

Lumped Flood Routing through an Interactive Web Application

Juan Martín Marcenaro¹ , Marcos Tomás Devoto¹  y Micaela Suriano¹ 

¹*Hydraulic Department, Faculty of Engineering University of Buenos Aires, Argentina, jmarcenaro@fi.uba.ar, mdevoto@fi.uba.ar; msuriano@fi.uba.ar.*

Abstract – Lumped flood routing in reservoirs is a fundamental topic in introductory hydrology courses in engineering programs. Understanding the associated concepts is of great importance for their subsequent application in professional life, such as in the design and operation of reservoirs. Students often have difficulty comprehending the relationships between variables, parameters, and limitations between methods. In turn, experience shows that students waste time on spreadsheet calculations, and consequently, learning of concepts is not prioritized.

In this work, an application is developed that solves lumped flood routing in a reservoir, where various parameters such as reservoir characteristics, input hydrographs, and the dam discharge organ can be modified. The tool provides an interface that allows the user to interact in a simple way, since by easily modifying the parameters, the effect on the result of the lamination can be graphically seen. This application is open source and is available for any device with internet access.

Key Words: Water Resources – Hydrology – Flood Routing - Reservoir – Web Application

Tránsito Agregado de Crecidas en Embalses a través de una Aplicación Web Interactiva

Juan Martín Marcenaro¹, Marcos Tomás Devoto¹ y Micaela Suriano¹

¹Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Argentina, jmarcenaro@fi.uba.ar,
mdevoto@fi.uba.ar; msuriano@fi.uba.ar.

Resumen– El tránsito agregado de crecidas en embalses es un tema fundamental en los cursos introductorios de hidrología en las carreras de ingeniería. Entender los conceptos asociados es de gran importancia para su posterior aplicación en la vida profesional, como por ejemplo, en el diseño y operación de embalses.

Los estudiantes a menudo tienen dificultades para comprender las relaciones entre variables, parámetros y limitaciones de los diferentes métodos. A su vez, la experiencia muestra que para la resolución, los alumnos pierden tiempo en la elaboración de planillas de cálculo, y en consecuencia, no se prioriza el aprendizaje de los conceptos.

En este trabajo se desarrolla una aplicación que resuelve el tránsito agregado en un embalse, donde diversos parámetros como: características del embalse, hidrogramas de entrada y el órgano de descarga de la presa, son variables. La herramienta tiene una interfaz que permite al usuario interactuar de manera sencilla, ya que modificando fácilmente los parámetros, se puede ver gráficamente el efecto que tiene en el resultado de esos cambios en la laminación. Esta aplicación es de código abierto y se encuentra disponible para cualquier dispositivo con acceso a internet.

Palabras clave: Recursos Hídricos - Hidrología - Tránsito Agregado de Crecidas - Embalses - Aplicación web

I. INTRODUCCIÓN

La Hidrología es una ciencia interdisciplinaria que estudia la ocurrencia, distribución, circulación y las propiedades del agua en la Tierra [1]. Estudiar el tránsito agregado de crecidas en embalses, es un tema que aparece en la mayoría de los cursos introductorios de hidrología en carreras de ingeniería [2][3]. Este análisis es conceptualmente amplio ya que requiere de la evaluación de conceptos relevantes de la asignatura como es el balance de agua, identificación de las distintas partes del hidrograma, separación de las componentes del caudal, análisis topográfico en el cuenco de embalse.

Al tratarse de un problema que depende de distintas variables, es muy importante conocer de qué manera será el comportamiento del sistema, ya sea el almacenamiento de agua en el embalse como el caudal erogado, ante modificaciones por ejemplo: del caudal de entrada, nivel inicial o la estructura de disipación.

Comprender los procesos físicos de manera teórica lleva su tiempo y práctica, por lo que es importante contar con las herramientas adecuadas que permitan optimizar los recursos y mejorar el proceso de aprendizaje. Contar con elementos y

materiales didácticos de calidad, así como con estrategias de estudio y aprendizaje efectivas, pueden ser de gran ayuda para comprender los conceptos clave de manera más significativa.

Siguiendo el concepto de “prosumidor” planteado por Toffler [4] un rol activo y más práctico en la enseñanza de la ingeniería permite a los alumnos beneficiarse de la oportunidad de contribuir en el diseño y desarrollo de tecnologías emergentes, logrando un papel activo en la innovación.

Tal como indica Jenkins [5] la convergencia de los medios nos trajo nuevas formas de interacción entre los consumidores y los productores de contenido, dando lugar a una cultura participativa que se caracteriza por la colaboración activa de los usuarios en la creación y distribución de contenido a través de las redes sociales, los blogs y otros medios digitales. La educación no debe ser ajena a estos procesos, por lo cual es importante tomar en cuenta el contexto en el que interactúan nuestras alumnas y alumnos a la hora de proponer nuevas dinámicas de aprendizaje.

