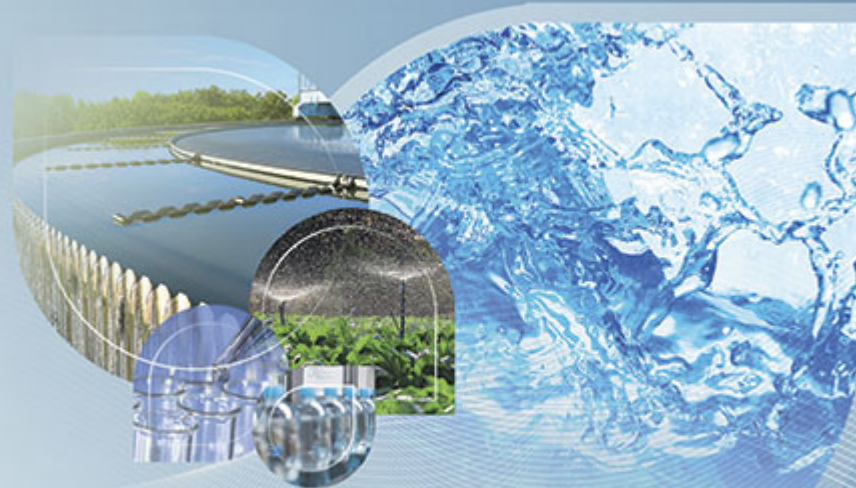




XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

24 A 28 DE NOVEMBRO DE 2019
FOZ DO IGUAÇU - PR

CERTIFICADO



Certificamos que o trabalho

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL RÍO PARAGUAY Y OPERACIONALIZACIÓN EN PLATAFORMA WEB

foi apresentado por **Benito Andres Pereira Zelaya** no formato **oral**, durante o **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, realizado entre 24 a 28 de novembro de 2019 em Foz do Iguaçu-PR, tendo como autor(es): **Benito Andres Pereira Zelaya, Daniel Alejandro Vazquez Bado, Santiago Vera Aquino e Roger Monte Domecq.**

Adilson Pinheiro
Presidente da Associação Brasileira
de Recursos Hídricos

Luiz Henrique Maldonado
Coordenador da Comissão Organizadora do
XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídrico

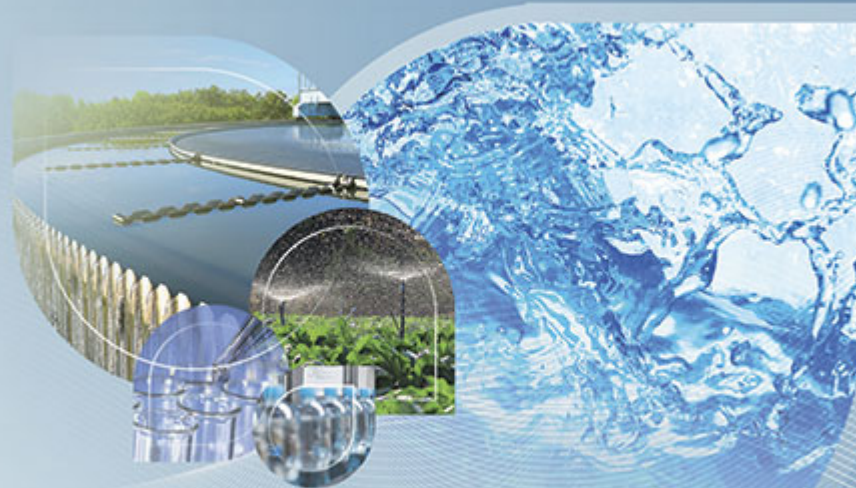
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
Coordenador da Comissão Científica do
XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos



XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

24 A 28 DE NOVEMBRO DE 2019
FOZ DO IGUAÇU - PR

CERTIFICADO



Certificamos que o trabalho

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS DE APORTE AL RÍO PARAGUAY EN EL TRAMO PORTO MURTINHO - ASUNCIÓN

foi apresentado por **Jorge Manuel Mazó Cáceres** no formato de **pôster**, durante o **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, realizado entre 24 a 28 de novembro de 2019 em Foz do Iguaçu-PR, tendo como autor(es): **Jorge Manuel Mazó Cáceres, Rosa Aseretto e Roger Monte Domecq.**

Adilson Pinheiro
Presidente da Associação Brasileira
de Recursos Hídricos

Luiz Henrique Maldonado
Coordenador da Comissão Organizadora do
XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídrico

Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
Coordenador da Comissão Científica do
XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL RÍO PARAGUAY Y OPERACIONALIZACIÓN EN PLATAFORMA WEB

Benito Pereira¹; Daniel Vázquez²; Santiago Vera³; Roger Monte Domecq⁴

RESUMEN – El Río Paraguay se constituye en uno de los pocos recursos hídricos vírgenes de todo el planeta, pues su grado de intervención antrópica aún no es significativa. A lo largo del tramo que pasa por el territorio paraguayo, existen diversas herramientas utilizadas para la previsión de niveles con distintos fines. En el presente trabajo, se expone el modelo hidrodinámico desarrollado para la previsión de niveles del tramo comprendido entre Porto Murtinho (BRA) y Pilar (PGY). En líneas generales, se obtuvieron resultados satisfactorios considerando la baja cantidad de información batimétrica a lo largo del río y la ausencia de datos de caudales medidos en los cauces afluentes al Río Paraguay. También se expone brevemente el proceso de acople y operacionalización en una plataforma web.

ABSTRACT– The Paraguay River is one of the few virgin water resources of the entire planet, as its degree of anthropic intervention is not yet significant. Along the section that passes through the Paraguayan territory, there are various tools used for forecasting levels with different purposes. In the present work, the hydrodynamic model developed for the forecast of levels of the stretch between Porto Murtinho (BRA) and Pilar (PGY) is exposed. In general terms, satisfactory results were obtained considering the low amount of bathymetric information along the river and the absence of data of measured flows in the tributaries to the Paraguay River. The process of operationalizing the model in a web platform is also exposed.

Palabras-Clave – Modelación, Hidrología, Hidrodinámica, Previsión.

1) Centro de Tecnología Apropriada, Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Tte. Lidio Cantalupi, Asunción, Paraguay, cel: +595 981 541 828, e-mail: bpereirapy@gmail.com

2) Centro Internacional de Hidroinformática, Itaipu Binacional, Super Carretera Itaipu km 15 ½, Hernandarias, Paraguay, tel: +595 61 5998247, e-mail: danielal@itaipu.gov.py

3) Centro Internacional de Hidroinformática, Itaipu Binacional, Super Carretera Itaipu km 15 ½, Hernandarias, Paraguay, tel: +595 61 5998247, e-mail: veraaqui@itaipu.gov.py

4) Centro de Tecnología Apropriada, Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Tte. Lidio Cantalupi, Asunción, Paraguay, cel: +595 971 558 989, e-mail: roger.montedomecq@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En el presente resumen se exponen los principales resultados obtenidos con el Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay (tramo Porto Murтинho – Pilar), el cual fue elaborado en el marco del proyecto “Desarrollo e Implementación de un Sistema de Pronóstico de Niveles y Caudales del Río Paraguay” de la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, financiado por el Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías (CONACYT).

El Río Paraguay es un curso de agua con importantes planicies de inundación a lo largo de su recorrido, por lo que la utilización de modelos hidrodinámicos 1D tienen ciertas limitaciones para representar todos los fenómenos hidráulicos que ocurren. La cantidad y calidad de información batimétrica a lo largo de todo el tramo a simular, juega un papel fundamental a la hora de representar correctamente los niveles observados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

Se define como área de estudio al tramo del Río Paraguay comprendido entre Porto Murтинho (BR) y Pilar (PY), con una extensión aproximada de 880 km, tal como se muestra en la Figura 1.



Figura 1 – Tramo de simulación hidrodinámica del Río Paraguay

Herramientas y Datos Utilizados

Para la elaboración de este trabajo de investigación se utilizaron los programas de modelación hidrológica de hidráulica, HEC-HMS y HEC-RAS, respectivamente. Adicionalmente, se utilizaron

otros softwares de procesamiento y manejo de datos, como el QGIS, el Matlab y el HEC-DSS Vue (Gestor de Datos de la familia de programas HEC).

Topo-batimetría

Para el montaje del Modelo Hidrodinámico, se utilizaron informaciones batimétricas del Río Paraguay realizadas por la Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP) en el marco del proyecto “Dragado del Río Paraguay”. Los sitios donde se contaba con información batimétrica se muestran en la Figura 2.

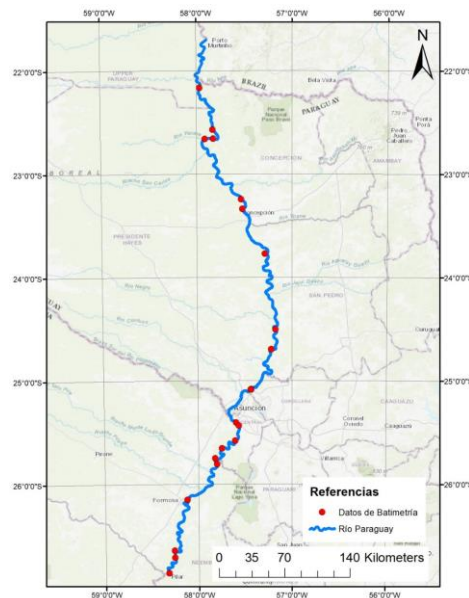


Figura 2 – Zonas del Río Paraguay (en el tramo de estudio) con información batimétrica

Estos datos son utilizados para representar el cauce del Río Paraguay. Las zonas intermedias (donde no existe información batimétrica) son obtenidas a través de una interpolación lineal a lo largo del eje del río. Esto permite construir un cauce continuo para todo el tramo a ser modelado.



Figura 3 – Ejemplo de datos batimétricos utilizados

Para representar lo mejor posible la geomorfología de las planicies de inundación, se utilizó el MERIT SRTM (Yamazaki, et al., 2017), que consiste en un Modelo Digital de Elevación que deriva de un procesamiento realizado sobre el SRTM original (Farr, et al., 2007). De acuerdo a la descripción que realizan los autores, se obtuvieron mejoras significativas respecto al SRTM original, principalmente en regiones planas. Esta mejora se debe a una limpieza de ruidos de distintos tipos, como, por ejemplo, sesgos en la elevación del terreno asociados a la vegetación. Por estas razones, se considera al MERIT SRTM una fuente de información clave para representar las planicies de inundación en la Modelación Hidrodinámica del Río Paraguay.

Con el objetivo de representar correctamente la variación de las secciones transversales en cualquier sitio del Río Paraguay en el tramo comprendido entre Puerto Murtiño (BR) y Pilar (PY), se realiza una fusión entre el MDE creado a partir de los datos batimétricos (cauce) y el MERIT SRTM (planicies de inundación). En la Figura 4 se puede observar como fue concebida la geomorfología del río.

