

# Impacto de la ampliación del Canal de Panamá en las confiabilidades hídrica y de calado

## Impact of the Panama Canal expansion on the water and draft reliabilities

Lucas Calvo Gobbetti<sup>1,2,\*</sup>, Kevin Ríos Córdoba<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá, Campus Metropolitano Víctor Levi Sasso, Panamá

<sup>2</sup> Sistema Nacional de Investigación (SNI), Secretaría Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SENACYT), Ciudad del Saber, Panamá

<sup>3</sup> Licenciatura en Ingeniería Marítima Portuaria, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Campus Metropolitano Víctor Lasso, Panamá

\*Autor de correspondencia: [lucas.calvo@utp.ac.pa](mailto:lucas.calvo@utp.ac.pa)

**RESUMEN.** La ampliación del Canal de Panamá ha provocado un incremento en el volumen de agua destinado a sus operaciones, además de un aumento en los niveles mínimos operativos. El objetivo de esta investigación es estudiar el impacto de la ampliación en las confiabilidades hídricas y de calado del Canal de Panamá utilizando la herramienta HEC-ResSim®. Un modelo de simulación HEC-ResSim® del sistema anterior a la ampliación fue construido para los años 1985-1995 y verificado para los años 1995-2005. La simulación del sistema posterior a la ampliación mostró una disminución en las confiabilidades de calado debida principalmente al aumento de las demandas en el lago Gatún y al aumento del nivel mínimo operativo del lago Gatún. Se observó que la confiabilidad de calado pasó de 97% antes de la ampliación a 68.5% después de la ampliación para el calado máximo de 50'. El estudio del sistema posterior a la ampliación lleva a la conclusión de que la relativamente baja confiabilidad de calado, debida en parte al aumento del consumo por la no utilización de las tinas de ahorro de agua, así como la aparición de temporadas secas extremas son las causas conjuntas de las recientes y repetidas restricciones de calado. Estos resultados enfatizan la importancia de implementar proyectos de nuevas fuentes de agua para aumentar la confiabilidad de calado a niveles que limiten las restricciones de calado o las disminuciones de tránsitos por el Canal de Panamá.

**Palabras clave.** *Ampliación del Canal de Panamá, balance hídrico, confiabilidad de calado, confiabilidad hídrica, cuenca hidrográfica del Canal de Panamá, HEC-ResSim®*

**ABSTRACT.** The expansion of the Panama Canal has led to an increase in the volume of water destined to its operations, in addition to an increase in the minimum operating levels. The objective of this research is to study the impact of the expansion on the water and draft reliabilities of the Panama Canal using the HEC-ResSim® tool. A HEC-ResSim® simulation model of the pre-expansion system was built for the years 1985-1995 and verified for the years 1995-2005. The simulation of the post expansion system showed a decrease in the draft reliabilities mainly due to increased demands on Gatun Lake and an increase in the minimum operating level of Gatun Lake. It was observed that the draft reliability went from 97% before the expansion to 68.5% after the expansion for the maximum draft of 50'. The study of the post-enlargement system leads to the conclusion that the relatively low draft reliability, increased consumption due to the non-use of the water saving basins, and the occurrence of extreme dry seasons are the joint causes of the recent and repeated draft restrictions. These results emphasize the importance of implementing new water source projects to increase draft reliability to levels that limit draft restrictions or decreases in Panama Canal transits.

**Keywords.** *Draught reliability, HEC-ResSim®, Panama Canal expansion, Panama Canal watershed, water reliability, water balance*

**Citación:** L. Calvo Gobbetti et al., "Impacto de la ampliación del Canal de Panamá en las confiabilidades hídrica y de calado", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 1, pp. (49-60), 2024.

**Tipo de artículo:** Original. **Recibido:** 10 de agosto de 2023. **Recibido con correcciones:** 10 de noviembre de 2023. **Aceptado:** 15 de diciembre de 2023.

**DOI:** <https://doi.org/10.33412/idt.v20.1.3880>

**Copyright:** 2024 L. Calvo Gobbetti et al., This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

## 1. Introducción

En los últimos años, la Autoridad del Canal de Panamá ha anunciado repetidas restricciones de calado debidas a fenómenos climáticos cíclicos (El Niño Southern Oscillation, ENSO), o a períodos secos extraordinarios [1-3]. Por otro lado, la ampliación del Canal de Panamá ha supuesto un incremento en el volumen de agua destinado a sus operaciones y un aumento en los niveles mínimos operativos, presentándose además el aumento natural del consumo de agua municipal e industrial en las ciudades de Panamá y Colón. Consecuentemente, se hace necesario estudiar el impacto que la ampliación del Canal de Panamá ha tenido en su funcionamiento, y separar así este impacto de causas climáticas extraordinarias que lleven a restricciones de tránsitos o de calados.

Para la simulación de los sistemas de reservorios anteriores y posteriores a la ampliación del Canal de Panamá se utilizó el modelo HEC-ResSim®, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros Militares de Estados Unidos (USACE) [4]. Este programa tiene la capacidad de modelar el funcionamiento de múltiples embalses, bombas y estaciones de generación hidroeléctrica, entre otras muchas opciones de simulación [5-8]. Como indica la bibliografía, HEC-ResSim® se ha aplicado con éxito en varias escalas temporales y estudios de casos, tanto para las condiciones actuales como para las del cambio climático [9-19].

El objetivo de este trabajo es estudiar el impacto de la ampliación en las confiabilidades hídricas y de calado del Canal de Panamá utilizando la herramienta HEC-ResSim®. Tradicionalmente en el Canal de Panamá se ha utilizado el Sistema Inglés de medidas, sin embargo, los análisis más recientes usan el Sistema Internacional. En este trabajo se utilizarán ambos sistemas de medidas.

### 1.1 Sistema de embalses anterior a la ampliación

Antes de la ampliación, así como en la actualidad, los embalses que utiliza el Canal de Panamá son el lago Gatún y el lago Alhajuela. El lago Gatún fue creado en 1910 para minimizar las necesidades de excavación del canal y para protección frente a las crecidas de los numerosos ríos que fluían hacia el cauce de navegación. El lago Alhajuela fue creado en 1935 con las finalidades de apoyo al lago Gatún y para la generación hidroeléctrica [20]. Toda el agua que fluye normalmente

del lago Alhajuela al lago Gatún pasa por una planta hidroeléctrica en la represa Madden.

### 1.2 Sistema de embalses posterior a la ampliación

En el Plan Maestro del Canal de Panamá [21] se presenta todo el procedimiento de selección de las alternativas para el abastecimiento y el ahorro del agua posteriores a la ampliación del Canal de Panamá. Las alternativas implementadas finalmente consisten en:

- Profundizar los cauces de navegación a 30' (9.14 m) PLD (Precise Level Datum; referencia de nivel vertical en la Autoridad del Canal de Panamá, ACP).
- Elevar el nivel máximo operativo del lago Gatún a 89' (27.1 m) PLD.
- Utilizar tres tinas de ahorro de agua en cada cámara de las nuevas esclusas.