La enseñanza de la hidrología tiene como desafío vincular el aula con el mundo exterior, y para eso la modelación y simulación de los procesos son fundamentales, siendo imprescindible el uso y desarrollo de nuevas herramientas y tecnologías computacionales. Por ejemplo, en la Universidad de Birmingham [6], se utilizan videos de ciencias hidrológicas y aplicaciones móviles para mejorar la experiencia de los estudiantes y las evaluaciones han demostrado que a los estudiantes les gusta participar en estas actividades y que les ayuda en su aprendizaje.

Otros autores [7] presentaron modelos de aprendizaje centrados en el estudiante creando oportunidades para nuevas asociaciones entre investigadores, académicos e hidrólogos para explorar las necesidades específicas de los estudiantes de hidrología.

Existen numerosas herramientas para la programación en Python y R, entre otros, con aplicaciones en Hidrología [8], como también aplicaciones especialmente diseñadas para abordar algún tema específico, como por ejemplo, un tema muy popular: Balance Hídrico [9].

Este trabajo se constituye en el ámbito de la materia Hidrología para la carrera de grado Ingeniería Civil en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.

La pandemia COVID-19 obligó a repensar la manera en la que se dictaban las clases, siendo necesario la incorporación de nuevas herramientas computacionales, presentando esta situación como un desafío pero a la vez como una oportunidad para innovar. En el caso particular del desarrollo del tema, tránsito en embalses, resultó difícil que los alumnos desarrollen la planilla o herramienta de cálculo para su resolución, ya que

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

no se logró proveer con la adecuada calidad de respuesta a problemas, como sí ocurría presencialmente.

En ese contexto, y en línea con la necesidad de adaptarse a las nuevas tecnologías e innovaciones en la enseñanza, contar una aplicación interactiva con posibilidad de modificar las variables y parámetros de una función matemática, para luego identificar visualmente los resultados de manera rápida y eficiente, es de gran utilidad para comprender los conceptos hidrológicos fundamentales que trae aparejado el problema.

A continuación, se desarrollará primero la teoría del método modelado, luego el desarrollo de la aplicación web y por último un análisis de resultados y conclusiones.

II. TRÁNSITO AGREGADO DE CRECIDAS

A. Ecuación del tránsito agregado de crecidas

En el tránsito agregado de crecidas el flujo se calcula como una función del tiempo únicamente en un lugar particular, siguiendo el desarrollo presentado en [10]. Para analizar la respuesta del embalse, se plantea la ecuación de continuidad (1), siendo $I(t)$ el caudal de ingreso al embalse, $O(t)$ el caudal de egreso, S el volumen almacenado y dS/dt la variación de almacenamiento en el tiempo.

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (1)$$

Para poder resolver el tránsito, se requiere conocer una función de almacenamiento S (2), para relacionar el almacenamiento del embalse, con el caudal de salida para ese nivel.

$$S = f(Q) \quad (2)$$

Al ser un embalse de superficie horizontal, se plantea el método de la piscina nivelada, en donde la relación entre el nivel dentro del embalse y el volumen almacenado es invariable. La aplicación web trabaja con el modelo de tránsito agregado de crecidas de Runge-Kutta [11], un algoritmo numérico que se utiliza para aproximar soluciones numéricas a ecuaciones diferenciales ordinarias. Este método cuenta con distintos esquemas de diferente orden, en este caso se desarrollará un esquema de tercer orden. Se vuelve a expresar la ecuación de continuidad (1) de la siguiente manera (3):

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(H) \quad (3)$$

Siendo $I(t)$ el caudal de ingreso al embalse, $Q(H)$ el caudal de egreso en función del nivel y S el volumen almacenado. En base a esto, la variación del almacenamiento se puede plantear de la siguiente manera (4):

$$dS = A(H) * dH \quad (4)$$

Donde $A(H)$ es el área de la superficie de agua correspondiente a la elevación H . Finalmente, la ecuación de continuidad puede ser escrita (5):

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I(t) - Q(H)}{A(H)} \quad (5)$$

Donde $I(t)$ el caudal de ingreso al embalse, $Q(H)$ el caudal de egreso en función del nivel y $A(H)$ es el área de la superficie de agua correspondiente a la elevación H .

Para resolver esta ecuación, se proyecta mediante pequeños incrementos en la variable independiente, el tiempo, empleando valores conocidos de la variable dependiente, el nivel dentro del embalse H . Estos pequeños incrementos, se desarrollan en función del orden en el esquema planteado. Para el caso de un esquema de Runge-Kutta de tercer orden [11], se cuenta con tres incrementos en cada intervalo de tiempo Δt y se efectúan tres aproximaciones de la variación en el nivel en el embalse dH .