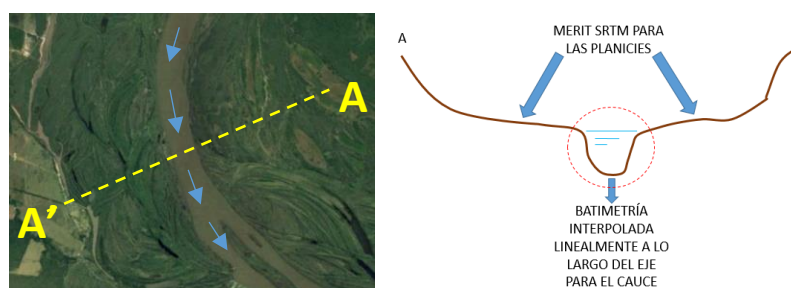


Figura 4 – Configuración geomorfológica del Río Paraguay

Fusionando estas informaciones, se obtiene un Modelo Digital de Elevación del Río Paraguay con su cauce incluido, tal como se muestra en la Figura 5.

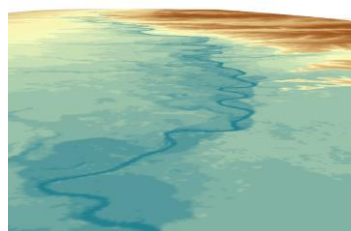


Figura 5 – Modelo Digital de Elevación del Río Paraguay con cauce incorporado

Datos de Niveles Observados

Los Modelos Hidráulicos requieren datos observados de nivel a lo largo del trecho a simular, lo cual permite ajustar los niveles simulados para que repliquen lo mejor posible la realidad. Para el presente trabajo, se utilizaron datos observados de las estaciones hidrométricas de Vallemí,

Concepción, Puerto Rosario, Asunción, Villeta, Alberdi y Pilar, los cuales fueron facilitados por la ANNP.

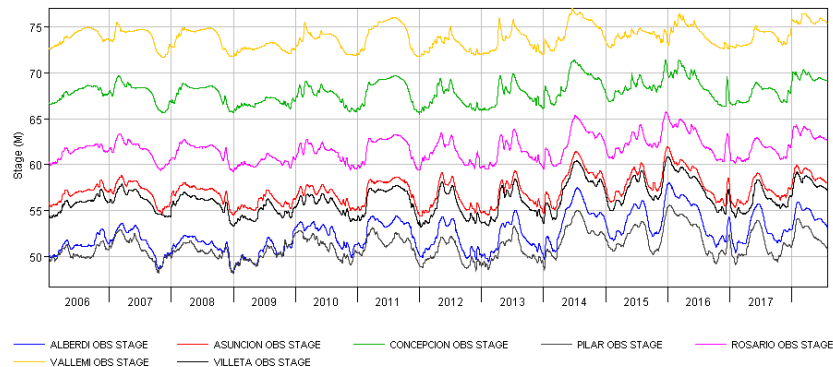


Figura 6 – Niveles observados en las estaciones hidrométricas utilizadas para la calibración del modelo hidrodinámico

Datos de Caudal Observado

A los efectos del presente modelo, se utilizó la serie histórica de caudal en Puerto Murtiño, que se extiende en el periodo 1939 – 2018.

Procedimiento Metodológico

Esquema conceptual

El esquema conceptual del modelo planteado se resume en lo siguiente: el dato de entrada principal es el caudal que ingresa al Río Paraguay a la altura de Puerto Murtiño, recibiendo también el caudal de los principales aportes laterales a lo largo del trecho, y finalmente, se indica un forzante del nivel de agua en su extremo aguas abajo con los niveles registrados en la estación hidrométrica de Pilar (condición de borde), tal como se muestra en la Figura 7.

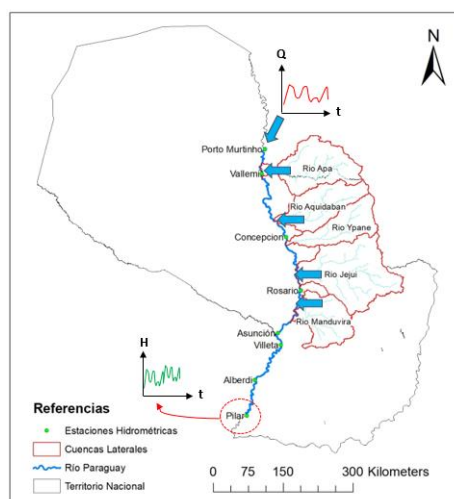


Figura 7 – Esquema conceptual de modelación del Río Paraguay

Modelación Hidrológica

Los modelos hidrológicos son utilizados en este caso para estimar el aporte de las cuencas incrementales a lo largo del tramo de estudio. A excepción del Río Apa, no se cuentan con datos observados de caudal en los cauces, por lo que para la calibración de las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá, se recurrió primeramente a la estimación de caudales sintéticos a partir de datos de nivel observados, recolectados del anuario hidrográfico ANNP². Para ello, se utilizó el Método Área/Pendiente, que, para el caso de grandes eventos de crecida, permite estimar el caudal a través de métodos indirectos, con valores de niveles medios, y estimaciones de parámetros físicos (a través de observación de imágenes satelitales) de las áreas de las secciones transversales (se asumen secciones trapezoidales para el presente caso), la pendiente de los canales, entre otros.

Modelación Hidrodinámica

Los caudales obtenidos en el proceso de modelación hidrológica, son ingresados como aporte lateral al modelo hidráulico. Con respecto al espaciamiento entre secciones transversales, se utilizó el criterio de Samuels (1990), que para modelos hidrodinámicos sugiere tener en cuenta criterios relacionados al ancho del río, a los efectos de remanso en régimen subcrítico y la propagación de onda. Siguiendo la metodología, se estima que el espaciamiento entre secciones transversales debería situarse en valores iguales o menores a 15,000 m.

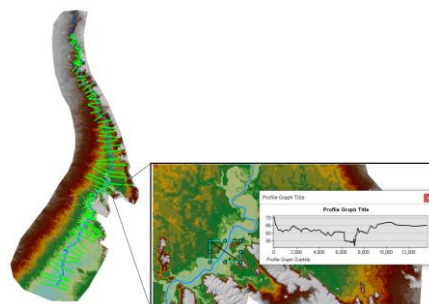


Figura 8 – Secciones transversales trazadas sobre el MDE

En lo que respecta a los coeficientes de rugosidad de manning, este valor depende de diversos factores, como el material del lecho, la cobertura vegetal existente, entre otros. En la literatura especializada existen diversas tablas y criterios para estimar este valor. Uno de los criterios más conocidos es el método de cowan (ec. 1), que básicamente consiste en una ponderación del valor manning de acuerdo a varias características del cauce.

² Administración Nacional de Navegación y Puertos (Paraguay)

$$n_{canal} = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (1)$$

La selección de una rugosidad base para el Río Paraguay fue realizada asumiendo que se trata de un río con lecho de tierra, grado de irregularidad suave, variaciones en la sección transversal gradual, efectos de obstrucciones insignificantes, vegetación baja y efecto de meandros menor. Con estas características y utilizando los valores sugeridos en Ven Te Chow (1959), la aplicación del método de Cowan deriva en una rugosidad del canal = 0.025. Para el caso de las planicies de inundación se adopta un valor de rugosidad en planicies = 0.08. Estos valores varían durante la calibración del modelo.

Proceso de acople y operacionalización de modelos Hidrológicos e Hidrodinámico en plataforma web del Centro Internacional de Hidroinformática (CIH)

El CIH cuenta con un aplicativo WEB, denominado YRATO³, que permite el monitoreo en tiempo cuasi-real (NRT) de variables hidrológicas para los principales ríos del Paraguay (Vera & Vázquez, 2018). Se desarrollaron rutinas y funcionalidades para la automatización y operacionalización de los modelos hidrológicos e hidráulico confeccionados. Se incorporan datos de la red hidrológica del país, de teledetección y previsión meteorológica con un horizonte de hasta 12 días. Los modelos generan resultados diariamente y estos poseen un esquema de notificación que permiten informar a instituciones claves sobre la evolución del comportamiento del río. A continuación, se observa de manera esquemática y muy resumida los procesos que permiten acoplar y operar automáticamente el modelo hidrodinámico.

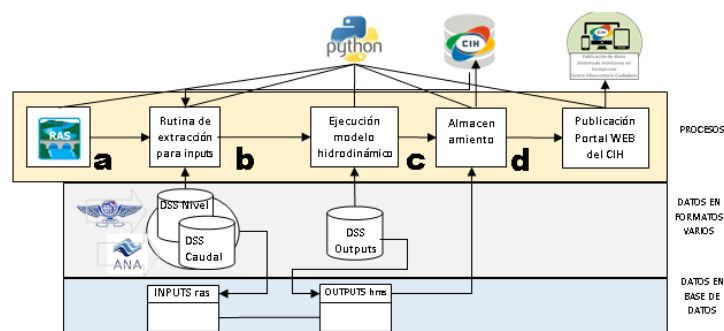


Figura 9 – Esquema simplificado de procesos para la automatización del modelo hidrodinámico

- a) Obtener modelos: Reconocimiento del modelo hidrodinámico desarrollado en el presente estudio, desde Puerto Mourtinho hasta Pilar;
- b) Captura de datos: Se emplean series temporales de caudal y nivel observado como condiciones de borde, y series de modelado del aporte hidrológico (paso 3). Para la previsión de condición de borde se emplea la hipótesis de condiciones permanentes de nivel y caudal, lo que permite

³ <https://hidroinformatica.itaipu.gov.py/yrato/>

pronosticar niveles y caudales hasta el periodo de transito de la onda de crecida. Los datos de entrada son transformados a formato compatible para hec-ras (DSS);

- c) Ejecutar modelo: El modelo hidrodinámico es ejecutado posterior a la finalización de todos los modelos hidrológicos, con tareas programadas y a paso diario (operacionalmente);
- d) DSS a BD CIH: todos los outputs en DSS son insertados a la base de datos del CIH, para la visualización en el portal web.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de desempeño del modelo hidrodinámico fue realizada con las siguientes funciones objetivo: Diferencia de Valores Medios (MED), Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Índice de Eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE), cuyas expresiones se muestran a continuación:

$$MED = \overline{H_{SIM}} - \overline{H_{OBS}}$$

(2)

donde:

$\overline{H_{SIM}}$: promedio de niveles simulados
 $\overline{H_{OBS}}$: promedio de niveles observados

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{SIM_i} - H_{OBS_i})^2}$$

(3)

donde:

H_{SIM_i} : niveles simulados
 H_{OBS_i} : niveles observados
 n : cantidad de datos de la serie

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{OBS_i} - H_{SIM_i})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{OBS_i} - \overline{H_{OBS}})^2}$$

(4)

De acuerdo al criterio de Molnar (2011), la evaluación del desempeño del modelo en base al estadístico NSE se da como se muestra en la Tabla 1. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1 - Criterio de Molnar (2011) para evaluación del desempeño en base al NSE

NSE	AJUSTE
<0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy Bueno
> 0.8	Excelente

Tabla 2 – Funciones Objetivo y desempeño del modelo en el periodo de calibración y validación