Además de estas alternativas, fueron propuestos proyectos de nuevas fuentes de agua necesarios para el canal ampliado [22]. Los proyectos analizados en este estudio son: el proyecto Alto Chagres, el proyecto Río Indio y el proyecto Trinidad, así como varias combinaciones posibles entre ellos. La figura 1 muestra la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP) (Cuenca del río Chagres, 115) con las ubicaciones de los posibles nuevos embalses.

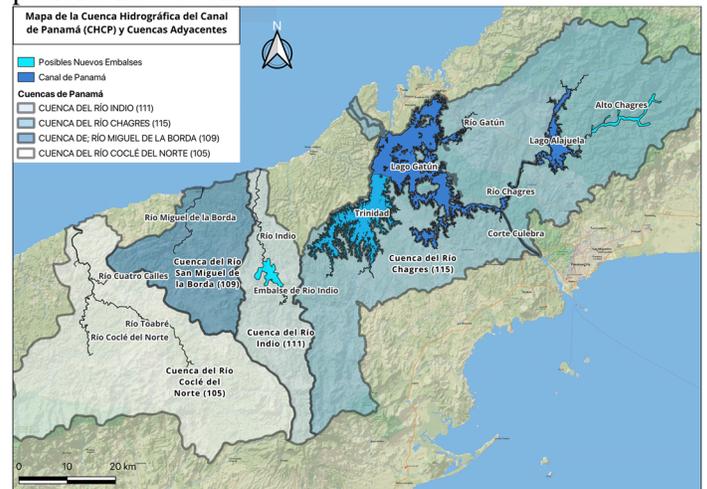


Figura 1. Cuenca hidrográfica del Canal de Panamá (Cuenca del río Chagres, 115) y posibles nuevos embalses.

El proyecto Alto Chagres contempla la construcción de un reservorio inmediatamente aguas arriba del lago Alhajuela. Fue estudiado a nivel conceptual por USACE [22] y a nivel de factibilidad por Montgomery Watson Harza [23]. El proyecto Alto Chagres destaca por su elevada potencialidad hidroeléctrica. El impacto

ambiental del proyecto es considerado alto, porque está ubicado en la reserva forestal con la extensión de bosque primario más grande de la CHCP y es la principal fuente de agua del Canal.

El proyecto Río Indio abarca una represa y un túnel de transposición que llevaría el agua directamente del río Indio al lago Gatún. Fue estudiado a nivel conceptual por USACE [22] y a nivel de factibilidad por Montgomery Watson Harza [24]. El impacto ambiental del proyecto es considerado bajo, porque está ubicado en tierras deforestadas actualmente dedicadas principalmente a la agricultura de subsistencia.

El proyecto Trinidad consiste en una represa subacuática de relleno que separaría el brazo Trinidad, que forma parte del lago Gatún, del cuerpo principal del lago. En épocas de lluvia el agua en exceso en el lago Gatún podría ser bombeada hacia el lago Trinidad, aprovechándose su capacidad de almacenamiento adicional. En épocas secas el lago Trinidad puede abastecer al lago Gatún por gravedad y por bombeo. El proyecto fue estudiado a nivel conceptual por Tudor Engineering Company [25] [26], Shannon y Wilson [27], USACE [28] y ACP [29]. El impacto ambiental del proyecto es considerado bajo, porque está ubicado en tierras inmediatamente colindantes con el lago Gatún que pertenecen a la ACP.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Modelo de simulación HEC-ResSim® del sistema anterior a la ampliación

Se construyó un modelo de simulación HEC-ResSim® del sistema anterior a la ampliación, incluyendo los lagos Alhajuela y Gatún. Como datos de entrada, el modelo utiliza volúmenes medios mensuales con un intervalo de tiempo de cálculo diario. Los caudales de entrada de cada día del mes se tomaron como iguales al promedio mensual. Los volúmenes mensuales de entrada en los embalses utilizados en todas las simulaciones son los volúmenes netos obtenidos indirectamente de balances hídricos. En cada embalse, los volúmenes al principio y final del mes, vertidos en vertederos, utilizados en generación hidroeléctrica, en consumo municipal e industrial y en esclusajes son conocidos (observados), por lo que las únicas incógnitas en las ecuaciones del balance hídrico son los volúmenes netos mensuales. Estas aportaciones netas mensuales incluyen las pérdidas por infiltración y evaporación en

los embalses. Para el lago Alhajuela, estos valores fueron obtenidos por:

$$NIA_i = IA_i - EA_i - InfA_i = VA_{i+1} - VA_i + (SA_i + GA_i + MIA_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

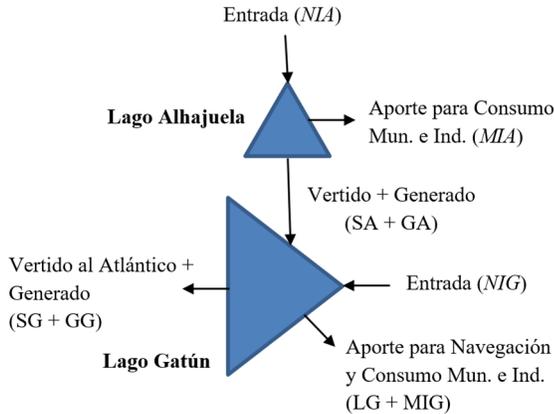
donde  $NIA_i$  = volumen mensual de entrada neto al lago Alhajuela durante el mes  $i$ ,  $IA_i$  = volumen mensual de entrada al lago Alhajuela durante el mes  $i$ ,  $EA_i$  = volumen mensual de evaporación en el lago Alhajuela durante el mes  $i$ ,  $InfA_i$  = volumen mensual de infiltración en el lago Alhajuela durante el mes  $i$ ,  $VA_{i+1}$  = volumen del lago Alhajuela al comienzo del mes  $i + 1$  (observado),  $VA_i$  = volumen del lago Alhajuela al principio del mes  $i$  (observado),  $SA_i$  = volumen vertido del lago Alhajuela durante el mes  $i$  (observado),  $GA_i$  = volumen utilizado en la generación hidroeléctrica en el lago Alhajuela durante el mes  $i$  (observado),  $MIA_i$  = volumen utilizado en el suministro de agua municipal e industrial en el lago Alhajuela durante el mes  $i$  (observado) y  $n$  = número de meses en el horizonte de simulación. Para el Lago Gatún estos valores fueron obtenidos por:

$$NIG_i = IG_i - EG_i - InfG_i = VG_{i+1} - VG_i + (SG_i + GG_i + MIG_i + LG_i) - (SA_i + GA_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

donde  $NIG_i$  = volumen mensual de entrada neto al lago Gatún durante el mes  $i$ ,  $IG_i$  = volumen mensual de entrada al lago Gatún durante el mes  $i$ ,  $EG_i$  = volumen mensual de evaporación en el lago Gatún durante el mes  $i$ ,  $InfG_i$  = volumen mensual de infiltración en el lago Gatún durante el mes  $i$ ,  $VG_{i+1}$  = volumen del lago Gatún al comienzo del mes  $i + 1$  (observado),  $VG_i$  = volumen del lago Gatún al principio del mes  $i$  (observado),  $SG_i$  = volumen vertido del lago Gatún durante el mes  $i$  (observado),  $GG_i$  = volumen utilizado en la generación hidroeléctrica en el lago Gatún durante el mes  $i$  (observado),  $MIG_i$  = volumen utilizado en el suministro de agua municipal e industrial en el lago Gatún durante el mes  $i$  (observado),  $LG_i$  = volumen usado en los esclusajes en el lago Gatún durante el mes  $i$  (observado) y  $n$  = número de meses en el horizonte de simulación.