$$\Delta H_1 = \Delta t \cdot f(h_j, t_j) = \Delta t \cdot \left(\frac{I(t_j) - O(h_j)}{A(h_j)} \right) \quad (6)$$

$$\Delta H_2 = \Delta t \cdot f\left(h_j + \frac{\Delta H_1}{3}, t_j + \frac{\Delta t}{3}\right) = \Delta t \cdot \left(\frac{I\left(t_j + \frac{\Delta t}{3}\right) - O\left(h_j + \frac{\Delta H_1}{3}\right)}{A\left(h_j + \frac{\Delta H_1}{3}\right)} \right) \quad (7)$$

$$\Delta H_3 = \Delta t \cdot f\left(h_j + \frac{2\Delta H_2}{3}, t_j + \frac{2\Delta t}{3}\right) = \Delta t \cdot \left(\frac{I\left(t_j + \frac{2\Delta t}{3}\right) - O\left(h_j + \frac{2\Delta H_2}{3}\right)}{A\left(h_j + \frac{2\Delta H_2}{3}\right)} \right) \quad (8)$$

$$h_{j+1} = h_j + \Delta H \quad (9)$$

$$\Delta H = \frac{\Delta H_1}{4} + \frac{3\Delta H_3}{4} \quad (10)$$

Siendo ΔH_i los valores aproximados, en donde son evaluados primero en (H_j, t_j) (6), luego en $(H_j + \Delta H_1/3, t_j + \Delta t/3)$ (7) y finalmente en $(H_j + 2\Delta H_2/3, t_j + 2\Delta t/3)$ (8). Se determina la diferencia de nivel ΔH (9) en cada paso de tiempo y finalmente el nivel en el paso de tiempo siguiente h_{j+1} (10).

B. Ecuación de vertedero

También se requiere conocer la relación entre el caudal de salida aguas abajo del embalse, en función de la altura de almacenamiento $Q(h)$. En este caso, se considera la ecuación de vertedero de labio fijo (11) o cresta libre no controlado [12].

$$Q(h) = C * B * h^{3/2} \quad (11)$$

Siendo h la carga de agua por sobre la cresta del vertedero, C el coeficiente de descarga del vertedero y B el ancho del vertedero. Estos parámetros de la descarga del vertedero de la presa, son fácilmente modificables dentro de la web interactiva de la app, así es posible conocer la influencia de los mismos en el hidrograma de salida resultante.

C. Hidrograma de entrada

Como es un problema de tránsito agregado de crecidas, se debe tener en cuenta el hidrograma de entrada al embalse, se considera a modo de ejemplo educativo, un hidrograma analítico de caudal. Se utiliza una ecuación matemática comúnmente utilizada que aproxima la forma de un hidrograma de crecida.

La ecuación a utilizar (12), representa una relación adimensional del caudal directo $Q_d(t)$ en función del tiempo, también de manera adimensional. A su vez, dicha ecuación es dependiente de un coeficiente de forma, el cuál varía en función de tipo de hidrograma que se quiere aproximar.

$$y = [x \exp(1 - x)]^m \tag{12}$$

Siendo y la relación entre el caudal directo $Q_d(t)$ y el caudal pico Q_{pico} , y x la relación entre el tiempo t y el tiempo al pico t_{pico} . En la Figura 1, es posible observar la forma de dicha ecuación matemática, (para distintos valores de m) la cual se asemeja en gran medida a la forma de un hidrograma de crecida de caudal directo real.

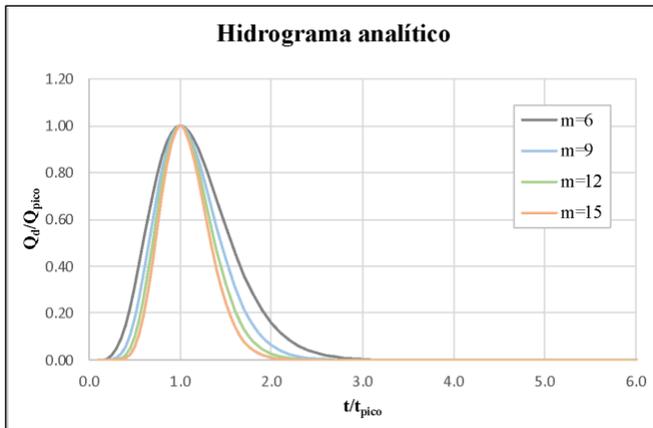


Fig. 1 Hidrograma analítico a través de ecuación matemática

Se debe escalar el hidrograma para el caudal pico y el tiempo al pico. También, de ser necesario, es posible adicionar el caudal base resultando en un hidrograma de caudal total. En la siguiente figura (Fig. 2), se muestra un hidrograma de caudal total obtenido a través de la ecuación matemática mencionada (12) y sumado un caudal base.

El hidrograma de la Fig. 2, se obtuvo mediante la consideración de los siguiente valores: $Q_{pico} = 1450 \text{ m}^3/\text{seg}$, $t_{pico} = 15 \text{ horas}$, $m = 8$ y $Q_{base} = 100 \text{ m}^3/\text{seg}$.

D. Características del embalse

Otra de las variables a considerar en el tránsito agregado de crecidas en embalses, es la relación entre el área de la superficie en el embalse y el nivel en el mismo $A(H)$.