Estación	MED		RMSE		NSE		Desempeño	
	CAL	VAL	CAL	VAL	CAL	VAL	CAL	VAL
VALLEMÍ	0.32	0.13	0.30	0.28	0.93	0.94	Excelente	Excelente
CONCEPCIÓN	0.87	0.02	0.77	0.38	0.60	0.87	Bueno	Excelente
ROSARIO	0.72	0.24	0.67	0.47	0.76	0.80	Muy Bueno	Excelente
ASUNCIÓN	0.86	-0.09	0.65	0.49	0.76	0.79	Muy Bueno	Muy Bueno
VILLETA	0.93	0.24	0.48	0.48	0.74	0.81	Muy Bueno	Excelente
ALBERDI	0.74	0.54	0.59	0.85	0.86	0.63	Excelente	Muy Bueno

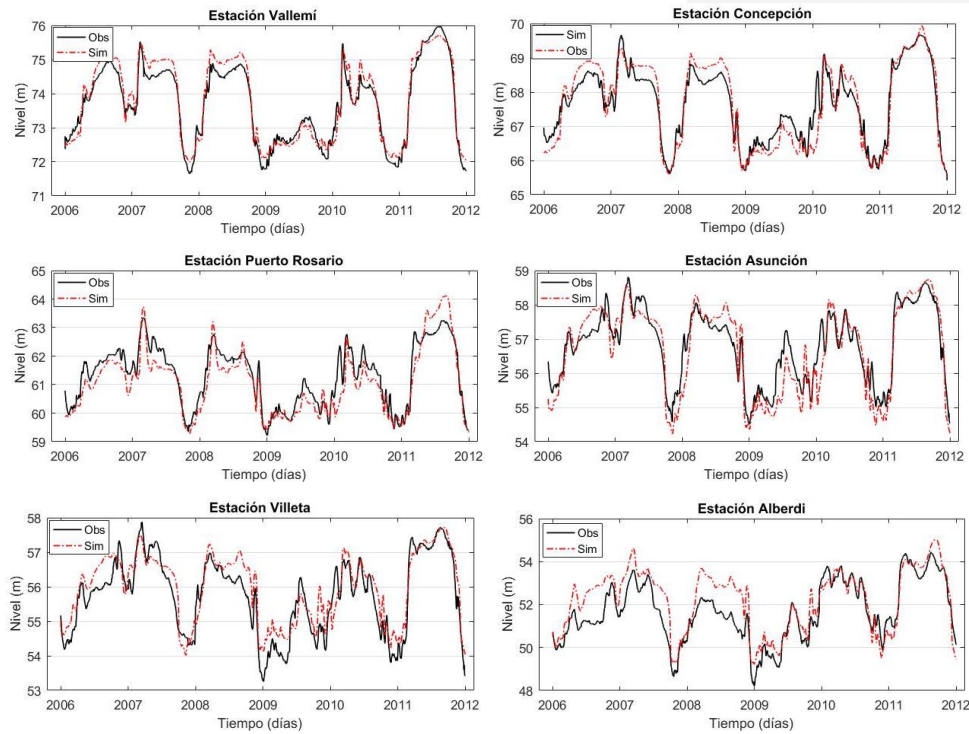


Figura 10 – Niveles simulados vs. observados para el periodo de validación del modelo

A continuación, se observa la interfaz gráfica en ambiente de producción del resultado del proceso de acople, automatización y operacionalización de los modelos hidrológicos e hidrodinámicos. El aplicativo web logra integrar todos los resultados obtenidos en las subcuencas, nodos y outlets del modelo hidrológico y de las secciones transversales del modelo hidrodinámico. A su vez esta plataforma presenta datos en tiempo real de teledetección y previsión del tiempo, como también datos de estaciones telemétricas y convencionales hidrológicas. El aplicativo posee una funcionalidad llamada panel de control donde se pueden monitorear estas variables mencionadas.

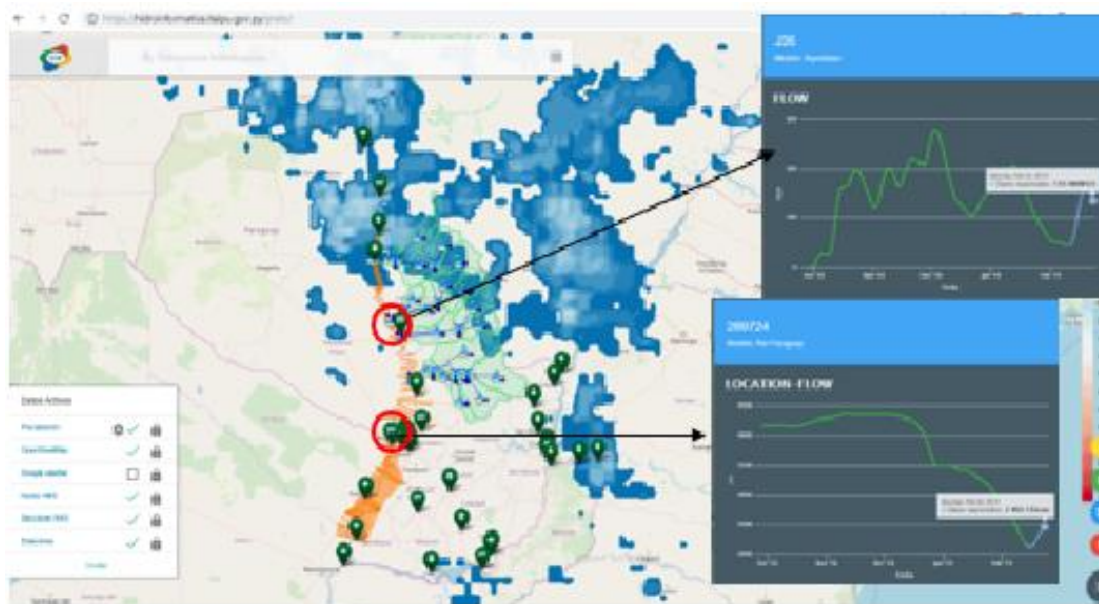


Figura 11 – Interfaz gráfica de resultados del modelo hidrológico e hidráulico en plataforma web del CIH

CONCLUSIONES

En términos generales, el Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay representa correctamente el comportamiento hidráulico en la mayoría de las estaciones hidrométricas a lo largo de tramo de estudio. En el periodo de calibración se obtuvieron buenos resultados en todas las estaciones hidrométricas, sin embargo, en el periodo de validación se observan resultados poco representativos en la estación de Alberdi. Considerando que el objetivo del presente trabajo es utilizar el Modelo Hidrodinámico para la previsión de niveles en Asunción, se considera que los resultados son satisfactorios. Se mostró claramente que el modelo tiene capacidad predictiva en la estación Asunción, teniendo en cuenta el desempeño semejante para el periodo de calibración y validación, donde el índice NSE se mantuvo entre 0.76 y 0.79, respectivamente.

Los resultados obtenidos pueden ser considerablemente mejorados si se incorpora al modelo mayor información batimétrica, lo cual reduciría considerablemente incertidumbres asociadas a la variabilidad de la pendiente y sección del cauce del río a lo largo del trecho de estudio.

REFERENCIAS

- CHOW, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGRAW-HILL.
- COWAN. (1956). Estimating Hydraulic Roughness Coefficients. *Agricultural Engineering*, 473-475.
- FARR, T., ROSEN, P., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., . . . ALSDORF, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*
- MOLNAR, P. (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*. Zürich - Switzerland: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
- NASH, & SUTCLIFFE. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models. *Journal of Hydrology*, 282-290.
- SAMUELS, P (1990). *Cross-section location in 1-d models*.
- VÁZQUEZ, D; VERA, S. (2018). *Sistema de Monitoreo Hidrológico en Tiempo Real para el Paraguay*; Centro Internacional de Hidroinformática. Itaipú - UNESCO, Paraguay. DOI: 10.29104/PHI-2018-AQUALAC-V10-N2-08
- YAMAZAKI, D., IKESHIMA, TAWATARI, YAMAGUCHI, O'LOUGHLIN, NEAL, . . . BATES. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*.

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS DE APORTE AL RÍO
PARAGUAY EN EL TRAMO PORTO MURTINHO - ASUNCIÓN**

Mazó, J¹.; Aseretto, R².; Monte Domecq, R³.

RESUMEN – El presente trabajo presenta la modelación hidrológica de cinco cuencas ubicadas en la Región Oriental del Paraguay, las cuales son las de los ríos Apa, Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá. El objetivo principal fue el de estimar caudales en dichas cuencas de forma a que fungieran de aporte lateral en un modelo hidráulico del río Paraguay en territorio paraguayo, siendo éste una de las componentes del proyecto 14-INV-280 “Desarrollo e Implementación de un Sistema de Pronóstico de Niveles y Caudales del río Paraguay”.

Los modelos fueron simulados y calibrados. En los casos de las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá no se contaron con datos de caudal observados por lo que se generaron caudales sintéticos para el ajuste de los hidrogramas. Con esto en cuenta, se obtuvieron resultados satisfactorios y que fueron utilizados en un modelo hidráulico en HEC-RAS con fines de pronóstico.

Palabras Claves: Modelo Hidrológico HEC-HMS, Río Paraguay, Caudal.

ABSTRACT - This paper presents the hydrological modeling of five basins located in the Eastern Region of Paraguay, which are those of the Apa, Aquidabán, Ypané, Jejuí and Manduvirá rivers. The main objective was to estimate flows in these basins in such a way that they served as a lateral contribution in a hydraulic model of the Paraguay River in Paraguayan territory, this being one of the components of the project 14-INV-280 "Development and Implementation of a Forecasting System of Levels and Flows of the Paraguay River".

The models were simulated and calibrated. In the cases of the basins of the rivers Aquidabán, Ypané, Jejuí and Manduvirá, no observed flow data were available, for that reason synthetic flows were generated for the adjustment of the hydrographs. With this in mind, satisfactory results were obtained and they were used in a hydraulic model in HEC-RAS for forecasting purposes.

the tendency is to increase average and maximum discharges and the decrease of minimum discharges.

Keywords: Hydrological model HEC-HMS, Paraguay River, Flow.

1) Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, Facultad de Ciencias y Tecnología, mmazoc@gmail.com

2) Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, Facultad de Ciencias y Tecnología, roaseretto@gmail.com

3) Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, Facultad de Ciencias y Tecnología, roger.montedomecq@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto 14-INV-280 “Desarrollo e Implementación de un Sistema de Pronóstico de Niveles y Caudales del río Paraguay”, financiado por el Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología del Paraguay y ejecutado por el Centro de Tecnología Apropiaada de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”.

En este sentido, se requirió la estimación de caudales de las principales cuencas que aportan al río Paraguay en su tramo medio de forma a que constituyan el aporte lateral a ser utilizados posteriormente en la implementación de un modelo hidráulico en dicho tramo. Para ello, se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS, el cual es un programa de dominio público, para modelación hidrológica desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, en el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) y está diseñado para simular el proceso de precipitación y escurrimiento en cuencas y puede ser aplicado a un amplio rango de regiones geográficas como grandes cuencas sin intervención.