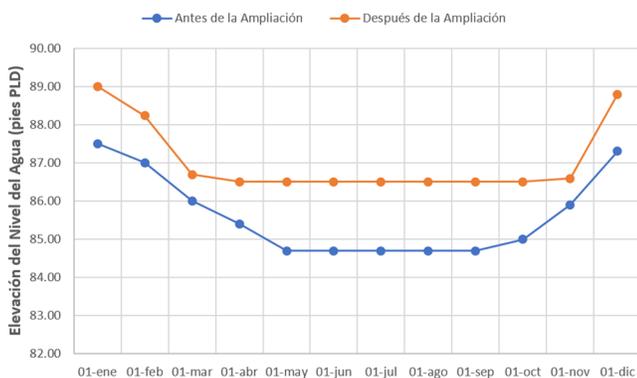
El modelo replica las descargas en los vertederos, la generación hidroeléctrica en Gatún y Alhajuela, los volúmenes suministrados en Gatún para navegación y

consumo municipal e industrial y los volúmenes suministrados en Alhajuela para consumo municipal e industrial. Un esquema del modelo HEC-ResSim® del sistema anterior a la ampliación se muestra en la figura 2.



**Figura 2.** Esquema del modelo HEC-ResSim® del sistema anterior a la ampliación del Canal de Panamá.

En el modelo HEC-ResSim®, la operación de cada reservorio está determinada por la zona en la cual se encuentra el nivel del reservorio. Por definición existen tres zonas: Control de Crecidas, Conservación e Inactiva. La curva guía del reservorio en HEC-ResSim® está ubicada en el límite superior de la zona de Conservación. Dentro de cada zona se sitúan las reglas de operación que debe seguir el reservorio cuando el nivel se encuentre en dicha zona. El modelo siempre trata de llevar el nivel del reservorio lo más cerca posible de la curva guía obedeciendo a las reglas de operación. Las curvas guías del lago Gatún, similares a las del lago Alhajuela, usadas en las simulaciones de los sistemas anterior y posterior a la ampliación, se muestran en la figura 3. Estas curvas guías son típicas de los sistemas estacionales tropicales, con estaciones secas y lluviosas y con la capacidad de llenarse al final de cada año.



**Figura 3.** Curvas guías anteriores y posteriores a la ampliación del Canal de Panamá en el lago Gatún.

El modelo del sistema anterior a la ampliación comienza en el lago Alhajuela recibiendo los caudales netos de su cuenca. En las zonas de Control de Crecidas y Conservación para el Lago Alhajuela se imponen las siguientes reglas:

- Generar y/o verter, a través de la hidroeléctrica de Madden y/o el vertedor de Madden, hacia el lago Gatún de manera sincronizada con los niveles del lago Gatún (regla tándem). El lago Alhajuela se ve obligado a sincronizarse con el lago Gatún, con los niveles de ambos lagos aumentando o disminuyendo simultáneamente, como en la práctica.
- Aportar volúmenes para el abastecimiento municipal e industrial (Planta de Tratamiento de Agua de Alhajuela).

El lago Alhajuela cuenta con una zona adicional de Nivel Mínimo, donde se impone la regla:

- Al bajar el nivel del reservorio por debajo del nivel mínimo de 190' (57.9 m) PLD, se aportan los volúmenes para el abastecimiento municipal e industrial, pero no se genera ni se vierte hacia el lago Gatún.

El lago Gatún recibe los volúmenes generados, y/o vertidos, provenientes de Alhajuela, así como los caudales netos de la parte de su cuenca que no es controlada por la represa Madden. En las zonas de Control de Crecidas y Conservación para el lago Gatún se impone la siguiente regla:

- Aportar volúmenes para el abastecimiento municipal e industrial (Plantas de Tratamiento de Agua de Miraflores, Mount Hope y Mendoza) y para la navegación (esclusas de Pedro Miguel y Gatún).

Los volúmenes aportados para navegación en el rango de operación normal (arriba del nivel mínimo) son volúmenes mensuales promedio. Estos volúmenes corresponden aproximadamente a los volúmenes descargados en los esclusajes siguiendo los niveles de la curva guía. El lago Gatún cuenta con una zona adicional de Nivel Mínimo, donde se impone la regla:

- Al bajar el nivel del reservorio por debajo del nivel mínimo de 81.5' (24.8 m) PLD, el volumen aportado para la navegación será función del nivel del reservorio.

### 2.1.1 Modelo del sistema anterior a la ampliación (1985-1995)

El modelo del sistema anterior a la ampliación, con las zonas y reglas descritas arriba, se utilizó para reproducir la operación entre los años 1985-1995. El modelo se alimentó con los caudales netos mensuales entrantes al lago Alhajuela, así como con los caudales netos mensuales entrantes al lago Gatún que no provienen de la subcuenca del lago Alhajuela, correspondientes a los años 1985-1995. El intervalo de tiempo de cálculo fue diario. Los caudales de entrada para cada día de un mes se tomaron como iguales a los promedios mensuales. Las demandas de abastecimiento municipal e industrial en Alhajuela y Gatún, y las demandas de navegación en Gatún, fueron tomadas como siendo las demandas mensuales promedio de los años 1985-1995.

Como el modelo se alimentó con caudales netos mensuales, las comparaciones de nivel se realizaron al principio de cada mes. Las figuras 4 y 5 presentan las comparaciones entre los niveles diarios simulados y observados al inicio de cada mes para los lagos Gatún y Alhajuela entre los años 1985-1995.

Para cuantificar la similitud entre los niveles simulados y los observados se utilizaron los coeficientes de determinación ( $R^2$ ), el coeficiente de eficacia de Nash-Sutcliffe ( $NSCE$ ) [30] y el error cuadrático medio ( $RMSE$ ).