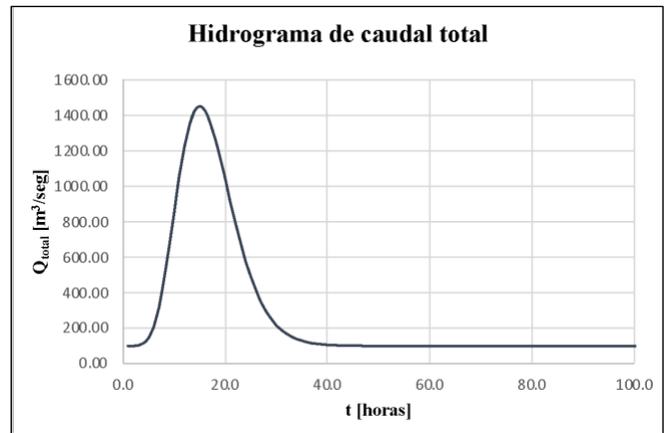


Fig. 2 Hidrograma de caudal total - ejemplo

A modo de ejemplo para este ejercicio, se tomó la curva que relaciona el área de la superficie con el nivel en el embalse de la presa “Quebrada de Ullúm”, del Inventario de Presas y Centrales Hidroeléctricas de la República Argentina, Tomo III [13]. Es posible observar esta curva en la Fig. 3, cabe aclarar que el nivel se encuentra medido a partir de un cero de referencia en el punto más bajo del embalse:

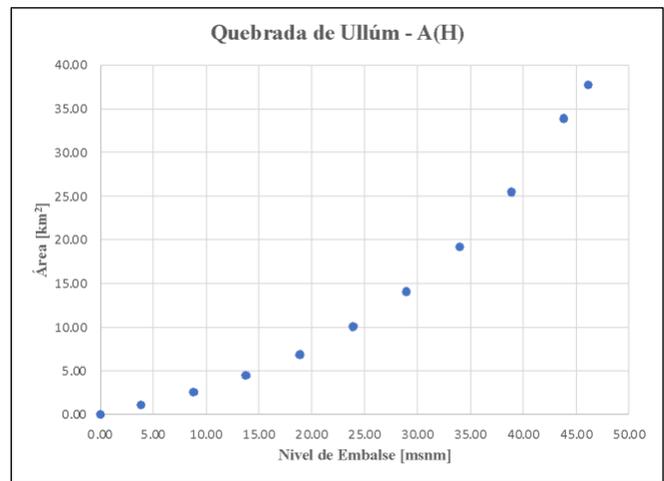


Fig. 3 Área del embalse Quebrada de Ullúm en función del nivel

A partir de los pares de puntos de la Fig. 3, es posible aproximar una función polinómica de segundo orden que relacione ambas variables, el área de la superficie (km^2) y el nivel del embalse relativo al cero de referencia (m). Dicha curva se presenta en la siguiente ecuación (13).

$$A(H) = 0.01677 H^2 + 0.0256H \tag{13}$$

A partir de la función polinómica que relaciona el área con el nivel dentro del embalse, es posible obtener la función polinómica de tercer grado realizando la integración matemática de la curva, que relaciona el volumen almacenado, con el nivel de en el embalse. Se presenta la ecuación (14):

$$V(H) = 0.00559 H^3 + 0.0128H^2 \quad (14)$$

A partir de la ecuación mencionada, es posible ver gráficamente la relación entre el volumen almacenado (km³) y el nivel del embalse relativo al cero de referencia (m), en la Fig. 4.

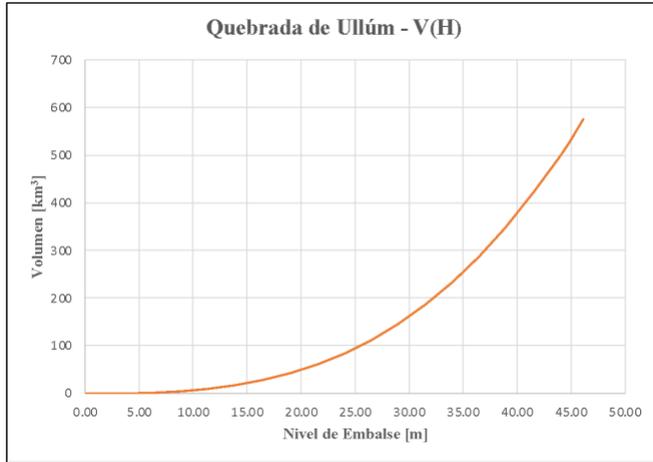


Fig. 4 Volumen del embalse Quebrada de Ullúm en función del nivel

Dicha relación entre el volumen y el nivel del embalse no se utiliza para la resolución del método desarrollado anteriormente, pero sirve para estimar el volumen del embalse para cada intervalo de cálculo.

Una vez considerado todo lo anterior, es posible resolver el tránsito agregado de crecidas en embalses para un hidrograma de entrada $I(t)$ conocido, obteniendo el hidrograma de salida $O(t)$ aguas abajo de la presa.