Se seleccionaron para una primera etapa del proyecto, las mayores cuencas de aporte ubicadas en la Región Oriental del Paraguay y que tengan influencia en los eventos de crecidas que ocurran en Asunción. Por otro lado, de la Región Occidental o Chaco no se consideran las cuencas como aporte lateral al río Paraguay, atendiendo a que no se identifican cauces activos que aporten significativamente al cauce del río frente a los cauces de la Región Oriental. Los cauces que llegan al río Paraguay en la Región Occidental como los riachos Negro, Confuso, Verde, Montelindo y otros sólo se activan en periodos húmedos y por tanto no se los considera en esta fase de modelación hidrológica para el modelo hidráulico del río Paraguay. El único cauce relativamente importante de la región, el río Pilcomayo, solo tiene cauce activo binacional con la Argentina en unos 60 kilómetros de la frontera boliviana y luego desaparece como cauce activo a través de 2 brazos, uno en cada país y que alternativamente distribuyen aguas en periodos lluviosos a cada uno ellos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

Para el proyecto, se consideraron las cuencas de mayor aporte al río Paraguay en la Región Oriental, enfocándose en las que afectan principalmente al caudal que llega a Asunción (Figura 1).

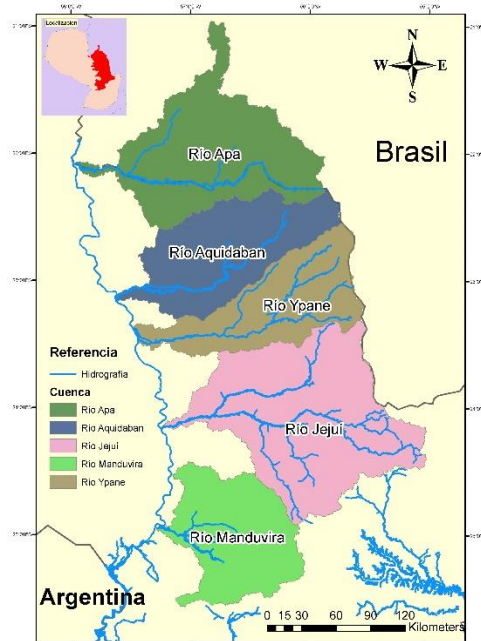


Figura 1. Área de estudio del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca del río Apa

Posee un área de 15.263 km², de los cuales el 75% de la cuenca se encuentra en territorio brasileño y el 25% restante en el paraguay. La naciente del río se encuentra localizada en el estado brasileño de Mato Grosso do Sul y en el departamento de Amambay en Paraguay, mientras que desemboca en el río Paraguay en el estado de Mato Grosso do Sul y el departamento de Concepción (Echeverría et al., 2011).

Cuenca del río Aquidabán

La cuenca del río Aquidabán se encuentra en su totalidad en territorio paraguayo. Se extiende de este al oeste de la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil, al norte con la cuenca del río Apa, al noroeste con la cuenca del río Tagatiyá y al sur con la cuenca del río Ypané (Chávez et al., 2006). La superficie de la cuenca es de aproximadamente 11.769 km² (Chávez et al., 2006).

Cuenca del río Ypané

La superficie de su cuenca es de 10.266 km² y la longitud del curso principal es de 282 km aproximadamente, desembocando en la margen izquierda del río Paraguay a la altura del km 692 contando desde la confluencia de los ríos Paraguay y Paraná y a unos 8 km aguas abajo del Puerto de Concepción (Chávez et al., 2006).

Cuenca del río Jejuí

Se extiende de este a oeste de la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil, al oeste con el río Paraguay, al norte con la cuenca del río Ypané y al sur con la cuenca del río Manduvirá. El río Jejuí Guazú desemboca en el río Paraguay hacia su margen izquierda en el km 571 (contado a partir de la confluencia Paraguay-Paraná) a unos 34 km aguas arriba de Puerto Rosario. La superficie de la cuenca es de aproximadamente 22.719 km² (equivale al 14.2 % de la Región Oriental y al 5.6 % del país) (Chávez et al., 2006).

Cuenca del río Manduvirá

Se encuentra en su totalidad en territorio paraguayo, extendiéndose de este a oeste de la Región Oriental por una superficie de aproximadamente 10.583 km², lindando al este con las cuencas de los ríos Acaray y Monday, al suroeste con la cuenca del río Piribebuy, al norte con la cuenca del río Jejuí Guazú y al sur con la cuenca del río Tebicuary (Chávez et al., 2006).

2.2 Datos hidro-meteorológicos

Para la generación de caudal, se utilizaron datos de precipitación de estaciones administradas por la Dirección de Meteorología e Hidrología de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil y de la Agencia Nacional de Aguas del Brasil. Las estaciones que fueron utilizadas se detallan en la figura 2a.

Además, para la calibración del caudal calculado por el modelo hidrológico, se utilizaron estaciones hidrométricas ubicadas en los cauces principales de cada cuenca. Para la cuenca del río Apa, se utilizó la estación de São Carlos, administrada por la ANA, la cual dispone de datos de nivel y caudal verificados por la misma entidad, en un periodo desde 1971 al 2013. Para las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá no se tienen datos disponibles de caudal, sin embargo, se cuentan con datos históricos de nivel hidrométrico del Anuario Hidrográfico de la Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP), con un registro de mediciones del 01/01/1974 al 31/12/1991, los cuales fueron utilizados para la estimación de caudales sintéticos. En la figura 2b, se observa la ubicación de las estaciones durante el periodo de medición detallado.

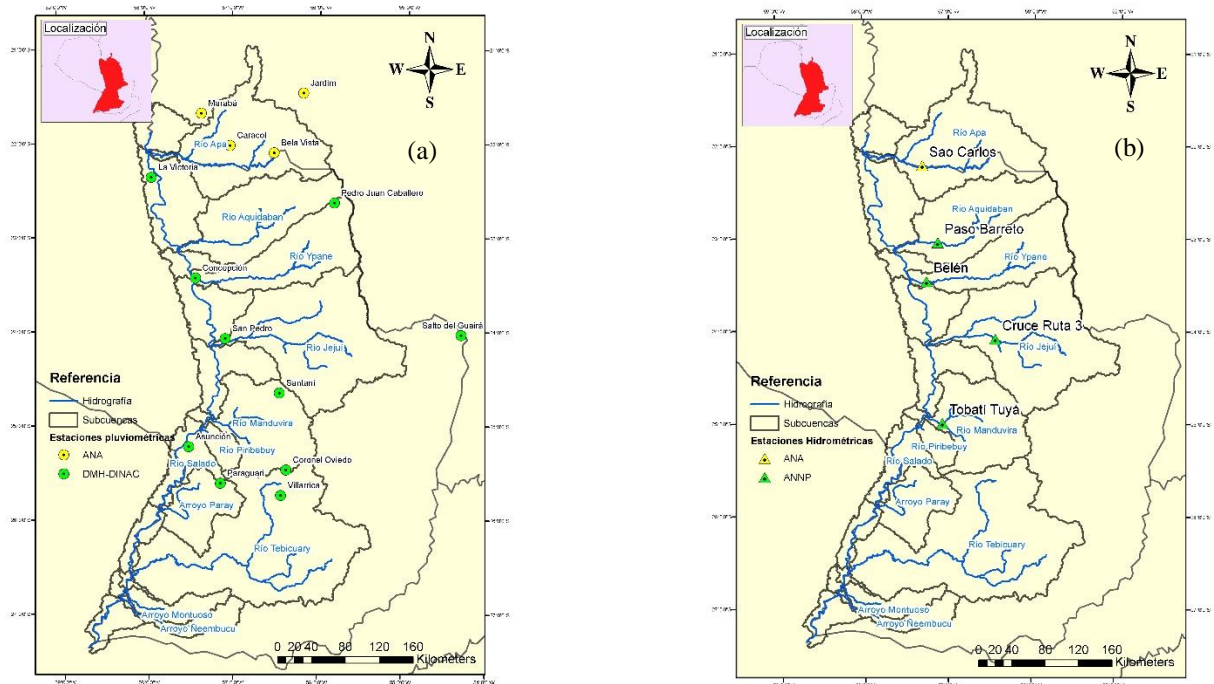


Figura 2. Estaciones hidro-meteorológicas: (a) Estaciones pluviométricas utilizadas; (b) Estaciones hidrométricas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

2.3 Datos espaciales

Se utilizaron los siguientes datos y softwares para la caracterización y estimación de parámetros iniciales en cada cuenca.

- Modelo Digital de Elevación (MDE) utilizado, descargado gratuitamente de la página del CGIAR-CSI por el Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). El modelo utilizado fue el elaborado por la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de la National Geospatial Intelligence Agency (NASA). El mismo tiene una resolución espacial de 90m x 90m.
- Mapa de tipo de suelo de la región oriental del Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (López et al., 1995).
- Soil Grids, es un sistema de mapeo automatizado del suelo basado en métodos de predicción espacial de vanguardia, ofrece una colección de mapas del mundo de propiedades y clases de suelos actualizables a resoluciones espaciales de 1 km/250m producidas mediante mapas automatizados de suelos basados en algoritmos de aprendizaje automático. Los datos de SoilGrids están disponibles públicamente bajo la licencia Open Data Base.
- Soil water characteristics, A partir de los contenidos de arena y arcilla, provee las relaciones del contenido hídrico y tensión (punto de marchitez, capacidad de campo y saturación) y conductividad hidráulica saturada (Ksat) y no saturada, según la clasificación de tipo de suelos del USDA.

2.4 Métodos utilizados para los componentes del ciclo hidrológico en el HEC-HMS

El método utilizado por el modelo para simulaciones continuas es el Soil Moisture Accounting (Modelo de la Contabilidad de la Humedad del Suelo). Este simula el movimiento y almacenamiento del agua a través de la vegetación, la superficie del suelo, el perfil del suelo y las distintas capas del agua subterránea (Pereira, 2015). En la figura 3 se observa el proceso realizado por el SMA.

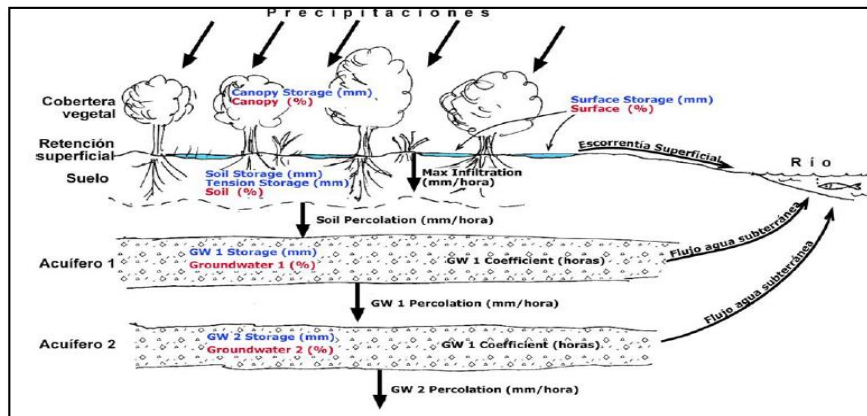


Figura 3. Esquema del Soil Moisture Accounting. Fuente: Manual del Usuario HEC-HMS

Para el caudal base, se optó por el método de Reservorio Lineal, el cual funciona en conjunto con el SMA y supone el tránsito a través de una serie de depósitos lineales. El modelo de transformación es el Hidrograma Unitario de Clark, este consiste en un hidrograma unitario sintético que es estimado de acuerdo con fórmulas que incluyen parámetros físicos de la cuenca de estudio como el área, longitud del cauce principal, pendiente media, etc. Para el tránsito de hidrogramas se utilizó el método de Muskingum-Cunge, que es una técnica de coeficientes no lineales que tiene en cuenta la difusión y amortiguación del hidrograma basado en propiedades físicas del canal y el hidrograma de entrada al tramo.

