alfonso, A. P. (2018) y García, E. (2020), es por ello que se aplica las mismas condiciones teniendo en cuenta los aspectos antes abordados.

Se va ajustando el hietograma para el tiempo de retorno de 12 años en el proceso de calibración para ajustar el modelo hidrológico hacia la cuenca de estudio mediante los parámetros declarados en la sección de materiales y métodos fijando los valores del hietograma (Fig. 2.11).

Se seleccionó el evento ocurrido con fecha 11 de mayo del año 2020 con una duración de 24 horas, el cual llegó a reportar un caudal máximo de 42,25 m³/s y se realizó una primera simulación arrojando valores iniciales para

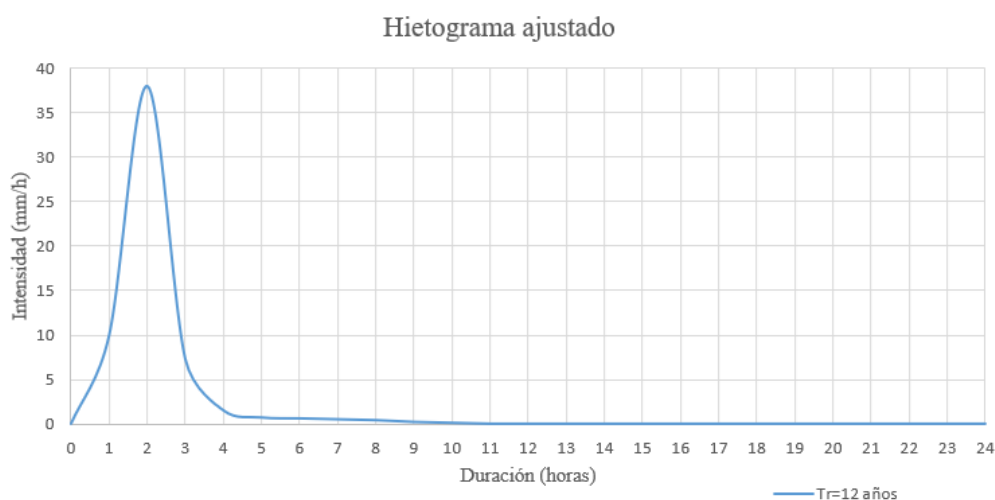


Figure 2.11. Hietograma instantáneo.

las variables como la Curva Número (CN) a un valor de 94,4 y tiempo de retraso (Lag time) a un valor de 272 minutos. Sin embargo, los caudales fueron ajustados cada vez más debido a una serie de simulaciones (Tabla 2.5) por medio de la variación de las dos variables antes descritas mediante el software HEC-HMS v4.13 llegando a un coeficiente de correlación de 0,9714 arrojando valores de caudales similares a los observados (Fig. 2.12) permitiendo la validez del hietograma antes propuesto.

Table 2.5. Simulaciones para calibrar las variables declaradas mediante el software HEC-HMS v4.13.

Tiempo de retraso (Lag time)	Curva Número (CN)	R^2
272 minutos	94,4	0,9537
277 minutos	95	0,9708
280 minutos	96	0,9714

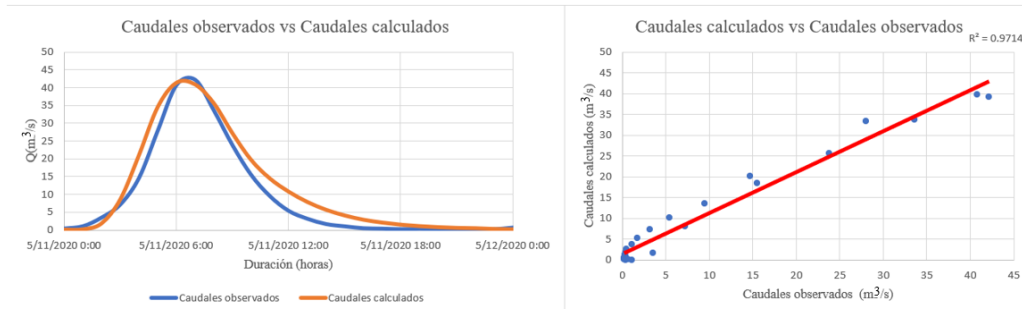


Figure 2.12. Calibración del modelo hidrológico para $T_r = 12$ años, Lag time = 280 minutos y CN = 96.

En la cuenca cuando se aplica la modelación hidrológica-hidráulica pueden observarse las áreas de inundación dentro de la zona de estudio. Estas áreas permiten observar la variabilidad en la profundidad de circulación del escurrimiento superficial. La zona de riesgo es detectada por el aumento de la profundidad de circulación en el transcurso del cauce “Cajío” producto del escurrimiento superficial aumentando la profundidad de circulación entre 3,1 y 4,2 m con velocidades que oscilan entre 0,4 y 0,5 m/s en la hora más crítica de duración para la probabilidad de ocurrencia del 8,33 % del evento alertando a los pobladores del peligro al estar cerca del cauce (Fig. 2.13).