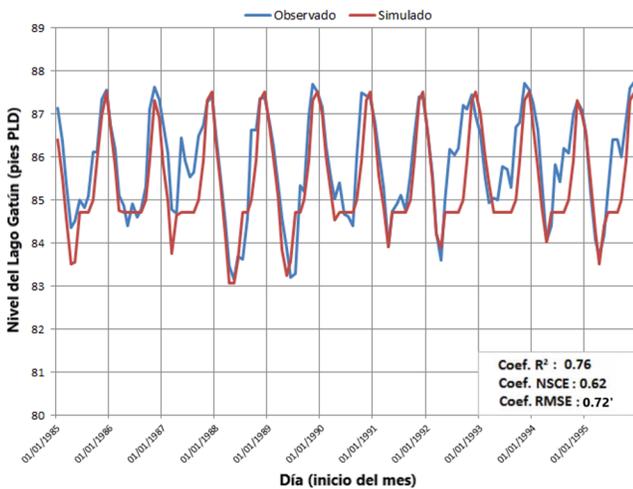


Figura 4. Niveles simulados vs. niveles observados al inicio de cada mes para el lago Gatún (1985-1995).

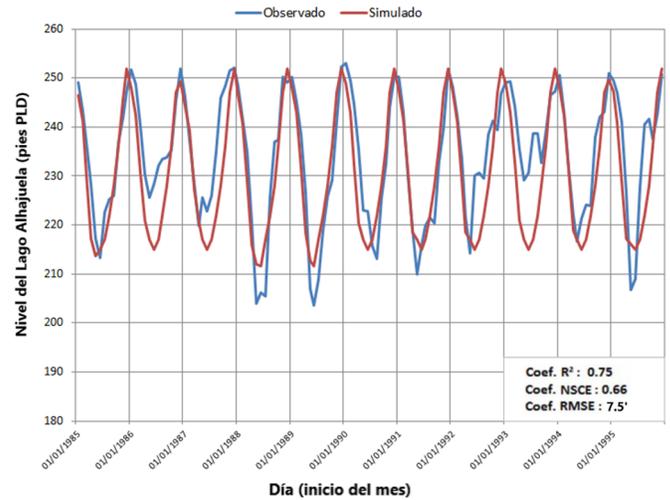


Figura 5. Niveles simulados vs. niveles observados al inicio de cada mes para el lago Alhajuela (1985-1995).

El coeficiente  $R^2$  mide el grado de colinealidad entre los niveles simulados y observados. El coeficiente  $NSCE$  es una medida del poder predictivo de un modelo hidrológico. El coeficiente  $RMSE$  mide el valor residual entre los niveles observados y simulados en unidades reales de medida de los niveles. Los valores  $R^2$  y  $NSCE$  de 1 y  $RMSE$  de 0 son valores óptimos [31]. Las fórmulas para  $R^2$ ,  $NSCE$  y  $RMSE$  vienen dadas por:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y}_i)(\tilde{y}_i - \bar{\tilde{y}}_i)]^2}{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{\tilde{y}}_i)^2]} \quad (3)$$

$$NSCE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

donde  $y_i$  son los niveles diarios observados a principios del mes  $i$ ,  $\tilde{y}_i$  son los niveles diarios simulados a principios del mes  $i$ ,  $\bar{y}_i$  es el promedio de los niveles diarios observados,  $\bar{\tilde{y}}_i$  es el promedio de los niveles diarios simulados y  $n$  es el número de meses de las simulaciones.

Para el lago Gatún se obtuvieron los siguientes valores:

- Coeficiente  $R^2$ : 0.76
- Coeficiente  $NSCE$ : 0.62
- Coeficiente  $RMSE$ : 0.72' (0.22 m)

Para el lago Alhajuela se obtuvieron los siguientes valores:

- Coeficiente  $R^2$ : 0.75
- Coeficiente  $NSCE$ : 0.66
- Coeficiente  $RMSE$ : 7.5' (2.28 m)

Las diferencias entre los valores diarios de niveles calculados y observados se consideran aceptables. Se presentan algunas consideraciones sobre estas diferencias:

- Los niveles diarios resultantes son producto de los caudales netos mensuales con los que se alimentó al modelo.
- Las demandas de abastecimiento municipal e industrial y las demandas de navegación fueron aproximadas por las demandas mensuales promedio durante los años 1985-1995.
- Los volúmenes generados o vertidos, a través de la hidroeléctrica de Madden o el vertedor de la represa Madden, son efectuados en base a la experiencia práctica del operador. La regla tándem del modelo es una automatización del proceso.
- El pequeño valor residual entre los niveles observados y simulados ( $RMSE = 0.72' / 0.22$  m) es especialmente importante en el lago Gatún debido al uso del lago en la navegación. El mayor valor residual para el lago Alhajuela puede explicarse por el uso de la regla del tándem.
- Los valores de  $R^2$  y  $NSCE$  muestran una correlación y un ajuste aceptables entre los niveles calculados y los observados.

### 2.1.2 Verificación del modelo del sistema anterior a la ampliación (1995-2005)

La configuración del modelo del sistema anterior a la ampliación, sus zonas y reglas de operación fueron verificadas al reproducir la operación del sistema entre los años 1995-2005. Este período incluye el fenómeno ENSO más fuerte registrado hasta la actualidad (1997-1998), donde el Canal de Panamá operó con restricción de calado durante más de dos meses. El modelo se alimentó con los caudales netos mensuales entrantes a los lagos Alhajuela y Gatún correspondientes a los años 1995-2005. El intervalo de tiempo de cálculo fue diario. Los caudales de entrada de cada día del mes se tomaron como iguales al promedio mensual. Las demandas de abastecimiento municipal e industrial y las demandas de navegación, fueron tomadas como siendo las demandas mensuales promedio de los años 1995-2005. Las figuras

6 y 7 muestran las comparaciones entre los niveles diarios simulados y los niveles diarios observados para los lagos Gatún y Alhajuela entre los años 1995-2005.

Para el lago Gatún se obtuvieron los siguientes valores:

- Coeficiente  $R^2$ : 0.8
- Coeficiente  $NSCE$ : 0.71
- Coeficiente  $RMSE$ : 0.95' (0.29 m)

Para el lago Alhajuela se obtuvieron los siguientes valores:

- Coeficiente  $R^2$ : 0.69
- Coeficiente  $NSCE$ : 0.57
- Coeficiente  $RMSE$ : 9' (2.76 m)

En las figuras 6 y 7 se constata que el modelo fue capaz de reproducir el comportamiento de los lagos durante el fenómeno extremo ENSO del 1997-1998.