III. APLICACIÓN WEB

La aplicación fue desarrollada a través del lenguaje de programación Python [14] junto con el apoyo de diferentes librerías que permiten, por un lado, el desarrollo de las ecuaciones del método numérico de tránsito agregado de crecidas y por el otro, la visualización e interacción con las variables que resultan más relevantes. Más específicamente, las ecuaciones del método numérico fueron resueltas a través de las librerías Numpy [15] y Pandas [16] y la visualización e interacción final a través de la librería Bokeh [17].

A lo largo del código desarrollado, la metodología de resolución propuesta consiste en primer lugar en el diseño del hidrograma de entrada a través de la expresión (12), el cual es un hidrograma de cierta duración, igualmente espaciado en el tiempo y cuyas características principales están dadas por un caudal pico, tiempo al pico y factor de forma adoptados.

Luego, se caracteriza al órgano de descarga con los parámetros indicados en (11). También, es necesario adoptar una condición de nivel inicial en el embalse frente al arribo del hidrograma de entrada.

Con esta información definida, se está en condiciones de resolver la ecuación del tránsito agregado de crecidas

desarrollada anteriormente y por lo tanto, obtener el nivel en el embalse para cada paso temporal.

A partir de la serie de niveles calculados, es posible determinar para cada intervalo, el caudal de salida, el área superficial y volumen del embalse, entre otros, y de estas series extraer los resultados más relevantes.

El código resuelve en primera instancia, las diferentes ecuaciones del método a través de los pasos ya mencionados y a partir de un conjunto de parámetros iniciales. Luego se crean las interacciones de la aplicación, es decir, los parámetros que inicialmente eran iguales a un valor fijo ahora son variables en un rango propuesto. Consecuentemente, los resultados del método que son sensibles a dichas variaciones son recalculados según los nuevos valores adoptados.

Dentro del entorno de la aplicación, es posible modificar parámetros relacionados con el hidrograma de entrada, con el embalse y con las características del órgano de descarga de la presa.

Particularmente, para el hidrograma de entrada al embalse, es posible modificar su caudal pico, tiempo al pico y forma según lo indicado en (12). Para el embalse, es variable su nivel inicial previo al comienzo de la crecida y para el vertedero de la presa, son modificables su longitud y altura de la cresta o nivel máximo normal según lo indicado en (11).

El desarrollo del código se encuentra alojado en un repositorio público y accesible a través de la siguiente dirección <https://github.com/JMM385/RENDER-LACCEI>

La aplicación web interactiva es accesible y operable a través de cualquier dispositivo con acceso a internet a través de la siguiente dirección: <https://laccei-tac.onrender.com/>

IV. RESULTADOS

En la Fig. 5 se presenta el esquema de la aplicación web interactiva desarrollada.

Posteriormente a una introducción sobre el contenido general de la aplicación, la disposición de los elementos dentro de la herramienta consiste en un primer apartado donde se presenta el conjunto de parámetros con los que el estudiante o usuario final tiene la posibilidad de interactuar.

En el siguiente apartado se presentan los resultados más significativos de la laminación. Entre estos resultados, se encuentran los hidrogramas de entrada y salida, la variación del nivel del embalse en el tiempo y valores característicos como máximos valores alcanzados, porcentajes de atenuación y desfases temporales. En esta sección, se incluye también la vinculación entre el área superficial y volumen del embalse con el nivel del mismo, ya que los resultados del tránsito agregado a través de un embalse están fuertemente ligados a las características geométricas del vaso receptor.

La resolución inicial se realizó a través del conjunto de datos de la presa existente “Quebrada de Ullúm” recopilados del Inventario de Presas y Embalses [13].

Tránsito agregado de crecidas en un embalse a través de una aplicación web interactiva

- Para el hidrograma de entrada, es posible variar el caudal pico, el tiempo al pico y la forma del hidrograma a través de un factor de forma.

- En cuanto a las características de la presa y el embalse, es posible variar la cota a la cual se encuentra en nivel máximo normal del embalse (NMN), el ancho del vertedero y el nivel inicial del embalse.

- Por consultas o comentarios enviar un correo a jmarcenaro@fi.uba.ar, mdevoto@fi.uba.ar o msuriano@fi.uba.ar

Características del hidrograma de entrada

Caudal pico de entrada [m^3/s]: **6500**



Tiempo al pico de entrada [hs]: **12**



Factor de forma: **4**



Características de la presa y el embalse

NMN de la presa [m]: **40**



Nivel inicial del embalse [m]: **39**



Largo del vertedero [m]: **70**



Resultados generales de la laminación

El caudal máximo de entrada y salida es igual a $6500.0 m^3/s$ y $2462.3 m^3/s$ respectivamente. La atenuación es igual al 62 %.

El caudal máximo de entrada ocurre a las 12.0 horas y el de salida a las 22.5 hs y por lo tanto el desfase es de 10.5 horas.

El nivel inicial del embalse es igual a 39.0 m y el máximo alcanzado igual a 46.3 m y por lo tanto el nivel aumento en 7.3 m.

La máxima superficie inundada es de $37.2 km^2$ y el máximo volumen almacenado igual a $583.9 hm^3$.

