

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-06

Artículos

Sistema de ayuda a la decisión para la gestión hidrológica del río Guayas

Decision support system for the hydrological management of the Guayas River

José María Campo-Carrera¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0569-7084>

Miguel Angel Cedeño-Villarroel², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9766-3625>

Mauricio Boada-Herrera³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7990-0631>

Angel Udias⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1219-0465>

¹Universidad de Alcalá, España/ Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, Unidad de Negocio Hidronación, Ecuador, josemariacampo@hotmail.com

²Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, Unidad de Negocio Hidronación, Ecuador, miguel.cedenov@celec.gob.ec

³Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, Unidad de Negocio Hidronación, Ecuador, mauricio.boada@celec.gob.ec

⁴Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles, España, angelluis.udias@urjc.es



Autor para correspondencia: José María Campo,
josemariacampo@hotmail.com

Resumen

La cuenca del río Guayas en Ecuador es la más grande en la vertiente Pacífico de Suramérica, con un área de 34 500 km² (12.57 % del territorio nacional). Dentro de la cuenca, el embalse Daule-Peripa constituye la mayor reserva de agua del país, garantizando agua para consumo de más de ocho millones de personas, además de riego y generación hidroeléctrica. Se ha desarrollado un Sistema Hidrológico de Ayuda a la Decisión (SHAD) para gestionar eficientemente los recursos hídricos en la cuenca del río Guayas, mejorar la producción energética de las centrales hidroeléctricas y alertar tempranamente de inundaciones aguas abajo de las centrales. El SHAD integra un módulo de adquisición de datos en tiempo real, con el modelo hidrológico de tanques encargado de estimar los ingresos a los embalses en escala horaria, y el módulo de control sobre el que interaccionan los gestores. El modelo hidrológico se ha calibrado separadamente para las cuencas Daule-Peripa y Baba con datos horarios del periodo 2019-2021. Para la cuenca de Baba, el coeficiente Nash-Sutcliffe para la validación a escala diaria y horaria fue 0.77 y 0.71, respectivamente, así como 0.62 y 0.49 para Daule-Peripa. El análisis preliminar comparativo de la gestión de los recursos hídricos de la cuenca realizada desde la puesta en operación del SHAD muestra evidencias de mejoras significativas.

Palabras clave: río Guayas, sistema hidrológico de ayuda a la decisión, gestión cuenca, modelo hidrológico, datos en tiempo real, inundación.

Abstract

The Guayas River basin in Ecuador is the largest on the Pacific slope of South America, with an area of 34 500 km² (12.57 % of the national territory). Within the basin, the Daule-Peripa reservoir constitutes the largest water reserve in the country, guaranteeing water for the consumption of more than eight million people, in addition to irrigation and hydroelectric generation. A Hydrological Decision Support System (SHAD) has been developed to efficiently manage water resources in the Guayas river basin, improve the energy production of hydroelectric plants and provide early warning of floods downstream of the plants. SHAD integrates a real-time data acquisition module, with the hydrological model of tanks in charge of estimating the inflows to the reservoirs on an hourly scale, and the control module on which the managers interact. The hydrological model has been calibrated separately for the Daule-Peripa and Baba basins with hourly data from the period 2019-2021. For the Baba basin, the Nash-Sutcliffe coefficient for validation at daily and hourly scales were 0.77 and 0.71, respectively, as well as 0.62 and 0.49 for Daule-Peripa. The preliminary comparative analysis of the management of the water resources of the basin, carried out since the commissioning of SHAD shows evidence of significant improvements.

Keywords: Guayas River, hydrological decision support system, basin management, hydrological model, real-time data, flood.

Recibido: 17/11/2022

Aceptado: 01/10/2023

Publicado Online: 31/10/2023

Introducción

El sector hidroeléctrico ecuatoriano es un pilar estratégico para el desarrollo económico y social del país. En 2021, según datos del Operador Nacional de Electricidad (Cenace, 2022), la producción de energía eléctrica en el Ecuador fue de 27 659 GWh, de la cual el 92.0 % fue de origen hidroeléctrico.

Este sector se enfrenta a diversos retos relacionados con la variabilidad meteorológica y climática, siendo el fenómeno de El Niño Oscilación Sur el que mayor influencia tiene en lo relativo a precipitación y caudales disponibles en las diferentes regiones del Ecuador (Bendix, Gämmerler, Reudenbach, & Bendix, 2003; Recalde-Coronel, Barnston, & Muñoz, 2014), en especial en la región costa (De Guenni *et al.*, 2017). Además de los retos históricos habituales existen nuevos retos, como la demanda creciente en el consumo (Cenace, 2022) o su vulnerabilidad ante el cambio climático (Paz *et al.*, 2019).

En el caso de los embalses Daule-Peripa (la mayor reserva de agua de Ecuador) y Baba, y sus respectivas centrales hidroeléctricas, Marcel Laniado de Wind y Baba, el principal problema de gestión del recurso hídrico es maximizar la producción de energía garantizando el suministro de agua para más de ocho millones de personas y agua para riego en las provincias de Guayas, Manabí, Los Ríos y Santa Elena. El embalse de

Daule-Peripa es parte fundamental del más importante sistema hídrico de la costa de Ecuador del que formarían parte, además de los citados embalses, la presas de La Esperanza, Poza Honda, sistema de trasvases y embalses de la provincia de Santa Elena, y el trasvase Daule-Vinces (Figura 2 y Figura 3).

Además de garantizar el recurso hídrico y la generación hidroeléctrica, los embalses Daule-Peripa y Baba son fundamentales para el control o atenuación de inundaciones aguas abajo de los embalses en los cauces de los ríos Daule y Quevedo, respectivamente.

En consecuencia, la optimización de la operación de los embalses y centrales hidroeléctricas involucra múltiples demandas hídricas tanto en la cuenca del Guayas como fuera de ésta; energéticas dentro del Sistema Nacional Interconectado, y otras funciones como el control de inundaciones aguas abajo, todo ello junto con una meteorología y clima muy dependientes de diferentes variables oceánicas y atmosféricas, con una gran influencia del fenómeno de El Niño (De Guenni *et al.*, 2017). Se trata de un sistema complejo donde el acceso a información hidrometeorológica de calidad en tiempo real supone un gran avance para la gestión óptima de los embalses.

El SHAD desarrollado en este estudio tiene múltiples objetivos, centrados en maximizar el uso de conjuntos de datos disponibles. Estos datos provienen tanto de las bases internas de las centrales hidroeléctricas como de fuentes externas, incluyendo modelos meteorológicos. La integración de esta información tiene como finalidad proporcionar datos útiles en tiempo real que puedan ser aplicados en la operación de centrales hidroeléctricas y órganos de desagüe.

Los objetivos específicos del SHAD son:

- Optimización de la gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Guayas: el SHAD está diseñado para mejorar la administración de recursos hídricos, contribuyendo así a un uso más sostenible del agua en la cuenca.
- Detección temprana y atenuación de eventos de inundación: el sistema busca minimizar los riesgos asociados con inundaciones aguas abajo de las centrales hidroeléctricas, proporcionando herramientas para una detección y respuesta tempranas.
- Optimización de la producción de energía en las centrales hidroeléctricas: mediante la integración y análisis en tiempo real de los datos, y por medio de una operación más eficiente de las centrales se consigue el aumento de la producción energética.

En términos generales, un sistema de ayuda a la decisión (SAD) es una infraestructura computacional diseñada para asistir en las actividades de toma de decisiones. Este sistema facilita el proceso de juicio de los decisores sin llegar a tomar la decisión en sí misma (Hersh, 1999). Su desarrollo involucra diversas disciplinas, incluyendo informática, estadística, psicología y teoría de la decisión (Mysiak, Giupponi, & Rosato, 2005).

Desde finales de la década de 1970 ha habido un considerable desarrollo en la implementación de SAD en la gestión de recursos hídricos (Johnson, 1986). Este crecimiento se ha acelerado hasta la fecha debido tanto a las mejoras en el entendimiento de los procesos involucrados en los ciclos hidrológicos y meteorológicos como a los avances significativos en computación, tecnología de sensores y comunicaciones. Además, la

creciente urgencia provocada por los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua ha intensificado la necesidad de tales sistemas. Estas evoluciones han expandido tanto la disponibilidad de datos como la capacidad de cómputo, ofreciendo actualmente diversas herramientas y opciones para su desarrollo (Wardropper & Brookfield, 2022). Un componente esencial de los SAD en la gestión de recursos hídricos son los modelos hidrológicos. Estos modelos permiten, entre otras usos, la detección temprana de eventos de inundación mediante la transformación de datos de precipitación en caudales de agua (Smith *et al.*, 2016).

Una de los principales desafíos a la hora de gestionar el recurso hídrico es compatibilizar la disponibilidad de agua almacenada con la protección frente a inundaciones, donde bajo condiciones normales suele existir un conflicto (Ahmad, El-Shafie, Razali, & Mohamad, 2014). La optimización de ambas dependerá de la capacidad de anticipar los caudales de ingreso en los embalses previo a su ocurrencia.

El caudal superficial disponible estará determinado por el ciclo hidrológico y sus diferentes componentes; en resumen, será la precipitación que no infiltra en el suelo ni se evapora, y discurre a través de laderas, corrientes, ríos, lagos o embalses (Sitterson *et al.*, 2018).

Una de las principales razones para la elaboración de modelos hidrológicos es extrapolar los datos hidrometeorológicos medidos hacia el futuro y de esta manera evaluar el impacto del cambio hidrológico futuro (Beven, 2011). A partir únicamente de la medida de variables meteorológicas hasta el momento presente, la frontera de predicción a futuro para la esorrentía superficial será el tiempo de concentración de la cuenca, siendo la capacidad de predicción del modelo máxima para el

instante presente y mínima al final del tiempo de concentración, donde ya solo se reflejarán los flujos subsuperficiales y profundos (Chow, 1964).

El desarrollo de modelos meteorológicos de la últimas dos décadas hacen que una predicción a cinco días es en la actualidad tan exacta como una predicción a un día de 1980, con pronósticos útiles en la actualidad que llegan a los 9 o 10 días (Alley, Emanuel, & Zhang, 2019), habiendo mejorado también los pronósticos estacionales principalmente mediante la incorporación de modelos oceánicos.

La predicción meteorológica mediante modelos numéricos se basa en la capacidad de una adecuada representación de las condiciones iniciales junto con una adecuada capacidad para modelizar las diferentes interacciones que se producen en las diferentes capas de la atmósfera, la tierra y los océanos, y las interconexiones entre éstas. Para ello es necesaria una gran cantidad de recursos para monitorización de atmósfera, océanos y tierra; una importante comunidad científica dedicada al estudio y modelación numérica de las distintas interacciones océano-tierra-atmósfera, y una gran capacidad de computación para el cálculo de estos sistemas complejos (Mariotti, Ruti, & Rixen, 2018). Así, se han conseguido grandes avances en la exactitud de los pronósticos, principalmente a partir de centros de predicción numérica que han dispuesto de numerosos recursos de monitorización, desarrollo y computación, como el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) y la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). El fácil acceso, y la homogeneidad espacial y temporal de estos modelos han favorecido su uso en modelización hidrológica (Raimonet *et al.*, 2017).

El proceso de modelizar caudales a partir de lluvia y otras variables meteorológicas es un proceso que comprende diversas fases que inician con el modelo perceptual del hidrólogo encargado de su desarrollo, que dependerá de su entrenamiento y experiencias previas, así como de su percepción del comportamiento de las cuencas a modelizar. A partir de este modelo perceptual se decidirá el modelo conceptual o ecuaciones a utilizar que darán paso al modelo procedimental o código para correr el modelo en un computador. Con el modelo desarrollado se procederá a su calibración y posteriormente a su validación de ser procedente; de no serlo, se revisarán los pasos anteriores (Beven, 2011). Todo el proceso estará determinado por muchos factores interactuando entre ellos, como las variables meteorológicas de entrada y caracterización física de la cuenca; los objetivos del modelo que determinarán la necesidad de precisión espacial y temporal de su salida; los algoritmos utilizados para su calibración, o la capacidad de computación y tiempos de respuesta esperados.

La integración de los pronósticos meteorológicos en tiempo real con modelos hidrológicos desarrollados específicamente para optimizar la explotación de los recursos hidroeléctricos son la parte fundamental de la implementación de un Sistema Hidrológico de Ayuda a la Decisión (SHAD), concebido para recolectar, procesar, modelar y presentar datos hidrometeorológicos dirigidos a mejorar la operación de los embalses Daule-Peripa y Baba y las centrales hidroeléctricas Marcel Laniado de Wind y Baba dentro del sistema hídrico de la cuenca del río Guayas y sus trasvases.

En el presente trabajo se describen la herramienta desarrollada y los resultados obtenidos tanto en relación con el comportamiento de los modelos hidrológicos como con la mejora en la gestión de los embalses y centrales hidroeléctricas.

Materiales y métodos

Las opciones disponibles para la implementación del sistema son múltiples y con múltiples interacciones e incompatibilidades entre las diferentes opciones; tipo de modelo hidrológico; ecuaciones empleadas; estadísticos utilizados para su calibración y validación; uso de aplicaciones comerciales frente a elaboración propia; tipo de aplicación gráfica; incorporación de bases de datos; incorporación de pronósticos meteorológicos; interacción entre los diferentes módulos y bases de datos, etcétera, por lo que en la solución adoptada se ha ajustado, asegurando un correcto funcionamiento del sistema y la capacidad de desarrollos futuros.

Como solución final, el sistema hidrológico de ayuda a la decisión ha sido programado íntegramente en Python (Rossum, 1995) y consta principalmente de tres componentes/módulos que se ejecutan automáticamente según el esquema de la Figura 1.