Por otro lado, la distribución de precipitación se realizó mediante polígonos de Thiessen, asignando un peso a las Estaciones Pluviométricas en cada subcuenca, y la evaporación se estimó a través del método de Thornwaite, utilizando datos de temperatura medidas en las estaciones y dependiendo de la ubicación geográfica de las estaciones.

2.5 Estimación de caudales sintéticos

Teniendo en cuenta que, a excepción del río Apa, no se cuentan con datos observados de caudal en los cauces, por lo que para la calibración de las cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá, se recurrió primeramente a la estimación de caudales sintéticos a partir de datos de nivel observados y recolectados del anuario hidrográfico ANNP. Para ello, se recurrió al Método Área Pendiente, que para el caso en el que ocurren grandes eventos de crecidas, puede estimar el flujo a través de métodos indirectos, con valores de niveles medidos, y estimaciones de parámetros físicos (a través de observación de imágenes satelitales) de las áreas de las secciones transversales (se asumen secciones trapezoidales para el presente caso), la pendiente de los canales, entre otros.

Estos valores se introducen en la ecuación de Manning para estimar el flujo (Ecuación 1), la cual es:

$$Q = \frac{A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (1)$$

Dónde:

Q = Caudal (m^3/s).

n = Coeficiente de rugosidad de Manning, estimados a partir de Ven Te Chow, 1994.

A = Área de la sección transversal.

R = Radio hidráulico, equivalente al área dividido por el perímetro mojado.

S = Pérdida de carga por unidad de longitud del canal, aproximado por la pendiente del canal.

En la mayoría de los cursos hídricos menores, el coeficiente de rugosidad de Manning se encuentra entre 0,010 y 0,750. Si los valores estimados de n , A , R , y S son razonables, la ecuación de Manning puede ser utilizada para estimar el caudal de descarga que ha ocurrido durante un periodo de aguas altas. (W.J. and Lewis, 2003).

Los caudales sintéticos medios se estimaron mediante la optimización de los parámetros en la ecuación de Manning teniendo en cuenta la sección en el lugar de medición de los niveles en régimen permanente y tomando como datos de control caudales estimados en la bibliografía. Este proceso se muestra en detalle en la sección de calibración para cada cuenca.

3. RESULTADOS

3.1 Modelo Conceptual del Sistema

Teniendo definidas las cuencas de estudio, se procedió a generar el modelo de cuencas para cada una de ellas, primeramente, por las características propias de un Modelo Hidrológico Semi distribuido, es imprescindible subdividir el área de proyecto en unidades más pequeñas llamadas subcuencas, generadas de acuerdo a la red de drenaje y la topografía y a las cuales se le asignarán características particulares de acuerdo al tipo de suelo, uso de suelo, precipitación media, etc. Este proceso se realiza para cada una de las cuencas aportantes.

Una vez definido el sistema de drenaje de las cuencas de estudio, es posible crear el modelo conceptual en el HEC-HMS.

En el modelo conceptual se indican los elementos por los cuales estará compuesto el sistema:

-Subcuenca: representa a cada unidad de subcuenca en donde uno ingresa los parámetros asociados al modelo de pérdidas, transformación y caudal base.

-Junction: representa a los nodos del sistema real y son utilizados para sumar los hidrogramas generados en dos subcuencas.

-Reach: representa el tramo de un cauce en donde se introducirán los parámetros asociados al modelo de tránsito de hidrogramas. Este elemento une dos nodos consecutivos.

Este proceso se realizó para cada una de las cuencas aportantes, cuyos resultados se detallan a continuación y se muestra en las figuras 4a, 4b, 4c, 4d y 4e para las cuencas de los ríos Apa, Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá, respectivamente.

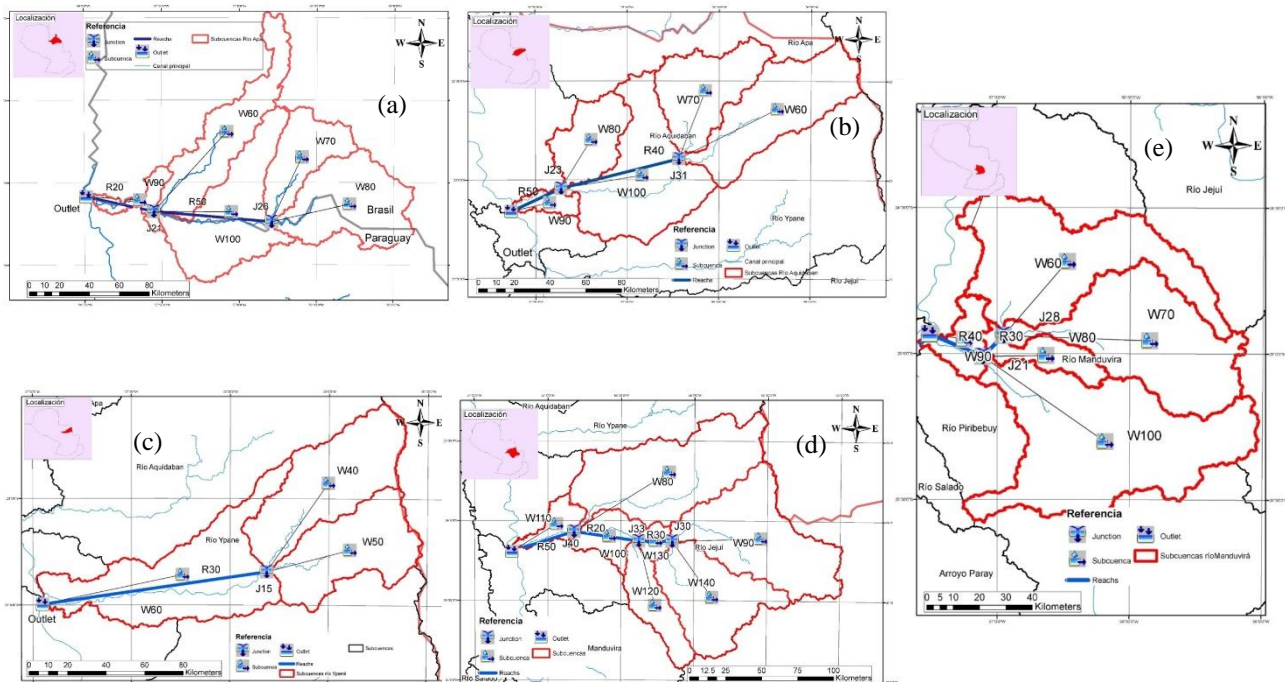


Figura 4. Modelo conceptual utilizado para: (a) Cuenca del río Apa; (b) Cuenca del río Aquidabán; (c) Cuenca del río Ypané; (d) Cuenca del río Jejuí; (e) Cuenca del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Simulación y calibración

Una vez estimados los parámetros iniciales para cada cuenca, se inicia el proceso de calibración, el cual consiste esencialmente en ajustar dichos parámetros, mediante un proceso iterativo, de manera a que el caudal calculado por el modelo replique de la mejor forma posible los caudales observados.

La experiencia con los modelos hidrológicos, concentrados o distribuidos, prueba que ninguna técnica de calibración y que ningún modelo llega a una perfecta correlación entre los valores calculados y observados.

La evaluación de desempeño de cada modelo se realizó con la siguiente función objetivo:

Coefficiente Nash (R^2): tiene un valor máximo igual a 1, que corresponde a un ajuste perfecto entre caudales simulados y observados. El valor de R^2 está fuertemente influenciado por errores de caudales máximas, por esto, cuando es próximo a 1, el modelo está obteniendo un buen ajuste para los picos altos. El desempeño de un modelo es considerado adecuado y bueno si el valor de R^2 supera 0,75, y es considerado aceptable si el valor de R^2 queda entre 0,36 y 0,75 (Gotschalk y Motovilov, 2000).

Los periodos de calibración para las cuencas se seleccionaron de acuerdo a la disponibilidad de datos de precipitación y caudal/nivel observados en las estaciones utilizadas, de forma a que exista una consistencia entre ellos en un mismo periodo.

Es importante recalcar que solo se cuentan con datos de caudal observado en el río Apa, con un registro extenso y con escasos datos faltantes. Para el proceso de calibración en las demás cuencas, se optó por el método de generación de caudales sintéticos explicado anteriormente, los datos de nivel del Anuario Hidrográficos no se encuentran completos, con periodos muy extensos sin datos, con esto en cuenta, se seleccionaron los periodos de forma a poder simular un periodo de al menos dos años, contando con una buena cantidad de datos de precipitación y nivel/caudal.

Cuenca del río Apa

La calibración del modelo en la cuenca se realizó comparando los resultados con caudales observados por la estación São Carlos de la ANA. El periodo seleccionado es del 02 de Enero del 2009 al 31 de Diciembre del 2010, a partir de los parámetros iniciales estimados, se realizó el ajuste de los mismos obteniendo el resultado que se observa en la figura 5a. A simple vista, los caudales calculados se ajustan de buena manera a los observados, exceptuando periodos cortos al inicio de la simulación, pero representando adecuadamente los eventos de crecidas y la frecuencia del hidrograma observado.

Con los parámetros establecidos en la calibración, se validó el modelo evaluando su desempeño en un periodo diferente al de la calibración (figura 5b), el periodo seleccionado fue del 02 de Enero del 2005 al 31 de Diciembre del 2006. El modelo no representa correctamente la frecuencia al inicio de la simulación, sin embargo, se ajusta correctamente en periodos de crecidas y con mucha variabilidad.

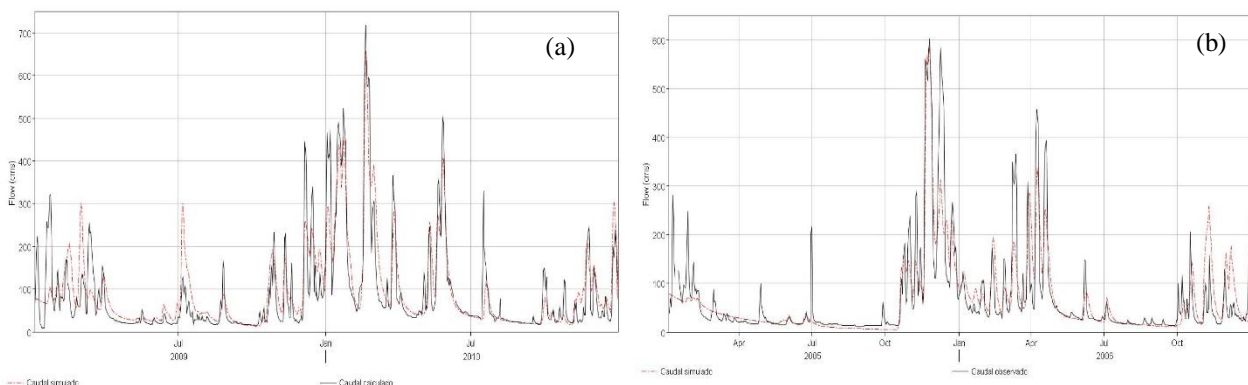


Figura 5. Calibración en la cuenca del río Apa: (a) Calibración; (b) Validación. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 1 se observan los resultados resumidos de acuerdo a ciertos indicadores, considerando estos valores, se concluyó la calibración con los parámetros calibrados y validados.