Se declaró dos secciones en el mapa de calado de la cuenca para la obtención de la profundidad de circulación del cauce en las zonas más próximas a los poblados para el período de retorno de 12 años (Fig. 2.14) alcanzando valores entre 2,07 y 3,2 m proponiendo el diseño de sistemas de drenaje que evacuen como caudal máximo 3 m³/s.

Varios autores coinciden en tomar el criterio de peligrosidad como el producto de la velocidad por la profundidad, es decir este valor se le conoce en la literatura referente al tema como producto número (product number). En este sentido FEMA (1979), County (199), FHWA (2001) y Gómez *et al.* (2008) coinciden en que valores mayores a 0,5 m²/s indica inundación peligrosa, con daños a infraestructura rural y la inestabilidad de los pobladores transitar por las zonas bajas lo cual indica el grado de peligrosidad entre alto y moderado en el cauce (Fig. 2.15).

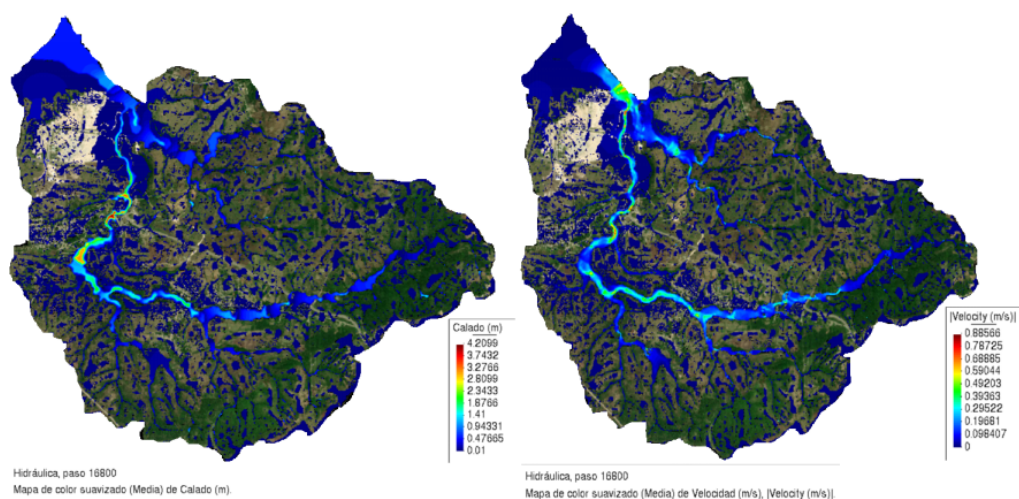


Figure 2.13. Niveles de inundación y velocidades transcurridas 4 horas y 40 minutos del evento, para un tiempo de retorno de 12 años en la cuenca “Cajío”.

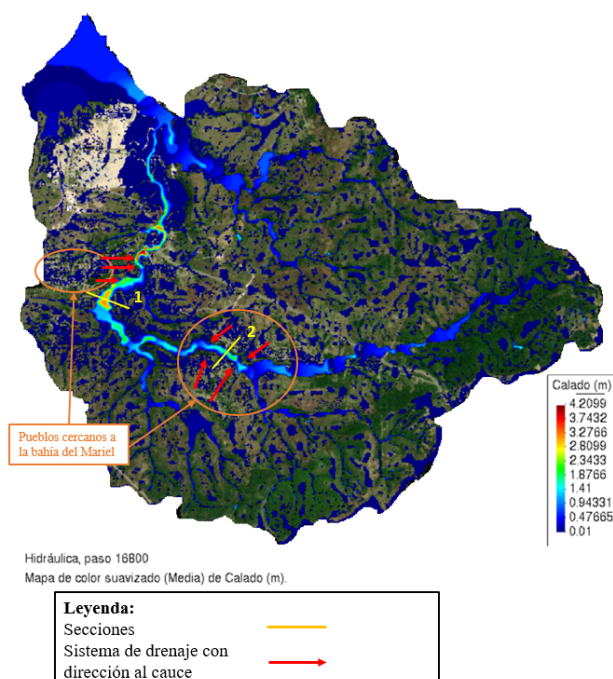


Figure 2.14. Nivel de inundación máxima en la sección 1 con cota máxima del agua de 13,23 m y en la sección 2 con cota máxima de agua de 22,2 m en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel.