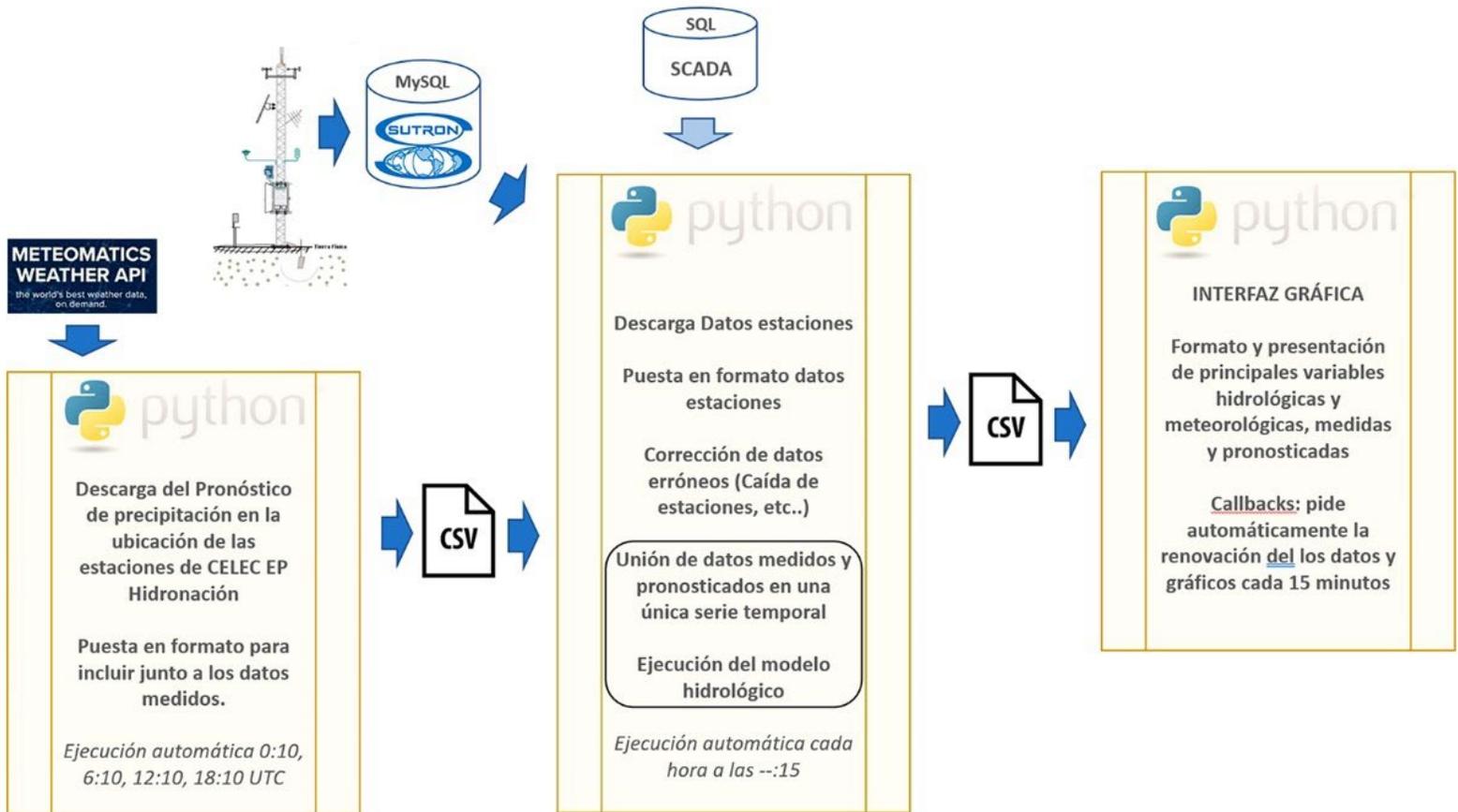


Figura 1. Esquema de operación del SHAD.

El primer componente/módulo realiza la descarga y puesta en formato de los pronósticos de precipitación puntuales en las estaciones pluviométricas disponibles.

Resultado de este componente/módulo se crea un archivo donde se incluyen los pronósticos en escala horaria y hora local.

El siguiente componente/módulo —ejecutado horariamente una vez recibidos los datos provenientes de las estaciones meteorológicas— realiza las siguientes funciones:

- Incorpora los datos de las diferentes fuentes: archivo .csv de salida del primer código, base de datos MySQL de estaciones meteorológicas y base de datos SQL del SCADA.
- Corrige datos erróneos de estaciones meteorológicas caídas.
- Realiza la unión de datos medidos y pronosticados en una única serie temporal.
- Ejecuta el modelo hidrológico y obtiene los caudales de ingreso previstos en los embalses.

Este componente/módulo se ejecuta tres veces por cada central para los diferentes modelos meteorológicos de precipitación utilizados (MIX, ECMWF-Ensemble cuantil 0.1 y ECMWF-Ensemble cuantil 0.9), obteniendo los caudales de ingreso en el embalse Daule-Peripa y en el embalse Baba. Como resultado, se crea otro archivo con la salida del modelo hidrológico para cada uno de los modelos meteorológicos utilizados.

El tercer componente/módulo es la interfaz gráfica que lee la salida del segundo código, poniendo en formato y representando gráficamente las principales variables hidrometeorológicas registradas y previstas aguas arriba y aguas abajo de las centrales. Se dispone de una interfaz para la operación de Daule-Peripa y otra para Baba.

Área de estudio

La cuenca del río Guayas es la mayor cuenca hidrográfica de la costa del Pacífico en América del Sur, con una extensión en Guayaquil de 34 500 km², siendo fundamental en el abastecimiento para consumo humano y riego de más de ocho millones de personas y 300 000 ha de cultivos en las provincias de Guayas, Manabí, Los Ríos y Santa Elena. Este abastecimiento se realiza a través de diferentes trasvases: Trasvase Conguillo-La Esperanza, La Esperanza-Poza Honda, Trasvase Daule Vinces y Trasvase Santa Elena. Se incluye un esquema de las principales instalaciones hidráulicas en la Figura 2.

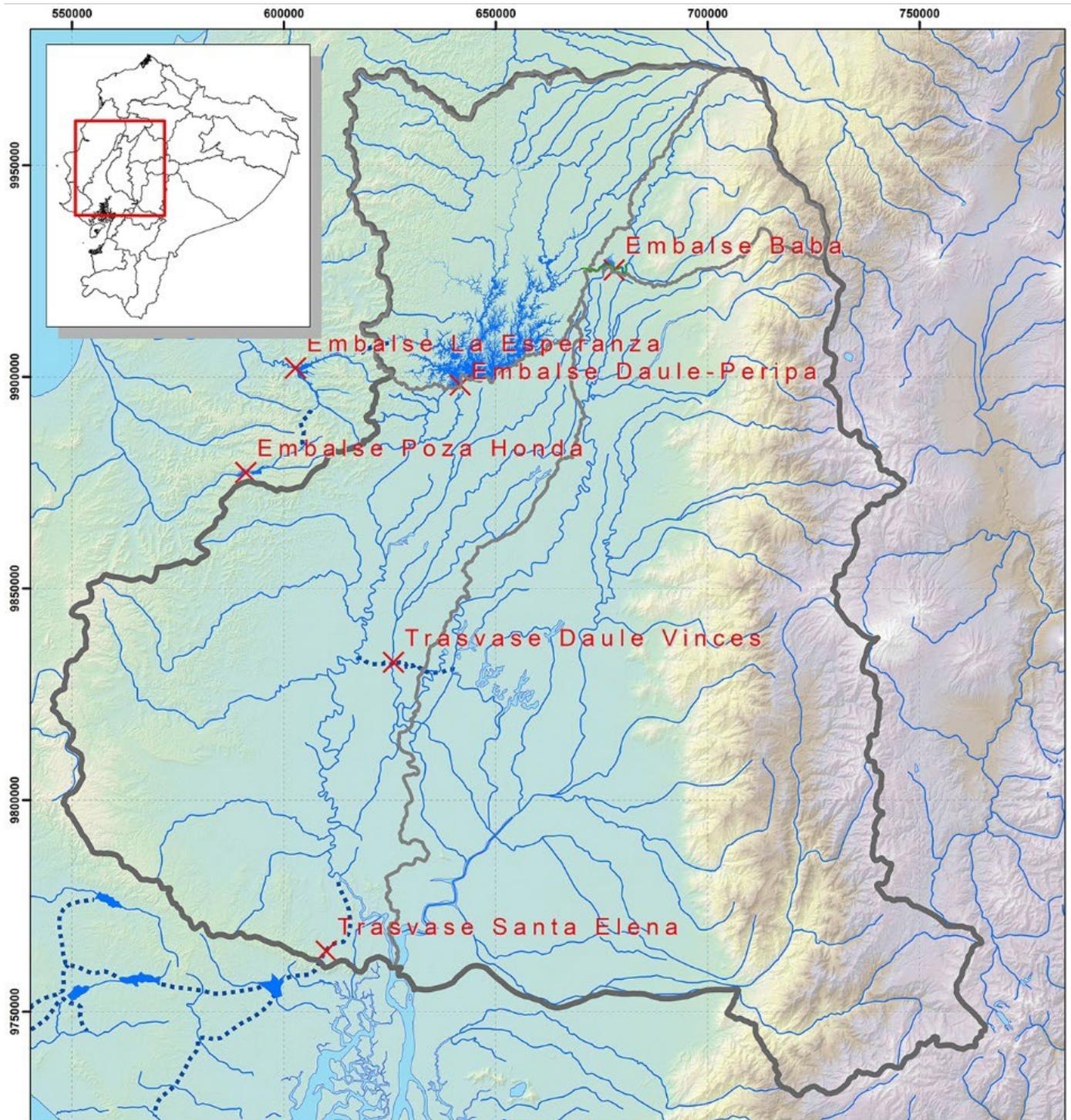


Figura 2. Principales embalses y trasvases en la cuenca del río Guayas.



CELEC EP Hidronación realiza la operación y mantenimiento de las centrales hidroeléctricas Marcel Laniado de Wind y Baba ubicadas en los embalses Daule-Peripa y Baba, respectivamente, ambas situadas en la cuenca del río Guayas (Figura 3).

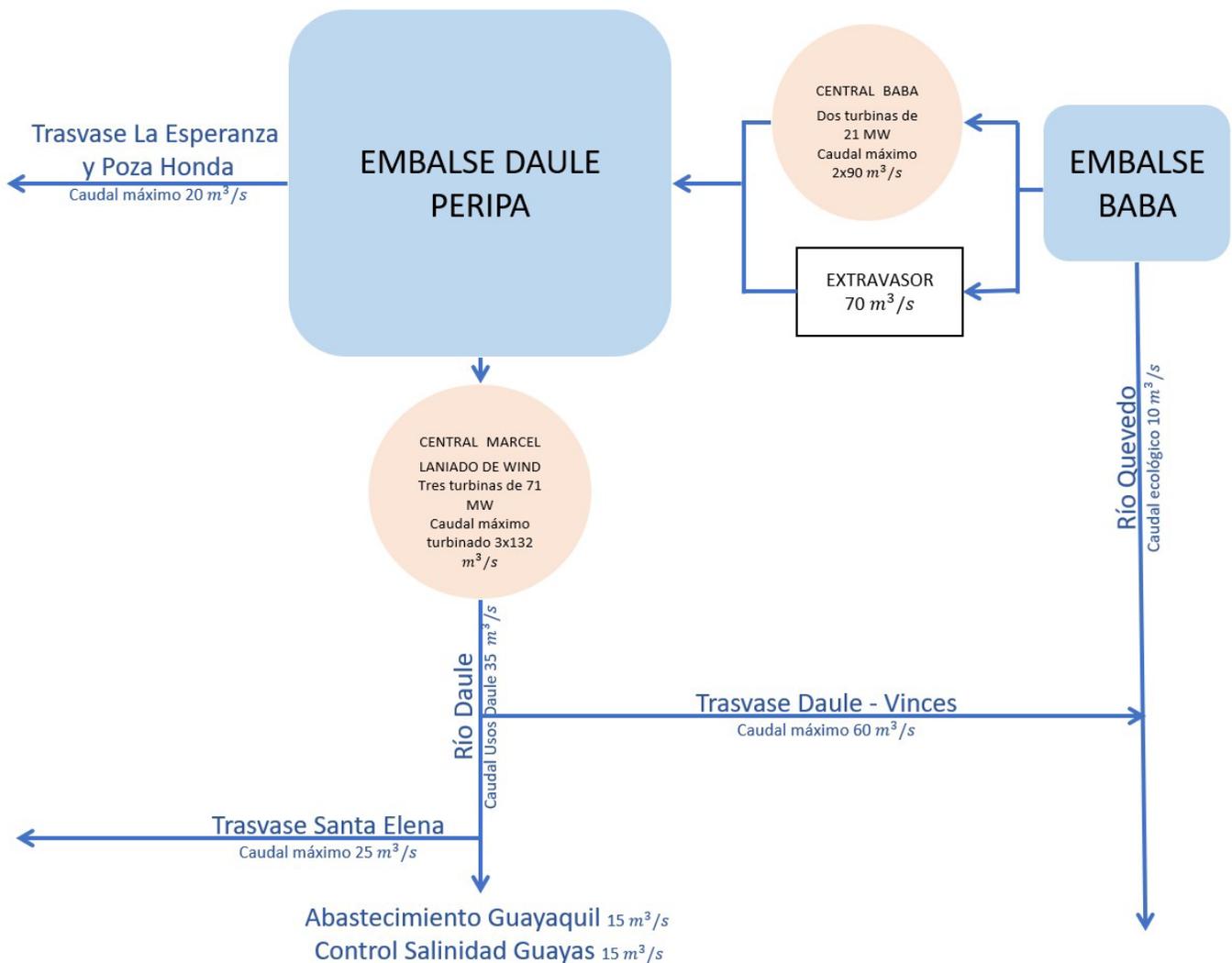


Figura 3. Esquema de demandas máximas e instalaciones hidráulicas en la cuenca del río Guayas (Ecuador).

La cuenca del Guayas y en general la zona costera del Ecuador tienen un régimen de precipitaciones unimodal, con un máximo de precipitación en los meses de febrero-marzo y un periodo seco con mínimas precipitaciones entre los meses de agosto y septiembre (Hidalgo-Proaño, 2017). La media histórica (1965-2017) de precipitación anual en la cuenca del Guayas es de 1 932 mm/año, habiendo llegado a duplicarse en años con El Niño del este (Wang, Deser, Yu, DiNezio, & Clement, 2012).

El embalse Daule-Peripa, con una capacidad máxima normal de 5 200 Hm³ y un área de inundación para este nivel de 264 km², es la principal reserva de agua de Ecuador, que garantiza el acceso al recurso hídrico en la costa durante la temporada seca (julio a diciembre). Sus principales funciones son las siguientes:

- Abastecer de agua para consumo de personas, y agua para riego a las provincias de Guayas, Manabí, Los Ríos y Santa Elena.
- Abastecer de agua para riego a la provincia de Los Ríos a través del trasvase Daule-Vinces (2016) y a la provincia de Santa Elena a través del trasvase Santa Elena.
- Controlar inundaciones en poblaciones aguas abajo del embalse.
- Controlar la intrusión salina en el río Guayas.
- Generación hidroeléctrica mediante tres turbinas de 71 MW c/u, aproximadamente 1 015 GWh/año, siendo la segunda reserva energética más importante del país.

El embalse Baba, con una capacidad máxima de 100 hectómetros cúbicos, desde su puesta en operación en 2013 se ha convertido en un elemento fundamental para la captación de aguas hacia el embalse Daule-Peripa, a través del trasvase de la cuenca del río Quevedo a dicho embalse. Sus principales funciones son las siguientes:

- Contribución al llenado del embalse Daule-Peripa mediante el trasvase de agua proveniente del río Quevedo.
- Atenuación de crecientes mediante trasvase de hasta 250 m³/s a la cuenca del Daule-Peripa.
- Generación hidroeléctrica mediante dos turbinas de 21 MW c/u, con una producción media anual de 150 GWh/año.

Información disponible

Red hidrometeorológica

Para el registro en tiempo real de las condiciones meteorológicas e hidrológicas se dispone de una red de 25 estaciones hidrometeorológicas distribuidas en las cuencas vertientes a los embalses y aguas abajo de éstos, con medida de precipitación en las 25. En siete de ellas se mide el nivel en ríos y embalses, y seis disponen de estaciones meteorológicas completas (temperatura, viento, radiación, presión barométrica y humedad) (Figura 4).