Tabla 1. Indicadores de evaluación del modelo hidrológico en la cuenca del río Apa. Fuente: Elaboración propia.

Indicadores	Periodo	
	2009-2010	2005-2006
NSE	0.75	0.72
Pico máximo observado (m ³ /s)	716.9	602.00
Fecha pico máximo observado	20/02/2010	25/11/2005
Pico máximo simulado (m ³ /s)	656.9	587.8
Fecha pico máximo simulado	20/02/2010	25/11/2005
Volumen total observado (hm ³)	5622.79	5622.79
Volumen total simulado (hm ³)	5978.78	6939.32
Diferencia del volúmen	+6.33%	+3.13%

Cuencas de los ríos Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá

No se contaron con datos de caudal observado para las cuencas restantes, por lo que para el ajuste, se compararon los caudales simulados con caudales sintéticos determinados a partir de datos de nivel. Los resultados para cada cuenca se muestran en la figura 6.

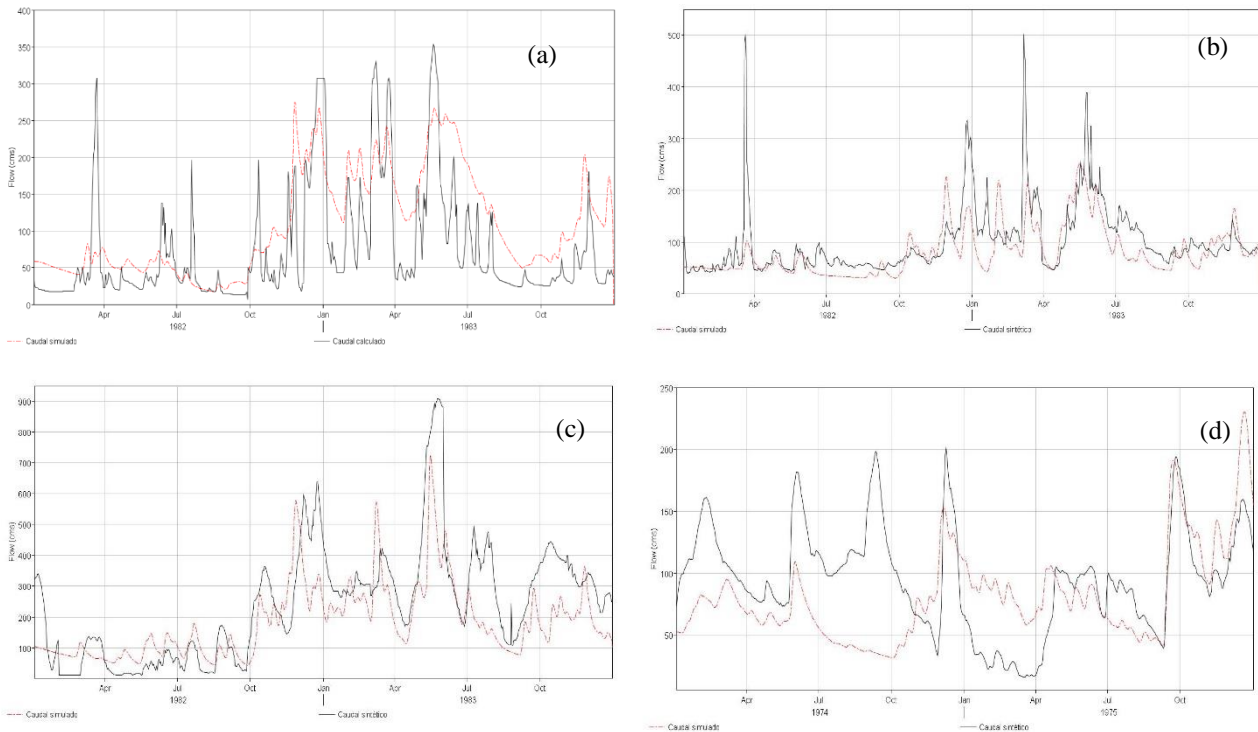


Figura 6. Ajustes del modelo hidrológico en comparación con caudales sintéticos en: (a) Cuenca del río Aquidabán; (b) Cuenca del río Ypané; (c) Cuenca del río Jejuí; (d) Cuenca del río Manduvirá. Fuente: Elaboración propia.

Para la cuenca del río Aquidabán, los caudales sintéticos se generaron de datos de nivel en la Estación Paso Barreto de la ANNP, de acuerdo a la calidad y cantidad de los datos, se seleccionó para la calibración el periodo del 02 de Enero de 1981 al 31 de Diciembre de 1982. Los caudales simulados no se ajustan principalmente en frecuencia con los caudales sintéticos (figura 6a), sin embargo, se mantienen dentro del mismo rango de magnitudes, considerando el método utilizado, y consultando con datos bibliográficos del río, los valores obtenidos se consideran aceptables para el propósito del modelo.

Para el caso del río Ypané, la calibración y generación de caudales sintéticos se realizó con datos de la estación de Belén. El periodo seleccionado fue el del 02 de Enero de 1982 al 31 de Diciembre de 1983, el resultado se muestra en la figura 6b. Se muestra un mejor ajuste al de la cuenca del Aquidabán, en los caudales sintéticos, se observan picos altos que el modelo no logra replicar y que tampoco se ajustan a los valores de referencia, de igual forma, ambos hidrogramas tienen un comportamiento similar.

En la cuenca del río Jejuí, se utilizó la estación Cruce Ruta III de la ANNP para el ajuste de parámetros. El periodo de calibración fue establecido entre el 02 de Enero de 1982 y el 31 de Diciembre de 1983. En la figura 6c se observan los resultados, se tiene un ajuste adecuado a lo largo del periodo de simulación, acompañando en general la frecuencia de los caudales sintéticos. El ajuste se consideró satisfactorio para los efectos del proyecto.

Por último, en la cuenca del río Manduvirá se generaron caudales sintéticos a partir de los datos de nivel de la Estación Tobatí Tuyá. Para el ajuste, no se tenían valores históricos de caudal como en los casos anteriores, sin embargo, se ajustaron los valores de acuerdo al valor promedio manejado en la bibliografía, donde el caudal promedio (17 años de registro - Balance Hídrico DINAC) del Río Manduvirá es 136 m³/s, equivalente a 456 mm de escorrentía (Toñánez, 2014). La calibración se realizó con los datos de la estación ubicada en Tobatí Tuyá, recopilados del anuario hidrográfico. De acuerdo a lo detallado, se ajustó el modelo con los datos de dicha estación, el periodo de simulación seleccionado fue del 04 de Enero de 1974 al 31 de Diciembre de 1975. Los resultados se ven en la figura 6d, al inicio del periodo de simulación, existe una frecuencia similar pero con una diferencia de magnitud notable, esto se puede deber a la escasez en los datos de precipitación, los cuales no logran representar correctamente la variabilidad que ocurre dentro de una cuenca de mayor tamaño como esta, el ajuste mejora al final del periodo y en general, no es óptimo, pero se los considera aceptable para los efectos del proyecto, como se mencionó anteriormente, de haber desfases muy grandes, éstos se notan en el modelo hidráulico y se pueden corregir de esta forma. Con los parámetros establecidos, se generaron los caudales de aporte a dicho modelo.

4. CONCLUSIONES

Conforme se observaron, se alcanzaron resultados, en general, aceptables. Se obtuvieron resultados muy buenos en la cuenca del río Apa, con valores altos del coeficiente R^2 , a pesar de la escasez de datos de precipitación. La calibración en las cuencas de los ríos Ypané y Jejuí se consideraron buenos en el periodo de calibración, sin embargo, el ajuste no fue óptimo en las cuencas de los ríos Aquidabán y Manduvirá, pero, para los fines de esta componente del proyecto, se consideran suficientes.

Ante la ausencia de datos de caudal observado en la mayoría de las cuencas, se recurrió al método de Área-Pendiente para la generación de caudales sintéticos, con los cuales se ajustaron los modelos. Éstos no comprenden datos reales, por lo que se manejan teniendo en cuenta sus limitaciones, asimismo, esto hizo que la calibración consista en un ajuste aproximado a estos valores, manteniendo los resultados en un rango de valores aceptables.

Los hidrogramas se utilizaron como aporte lateral en el modelo hidráulico, para la simulación en el periodo del 2006 al 2018, y se evaluaron a la par de los resultados de este, de manera a identificar y enmendar errores. Por otro lado, se pudo estimar el nivel de influencia que tienen las cuencas estudiadas en el caudal del río Paraguay que llega a Asunción, según los resultados de las

modelaciones, teniendo que de todo el caudal de entrada a Asunción, aproximadamente el 21% de éste representa el aporte de las cuencas de los ríos Apa, Aquidabán, Ypané, Jejuí y Manduvirá. El aporte de cada una de estas cuencas en base a ese porcentaje se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Aporte de caudal de cada cuenca de estudio, de acuerdo a los resultados. Fuente: Elaboración propia.

	Apa	Aquidabán	Ypané	Jejuí	Manduvirá
Aporte (%)	23.73	12.92	12.19	29.70	21.46

También es indispensable aumentar la densidad de las estaciones de monitoreo. La cantidad de estaciones pluviométricas para cada cuenca fue muy por debajo de lo recomendado, limitando considerablemente los resultados. De igual forma, no se contaron con datos de caudal observado en las cuencas; a excepción de la del río Apa, siendo lo óptimo realizar la calibración con datos reales y en periodos más recientes.

Por último, es necesario destacar que, con las limitaciones encontradas, se generaron modelos hidrológicos para cinco cuencas de gran importancia en la Región Oriental, los cuales constituyen un importante aporte del proyecto, facilitando la posibilidad de mejorarlos ante mayor cantidad y calidad de datos, en aplicaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

Al Msc Ing. Roberto Takahashi y al MSC Ing. Benito Pereira por su apoyo y contribución al trabajo.

REFERENCIAS

- Chávez, S.; Meyer, C.; Santos, S. (2006). "División Administrativa y Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales de la República del Paraguay a partir de las Cuencas Hidrográficas". Tesis de Grado de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción.
- Chow, V. T. (1994). "Hidráulica de canales abiertos". McGraw-Hill Interamericana.
- Echeverria, C.; Bravo, J.; Collischonn, W. (2011). "Aplicação do Modelo Hidrológico MGB-IPH na bacia transfronteiriça do rio Apa". XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- Gottschalk, L.; Motovilov, Y. (2000). "Macro-scale hydrological modelling - scandinavian experience. In: International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century - reports from the World'. Japan Society of Hydrology and Water Resources, Tokyo. López, O.; González, E.; Llamas, P.; Molinas, A.; Franco, E.; García, S.; Ríos, E. (1995). "Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra". MAG.
- Pereira, B. (2015). Implementación del Modelo Hidrológico HEC-HMS en la Cuenca del Río Carapa. Tesis de Grado de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Asunción - Paraguay.
- U. S. Army Corps of Engineers (2010). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual". Version 3.5.
- Viessman, W. J. & Lewis, G. L. (2003) 5ta. Edición. "Introduction to Hydrology".