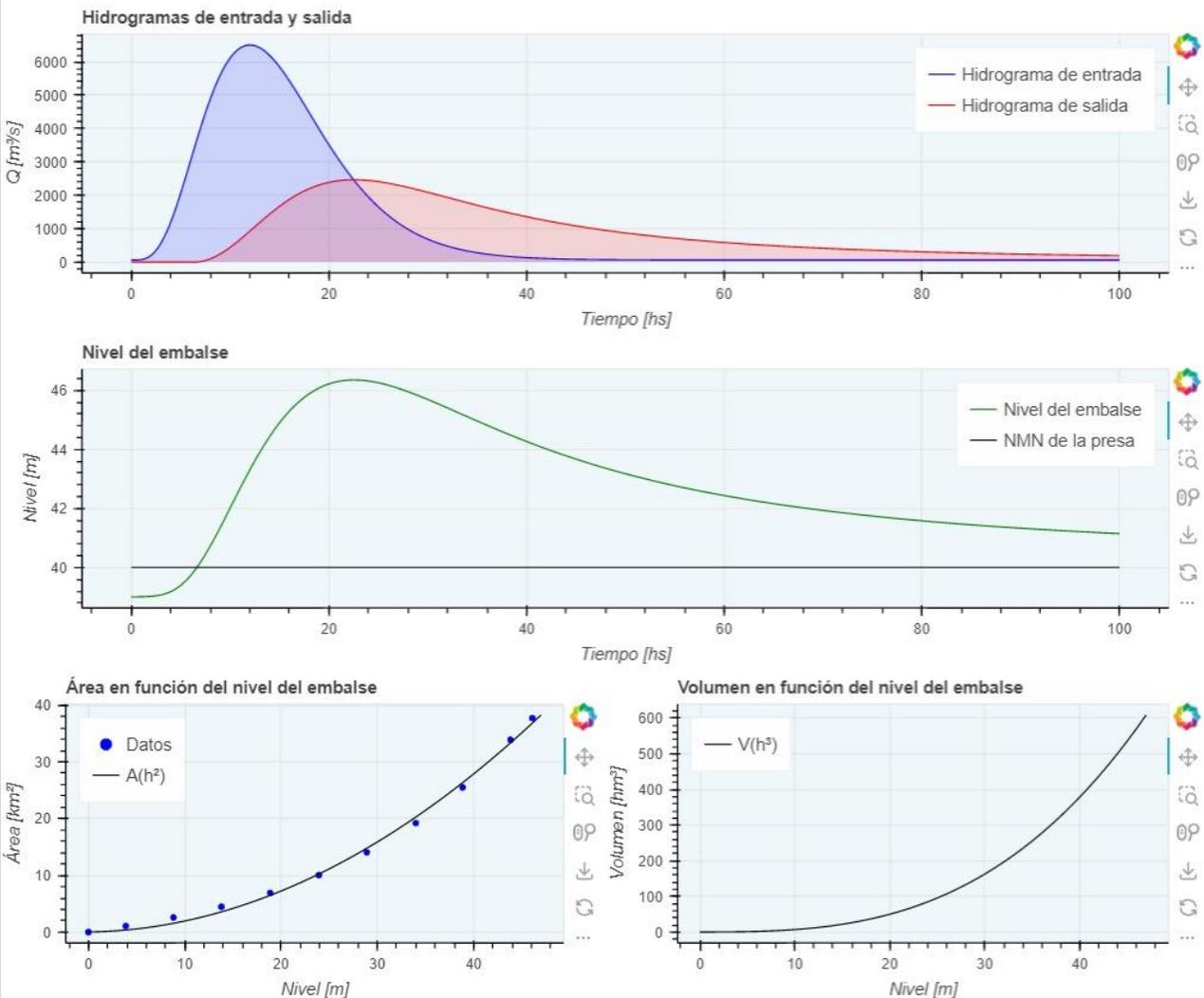


Fig. 5 Esquema de la aplicación.

Fueron adoptados el caudal de diseño del vertedero, la altura de la presa y el largo del vertedero indicados.

Por parte de la experiencia del estudiante es posible visualizar tanto cualitativa como cuantitativamente el efecto que tiene la variación de los distintos parámetros y que tan sensibles son sobre los resultados y el fenómeno físico (laminación de un hidrograma de crecida a través de un embalse) que se busca representar.

Desde la materia Hidrología, se propone a los estudiantes qué visualicen los resultados y luego obtengan conclusiones frente a diversos escenarios propuestos por los docentes, para que facilite a la resolución y el entendimiento del tema o bien utilicen la herramienta a disposición de manera tal que motive al aprendizaje propio.

Por ejemplo, se busca transmitir qué implicancias y en qué grado tiene influencia el ancho del vertedero o el nivel inicial del embalse sobre el hidrograma de salida. O bien, cómo se desarrolla y qué valores alcanza el nivel del embalse para distintos escenarios de caudal de ingreso, largo del vertedero y altura de la cresta, entre otros. Todas variables y resultados relevantes al diseño y operación que pudiera tener un embalse.

La experiencia demuestra que los alumnos, a posteriori de haber utilizado la aplicación, son capaces de comprender, anticiparse y describir los efectos y variaciones que se esperarían frente a diferentes modificaciones de los datos.