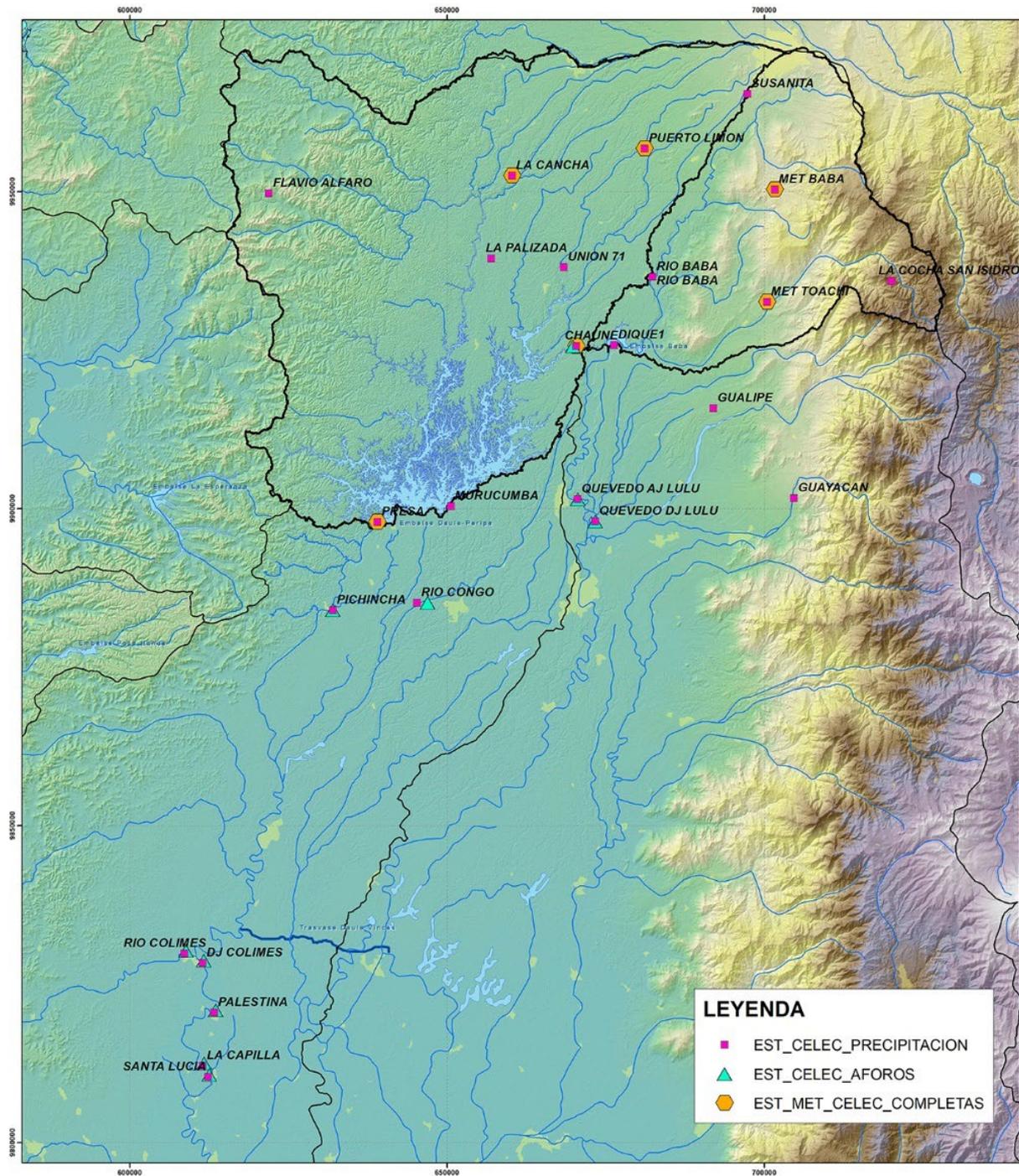


Figura 4. Red de estaciones hidrometeorológicas operadas por CELEC EP Hidronación.

Las diferentes estaciones se comunican por radio con la estación central situada en la presa Daule-Peripa. Aunque la resolución temporal de los datos es variable entre 5 y 30 minutos, dependiendo del tipo de sensor, los datos son enviados a la estación base horariamente y son incorporados mediante *software* SUTRON en una base de datos MySQL.

Base de datos de integración SCADA

Paralelamente al desarrollo del SHAD se ha realizado la integración en un solo servidor de diferentes fuentes de datos de diversos fabricantes, ubicadas en redes dispersas por las centrales hidroeléctricas (Perez-Suarez & Cedeño-Villarroel, 2021).

Los diferentes datos por integrar son los siguientes:

- **Generación bruta:** los medidores de generación bruta de las tres unidades se encuentran monitoreados por el sistema SCADA de la Central Marcel Laniado de Wind y se accederá a sus datos utilizando el servidor OPC.
- **Nivel de descarga:** se encuentra monitoreado por el sistema SCADA de la Central Marcel Laniado de Wind y se accederá a sus datos utilizando el servidor OPC.
- **Nivel del embalse:** el nivel del embalse se encuentra monitoreado en el sistema de meteorología SUTRON y para acceder se establece comunicación con la BDD. Debido a que la información guardada en la base de datos tiene un retardo de al menos 10 minutos, se plantea la opción de conectarse directamente a la red meteorológica

utilizando un conversor análogo a ModbusOnTcp para obtener el dato del nivel del embalse en tiempo real, es decir, directamente del sensor.

- **Generación neta:** se obtiene directamente de los medidores de energía ION por medio de Modbus, consumiendo datos directamente desde el equipo.

Al realizar la integración de los múltiples sistemas existentes en las Centrales de Celec Ep Hidronación se hizo evidente la necesidad de compartir datos desde una base de tipo SQL, facilitando el acceso a los datos de caudales requeridos para el funcionamiento del SHAD.

Pronósticos meteorológicos

Con objeto de mejorar la capacidad predictiva del modelo hidrológico para caudales futuros y disponer de predicciones fiables más allá del tiempo de concentración de las cuencas, se determinó la conveniencia de incorporar pronósticos meteorológicos al sistema, principalmente de precipitación. Para ello se evaluaron diferentes opciones, teniendo en cuenta la fiabilidad de los modelos, así como su resolución espacial y temporal, que a su vez ha tenido influencia en el modelo hidrológico finalmente adoptado.

Con objeto de disponer de la máxima resolución temporal de los modelos hidrológicos con el mayor alcance a futuro del pronóstico se utilizará el modelo MIX proporcionado por METEOMATICS. El modelo Mix utiliza para los primeros 10 días el modelo ECMWF realizado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Persson, 2001)

con resolución temporal de 1 hora (hasta el 2º día), 3 horas (hasta el 6º día) y 6 horas (hasta el 10º día); a partir del 10º día se usa el modelo NCEP realizado por la NOAA (Saha *et al.*, 2006) hasta el 14º día; después del 14º día se vuelve a usar el ECMWF, que tiene alcance de 46 días, con una resolución temporal de seis horas. Desde este modelo se descargará con resolución horaria la precipitación, además de la temperatura y el flujo de radiación solar (directa + difusa) en W/m^2 .

Para la gestión eficiente de la operación de los embalses es fundamental disponer tanto del ingreso esperado como de su incertidumbre (caudal máximo y mínimo esperado). Para ello, junto con la modelización de la precipitación futura, también se realizará la modelización del modelo meteorológico ECMWF-Ensemble (Molteni, Buizza, Palmer, & Petroliagis, 1996), que a diferencia del modelo ECMWF-IFS (determinístico), se trata de un modelo probabilístico compuesto por 50 miembros (50 diferentes modelizaciones), con pequeñas diferencias en las condiciones iniciales. Mediante la incorporación de los cuantiles 0.1 y 0.9 de este modelo en el sistema, se mejora la estimación de incertidumbre en los pronósticos de caudales, pudiendo así modelizar hidrológicamente los caudales de ingreso esperados para diferentes probabilidades (Dion, Martel, & Arsenault, 2021) (Figura 5).

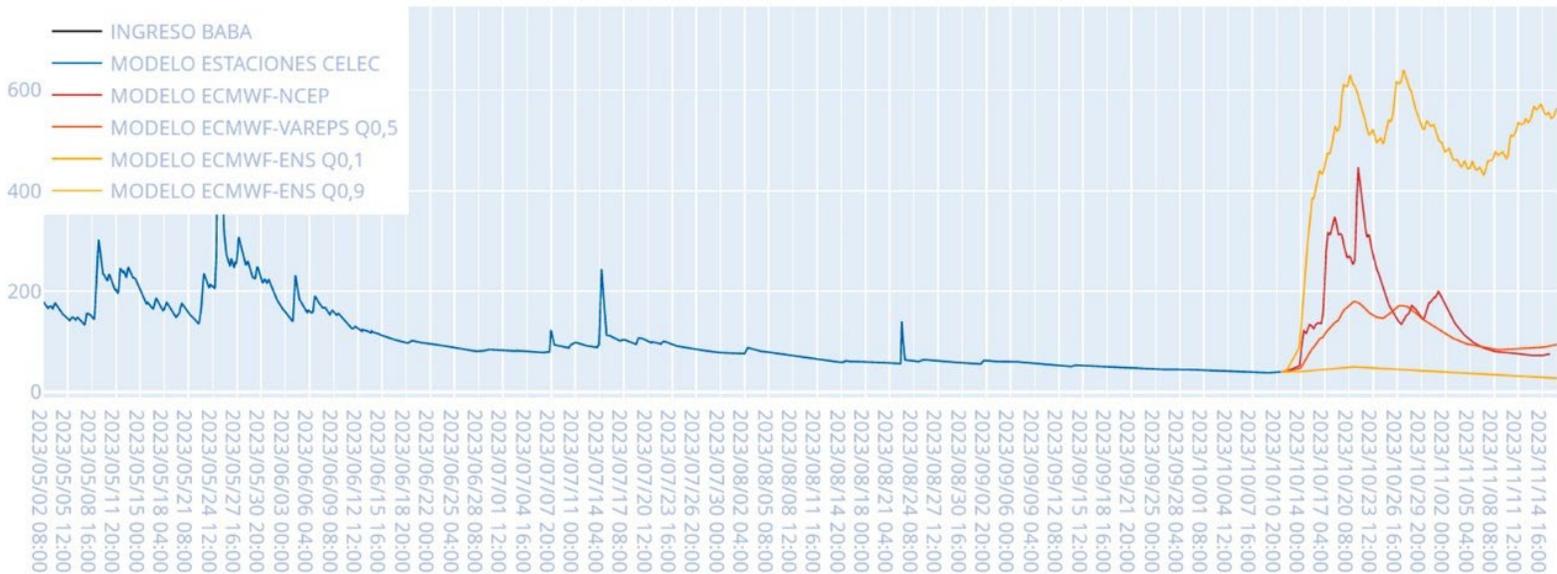


Figura 5. Salida en SHAD de modelos hidrológicos de ingresos al embalse Baba en m^3/s . Estimación hasta el presente mediante red de estaciones y a futuro mediante la incorporación de los modelos MIX y ECMWF Esemble cuantiles 0.1 y 0.9.

El modelo precipitación-escorrentía

Los componentes habituales de un modelo hidrológico son las entradas, condiciones de contorno, parámetros, ecuaciones del modelo y salidas. Existen diversas clasificaciones de los modelos (Jajarmizadeh, Harun, & Salarpour, 2012). Según su estructura, se podrían diferenciar entre abstractos o matemáticos, y con base física (Chow, 1964). Dentro de los matemáticos, a su vez, se podrían dividir en modelos de caja negra o empíricos que buscan establecer la relación entre entradas y salidas sin intentar comprender los diferentes procesos físicos que se dan en el ciclo hidrológico; dentro de éstos estarían, por ejemplo, el método del número

de curva (Bosznay, 1989) o los modelos basados en redes neuronales artificiales (Dawson & Wilby, 2001). Por otro lado estarían los conceptuales y determinísticos, o físicos, que de forma más o menos simplificada, respectivamente, intentan representar los procesos físicos que se dan en la cuenca. En función de la variabilidad espacial también pueden clasificarse como agregados, semidistribuidos y distribuidos.

Para el problema que se nos plantea se ha escogido un modelo conceptual de base física y semidistribuido, pues este tipo de aproximaciones favorece su capacidad de ajuste en diferentes tipos de cuencas con diferentes densidades de estaciones pluviométricas, además de reducir los tiempos de cálculo y calibración del modelo (Knudsen, Thomsen, & Refsgaard, 1986).

Además, por las características del área de estudio era un requerimiento importante disponer de un modelo de gran resolución temporal.

Este modelo deberá tener un buen comportamiento en caudales altos más allá del rango de los datos de calibración o entrenamiento, por lo que se descartarán modelos de tipo caja negra, como los basados en redes neuronales artificiales, debido a riesgo de sobreajuste de este tipo de modelos (Kingston, Maier, & Lambert, 2005).

Se desarrollaron y calibraron dos modelos para las cuencas vertientes a los embalses Daule-Peripa y Baba. Aunque el código utilizado en ambos casos será el mismo, no así lo será el número de subcuencas y tramos de río utilizado para cada una de ellas, que será incluido en el cálculo mediante un archivo externo al modelo que contendrá los datos particulares de cada subcuenca.

El trazado de las subcuencas se hizo en función de las características topográficas de las cuencas y de las estaciones pluviométricas disponibles, de forma que el modelo pueda evaluar adecuadamente la distribución espacial de precipitación captada por las estaciones. Para la cuenca Baba, 7 subcuencas (Tabla 1); para la cuenca Daule-Peripa, 10 subcuencas (Tabla 2).

Tabla 1. Características de las subcuencas contempladas en el modelo hidrológico de ingresos al embalse Baba.

Subcuenca	C_B_01	C_B_02	C_B_03	C_B_04	C_B_05	C_B_06	C_B_07
Area (km²)	88.81	75.50	307.64	156.67	200.61	274.81	390.58
Tiempo tránsito río (h)	0.00	0.99	0.99	2.33	3.13	3.45	5.11
Tiempo punta cuenca (h)	12.22	11.12	12.34	8.52	20.15	10.78	14.90

Tabla 2. Características de las subcuencas contempladas en el modelo hidrológico de ingresos al embalse Baba.

Subcuenca	C_DP 01	C_DP 02	C_DP 03	C_DP 04	C_DP 05	C_DP 06	C_DP 07	C_DP 08	C_DP 09	C_DP 10
Área (km²)	402.11	374.32	78.11	379.75	273.31	145.35	297.40	1033.33	672.73	494.11
Tiempo tránsito río (h)	0.00	2.13	2.13	5.19	5.19	10.37	10.37	12.96	12.13	10.37
Tiempo punta cuenca (h)	0.55	3.07	2.60	5.24	5.54	10.27	10.59	12.63	11.90	10.36

A continuación se describen brevemente las soluciones adoptadas para la modelización de los diferentes procesos involucrados en la transformación de precipitación en escorrentía.