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS: YPANÉ Y JEJUI, UTILIZANDO HEC-HMS CON FINES DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS EN EL RÍO PARAGUAY

Rosa Aseretto¹, Roger Monte Domecq²; Roberto Takahashi³.

RESUMEN – Este trabajo forma parte del Proyecto CONACYT-UCA “DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE PRONOSTICO DE NIVELES Y CAUDALES DEL RIO PARAGUAY” (14-INV-280), ejecutada por el Centro de Tecnología Apropriada (CTA) de la Universidad Católica de Asunción, cuyo objetivo es; establecer un sistema de pronóstico de niveles y caudales del Río Paraguay mediante la implementación de modelos: hidrológico en las cuencas interiores e hidráulico en el cauce del río Paraguay, calibrados y validados para el tramo de la cuenca media del Río Paraguay, en territorio Paraguayo.

Se utilizó el Modelo Hidrológico HEC-HMS y se trabajó con un modelo continuo, el SMA, modelo de contabilidad de la humedad del suelo, que simula el comportamiento de los ríos tanto en climas húmedo como en seco; para generar hidrogramas aportantes al río Paraguay, con fines de una ulterior modelación hidrodinámica del río con fines de previsión de niveles y caudales para diferentes pronósticos de tiempo. Se realizó la calibración teniendo mejores resultados en épocas de crecida, la misma se realizó para la cuenca del Río Ypané desde el año 1974 hasta 1987 y para la cuenca del Río Jejuí se calibró desde el año 1978 hasta 1991.

Palabras claves: Modelo hidrológico HEC-HMS, SMA.

ABSTRACT – This work is part of the CONACYT-UCA Project "DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A PRONOSTICO SYSTEM OF LEVELS AND FLOWS OF THE PARAGUAY RIVER", executed by the Appropriate Technology Center (CTA) of the Catholic University of Asunción, whose objective is; establish a system for forecasting the levels and flows of the Paraguay River through the implementation of hydrological models in the interior and hydraulic basins of the Paraguay River, calibrated and validated for the section of the middle basin of the Paraguay River, in Paraguayan territory.

The Hydrological Model HEC-HMS, was used and a continuous model, SMA (soil moisture accounting model), which simulates the behavior of rivers in both humid climates, was used. as in dry; to generate contributing hydrographs to the Paraguay River, for the purpose of a further hydrodynamic modeling of the river for the purpose of forecasting levels and flows for different weather forecasts. Calibration was performed with better results in times of flood, it was performed for the Ypané River basin from 1974 to 1987 and for the Jejuí River basin it was calibrated from 1978 to 1991.

Keywords: Hydrological model, HEC-HMS, SMA

1) Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, Facultad de Ciencias y Tecnología, roaseretto@gmail.com

2) Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, Facultad de Ciencias y Tecnología, roger.montedomecq@gmail.com

3) Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, Facultad de Ciencias y Tecnología, rhtaka@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

En el área de los recursos hídricos, se puede notar la falta de información actualizada, sobre los niveles y caudales de los principales afluentes del Río Paraguay, que a su vez podrían utilizarse para generar pronósticos de crecidas e inundaciones que eventualmente puedan ocurrir, como también un sistema de alerta temprana en base a los datos obtenidos. En este caso se seleccionaron dos de los principales cauces afluentes al Río Paraguay en su margen izquierda: los ríos Ypané y Jejuí localizados al norte de la región oriental y en la zona media de la cuenca del Río Paraguay.

De acuerdo a varios estudios realizados en el Río Paraguay, las lluvias que ocurren en su cuenca media generan caudales por encima de los niveles normales en la zona al sur de Asunción y por tanto es necesario caracterizar la respuesta de las sub cuencas que drenan al mismo en su tramo medio, los cuales contribuyen al régimen generado por las lluvias estacionales del Pantanal.

1.1. Objetivo.

Implementación del modelo hidrológico en las cuencas, para la obtención de hidrogramas a ser utilizados en un modelo hidrodinámico del Río Paraguay, de forma semioperativa para la realización de pronósticos hidrológicos.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Cuenca del Río Ypané

Se extiende de este a oeste en la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil (la cordillera de Amambay como límite natural), al oeste con el Río Paraguay, al norte con la cuenca del Río Aquidabán y al sur con la cuenca del Río Jejuí Guazú. La superficie de su cuenca es de 10.266 Km². aproximadamente, desemboca en la margen izquierda del río Paraguay a la altura del km. 692 contando desde la confluencia de los ríos Paraguay - Paraná.

Para este estudio se considera una superficie de 9.950 Km² aproximadamente.

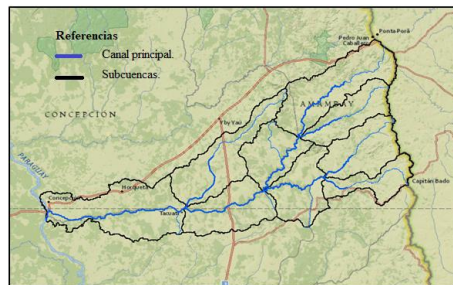


Figura: 1. Cuenca del Río Ypané. Fuente: Elaboración propia

3.2 Cuenca del Río Jejuí

Se extiende de este a oeste de la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil, al oeste con el Río Paraguay, al norte con la cuenca del Río Ypané y al sur con la cuenca del Río Manduvirá. El Río Jejuí Guazú desemboca en el río Paraguay hacia su margen izquierda en el km. 571 contando a partir de la confluencia de los ríos Paraguay-Paraná. La superficie de la cuenca del Río Jejuí Guazú es de aproximadamente 22.719 km².

Para este estudio se consideró una superficie de 20.098,513 Km²

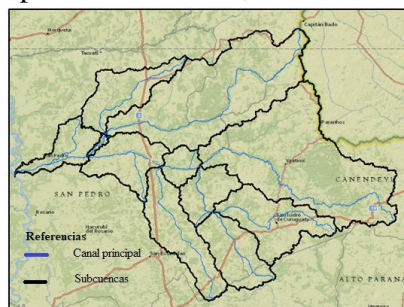


Figura: 2. Cuenca del Río Jejuí. **Fuente:** Elaboración propia

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2. Datos de series de tiempo.

4.2.1. Datos diarios de precipitación

Se dispone de datos de cinco estaciones meteorológicas e hidrométricas distribuidas en las dos cuencas de estudio. Los datos utilizados para la preparación de las series de lluvias diarias provienen de la Dirección de Meteorología e Hidrología de la DINAC.

Tabla: 1. Estaciones Meteorológicas utilizadas. **Fuente:** Dirección de Meteorología e Hidrología.

CODIGO	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	DEPARTAMENTO	LATITUD SUR	LONGITUD OESTE
86134	Concepción	Concepción	23°26' 29,51	57°25' 48,67
86185	San Pedro	San Pedro	24° 5' 6,85	57°5' 15,17
86097	PJC	Amambay	22°38' 25,00	55°49' 57,81
86192	San Estanislao	San Pedro	24°40' 1,00	56°26' 53,29
86210	Salto del Guaira	Canindeyú	24°1' 57,27	54°21' 13,81

4.2.2. Datos históricos de niveles.

Se obtuvieron los datos hidrométricos históricos de niveles en los ríos Ypané y Jejuí respectivamente, de las estaciones: de Belén y del Cruce ruta 3 del Anuario Hidrográfico, que fueron utilizados para la estimación de sus respectivas curvas de descarga altura-caudal (H-Q). El anuario hidrográfico dispone un registro de lecturas, desde el 01/01/1974 hasta el 31/12/1991, que corresponden a la ANNP (Administración Nacional de Aduanas y Puertos).

Para la cuenca del Río Ypané que corresponde a la Estación Belén; fueron seleccionados los años con menos errores de lectura o transcripción y se tomó desde el 01/01/1974 hasta el 31/05/1987.

Para la cuenca del Río Jejuí se utilizaron los datos correspondientes a la Estación Cruce Ruta 3, solo se utilizaron los años que disponían de registros completos, y se seleccionó desde el 19/08/1982 al 31/12/1991.

4.3. Datos de estudio de suelo.

Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (PRUT): Es un estudio de reconocimiento de suelos y determinación de su capacidad de uso en la Región Oriental del Paraguay, a efectos de sentar las bases para la planificación racional del uso y manejo sustentable de este recurso y la promoción de su ordenamiento territorial. (PRUT, 1995).

4.4. Descripción de los métodos utilizados para los componentes del ciclo hidrológico en el HEC-HMS.

El método utilizado modelo continuo es el SMA. Tiene en cuenta cinco niveles distintos en los que la precipitación puede ser retenida o almacenada: vegetación, retenciones superficiales, suelo, acuífero 1 (superficial) y acuífero 2 (más profundo).

Para lo que se generó el modelo conceptual determinando las características fisiográficas esenciales de los sistemas, área de las subcuencas y longitud de los tramos de los cauces de ríos.

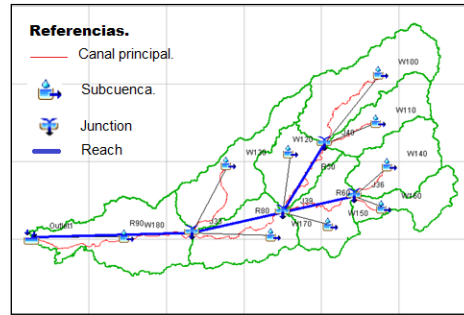


Figura 3. Modelo conceptual de la Cuenca del río Ypané Fuente: Elaboración propia

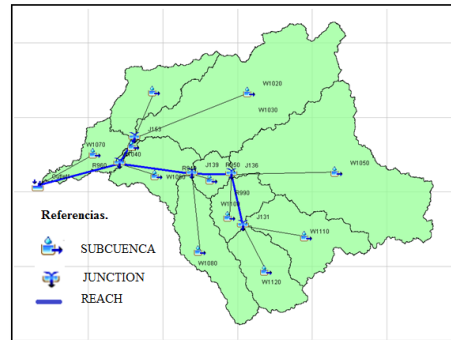


Figura 4. Modelo conceptual de la Cuenca del río Jejuí en HEC-HMS. Fuente: Elaboración propia

a) Interceptación en la cubierta vegetal (Interception Canopy): Representa la parte de la precipitación que no alcanza el suelo porque es retenida en las plantas. Mediante inspección visual de las imágenes satelitales disponibles a través de Google Earth, se obtuvo el porcentaje de superficie ocupada por la vegetación (Zonas boscosas) y el uso del suelo (Zonas agrícolas) en el conjunto de cada subcuenca; posteriormente se utilizaron los valores propuestos por Vélez et al.(2009), para obtener un valor ponderado en cada subcuenca. Para este trabajo se optó solo por tener en cuenta; la retención en zonas agrícolas (3 mm) y zonas boscosas (9 mm).

b) Almacenamiento en depresiones superficiales (Surface depression storage): Es el volumen de agua retenido en las irregularidades de la superficie del terreno. Se utilizó el criterio de Gaete y Vergara, especificado en el “Manual de diseño de Sistemas de Riego Tecnificado” (2001), porque permite estimar la Capacidad de Infiltración en función a la textura del suelo, y posteriormente aplicar un factor de corrección en función a la pendiente de la superficie. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la tasa máxima de infiltración también depende de otros factores que son ignorados, como el uso de suelo, que en este caso es predominantemente agrícola.