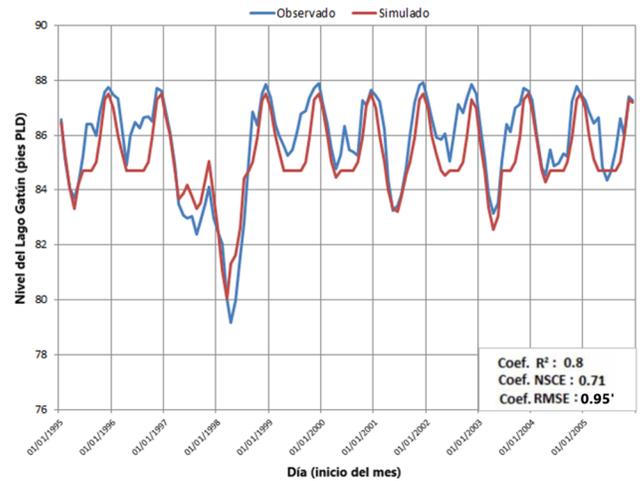
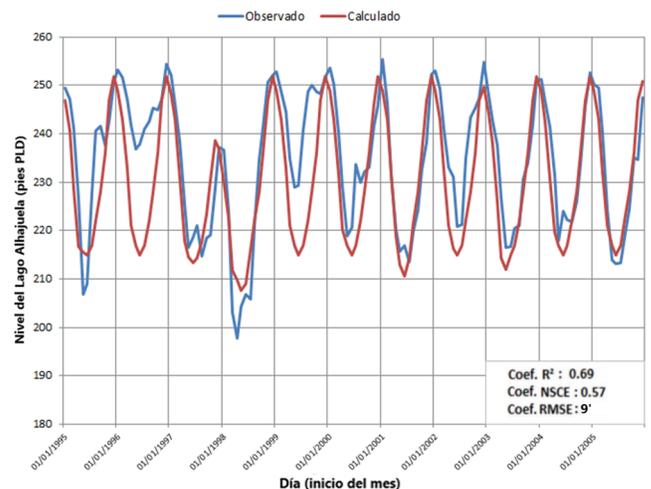


Figura 6. Niveles simulados vs. niveles observados al inicio de cada mes para el lago Gatún (1995-2005).



**Figura 7.** Niveles simulados vs. niveles observados al inicio de cada mes para el lago Alhajuela (1995-2005).

**2.1.3 Confiabilidades hídrica y de calado de los sistemas**

Una vez construido, y verificado, el modelo permite evaluar las confiabilidades hídricas y de calado de los sistemas anteriores y posteriores a la ampliación. La confiabilidad hídrica se define como la suma de los volúmenes de agua abastecidos por el sistema entre la suma de los volúmenes de agua demandados al sistema en un determinado período:

$$Conf. hídrica = \frac{\sum vol. abastecido}{\sum vol. demandado} \times 100\% \quad (6)$$

En los sistemas de navegación es más usual utilizar la confiabilidad de calado. La confiabilidad de calado es la frecuencia con la cual se garantiza un determinado calado; o la frecuencia con la que se garantiza que el nivel del lago estará por encima de un nivel mínimo dado. La confiabilidad de calado en un período determinado es:

$$Conf. de calado = \frac{\sum días sobre nivel mínimo}{\sum días del período} \times 100\% \quad (7)$$

Las confiabilidades hídricas y de calado dependen de la demanda y del horizonte de estudio, y están relacionadas entre sí de forma aproximadamente lineal. Esto es debido a que el volumen de agua usado en cada esclusaje es una función lineal de la profundidad del lago Gatún.

**2.1.4 Simulación del sistema anterior a la ampliación (2010)**

El sistema anterior a la ampliación se simuló con las demandas correspondientes al año 2010 (tabla 1). A pesar de que el sistema ampliado del Canal de Panamá comenzó a operar en el año 2016, a partir del 2010 se registró una reducción de los tránsitos normales de buques Panamax (buques de tamaño máximo antes de la ampliación) en razón de la substitución de éstos por buques Neo-Panamax (buques de tamaño máximo después de la ampliación), resultando en una disminución relativa de las demandas en los años 2010-2016.

**Tabla 1.** Demandas anteriores y posteriores a la ampliación.

Meses	2010		2022	
	Demandas Gatún (pies3/seg)	Demandas Alhajuela (pies3/seg)	Demandas Gatún (pies3/seg)	Demandas Alhajuela (pies3/seg)
Enero	3350	349	4131	362
Febrero	3142	346	4029	371
Marzo	3119	347	3788	374
Abril	2993	343	3674	373
Mayo	2901	328	4041	371
Junio	2824	344	4148	372
Julio	2869	338	3902	373
Agosto	3103	343	4448	371
Septiembre	2976	342	4105	365
Octubre	3249	344	3963	375
Noviembre	3576	337	4356	368
Diciembre	3846	309	4448	375
Promedio	3162	339	4086	371

En la simulación de los sistemas anteriores y posteriores a la ampliación los modelos se alimentaron de los caudales netos mensuales correspondientes a 51 años (de inicios de enero de 1960 a finales de diciembre de 2010). Este período incluye varios fenómenos hidrológicos extremos: desde las sequías causadas por el ENSO del 1997-1998, hasta el evento lluvioso del 8 de diciembre de 2010 conocido como “La Purísima”.

El nivel mínimo de operación anterior a la ampliación era de 81.5’ (24.8m) PLD. Este nivel mínimo estaba condicionado por la altura del piso de las esclusas de Pedro Miguel y Gatún. La simulación del sistema anterior a la ampliación se llevó a cabo utilizando la curva guía del lago Gatún anterior a la ampliación (figura 3), los caudales netos mensuales del período 1960-2010 y las demandas del año 2010.

**2.2 Modelo de simulación HEC-ResSim® del sistema posterior a la ampliación (2022)**

Después de la ampliación del Canal de Panamá el nivel máximo operativo del lago Gatún aumentó de 87.5’ (26.7 m) PLD a 89’ (27.1 m) PLD (figura 3). El calado máximo de los buques pasó de 39.4’ (12 m) a 49.9’ (15.2 m). Con el fondo del canal de navegación a 30’ (9.1 m) PLD y una distancia bajo la quilla (Under Kneel Clearance, UKC) de 4.9’ (1.5 m) la elevación mínima del lago Gatún para el tránsito de los buques de 49.9’ de calado será de 84.8’ (25.8 m) PLD; por lo que el nivel mínimo de la curva guía después de la ampliación se eleva hasta 86.5’ (26.4 m).

La simulación del sistema posterior a la ampliación se llevó a cabo usando la curva guía del lago Gatún posterior a la ampliación (figura 3), los caudales netos mensuales

del período 1960-2010 y las demandas del año 2022 (tabla 1).

El sistema posterior a la ampliación fue también modificado para incluir los diferentes proyectos de nuevas fuentes de agua.

### 2.2.1 Proyecto Alto Chagres

El modelo del sistema posterior a la ampliación se modificó para incluir el reservorio en el Alto Chagres. El reservorio descarga directamente en el lago Alajuela usando una regla de operación tándem con este lago.

### 2.2.2 Proyecto Río Indio

El modelo del sistema posterior a la ampliación se modificó para incluir el reservorio en río Indio (figura 8). El reservorio del río Indio descarga en el lago Gatún a través de un túnel de transposición. El agua almacenada en el lago Indio es llevada al lago Gatún a través de una regla de operación tándem con este lago. El caudal ecológico es mantenido aguas abajo de la represa en el río Indio.