Distribución de la precipitación

Para la distribución por áreas de la precipitación se utiliza el método de los coeficientes de Thiessen (Rhynsburger, 1973). Este método se considera el más adecuado debido a que combina sencillez con una adecuada distribución de la precipitación, evitando el efecto de subestimación de valores extremos en los puntos situados entre estaciones (aumentando los mínimos y disminuyendo los máximos), que sí se producen con otros métodos simples de interpolación como IDW, spline o Kriging, con peores resultados para mayores resoluciones temporales (Dirks, Hay, Stow, & Harris, 1998), donde son más determinantes las condiciones de humedad antecedentes.

Esta distribución (Figura 6) consigue una adecuada representación del contenido de humedad en suelo y vegetación, necesaria para una correcta estimación de la infiltración y evapotranspiración en pequeños intervalos de tiempo.

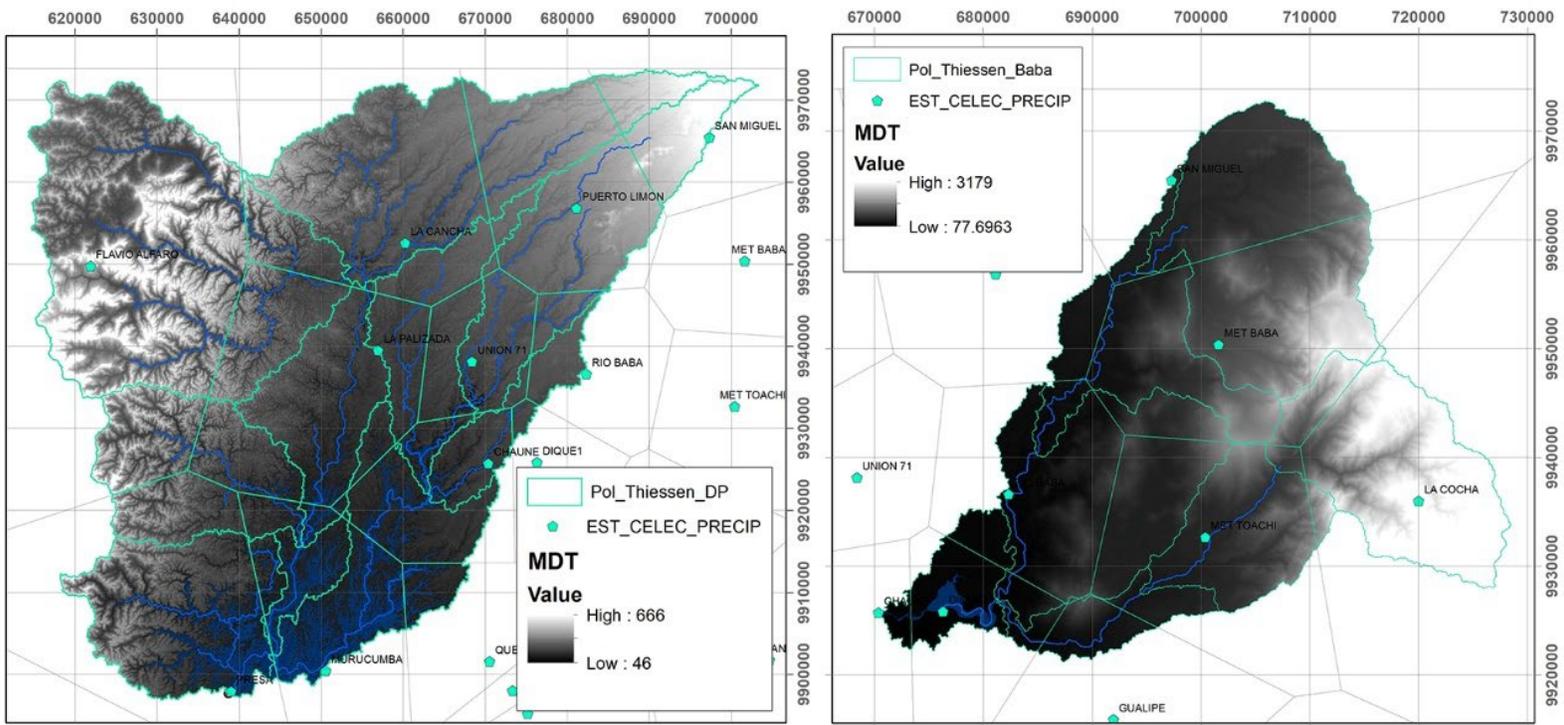


Figura 6. Polígonos de Thiessen para las subcuencas contempladas en los modelos hidrológicos de Daule-Peripa y Baba con modelo digital del terreno (MDT) en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Evapotranspiración potencial

La evaporación potencial se calcula mediante el método de Thornthwaite (Palmer & Havens, 1958), adaptado para el cálculo de la evapotranspiración potencial horaria partir de la temperatura media horaria:

$$ETP = 0.02192982 * \left(\frac{10 * T}{I} \right)^a$$

Donde:

T = temperatura media horaria en °C

$$a = 675 * 10^{-9} * I^3 - 771 * 10^{-7} * I^2 + 1792 * 10^{-5} * I + 0.49239$$

$$I = \text{índice de calor anual} = \sum_{mes=1}^{mes=12} \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

t = temperatura media mensual histórica en °C

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial en las cuencas (Daule-Peripa y Baba) se utiliza —mediante ponderación por coeficientes de Thiessen— los datos temperatura de tres estaciones meteorológicas disponibles en cada cuenca. Este dato ponderado se utilizará para todas las subcuencas.

Modelo de tanques

Se ha desarrollado un modelo hidrológico de tanques con objeto de realizar la simulación continua de los caudales de entrada a los embalses Daule-Peripa y Baba con resolución horaria. Los modelos de tanques han probado su capacidad de representar caudales en diferentes tipos de cuencas, obteniendo alta precisión en las predicciones con bajos requerimientos computacionales (Kuok, Harun, & Chan, 2011). Este tipo de modelos consisten en conjuntos de tanques con salidas hacia el cauce o hacia los otros tanques (Suryoputro, Suhardjono, Soetopo, & Suhartanto, 2017). Dependiendo de la complejidad de las respuestas de las cuencas ante la precipitación se utilizan habitualmente entre 2 y 4 tanques conectados (Song, Her, Park, & Kang, 2019). En el presente

modelo se han usado tres tanques para representar el comportamiento del agua en las diferentes capas de suelo y uno para representar la intercepción de agua por la vegetación (Figura 7).

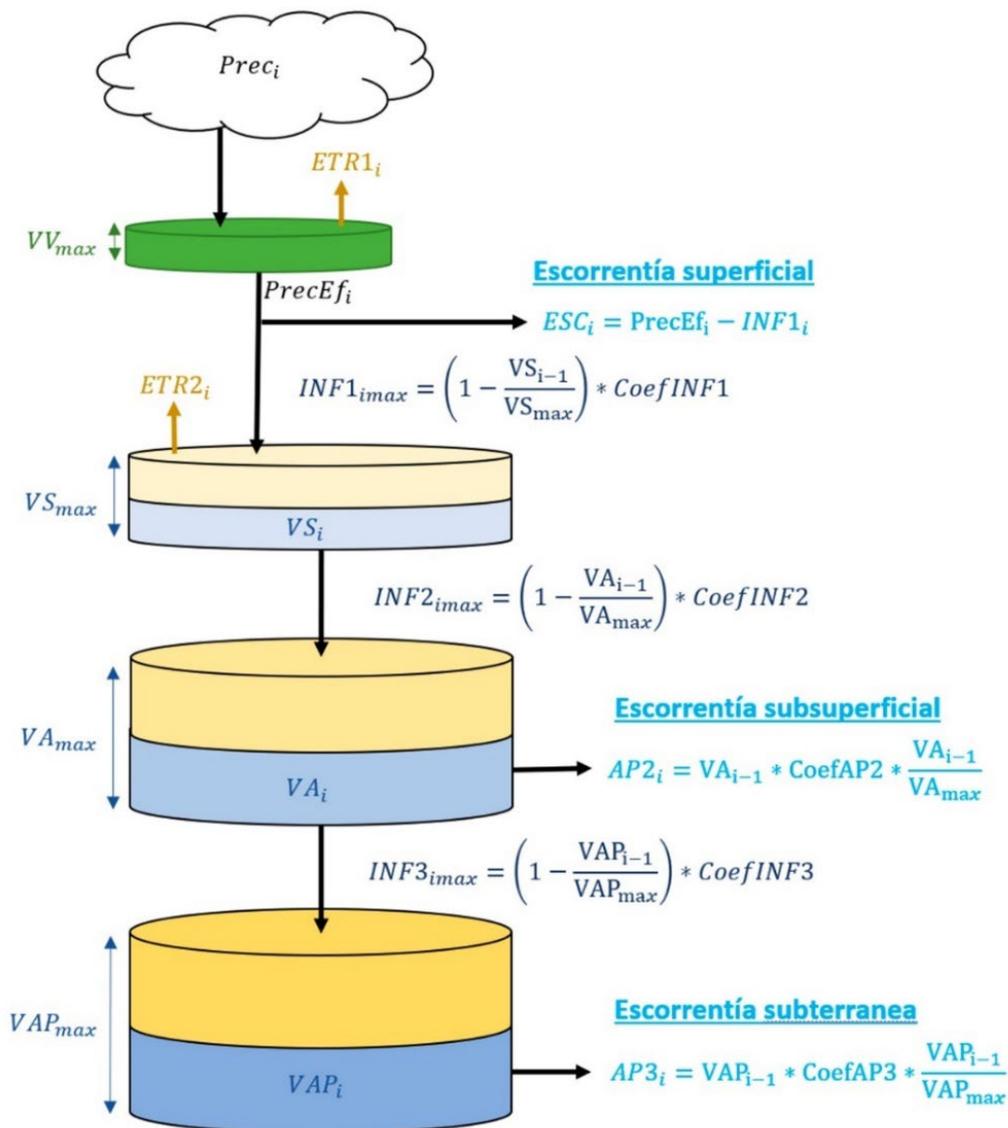


Figura 7. Esquema del modelo utilizado para la transformación de precipitación en escorrentía.

El primer tanque (VV) representa la intercepción de la precipitación que se produce en la vegetación. Para cada intervalo de tiempo, la precipitación efectiva ($PrecEf$) solo se producirá a través del exceso de agua sobre el volumen del tanque ($VVmax$), teniendo en cuenta para cada intervalo de tiempo el volumen inicial, la precipitación y la evapotranspiración ($ETR1$).

El siguiente tanque (VS) representa la capa superficial de suelo donde se encuentran las raíces de la vegetación. Parte o toda la precipitación efectiva se infiltrará ($INF1$) y el restante pasará a formar parte de la escorrentía superficial (ESC). La infiltración ($INF1$) dependerá del volumen de agua disponible en esta capa superficial de suelo al comienzo del intervalo de tiempo calculado. En este tanque se produce también evapotranspiración ($ETR2$).

El tercer tanque (VA) representa el flujo subsuperficial a lo largo de la cuenca; los ingresos se representan como $INF2$ y dependerán del volumen de agua disponible al comienzo del intervalo de tiempo calculado (VAi) y del agua disponible en el tanque anterior (VSi). Las salidas se producen en forma de escorrentía subsuperficial según descarga lineal ($AP2$) y como infiltración ($INF3$) al siguiente tanque (VAP).

El último tanque (VAP) representa el acuífero profundo donde los ingresos por infiltración desde el tanque anterior ($INF3$) dependerán del volumen de agua disponible en este acuífero profundo al comienzo del intervalo de tiempo calculado ($VAPi$). La salida considerada como flujo base de la subcuenca ($AP3$) se calculará en función del volumen de agua disponible y el porcentaje de llenado.

Ambas cuencas se han calibrado en el punto de cierre de los embalses a través del balance hídrico en éstos. Los parámetros calibrados son únicos para todas las subcuencas vertientes a cada embalse: 7 en el caso de Baba y 10 en el caso de Daule-Peripa.

Hidrogramas de salida

El cálculo del hidrograma de salida en las subcuencas se realiza a través del hidrograma unitario triangular propuesto por el Soil Conservation Service (Tschantz, s. f.); se trata de una solución ampliamente utilizada en modelación hidrológica.

El programa lo calcula en función del tiempo de concentración de cada subcuenca, incluido en el archivo externo de parámetros de cada modelo.

Tránsito en cauces

Para cada subcuenca se ha calculado el tiempo de tránsito de los cauces hasta el embalse (Works, 1995), que será el que se aplique al hidrograma de salida de la subcuenca.

Con objeto de considerar la laminación a lo largo del cauce se ha sumado al tiempo de concentración del hidrograma sintético calculado para cada cuenca el tiempo de tránsito a lo largo del cauce multiplicado por un coeficiente de calibración (Figura 8).

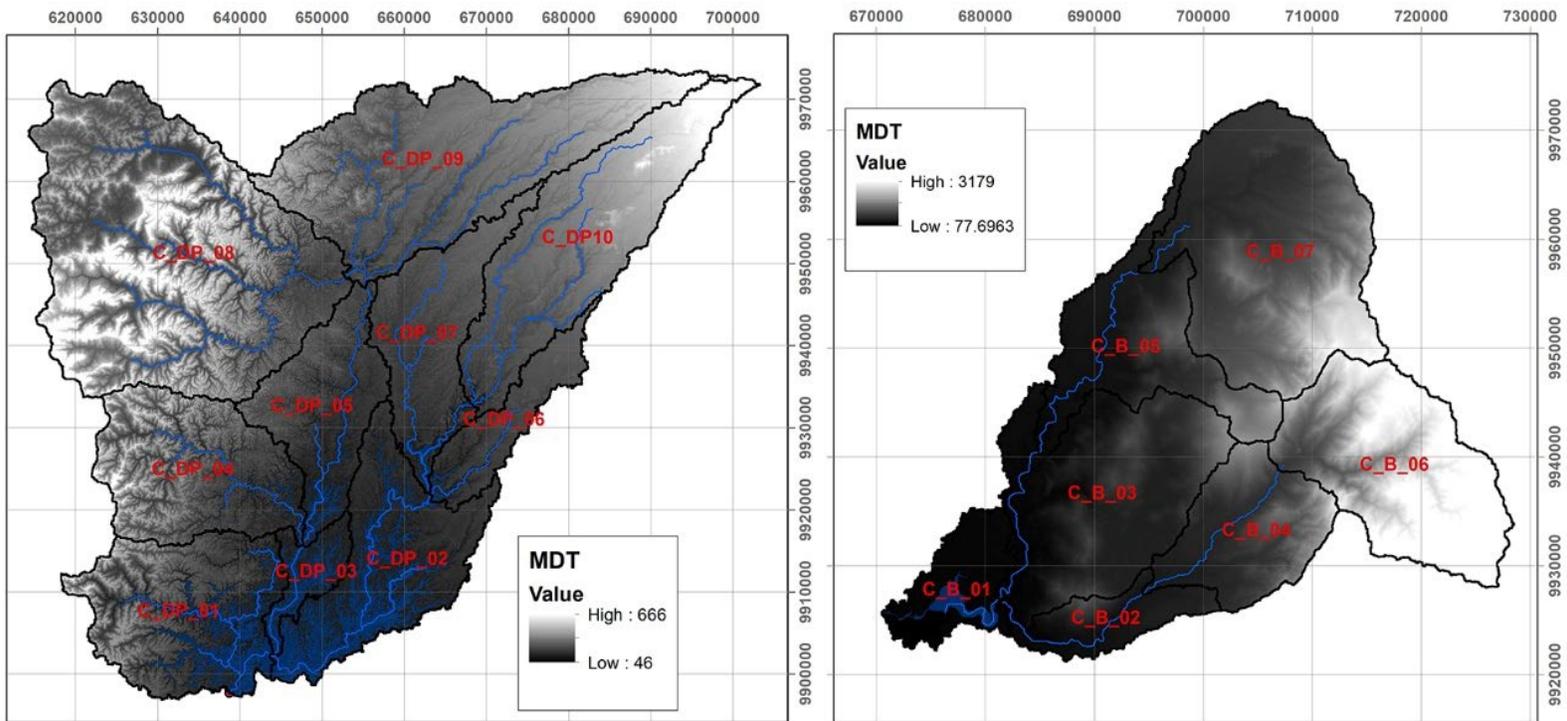


Figura 8. Subcuencas y tramos de río del modelo hidrológico semidistribuido aplicado en las cuencas Daule-Peripa y Baba con MDT (msnm).