A modo de ejemplificación, en la Fig. 6 se presentan los resultados que se obtendrían para un escenario en el cual se aumenta el ancho del vertedero original y el nivel inicial del embalse es coincidente con el de la cresta del vertedero. Se trata de un caso típico propuesto a los estudiantes y que permite aumentar la comprensión del problema que se resuelve.

V. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una aplicación web interactiva para el cálculo del tránsito agregado de crecidas en embalses, el cual es un tema de relevancia en los cursos universitarios de hidrología y de aplicación profesional en el diseño y operación de embalses.

El objetivo este desarrollo, es que los estudiantes puedan enfocarse en comprender el fenómeno físico que se representa y no en las complejidades que trae aparejada su resolución numérica. A través de esta herramienta, los alumnos son capaces de analizar las implicancias que tiene la variación de diferentes variables sobre el fenómeno del tránsito agregado en embalses, así como también la sensibilidad y la interrelación que guardan los parámetros.

La experiencia ha demostrado que a partir de las propuestas de los docentes o bien la interacción propia del alumno con los resultados, ha sido en primera instancia de utilidad para aumentar la comprensión del tema y que posteriormente,

facilita los estudios y la realización de trabajos prácticos relacionados. Los resultados obtenidos entonces, sugieren que la aplicación puede ser una herramienta efectiva para mejorar el aprendizaje y la enseñanza de la hidrología en la educación universitaria.

Se seguirá mejorando la aplicación interactiva a medida que se reciban comentarios y críticas constructivas por parte de los alumnos. Además, se tiene previsto realizar encuestas que permitan evaluar la experiencia de los estudiantes de una manera sistematizada.

Por otra parte, se planea extender el desarrollo de este tipo de herramientas en otros temas del curso, de esta forma, se buscará optimizar la funcionalidad y usabilidad para facilitar aún más el aprendizaje y la comprensión de los temas relacionados con la hidrología.

REFERENCIAS

- [1] P.S. Eagleson "Hydrologic science: A distinct geoscience" Rev. Geophys., 29(2), 237– 248, 1991, doi:10.1029/90RG02615.
- [2] V. T. Chow, D.R. Maidment y L. W. Mays "Hidrología Aplicada" McGraw-Hill, 1993 - 584 páginas.
- [3] E. M. Shaw "Hydrology in Practice", Taylor & Francis e-Library, 2005, 586 páginas, ISBN 0-203-01325-5.
- [4] Toffler, A. . La tercera ola. Barcelona: Plaza & Janés, 1980.
- [5] Jenkins, H. Convergence Culture. La cultura de la convergencia de los medios de comunicación. Ediciones Paidós Ibérica, 2008.
- [6] Van Loon, Anne. Using videos, apps and hands-on experience in undergraduate hydrology teaching. 10.13140/RG.2.1.1448.4880, 2016.
- [7] Thompson, S. E., Ngambeki, I., Troch, P. A., Sivapalan, M., and Evangelou, D.: Incorporating student-centered approaches into catchment hydrology teaching: a review and synthesis, Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 3263–3278, <https://doi.org/10.5194/hess-16-3263-2012>, 2012.
- [8] Resources for Programming in Hydrology, Jerom Aerts, The American Geophysical Union (AGU) Hydrology Section Student Subcommittee (H3S): <https://agu-h3s.org/2021/03/29/resources-for-programming-in-hydrology>
- [9] Gannon J. P., McGuire K. J. An Interactive Web Application Helps Students Explore Water Balance Concepts , Frontiers in Education, Vol. 7, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/educ.2022.873196>, 2022
- [10] Chow, V. T. Hidrología aplicada (1ra ed.). McGraw-Hill, 1994.
- [11] Carnahan, Brice. Applied Numerical Methods, 1969.
- [12] Bazin, Henri, Études expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts et à travers les ouvrages hydrauliques, 1895.
- [13] Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, Inventario de presas y centrales de la República Argentina. - 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, 2010. ISBN 978-987-23585-8-7.
- [14] Python Software Foundation, Python Language Reference Version 3.10.1, 2021. <https://docs.python.org/3/>
- [15] Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... Oliphant, T.E. NumPy Versión 1.20.1, 2021. <https://numpy.org/>
- [16] McKinney, W., & Others. pandas: powerful Python data analysis toolkit. Versión 1.3.4, 2021. <https://pandas.pydata.org/>
- [17] Bokeh Development Team, 2021. Bokeh: Python library for interactive visualization Versión 2.3.3, 2021. <https://bokeh.org/>

Tránsito agregado de crecidas en un embalse a través de una aplicación web interactiva

- Para el hidrograma de entrada, es posible variar el caudal pico, el tiempo al pico y la forma del hidrograma a través de un factor de forma.

- En cuanto a las características de la presa y el embalse, es posible variar la cota a la cual se encuentra en nivel máximo normal del embalse (NMN), el ancho del vertedero y el nivel inicial del embalse.