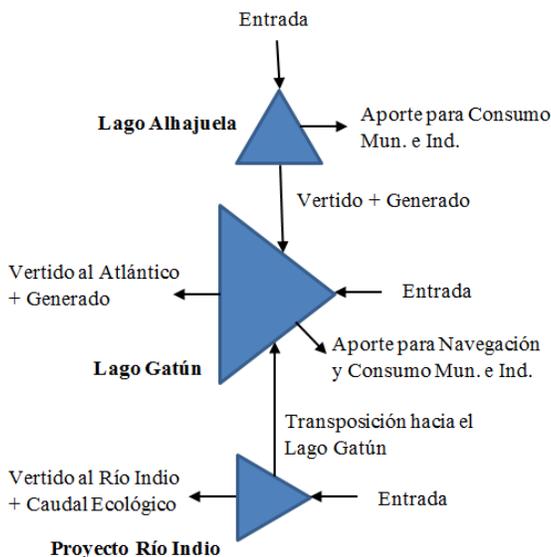


Figura 8. Esquema del modelo HEC-ResSim® del sistema posterior a la ampliación con el Proyecto Río Indio.

### 2.2.3 Proyecto Trinidad

El modelo del sistema posterior a la ampliación se modificó para incluir el reservorio en Trinidad. El reservorio en Trinidad descarga en el lago Gatún a través de un vertedor de compuertas. Se permite el bombeo en dos direcciones entre los lagos Trinidad y Gatún. La

curva guía utilizada en el embalse Trinidad fue inspirada en la curva guía de Alajuela y optimizada para garantizar el máximo rendimiento del embalse.

### 2.2.4 Combinaciones de Proyectos

Además de los proyectos individuales Alto Chagres, Río Indio y Trinidad, se estudiaron dos posibles combinaciones de estos proyectos, Indio + Trinidad y Trinidad + Chagres, que pueden aumentar la eficiencia hídrica total. El modelo del sistema posterior a la ampliación se modificó para incluir estas combinaciones de proyectos.

## 3. Resultados y discusión

Las figuras 9 y 10 presentan las confiabilidades hídricas y de calado de los sistemas anterior a la ampliación, posterior a la ampliación, así como de los proyectos de nuevas fuentes de agua y sus combinaciones. Las confiabilidades hídricas y de calado fueron calculadas para diferentes elevaciones mínimas del lago Gatún correspondientes a diferentes calados máximos:

- Nivel mínimo de 82' para calado máximo de 47'
- Nivel mínimo de 83' para calado máximo de 48'
- Nivel mínimo de 84' para calado máximo de 49'
- Nivel mínimo de 85' para calado máximo de 50'

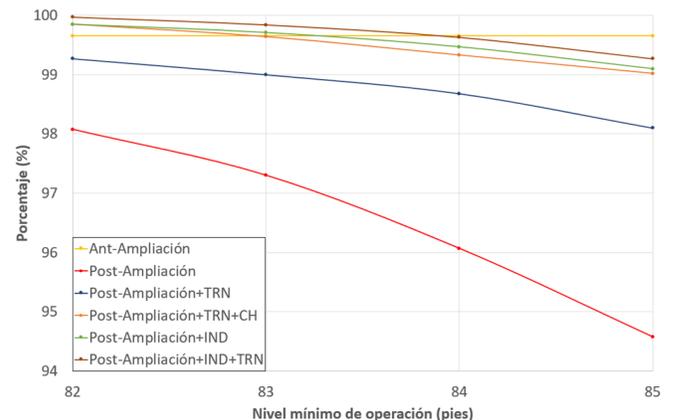
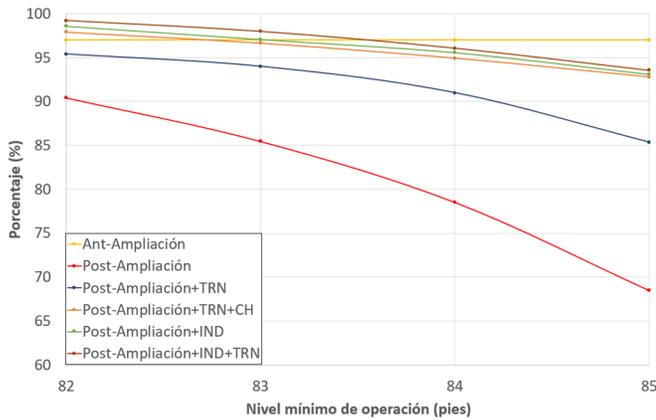


Figura 9. Confiabilidades hídricas para diferentes niveles mínimos de operación.



**Figura 10.** Confiabilidades de calado para diferentes niveles mínimos de operación.

En la figura 10 se observa que la confiabilidad de calado pasó de 97% antes de la ampliación a 68.5% después de la ampliación para el caso del nivel mínimo de operación en 85' (25.9 m) PLD, correspondiente al calado máximo de 50' (15.2 m). Igualmente, las confiabilidades de calado bajaron de 97% antes de la ampliación a 78.5%, 85.5% y 90% después de la ampliación para los calados de 49' (14.9 m), 48' (14.6 m) y 47' (14.3 m), respectivamente. Las confiabilidades hídricas de la figura 8 presentaron comportamientos análogos.

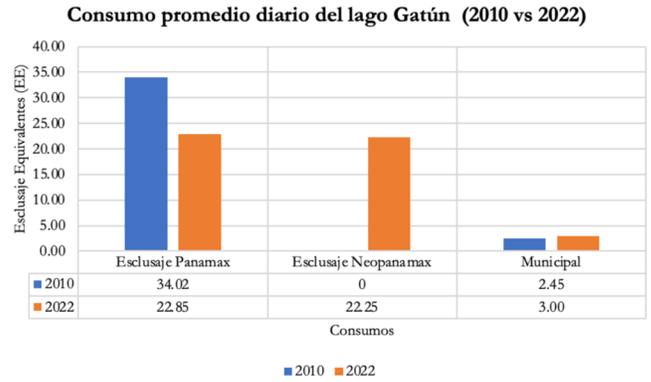
La figura 10 presenta una considerable disminución en las confiabilidades de calado del sistema posterior a la ampliación. Esto es debido principalmente al aumento de las demandas en el lago Gatún y al aumento del nivel mínimo operativo del lago Gatún, lo que provoca una disminución de su volumen útil.

Las figuras 9 y 10 muestran que los proyectos de nuevas fuentes de agua, particularmente los proyectos de Río Indio y Río Indio + Trinidad, podrían llevar las confiabilidades hídricas y de calado a niveles semejantes a los anteriores a la ampliación.