Interfaz gráfica

La interfaz gráfica ha sido diseñada para mostrar en tiempo real y de forma clara los principales parámetros hidrológicos y meteorológicos más importantes para la generación hidroeléctrica y operación de los órganos de descarga de las centrales operadas por CELEC EP Hidronación como nivel de embalse; ingresos a partir del modelo hidrológico para diferentes modelos meteorológicos (Figura 4); niveles en los principales cursos de agua aguas debajo de las centrales, o precipitación registrada por las

estaciones meteorológicas (Figura 9 en azul) o prevista con la mayor resolución disponible en los modelos meteorológicos ECMWF y NCEP (Figura 9 en rojo). La precipitación se muestra para cada cuenca ya obtenida la media mediante polígonos de Thiessen o para cada estación por separado con objeto de detectar posibles errores.

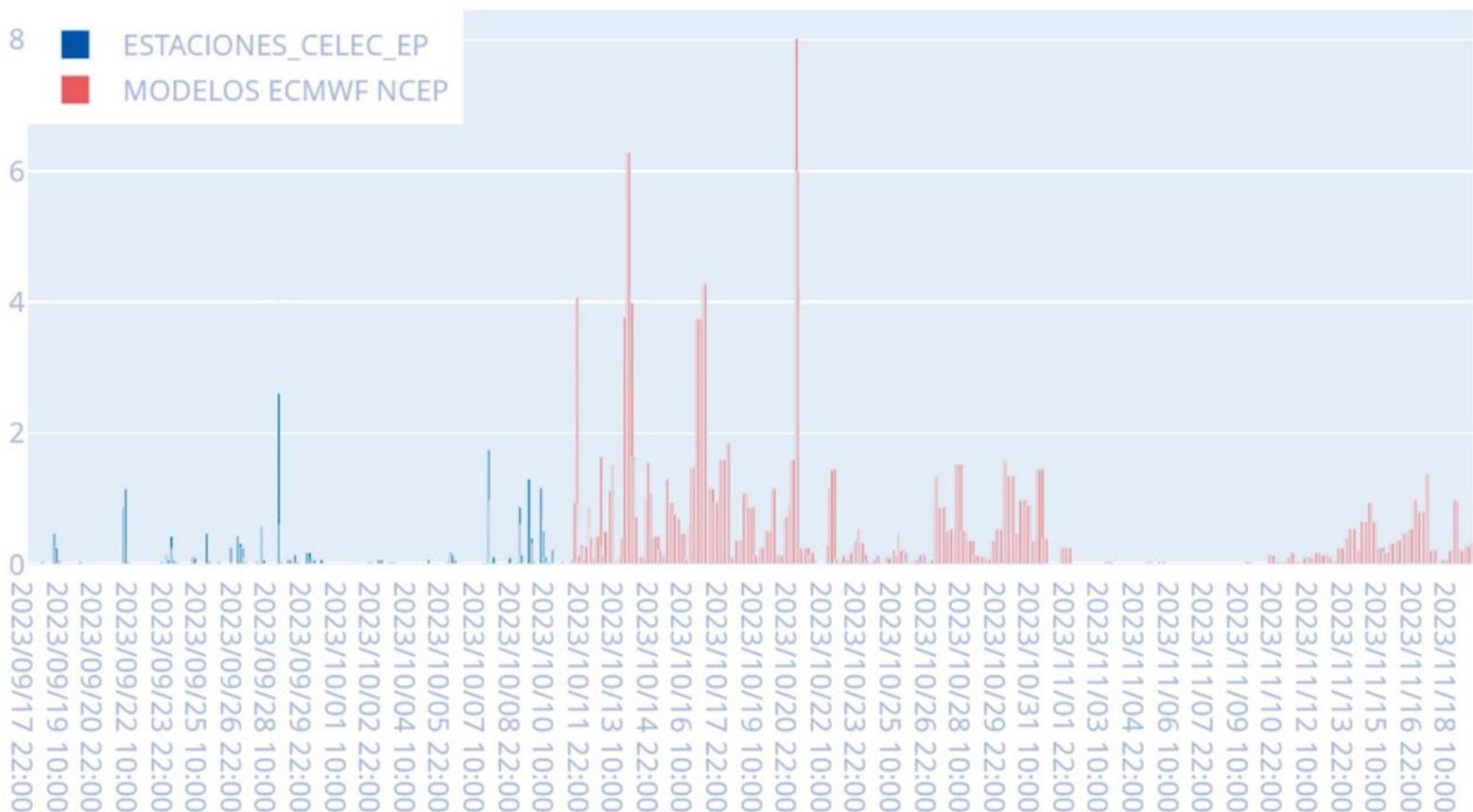


Figura 9. Ejemplo de salida de la interfaz gráfica realizada para el centro de operación de la central Baba.

Ha sido programada mediante la librería *Dash* de Python, que permite compartir la interfaz mediante URL con varios usuarios, permitiendo a cada usuario interactuar con las gráficas de forma independiente gracias a que la renderización se realiza en el propio navegador. La librería *Dash*, mediante *Calbacks*, permite la actualización automática de la información en el navegador y la interacción entre las diferentes gráficas. Así se garantiza la visualización continua de la información actualizada sin necesidad de refrescar la pantalla por parte del operador.

Mediante la interactividad con las gráficas y posibilidad de impresión de éstas se facilita su análisis y la creación rápida de informes ante circunstancias anómalas o de variación repentina.

Resultados

Calibración y validación del modelo

Los periodos de calibración y validación en principio fueron los mismos para las cuencas Daule-Peripa y Baba (11 de octubre de 2020 a 11 de julio de 2021 y 27 de noviembre de 2019 a 7 de julio de 2020, respectivamente), sin embargo los resultados en la validación para el embalse Daule-Peripa no fueron adecuados; ello, por un fenómeno muy marcado de disminución en las precipitaciones que se produjo en 2020 (Validación inicial) y que no fue tan acusado en 2019 (calibración inicial). Este fenómeno se produce debido al movimiento hacia el sur de Ecuador de la zona de convergencia intertropical y es más marcado dependiendo

del año. Por tanto se decidió realizar la calibración del embalse Daule-Peripa con el año 2019-20 y validación con 2020-21.

Los parámetros obtenidos en el proceso de calibración para todas las subcuencas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros calibrados para las subcuencas contempladas en el modelo hidrológico de ingresos al embalse Baba y al embalse Daule-Peripa.

Subuenca	Baba	Daule-Peripa
VVmax	1.5	1.5
VSmax	6	6
VAmx	225	225
VAPmax	750	400
VV_0	0	0
VS_0	0	0
VA_0	0	0
VAP_0	4.76	10
CoefINF1	20	4.3
CoefINF2	18.5	29.7
CoefINF3	0.35	0.148
CoefAP2	0.013	0.009
CoefAP3	0.0022	0.0004

La calibración se realizó en el punto de desagüe de ambas cuencas, en escala horaria en ambos casos. De manera experta se fijaron valores iniciales, mínimos y máximos para todos los parámetros. Se hizo un algoritmo de búsqueda exhaustiva mediante el cual se realizaron más de 100 000 simulaciones, en primer lugar con ajustes gruesos de diferentes grupos de parámetros simultáneamente, para finalmente efectuar ajustes mediante varios grupos de simulaciones de un solo parámetro, repetitivamente.

Como función objetivo para la calibración y validación del modelo se utilizó el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970), siempre buscando maximizar la función objetivo.

Para la determinación de los parámetros iniciales correspondientes a cada subcuenca se empleó información geoespacial de topografía, usos de suelo y tipos de suelo disponibles, que luego se calibraron y validaron (Resultados 3).

En la Tabla 4 se incluye el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970), junto con otras métricas de calidad habituales.

Tabla 4. Cálculo de coeficientes del modelo hidrológico en escala horaria.

Modelo	Calibración -validación	Periodo	Correlación	Nash-Sutcliffe	Error cuadrático medio	Diferencia de volumen	Caudal medio
Baba	Calibración	11 Oct 2020 a 11 Jul 2021	0.89	0.80	69.76	1.41%	177.33
	Validación	27 Nov 2019 a 7 Jul 2020	0.86	0.71	72.40	-5.87%	177.74
Daule-Peripa	Calibración	27 Nov 2019 a 7 Jul 2020	0.73	0.54	183.17	-0.26%	213.48
	Validación	11 Nov 2020 a 17 Jun 2021	0.72	0.49	285.27	-20.82	327.26

El coeficiente Nash-Sutcliffe puede variar en el rango $-\infty$ a 1. Un coeficiente de 1 significa un ajuste perfecto entre los datos observados y simulados; un coeficiente de 0 significa que el modelo no aporta predicciones mejores que los propios datos observados. Los resultados obtenidos para el intervalo horario de cálculo del modelo se observan en la Tabla 4.

A continuación se incluyen las gráficas de calibración y validación del embalse Baba, ambas realizadas para toda la temporada de lluvias con objeto de obtener un modelo válido para la previsión de caudales durante todo el año, obteniendo un coeficiente de Nash-Sutcliffe para la calibración de 0.80 (Figura 10) y 0.71 para la validación (Figura 11).

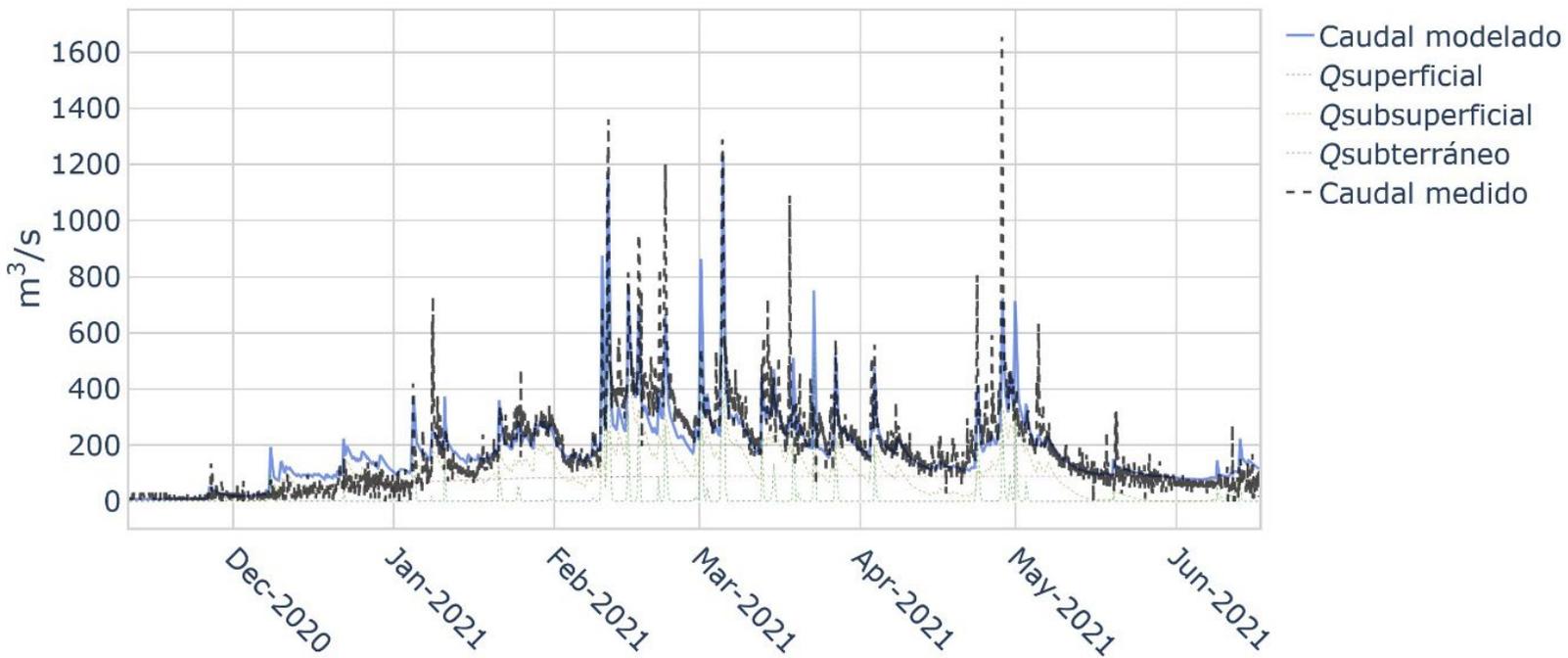


Figura 10. Resultados de la calibración del modelo para el ingreso al embalse Baba en escala horaria.