- Por consultas o comentarios enviar un correo a jmarcenaro@fi.uba.ar, mdevoto@fi.uba.ar o msuriano@fi.uba.ar

Características del hidrograma de entrada

Caudal pico de entrada [m^3/s]: 6500



Tiempo al pico de entrada [hs]: 12



Factor de forma: 4



Características de la presa y el embalse

NMN de la presa [m]: 40



Nivel inicial del embalse [m]: 40



Largo del vertedero [m]: 90



Resultados generales de la laminación

El caudal máximo de entrada y salida es igual a $6500.0 m^3/s$ y $3066.0 m^3/s$ respectivamente. La atenuación es igual al 53 %.

El caudal máximo de entrada ocurre a las 12.0 horas y el de salida a las 21.0 hs y por lo tanto el desfase es de 9.0 horas.

El nivel inicial del embalse es igual a 40.0 m y el máximo alcanzado igual a 46.2 m y por lo tanto el nivel aumento en 6.2 m.

La máxima superficie inundada es de $37.0 km^2$ y el máximo volumen almacenado igual a $579.0 hm^3$.

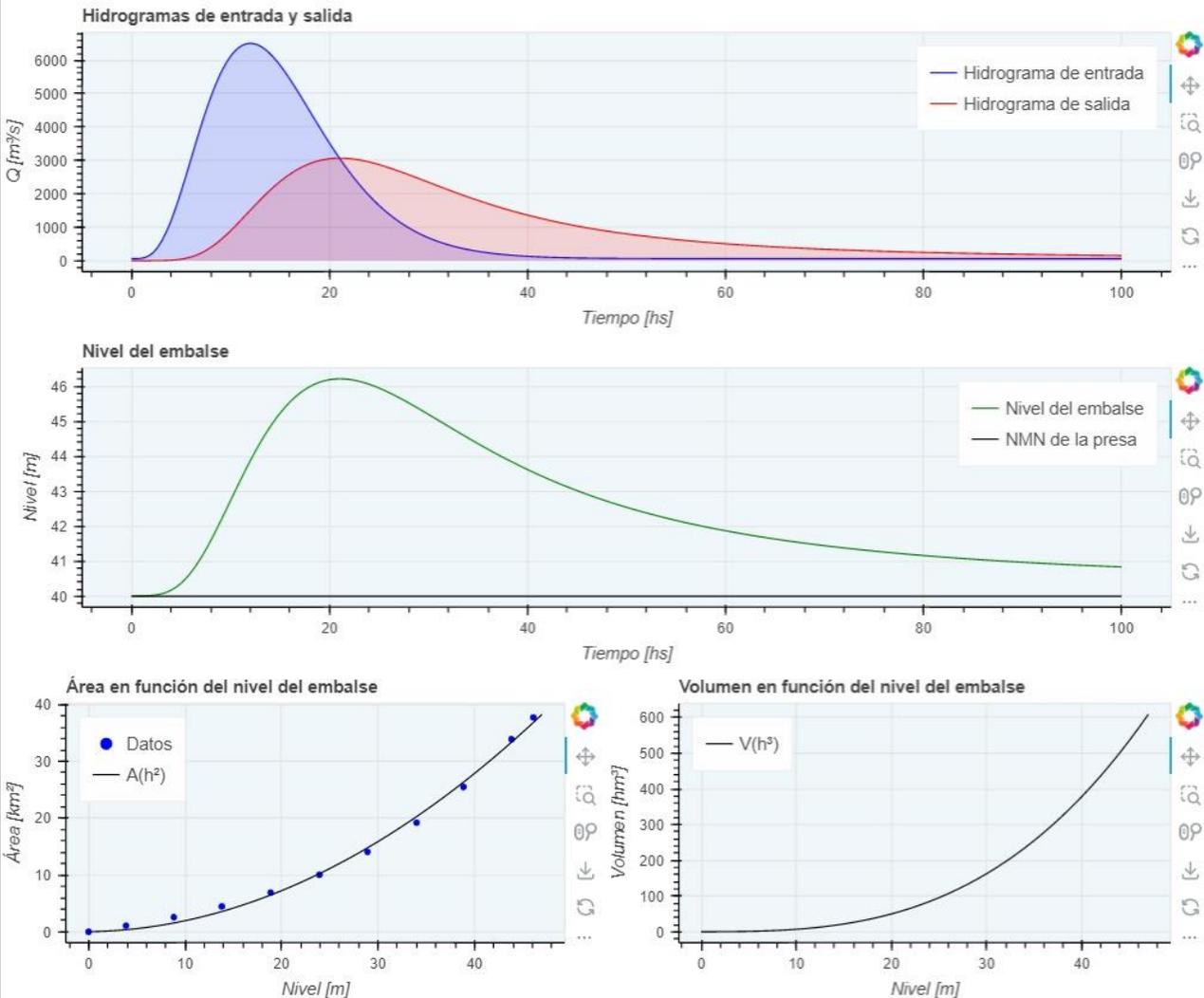


Fig. 6 Resultados de un escenario típico propuesto a los estudiantes