### 3.1 Análisis del aumento de las demandas en el lago Gatún

Después de la ampliación se registró un aumento en las demandas por la introducción de los buques Neopanamax. La figura 11 presenta los consumos promedios diarios en esclusajes equivalentes (un esclusaje de las esclusas Panamax, equivalente a 0.21 Mm<sup>3</sup>). Se observa que el consumo total del 2022 en relación con el del 2010 aumentó en un 31.9%, es decir en 11.6 esclusajes equivalentes. Este aumento de la demanda es mayor que los 11.2 esclusajes equivalentes

diarios adicionales que brindaría el proyecto Río Indio [5]. Los esclusajes Panamax disminuyeron en un 32.9% (11.2 esclusajes equivalentes) mientras el consumo municipal e industrial aumentó en un 22.5% (0.55 esclusajes equivalentes).

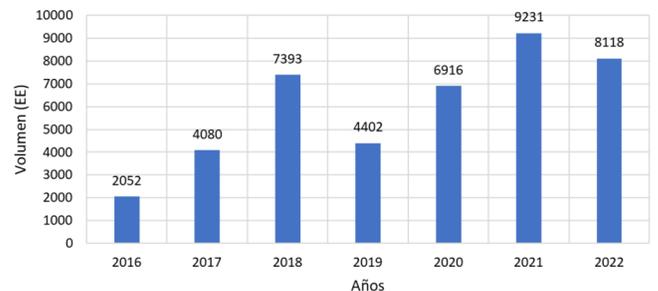


**Figura 11.** Consumo diario del lago Gatún (2010 vs 2022).

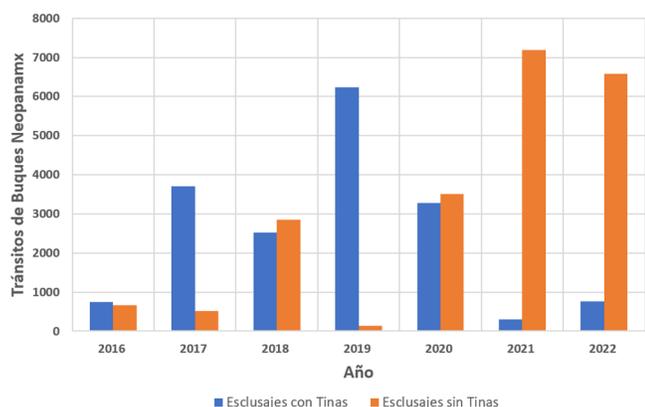
Un aspecto importante a considerar es el aumento de la demanda relacionado con las acciones de mitigación de la entrada de sal al lago Gatún. La utilización de las tinas de ahorro de agua de las nuevas esclusas aumenta este problema, por lo que periódicamente es necesario hacer descargas de agua para reducir la salinidad en las esclusas.

En la figura 12, se presenta el consumo de agua anual de las esclusas Neopanamax expresado en esclusajes equivalentes. A pesar de que el tránsito de buques Neopanamax mantuvo un crecimiento constante, se observa que el uso del agua varió anualmente, debido a la utilización de las tinas de ahorro de agua.

La figura 13 muestra que el año 2019 fue el último año donde se usaron las tinas de ahorro de agua consistentemente en los tránsitos Neopanamax. A partir de este año las tinas de ahorro de agua fueron utilizadas cada vez menos, hasta prácticamente dejar de ser usadas, con el consiguiente aumento del consumo.



**Figura 12.** Consumo anual en las esclusas NeoPanamax.



**Figura 13.** Tránsitos de Buques NeoPanamax con tinas de ahorro de agua y sin tinas de ahorro de agua.

### 3.2 Análisis de la precipitación posterior a la ampliación del Canal de Panamá

En la simulación de los sistemas anteriores y posteriores a la ampliación se tomaron en cuenta los datos hidrometeorológicos (caudales netos mensuales) entre los años 1960 a 2010. Sin embargo, para analizar la precipitación posterior a la ampliación y su impacto en la operación del canal se amplió este periodo hasta el último año disponible.

Del estudio de la precipitación anual sobre la CHCP para un total de 63 años (1960-2022) [32] se encuentra que los años con menor precipitación (1976, 1982, 1997 y 2015) son todos años donde se ha dado el fenómeno ENSO. Adicionalmente, se observa que el año 2010 es el de mayor precipitación de todo el periodo, esto debido a la tormenta “La Purísima” del 7 al 9 de diciembre de ese mismo año.

Por otro lado, en la tabla 2 se presenta la lista comparativa entre los 10 años con menor precipitación y la temporada seca (enero-abril) con menor precipitación dentro del periodo 1960-2023.

**Tabla 2.** Los 10 años y temporadas secas con menor precipitación en la CHCP.

Los diez años con menor precipitación (1960-2023)			Las diez temporadas secas con menor precipitación (1960-2023)		
Posición	Año	Precip. (mm)	Posición	Año	Precip. (mm)
1	1997	1690	1	1997	105
2	2015	1778	2	1973	107
3	1976	1892	3	1977	107
4	1982	2076	4	1975	111

5	2019	2122	5	1965	113
6	2014	2253	6	2023	118
7	1977	2274	7	1974	120
8	2013	2283	8	1988	133
9	1986	2293	9	2019	147
10	1989	2313	10	1962	150
= Años posteriores a la ampliación (2016)					

En la tabla 2, se observa que en la columna de las diez temporadas secas con menor precipitación aparece el presente año (2023) en el puesto número 6, siendo también candidato a ser uno de los años de menor precipitación. Esto tiene graves implicaciones para el funcionamiento del canal, tanto para el año actual como para el próximo, por lo que se pondrán en efecto limitaciones de tránsitos para asegurar un funcionamiento continuo durante la estación seca del próximo año [33].

## 4. Conclusiones

El modelo HEC-ResSim® fue aplicado con suceso a los sistemas anterior y posterior a la ampliación del Canal de Panamá. La aplicación al sistema posterior a la ampliación mostró una disminución en las confiabilidades de calado debida principalmente al aumento de las demandas en el lago Gatún y al aumento del nivel mínimo operativo del lago Gatún. Se observó que la confiabilidad de calado pasó de 97% antes de la ampliación a 68.5% después de la ampliación para el nivel mínimo de operación de 85’ (25.9 m) PLD, correspondiente al calado máximo de 50’ (15.2 m).

El estudio de otros aspectos del sistema posterior a la ampliación lleva a la conclusión de que la relativamente baja confiabilidad de calado, debida en parte al aumento del consumo por la no utilización de las tinas de ahorro de agua, así como la aparición de temporadas secas extremas (2019 y 2023) son las causas conjuntas de las recientes y repetidas restricciones de calado. Estos resultados realzan la importancia de implementar proyectos de nuevas fuentes de agua para aumentar la confiabilidad de calado a niveles que limiten las restricciones de calado o las disminuciones de tránsitos por el canal.

Futuros trabajos son necesarios para evaluar el ulterior impacto que el cambio climático impondrá sobre las confiabilidades hídricas y de calado del Canal de Panamá.

## AGRADECIMIENTOS

El presente artículo es un extracto del trabajo de graduación presentado por Kevin Ríos como requisito para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Marítima Portuaria. Este trabajo fue financiado en parte por el Sistema Nacional de Investigación (SNI) de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT).