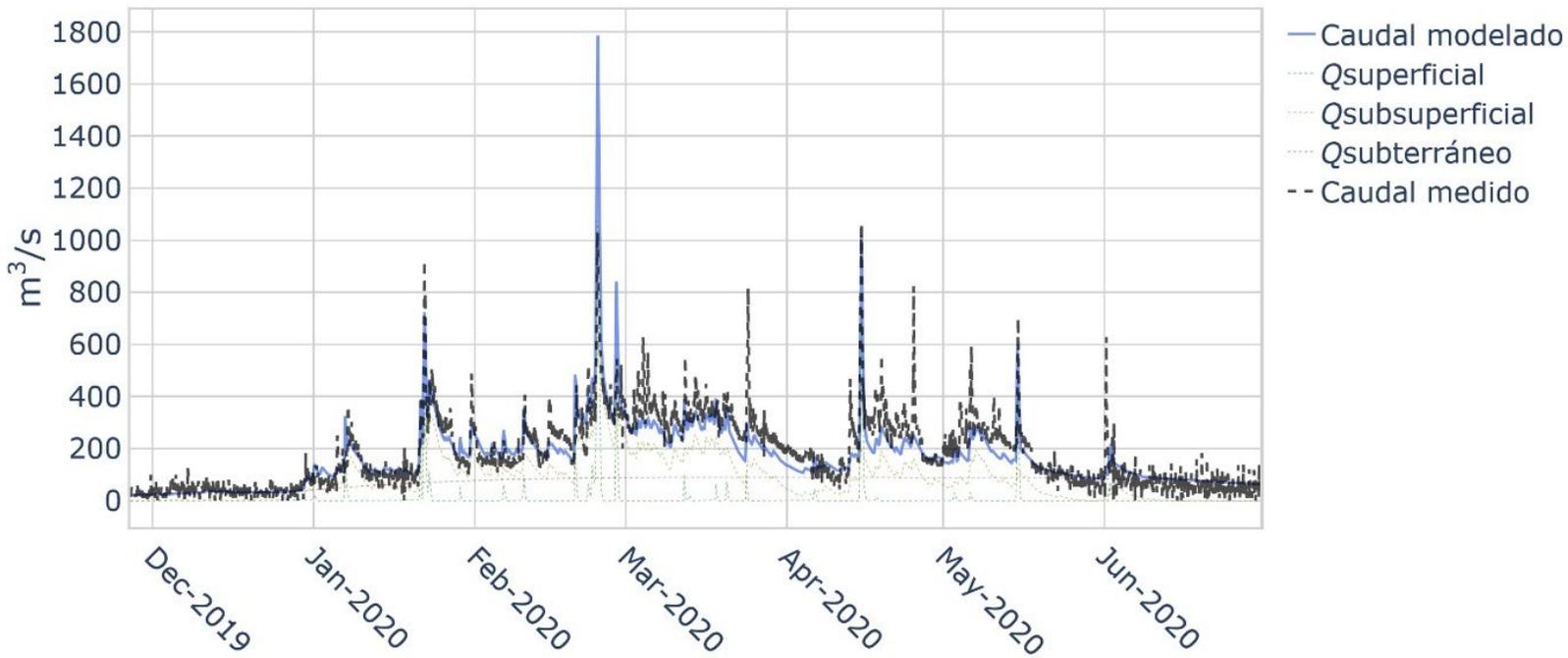


Figura 11. Resultados de la validación del modelo para el ingreso al embalse Baba en escala horaria.

En el caso del embalse Daule-Peripa se ha obtenido un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.54 y 0.49, respectivamente, para la calibración (Figura 12) y la validación (Figura 13) (Tabla 3).

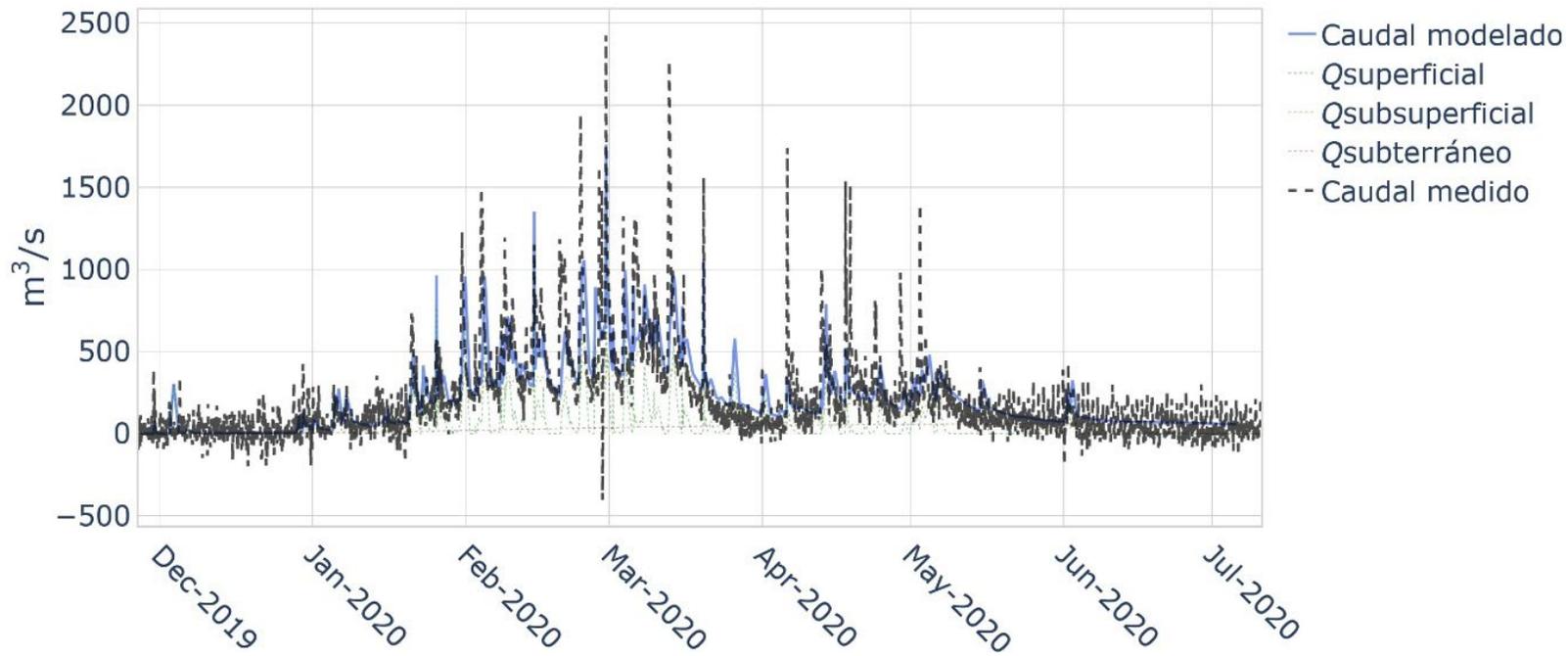


Figura 12. Resultados de la calibración del modelo para el ingreso al embalse Daule-Peripa en escala horaria.

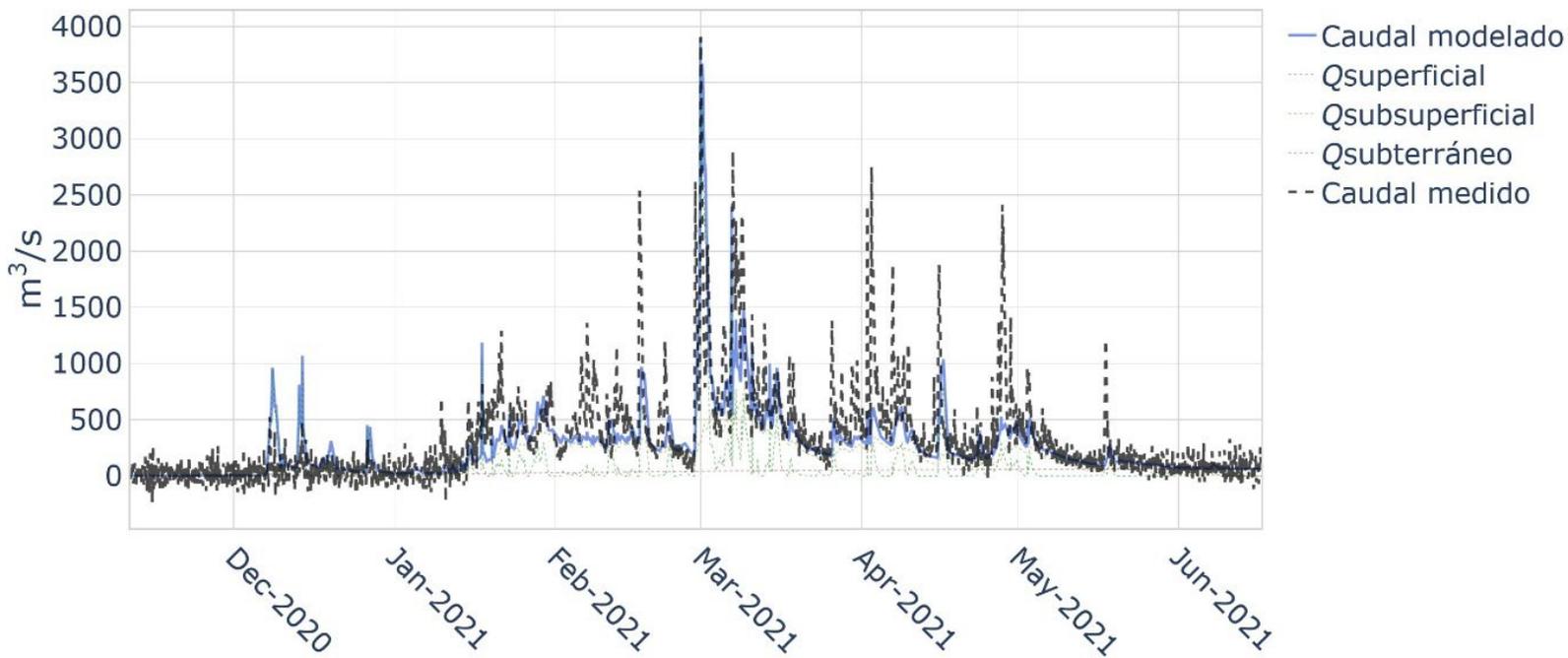


Figura 13. Resultados de la validación del modelo para el ingreso al embalse Daule-Peripa en escala horaria.

Se ha realizado la media diaria de las salidas del modelo horario para analizar su calidad de ajuste en esta escala temporal diaria, obteniendo métricas mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de coeficientes del modelo hidrológico en escala diaria.

Modelo	Calibración - validación	Periodo	Correlación	Nash-Sutcliffe	Error cuadrático medio	Diferencia de volumen	Caudal medio
Baba	Calibración	11 Oct 2020 a 11 Jul 2021	0.93	0.85	56.8	1.4 %	177
	Validación	27 Nov 2019 a 7 Jul 2020	0.89	0.77	60.2	-5.9 %	178
Daule Peripa	Calibración	27 Nov 2019 a 7 Jul 2020	0.87	0.75	115.6	-0.3 %	213
	Validación	11 Nov 2020 a 17 Jun 2021	0.81	0.62	224.2	-20.8 %	327

A continuación se incluyen las gráficas del modelo en escala temporal diaria del embalse Baba, obteniendo en escala diaria un coeficiente de Nash-Sutcliffe para en la calibración de 0.85 (Figura 14) y 0.77 para la validación (Figura 15).

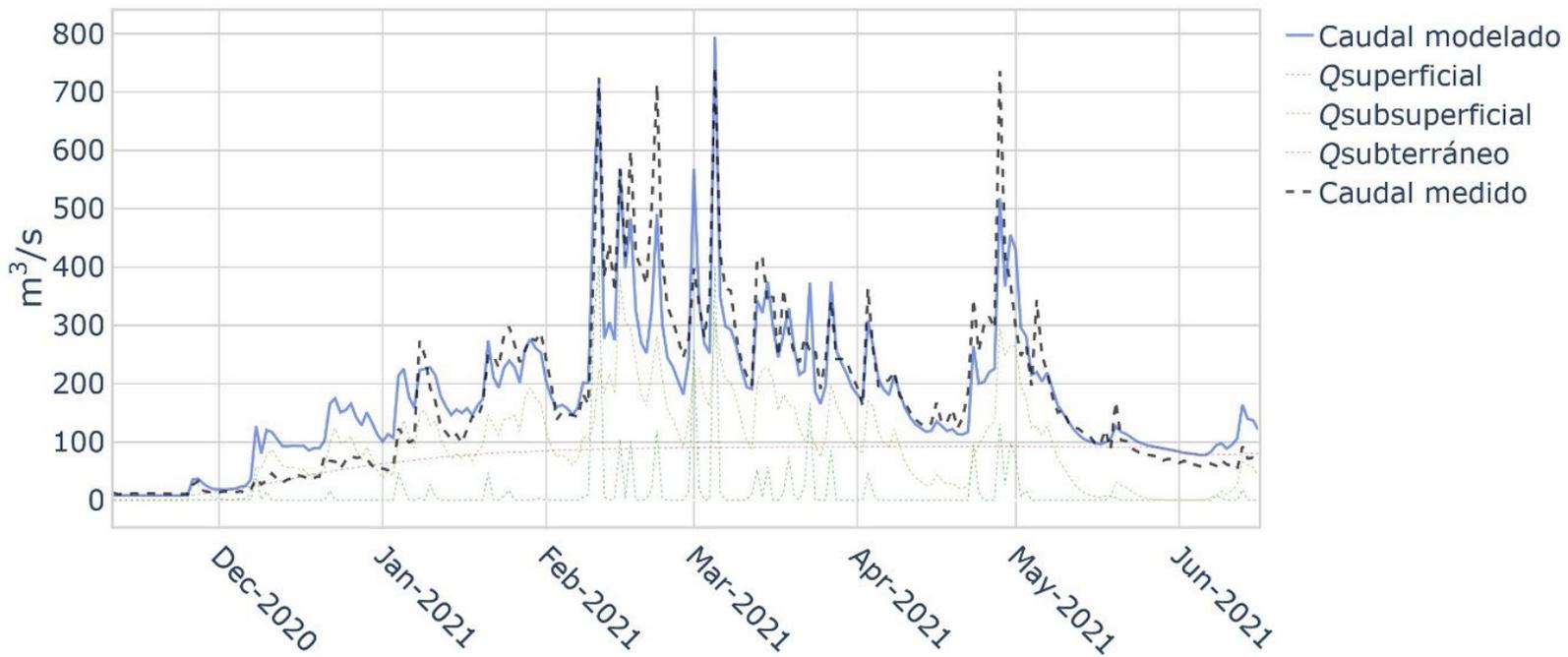


Figura 14. Resultados de la calibración del modelo Baba diario.