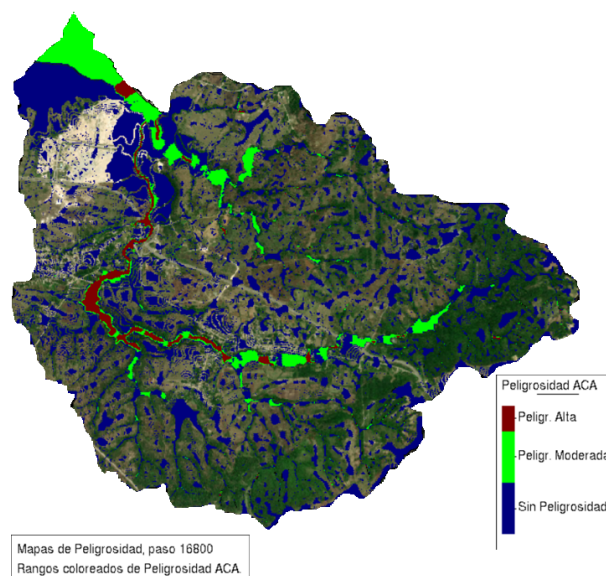


Figure 2.15. Mapa de peligrosidad en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel.

03 CONCLUSIONES

- A partir de la definición del modelo digital del terreno, se determinó la cuenca con un área de 21,13 km² tributaria a la zona de estudio.
- Se procesaron los datos pluviométricos con las tres estaciones pluviométricas abordadas según la plataforma SGIA y calculando la serie histórica de lluvia máxima diaria anual.
- Se obtuvo la curva de Intensidad – Frecuencia – Duración (IFD) que caracteriza el patrón conductual de las máximas precipitaciones en la cuenca ubicada al sur de la bahía del Mariel para condiciones actuales y se determinó un valor del tiempo de retraso (Lag time) de 280 minutos y la Curva Número (CN) con un valor de 96 adaptándose el modelo hidrológico según el tiempo de retorno de 12 años generando un escurrimiento similar al ocurrido el 11 de mayo del año 2020.
- Se determinó las áreas de inundaciones en toda la zona de estudio para la hora más crítica para una duración del evento en 24 horas, con aumentos considerables de la profundidad de circulación del cauce alertando a los pobladores a mantenerse alejados de posibles avenidas.
- Se propuso el diseño de un sistema de drenaje para los poblados que evacuen como caudal máximo 3 m³/s hacia el cauce para la protección de la población.
- Se obtuvo los valores de profundidad, velocidad del flujo y cota de inundación en diferentes secciones y áreas de interés con respecto a los poblados cercanos al cauce.

04 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonso, A. P. (2018). Comportamiento de las precipitaciones en cuba occidental ante eventos extremos. *Revista Cubana de Meteorología*.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa.
- Balbastre, R. (2018). *Análisis comparativo de metodologías de cálculo de tormentas de diseño para su aplicación en hidrología urbana* [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle>
- Batista Silva, J. L. (1991). Cálculo del escurrimiento medio anual sin observaciones hidrométricas. *Voluntad Hidráulica*, (85), 2–7.
- Batista Silva, J. L. (2021). *Hidrología práctica para el caribe insular*.

- Campos Aranda, D. F.** (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W.** (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.
- Colectivo de Autores.** (2024). *Léxico estratigráfico de cuba* (4th ed.). Instituto de Geología y Paleontología (IGP) / Servicio Geológico de Cuba.
- Consejo de Ministros de la República de Cuba.** (2017). Decreto no. 337/2017 reglamento de la ley no. 124 de las aguas terrestres.
- EIPHH.** (2010). *Estudio hidrológico presas pinillos, san francisco y mosquito (pid estudio de factibilidad abasto de agua zdm)*. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana. La Habana, Cuba.
- García, E.** (2020). Caracterización de hietogramas en la región occidental de cuba.
- GEOGLOWS.** (2024). Material de entrenamiento de la plataforma geogloss.
- Gómez Valentín, M.** (2008). *Hidrología urbana*. Universitat Politècnica de Catalunya, Grupo FLUMEN. Barcelona, España.
- Haan, C. T.** (2002). *Statistical methods in hydrology* (2nd ed.). Iowa State University Press.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.** (2024). *Sistema de gestión integral del agua (sgia)*.
- Keifer, C. J., & Chu, H. H.** (1957). Synthetic storm pattern for drainage design [Paper 1332]. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 83(4), 1–25.
- Martínez, Y., Planos, E., & Perdigón, D.** (2019). Hietogramas instantáneos adimensionales para ciclones tropicales que afectan al archipiélago cubano. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XL(1), 17–31.
- Planos, E., Limia, M., Vega, R., Boudet, D., & Hernández, M.** (2011). *Las grandes precipitaciones y las precipitaciones intensas en cuba: Causas y características* (Informe científico del Proyecto 0801). Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.
- Sarkar, S., & Maity, R.** (2020). Estimation of probable maximum precipitation in the context of climate change. *MethodsX*, 7, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100904>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Dariel Francisco Chang Domínguez <https://orcid.org/0009-0003-8296-4689>