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

## CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Kevin Ríos realizó la recolección de datos y participó en el análisis y la discusión de los resultados. Lucas Calvo diseñó la investigación, participó en el análisis y la discusión de los resultados y redactó el manuscrito. Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] M. McDonald. (2023, Jun. 29). "Canal de Panamá mantendrá límites para calado de barcos mientras sequía persiste" [Online]. <https://www.bloomberglinea.com/latinoamerica/panama/canal-de-panama-mantendra-limites-para-calado-de-barcos-mientras-sequia-persiste/>
- [2] E. Moreno & M. Parraga. (2023, Ago. 16). "Panama Canal extends transit restrictions through Sept. 2" [Online]. <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/panama-canal-extends-transit-restrictions-through-sept-2-2023-08-16/>
- [3] A. Coriat. (2023, Sept. 18). "Restricciones de calado provocan movimiento de más de 20 mil contenedores" [Online]. <https://www.laestrella.com.pa/nacional/230918/restricciones-calado-provocan-movimiento>
- [4] J.D. Klipsch, & M.B Hurst. US Army Corps of Engineers (USACE). HEC-ResSim Reservoir System Simulation User's Manual. Eds.: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA, USA, 2013.
- [5] L. E. Calvo. "Application of HEC-ResSim® in the Study of New Water Sources in the Panama Canal", *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2017. <https://doi.org/10.1080/23249676.2017.1355759>
- [6] D. C. McKinny. Arges Basin RessimModel. Support to Enhance Privatization, Investment, and Competitiveness in the Water Sector of the Romanian Economy (SEPIC), 2005.
- [7] R. Olsen & K. Gilroy. Dniester River Basin Reservoir Simulation Model. Alliance for Global Water Adaptation (AGWA), Alexandria, Virginia, USA, Institute for Water Resources, U.S. Army Corps of Engineers, 2013.
- [8] A. Belachew & Z. Mekonen. Eastern Nile Basin Water System Simulation Using Hec-ResSim Model. International Conference on Hydroinformatics (pp. 1-8). HIC 2014, New York City, USA, City University of New York (CUNY), 2014.
- [9] A. Ozkaya & Y. Zerberg. "Water storage change assessment in the Seyhan Reservoir (Turkey) using HEC-ResSim model", *Arab. J. Geosci.*, 14, 504, 2021.
- [10] M. Beheshti, A. Heidari, y B. Saghafian. "Susceptibility of Hydropower Generation to Climate Change: Karun III Dam Case Study", *Water*, 11, 1025, 2019.
- [11] A. Sensoy, G. Uysal y A.A. Sorman. "Developing a decision support framework for real-time flood management using integrated models", *J. Flood Risk Manag.*, 11, 2018.
- [12] T. Trinh, S. Jang, K. Ishida, N. Ohara, Z.Q. Chen, M.L. Anderson, Y. Daroma, J. Chen y M.L. Kavvas. "Reconstruction of Historical Inflows into and Water Supply from Shasta Dam by Coupling Physically Based Hydroclimate Model with Reservoir Operation Model". *J. Hydrol. Eng.*, 21, 2016.
- [13] J.Y. Park & S.J. Kim. "Potential impacts of climate change on the reliability of water and hydropower supply from a multipurposed dam in South Korea". *J. Am. Water Resour. Asso.*, 50, 1273–1288. 2014.
- [14] S. Shrestha, M. Khatiwada, M. Babel y K. Parajuli. "Impact of climate change on river flow and hydropower production in Kulekhani hydropower project of Nepal". *Environ. Process.*, 1, 231–250, 2014.
- [15] M. G. Mariam. "Modeling of Tekeze Hydropower Reservoir Operation with HEC-ResSim". Addis Ababa University, Ethiopia, M.Sc. Thesis, Civil Engineering, Faculty of Technology, 2012.
- [16] W. Ouyang, K. Lawson, D. Feng, L. Ye, C. Zhang y C. Shen. "Continental-scale streamflow modeling of basins with reservoirs: Towards a coherent deep-learning-based strategy" *J. Hydrol.*, 2021.
- [17] J. Kim, L. Read, L. E. Johnson, D. Gochis, R. Cifelli y H. Han "An experiment on reservoir representation schemes to improve hydrologic prediction: coupling the national water model with the HEC-ResSim" *Hydrol Sci J.*, 65 (10), 2020.
- [18] J. Ganoulis, H. Skoulikaris y J. M. Monget. "Involving stakeholders in transboundary water resource management: The Mesta/Nestos basin" *Water*, 34 (4), 461-7, 2008.
- [19] S. O. Sulaiman, H. H. Abdullah, N. Al- Ansari, J. Laue y Z. M. Yaseen. "Simulation Model for Optimal Operation of Dokan Dam Reservoir Northern of Iraq". *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 301- 306, 2021.
- [20] X. Jaén. (2023, May. 25) "Madden, presa indispensable para el Canal". [Online]. El Faro del Canal. <https://elfarodelcanal.com/madden-represa-indispensable-para-el-canal/>
- [21] ACP, "Plan Maestro del Canal de Panamá", 2006.
- [22] USACE, "Panama Canal Reconnaissance Study", Vol. I & II, 1999.

- [23] Montgomery Watson Harza, "Upper Chagres Water Supply Project, Feasibility Design of the Upper Chagres Water Supply Project", 2003.
- [24] Montgomery Watson Harza, "Río Indio Water Supply Project, Feasibility Design of the Río Indio Water Supply Project", 2003.
- [25] Tudor Engineering Company, "Study and Report on Increasing the Water Supply of the Panama Canal for the Panama Canal Company", 1962.
- [26] Tudor Engineering Company, "Design Studies: Fill Structure Across Trinidad Arm of Gatun Lake for the Panama Canal Company", 1963.
- [27] L. Shannon, E. Wilson, "Foundation Investigation: Proposed Rock and Earth Fill Embankment across Trinidad Arm of Gatun Zone", 1963.
- [28] USACE, "Panama Canal Reconnaissance Study, Study for a Pump Reservoir in Lower Trinidad", Vol. III, 2002.
- [29] ACP, "Trinidad Project Development Plan", 2001.
- [30] R. McCuen, Z. Knight y A. Cutter. "Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index". *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, 6, 2006.
- [31] B. Li, G. Yang, R. Wan, X. Dai y Y. Zhang. "Comparison of random forests and other statistical methods for the prediction of lake water level: a case study of the Poyang lake in China". *Hydrol Res.*, 47, 1, 69–83, 2016.
- [32] ACP. (2023, Sept. 15). Portal Web de la Sección de Meteorología e Hidrología -Canal de Panamá. [Online]. <https://panama.aquaticinformatics.net/Data/Dashboard/12>
- [33] P. Eavis. (2023, Nov. 1). "Una sequía afecta al Canal de Panamá. Y el comercio internacional lo resiente". [Online]. <https://www.nytimes.com/es/2023/11/01/espanol/sequia-canal-de-panama-comercio.html>