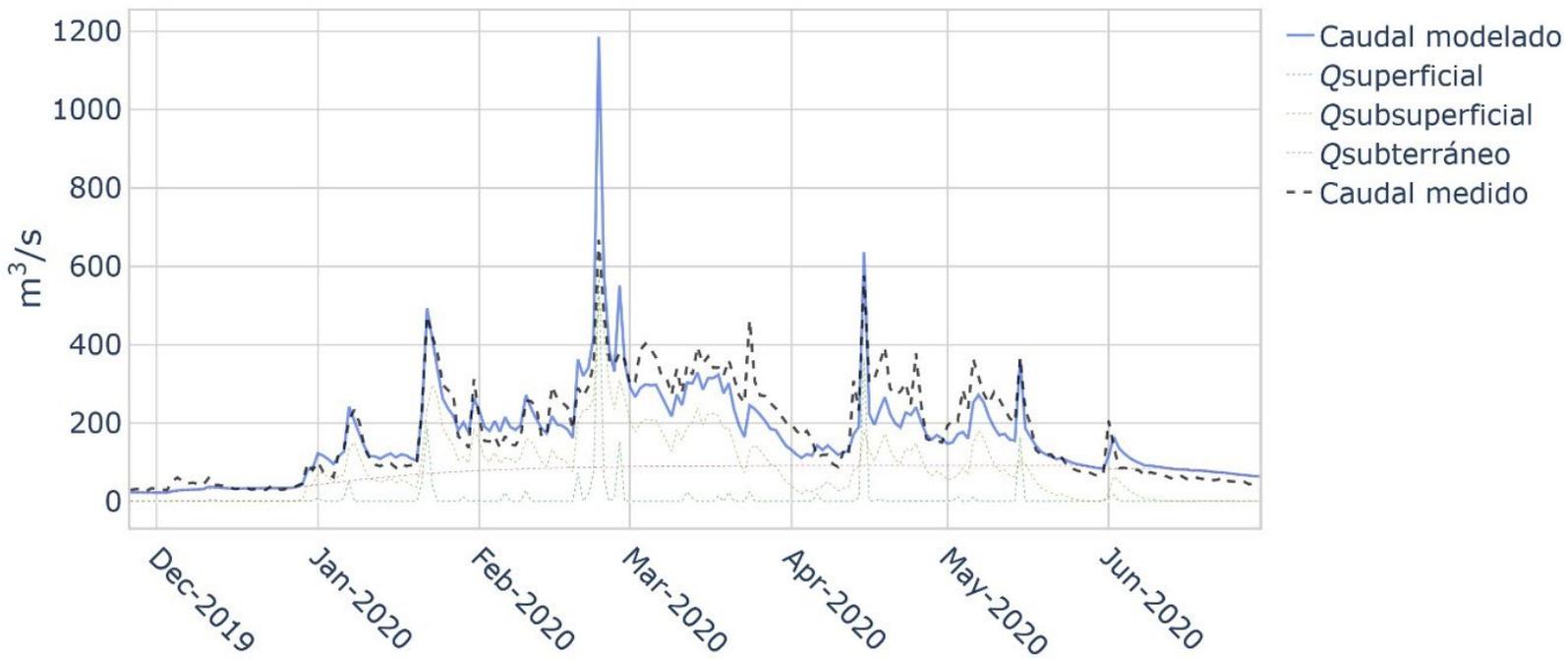


Figura 15. Resultados de la validación del modelo Baba diario.

En el caso del embalse Daule-Peripa se ha obtenido un coeficiente de Nash-Sutcliffe en la calibración (Figura 16) de 0.75 y 0.62 para la validación (Figura 17).

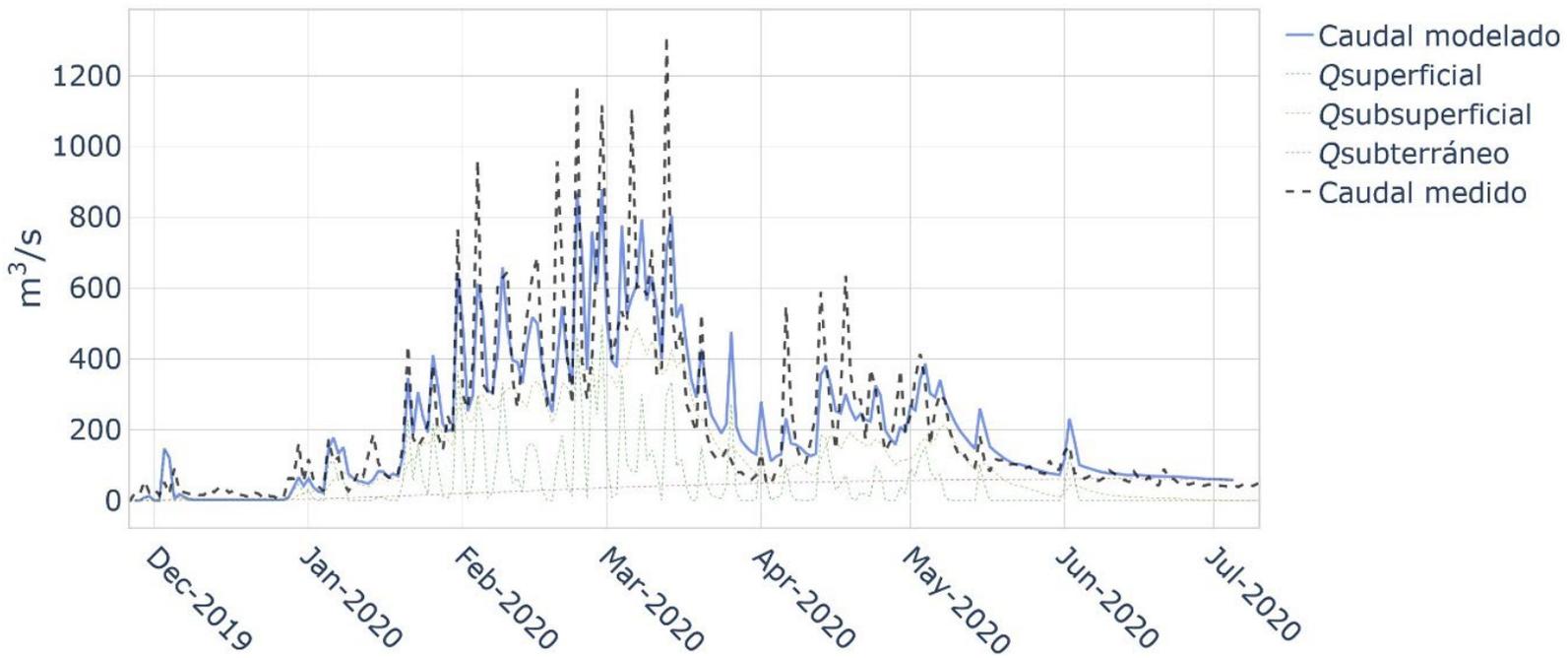


Figura 16. Resultados de la calibración del modelo Daule-Peripa diario.

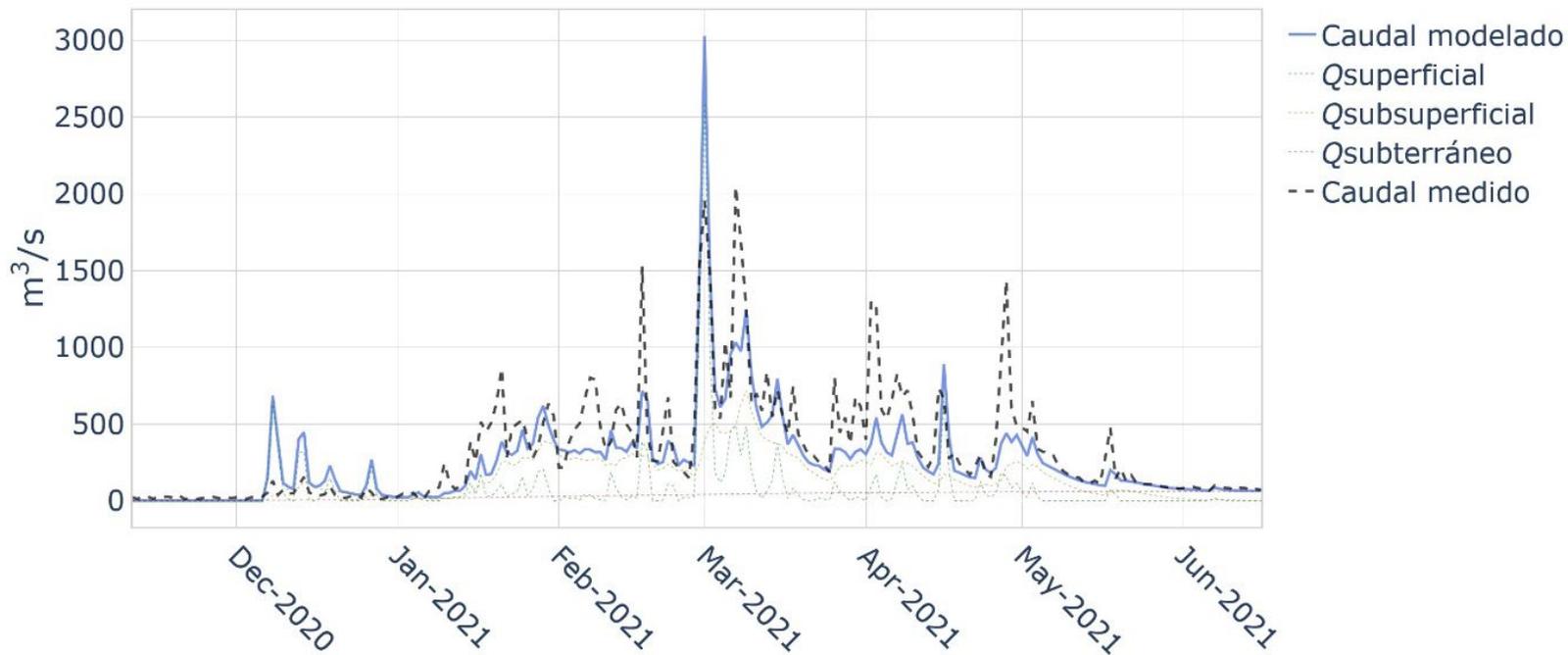


Figura 17. Resultados de la validación del modelo Daule-Peripa diario.

Operación del sistema

El SHAD está operativo para ambas centrales desde enero de 2021, coincidiendo con el comienzo de la temporada de lluvias en la costa de Ecuador. Durante este periodo de uso se ha podido constatar la aportación del SHAD para mejorar la operación de ambas centrales.

Respecto a esta mejora, hasta el momento ha cumplido con tres de sus objetivos principales y que se enuncian a continuación.

Gestión del recurso hídrico

En el caso de los embalses Daule-Peripa y Baba, la optimización de la gestión del recurso hídrico se produce a partir de la minimización del vertido innecesario; en el caso de Baba, la maximización del trasvase de Baba hacia Daule-Peripa permite, incluso en situaciones de sequía, el llenado del embalse.

Esta maximización del trasvase es difícil de evaluar en términos generales, ya que depende de múltiples factores, como los caudales de ingreso, disponibilidad de las unidades de generación o la propia necesidad de maximización, que con niveles altos del embalse Daule-Peripa que garanticen su llenado deja de ser una prioridad. Durante la primera parte de la temporada de lluvias (enero-febrero), debido a la incertidumbre en los caudales futuros de ingreso a los embalses, todos los años se intenta maximizar el trasvase. Teniendo en cuenta la incidencia de muchos otros factores, se puede observar en la Figura 18 la maximización y menor variabilidad en los caudales trasvasados diarios durante los años de funcionamiento del SHAD (2021 y 2022).

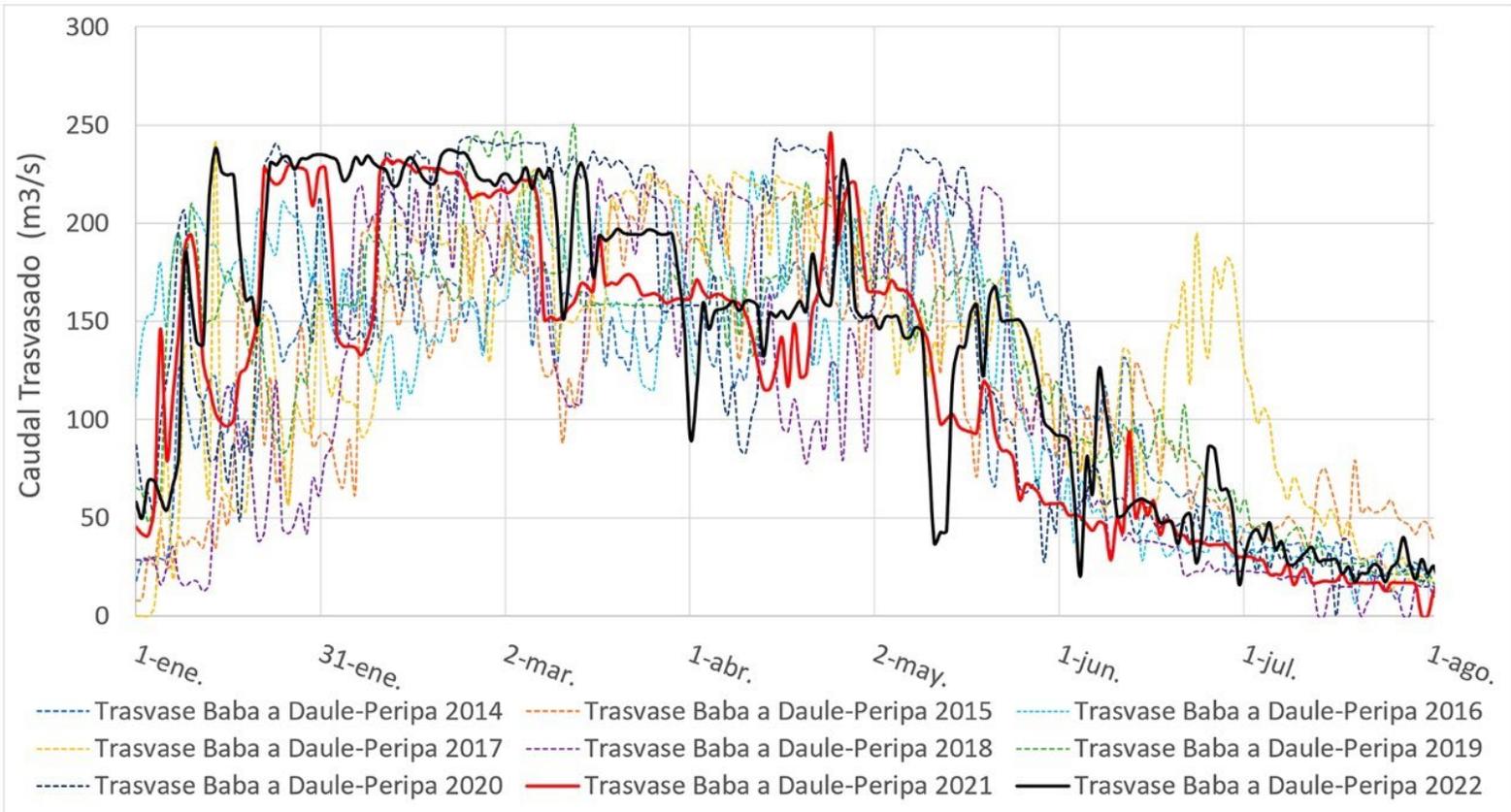


Figura 18. Histórico de caudales trasvasados diarios de Baba a Daule-Peripa durante la temporada de lluvias.

Como ya se comentaba, aunque una menor variabilidad diaria en los caudales trasvasados durante los primeros meses del año podría indicar una mejor gestión del trasvase, hay que tener en cuenta muchos otros factores, por ejemplo que en 2022, los ingresos del 1º de enero al 19 de mayo fueron los mayores desde la puesta en funcionamiento de la central hidroeléctrica ($317.16 \text{ m}^3/\text{s}$), sin embargo, en el caso de 2021, los ingresos para el mismo periodo estuvieron en la media ($256.14 \text{ m}^3/\text{s}$),

por debajo de 2016 (267.25 m³/s), 2017 (275.15 m³/s) y 2019 (278.60 m³/s).

Esta mejora de gestión del recurso es evidente cuando se analizan eventos particulares, en los que gracias al acceso a los datos en tiempo real ha sido posible la optimización de las descargas, evitando vertidos innecesarios y/o excesivos. Una muestra de ello está recogida en la Tabla 6; evitando en 2021, comparado con 2019, el vertimiento desde el embalse Daule-Peripa de aproximadamente 32.80 Hm³, volumen que pudo evitarse verter en 2019 si en ese entonces se hubiera dispuesto del pronóstico de caudal de ingreso. Esto, además de mitigar o evitar las posibles inundaciones en las poblaciones más “bajas” de la cuenca del río Daule y cercanas a sus márgenes, contribuye con la reserva de agua y energética que representa el agua no vertida y el consecuente cumplimiento de los usos consuntivos.

Tabla 6. Eventos de similares características en Daule-Peripa, años 2019 (sin SHAD) y 2021 (con SHAD).

Fecha	Nivel del embalse 24 h 00 (msnm)	Caudales m ³ /s			
		Ingreso	Trasvasado Baba	Turbinado	Vertido
23-may-19	85.298	471.37	163.90	404.40	126.74
24-may-19	85.270	449.05	162.97	405.29	126.52
25-may-19	85.245	419.23	148.67	366.76	126.32
7-may-21	85.286	467.31	166.02	406.51	0.00
8-may-21	85.275	391.43	164.05	405.28	0.00
9-may-21	85.255	349.49	159.92	402.76	0.00

Incremento en la generación

Este incremento puede ser llevado a cabo de dos maneras: con el incremento del trasvase desde la Central Baba hacia el embalse Daule-Peripa o como un aumento en la generación en cualquiera de las dos centrales.

A manera de ejemplo (Tabla 7), se tomará el 9 de febrero de 2021. A las 22:00 h, las condiciones de operación en la central Baba eran las siguientes: potencia máxima (aproximadamente 17.5 MW por unidad); nivel del embalse en la cota de 116.00 msnm; ningún vertido por el vertedero Pico de Pato; extravasador cerrado. Mediante monitoreo del SHAD se detectó una previsión de incremento en el caudal de ingreso y se procedió a la apertura el extravasador al máximo para trasvasar a Daule-Peripa 70 m³/s adicionales al caudal turbinado. Gracias a la capacidad de tomar decisiones previamente al incremento de caudales, se consiguió maximizar el trasvase, con el consiguiente aumento de la generación en la central Marcel Laniado de Wind.

Tabla 7. Eventos del 9 y 10 de febrero de 2021 en la presa Baba.

Fecha	Hora	Nivel embalse (msnm)	Caudales m ³ /s			
			Ingreso	Vertedero	Turbinado	Extravasador
9-feb	22:00	116.00	207.44	0.00	151.07	0.00
	23:00	116.04	326.07	8.00	151.07	70.00
	0:00	116.08	337.10	19.00	151.07	70.00
10-feb	4:00	116.43	653.83	206.00	153.90	70.00
	5:00	116.51	695.66	270.00	153.94	70.00
	6:00	116.53	569.66	287.00	153.93	70.00

DetECCIÓN TEMPRANA DE EVENTOS DE INUNDACIÓN

En la temporada de mayores precipitaciones en la región Costa, mediante el monitoreo del SHAD ha sido posible la detección temprana de todos los eventos con posibilidad de causar daños por inundaciones aguas arriba y aguas abajo del embalse con al menos tres horas de anticipación (ocho horas generalmente), facilitando así la generación y comunicación temprana de boletines (internos) de alerta. Gracias al modelo hidrológico también se han podido identificar con una exactitud de +/- 2 horas la llegada de los caudales "pico" a los embalses.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema (SHAD CELEC EP Hidronación) de ayuda a la gestión de los recursos hídricos para las cuencas aportantes a los embalses Daule-Peripa y Baba. Dicha herramienta se ha implantado como sistema con el que se gestionan los recursos hidroeléctricos de las centrales hidroeléctricas Marcel Laniado de Wind y Baba.

La herramienta integra sistemas de recopilación y almacenamiento de datos en tiempo real tanto de la red de estaciones hidrometeorológicas como de un módulo meteorológico, un modelo hidrológico desarrollado específicamente para la cuenca e interfaces gráficas que facilitan enormemente las tareas de los técnicos encargados de la gestión de los embalses. La herramienta integra componentes *software* y *hardware* para automatizar por completo los procesos de captación e incorporación de los datos de diferentes fuentes: estaciones meteorológicas, estaciones de

caudal, modelos meteorológicos, modelos hidrológicos, además de integrar servicios de almacenamiento de dicha información de forma segura, con la posibilidad de integrar en el futuro nuevas funcionalidades o mejora de éstas.

El embalse Baba, con un volumen de 100 Hm³ y un ingreso medio diario durante la temporada de lluvias de 253 m³/s, se convierte durante esta época en un embalse de régimen diario (con caudales similares a la capacidad de trasvase a Daule-Peripa), por lo que era fundamental disponer de pronósticos de calidad en escala horaria. En el caso de Daule-Peripa, con un volumen máximo de 3 000 Hm³ y un ingreso promedio de 280 m³/s, es un embalse de régimen anual, donde un modelo de escala diaria se considera suficiente para su manejo tanto en lo relativo a producción hidroeléctrica como en gestión de avenidas.

El modelo de la cuenca vertiente al embalse Baba tiene un NSE 0.8 para la calibración y 0.71 para la validación mientras que para la cuenca Daule-Peripa se obtuvieron NSE de 0.75 y 0.62 para calibración y validación, respectivamente, así que los ajustes de ambos modelos se pueden considerar satisfactorios. Los peores coeficientes obtenidos para Daule-Peripa se deben tanto a la ausencia de datos de precipitación en el suroeste de la cuenca como a la dificultad de realización del balance hídrico en el embalse debido a su gran volumen y longitud (en algunos ramales de más de 70 km). Hay que señalar que se está trabajando en la mejora del modelo de Daule-Peripa mediante la instalación de nuevas estaciones pluviométricas.

Aun a la espera de estas últimas mejoras, el modelo hidrológico se integra de forma adecuada en el sistema de gestión, convirtiendo a este

SHAD es una herramienta que automatiza los procesos de recopilación, tratamiento y predicción meteorológica e hidrológica.

El análisis preliminar comparativo de la gestión de los recursos hídricos de la cuenca, realizada desde la puesta en operación del SHAD, muestra evidencias de mejoras significativas en lo relativo a la eficiencia en la gestión de las centrales hidroeléctricas, así como la mejora en la gestión del recurso hídrico para otros fines que la producción hidroeléctrica o la detección automática temprana de posibles eventos de inundación.

El SHAD permitirá la implementación de sistemas de alerta temprana por inundación aguas abajo de las centrales, mediante la incorporación de sistemas de comunicación efectiva con la población.

Asimismo, resulta una herramienta importante para el proceso de elaboración de los planes de gestión de cuencas hidrográficas en los gobiernos autónomos descentralizados cantonales y provinciales, utilizando los modelos hidrológicos desarrollados para la validación técnica de las propuestas, y como ayuda para la implementación de medidas de ordenamiento territorial, fundamentales para fortalecer la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías e inundaciones.

Como ya se ha comentado, se está trabajando en la actualidad en la instalación de nuevas estaciones pluviométricas con las que mejorar la previsión del modelo hidrológico. También supondrá una notable mejora disponer automáticamente de los registros de caudales de los órganos de desagüe, como compuertas y vertederos, de forma que el total de

descargas y balance hídrico en los embalses se pueda calcular de modo automático por el sistema.

Para mejora de los modelos meteorológicos también sería deseable la participación más activa a nivel país en los proyectos internacionales de modelación meteorológica, registrando y compartiendo datos meteorológicos que permitan la mejora predictiva de estos modelos en nuestras áreas de interés.

Referencias

- Ahmad, A., El-Shafie, A., Razali, S. F. M., & Mohamad, Z. S. (2014). Reservoir optimization in water resources: A review. *Water resources management*, 28(11), 3391-3405.
- Alley, R. B., Emanuel, K. A., & Zhang, F. (2019). Advances in weather prediction. *Science*, 363(6425), 342-344.
- Bendix, J., Gämmerler, S., Reudenbach, C., & Bendix, A. (2003). A Case study on rainfall dynamics during El Niño/La Niña 1997/99 in Ecuador and surrounding areas as inferred from GOES-8 and TRMM-PR observations niederschlagsdynamik während El Niño/La Niña 1997/99 in Ecuador und benachbarten Gebieten—Eine Fallstudie auf der Basis von GOES-8-und TRMM-PR-Daten. *Erdkunde*, 57(2), 81-93.
- Beven, K. J. (2011). *Rainfall-runoff modelling: The primer*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Bosznay, M. (1989). Generalization of SCS curve number method. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 115(1), 139-144.

- Cenace, Centro Nacional de Control de Energía. (2022). *Informe operativo anual 2021*. Recuperado de <http://www.cenace.gob.ec/informe-anual-2021/>
- Chow, V. T. (1964). *Handbook of applied hydrology: A compendium of water-resources technology*. New York: McGraw-Hill.
- Dawson, C. W., & Wilby, R. L. (2001). Hydrological modelling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*, 25(1), 80-108.
- De Guenni, L. B., García, M., Muñoz, A. G., Santos, J. L., Cedeño, A., Perugachi, C., & Castillo, J. (2017). Predicting monthly precipitation along coastal Ecuador: ENSO and transfer function models. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4), 1059-1073.
- Dion, P., Martel, J.-L., & Arsenault, R. (2021). Hydrological ensemble forecasting using a multi-model framework. *Journal of Hydrology*, 600, 126537.
- Dirks, K. N., Hay, J. E., Stow, C. D., & Harris, D. (1998). High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island: Part II: Interpolation of rainfall data. *Journal of Hydrology*, 208(3-4), 187-193.
- Hersh, M. A. (1999). Sustainable decision making: The role of decision support systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 29(3), 395-408.
- Hidalgo-Proañón, M. (2017). Variabilidad climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS. *Revista Cienciamérica*, 6(2), 42-47.

- Jajarmizadeh, M., Harun, S., & Salarpour, M. (2012). A review on theoretical consideration and types of models in hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 5(5), 249-261.
- Johnson, L. E. (1986). Water resource management decision support systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 112(3), 308-325.
- Kingston, G. B., Maier, H. R., & Lambert, M. F. (2005). Calibration and validation of neural networks to ensure physically plausible hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 314(1-4), 158-176.
- Knudsen, J., Thomsen, A., & Refsgaard, J. C. (1986). WATBAL: A semi-distributed, physically based hydrological modelling system. *Hydrology Research*, 17(4-5), 347-362.
- Kuok, K. K., Harun, S., & Chan, C. P. (2011). Investigation best number of tanks for hydrological tank model for rural catchment in humid region. *Journal of The Institution of Engineers*, 72, 1-11.
- Mariotti, A., Ruti, P. M., & Rixen, M. (2018). Progress in subseasonal to seasonal prediction through a joint weather and climate community effort. *npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 1-4.
- Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., & Petroliagis, T. (1996). The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(529), 73-119.
- Mysiak, J., Giupponi, C., & Rosato, P. (2005). Towards the development of a decision support system for water resource management. *Environmental Modelling & Software*, 20(2), 203-214.

- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Palmer, W. C., & Havens, A. V. (1958). A graphical technique for determining evapotranspiration by the Thornthwaite method. *Monthly Weather Review*, 86(4), 123-128.
- Paz, J., Del Jesús, M., Kelman, R., Navas, S., Okamura, L., & Feliu, E. (2019). *Vulnerabilidad al cambio climático y medidas de adaptación de los sistemas hidroeléctricos en los países andinos*. Washington, DC, USA: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Perez-Suarez, R. A., & Cedeño-Villaruel, M. A. (2021). *Optimización del sistema de descarga de agua del vertedero de la presa Daule Peripa* (trabajo fin de master). Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Guayaquil, Ecuador.
- Persson, A. (2001). *User guide to ECMWF forecast products*. Recuperado de http://cedadocs.ceda.ac.uk/1218/1/ECMWF_user_guide_2001.pdf
- Raimonet, M., Oudin, L., Thieu, V., Silvestre, M., Vautard, R., Rabouille, C., & Le Moigne, P. (2017). Evaluation of gridded meteorological datasets for hydrological modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 18(11), 3027-3041.
- Recalde-Coronel, G. C., Barnston, A. G., & Muñoz, Á. G. (2014). Predictability of December–April rainfall in coastal and Andean Ecuador. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(6), 1471-1493.

- Rhynsburger, D. (1973). Analytic delineation of Thiessen polygons. *Geographical Analysis*, 5(2), 133-144.
- Rossum, G. (1995). *Python reference manual*. Recuperado de <https://ir.cwi.nl/pub/5008>
- Saha, S., Nadiga, S., Thiaw, C., Wang, J., Wang, W., Zhang, Q., Van den Dool, H. M., Pan, H.-L., Moorthi, S., Behringer, D., Stokes, D., Peña, M., Lord, S., White, G., Ebisuzaki, W., Peng, P., & Xie, P. (2006). The NCEP Climate Forecast System. *Journal of Climate*, 19(15), 3483-3517. DOI: 10.1175/JCLI3812.1
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Avant, B., & Muche, M. (2018). *An overview of rainfall-runoff model types*. Recuperado de <https://scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3977&context=iemssconference>
- Smith, P. J., Pappenberger, F., Wetterhall, F., Del Pozo, J. T., Krzeminski, B., Salamon, P., Muraro, D., Kalas, M., & Baugh, C. (2016). On the operational implementation of the European Flood Awareness System (EFAS). In: *Flood forecasting* (pp. 313-348). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Song, J.-H., Her, Y., Park, J., & Kang, M.-S. (2019). Exploring parsimonious daily rainfall-runoff model structure using the hyperbolic tangent function and Tank model. *Journal of Hydrology*, 574, 574-587.

- Suryoputro, N., Suhardjono, Soetopo, W., & Suhartanto, E. (2017). Calibration of infiltration parameters on hydrological tank model using runoff coefficient of rational method. *AIP Conference Proceedings*, 1887(1), 020056. DOI: 10.1063/1.5003539
- Tschantz, B. A. (s.f.). SCS user-defined storm hydrograph (SCS-USH). In: *Hydraulics and hydrology in the small computer age* (pp. 1274-1279). Reston, USA: ASCE.
- Wang, C., Deser, C., Yu, J. Y., DiNezio, P., & Clement, A. (2017). El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A review. *Coral reefs of the eastern tropical Pacific: Persistence and loss in a dynamic environment*, 85-106. DOI: 10.1007/978-94-017-7499-4_4
- Wardropper, C., & Brookfield, A. (2022). Decision-support systems for water management. *Journal of Hydrology*, 610, 127928.
- Works, D. of P. (1995). *California culvert practice, second*. Sacramento, USA: DPW, Division of Highways Sacramento, CA.