Dentro de la clasificación “agrícola”, la capacidad de infiltración también puede variar en función al tipo de cultivo y a la cantidad de materia orgánica presente en los campos.

c) Almacenamiento en el suelo (Soil profile storage): La entrada es la infiltración desde la superficie. Las salidas son la ET y la percolación hacia el acuífero subyacente. Los parámetros solicitados por el método SMA (Soil Moisture Accounting) fueron posibles estimar; con los datos de espesor y textura de suelo; materia orgánica (datos del PRUT y SoilGrids), y la utilización del software Soil Water Characteristics (SWC).

Con el SWC se estima la conductividad hidráulica del suelo, la capacidad de campo y la saturación del suelo, mediante el porcentaje de arcilla, arena y la materia orgánica de cada tipo de suelo. En ausencia de mejor información, la “Máxima Tasa de Percolación del Suelo (mm/hr)” solicitada por el SMA, es asumida como igual a la Conductividad Hidráulica vertical de la superficie del suelo. Por otra parte, los parámetros “almacenamiento del suelo (mm)” y “zona de tensión (mm)” son asumidos como la saturación y la capacidad de campo (proporcionados por el SWC), respectivamente.

d) Almacenamiento en los acuíferos (Ground wáter storage): El modelo distingue dos niveles: almacenamiento subterráneo 1 y almacenamiento subterráneo 2.

Las capas subterráneas del subsuelo requieren 6 (seis) parámetros. Los parámetros estimados son la Capacidad de Almacenamiento (mm) y el Coeficiente (hr) de respuesta de los dos acuíferos. Estos valores se estiman a partir del uso del Soil Grids que nos da los porcentajes de arena y arcilla, para espesores de 1 metro (1000 mm.) para el almacenamiento subterráneo 1 (GW1) y 2 metros (2000 mm.) para el almacenamiento subterráneo (GW2), luego con el SWC se estima la conductividad hidráulica, capacidad de campo, punto de marchitamiento y saturación.

4.4.1. Cálculo del Caudal Base

Se utilizó el método Reservorio Lineal que supone el tránsito a través de una serie de depósitos lineales. El método simula el almacenamiento y el movimiento del flujo subsuperficial a través de reservorios.

-Contenido inicial de agua subterránea (GW Initial): Es el caudal inicial, en el momento que el modelo comienza a trabajar.

-Coeficiente de agua subterránea (GW Coefficient): Es el coeficiente de almacenamiento de agua subterránea. El acuífero actúa como un lago o embalse, que recibe y suelta agua, también el acuífero atenúa el caudal y lo retrasa, como en cualquier procedimiento de tránsito de caudales.

-Reservorios de agua subterránea (GW Reservoirs): Simula cada acuífero como un número de depósitos en cadena que provocan la atenuación del caudal que se comenta más arriba. Se toma dos reservorios. Teniendo en cuenta la ausencia de datos, los coeficientes de los acuíferos solicitados en este método serán asumidos como iguales a los coeficientes determinados para el método de pérdidas.

4.4.2. Modelo de Transformación: Hidrograma Unitario de Clark.

El Hidrograma Unitario de Clark, es estimado con fórmulas que incluyen parámetros físicos de las cuencas de estudio como; el área, longitud del cauce principal, pendiente media, etc.

Para el TC se optó por la Fórmula de Kirpich (1940), que fue recogida en el libro “Hidrología Aplicada”, de V.T. Chow, fue calibrada con base en los datos registrados en 7 cuencas rurales de Tennessee, en E.E.U.U. Las cuencas consideradas presentaban una superficie inferior a 50 hectáreas y cauces bien definidos, con pendientes que oscilaban entre 3 % y 10 %. Para su utilización en cuencas con características diferentes a las utilizadas en el proceso de calibrado, se puede tener en cuenta lo indicado al respecto por D.A. Chin en su libro “Water Resources Engineering”, en el que se incluyen algunos coeficientes correctores, que se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla: 2 .Coeficiente corrector de la fórmula de Kirpich.

Campo de aplicación	Coeficiente corrector
Superficies pavimentadas	0,4
Canales de hormigón	0,2
Cuencas naturales	2,0

Teniendo en cuenta la información de la tabla anterior, la expresión final de la fórmula de Kirpich, aplicada a cuencas naturales es;

$$Tc = 0,13252 \times \frac{J^{0,77}}{L^{0,385}} \quad (1)$$

Tc: Tiempo de concentración, en horas.

L: Longitud del curso de agua principal, expresada en km.

J: Pendiente media del curso de agua principal.

Para el coeficiente de almacenamiento, se ha investigado para obtener una ecuación práctica de R. En estudios realizados en cuencas aforadas por el Cuerpo de Ingenieros HEC (1982) se establece la siguiente ecuación:

$$\frac{R}{R+T_c} = K \quad (2)$$

Siendo:

T_c: Tiempo de concentración, en horas.

R: Coeficiente de almacenamiento, en horas.

K: Parámetro, cuyo valor se sitúa en un rango de variación comprendido entre 0,1 y 0,9, correspondiendo este último valor a zonas con poca pendiente y con uso agrícola.

4.4.3. Cálculo de Tránsito de Hidrograma.

Se optó por el modelo Muskingum – Cunge, que es una técnica de coeficientes no lineales que tiene en cuenta la difusión y amortiguación del hidrograma basado en propiedades físicas del canal y el hidrograma de entrada al tramo.

- Configuración de la Sección Transversal del canal dado por 8 puntos: con esta configuración mostrada en la figura 4, los puntos 3 y 6 representan las orillas izquierda y derecha del canal, respectivamente. Los puntos 4 y 5 se encuentran entre el canal. Los puntos 1 y 2 representan los puntos finales de la planicie de inundación del lado izquierdo, mientras que los puntos 7 y 8 representan los puntos finales de la planicie de inundación del lado derecho.

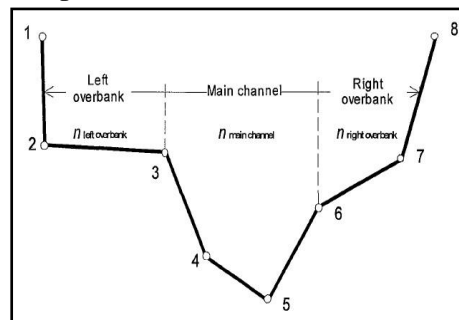


Figura: 5. Sección transversal de 8 puntos. Fuente: Manual de Referencias Técnicas del HEC-HMS.

4.4.4 Distribución de la Precipitación.

Se disponen de varios métodos para realizar el cálculo de la distribución de la precipitación en cuencas, para este trabajo se utilizó el inverso de la distancia; es un método local, que usa la información procedente de los pluviómetros más cercanos, por el cual el valor estimado se calcula a partir de los valores de las estaciones más cercanas, dando distintos peso a cada una de ellas según la distancia a la que se encuentren del punto estimado, de forma que a mayor distancia de una estación al punto de interpolación menor será su peso. Esta metodología es la recomendada por el HEC cuando las simulaciones se realizan para procesos operativos de predicción. Se utilizaron las estaciones de la tabla 1.

En general, la expresión que se utiliza para emplear este método es la siguiente:

$$Z_s = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{Z_i}{d_i^\alpha}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^\alpha}} \quad (\alpha > 0) \quad (3)$$

Donde;

d: Distancia del centroide de la cuenca a la estación más cercana.

Z_i: Es el valor de precipitación observado en la estación meteorológica.

4.4.5. Estimación de caudales sintéticos.

La realización de mediciones de velocidad para determinar los caudales de descarga no siempre se puede realizar, por lo mismo se opta por utilizar el Método Área Pendiente, que para el caso en el que ocurren grandes eventos de crecidas, puede estimar el flujo a través de métodos indirectos, tomando mediciones; de los niveles después de los eventos, áreas de las secciones transversales, la pendiente de los canales. Luego introducir estos parámetros en la ecuación de Manning para estimar el flujo.

La ecuación de Manning es;

$$Q = \frac{A \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (4)$$

Donde;

Q: Caudal en m³/s.

R: Radio Hidráulico.

S: Pendiente del canal en condiciones de flujo uniforme.

n: Coeficiente de Rugosidad de Manning.

A: Área de la sección transversal en m².

4.4.6. Evapotranspiración.

Se utilizó el método de Thornthwaite, los datos necesarios son; de temperatura (provenientes de la DMH) y de la latitud por una tabla se obtiene el n° teórico de horas de sol.

5. RESULTADOS.

Después de realizar los ajustes manuales y automáticos a los parámetros del modelo, teniendo en cuenta los análisis hechos, a continuación se presentan los resultados de las simulaciones y calibraciones. Los años utilizados para la calibración en la cuenca del Río Ypané fueron desde el año 1976 a 1984 y para la cuenca del Río Jejuí desde el año 1982 a 1989, los datos utilizados para generar la curva H-Q fueron del Anuario Histórico de la ANNP, por la falta de datos actualizados.

Para la cuenca del Río Ypané en la Figura: 6 se observa la simulación de los caudales calibrados con un pico máximo de 300 m³/s; el volumen total escurrido de 2554,04 mm y para el sintético simulado se tiene un pico máximo de 548,5 m³/s, y el volumen total escurrido de 2338,37 mm, se tiene una diferencia porcentual de 9,22 % (se sobre estima el volumen).

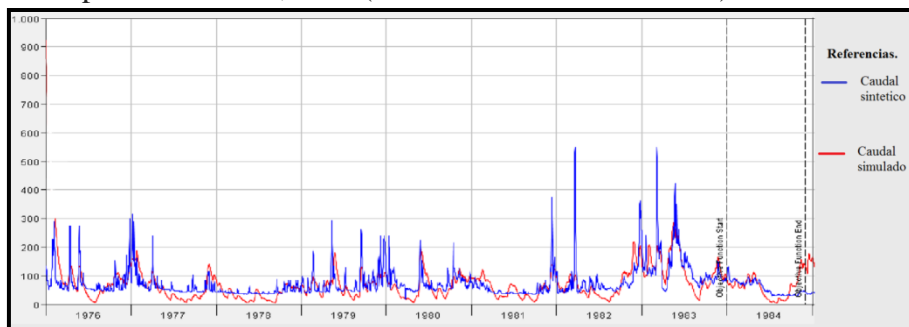


Figura: 6. Simulación de la cuenca del Río Ypané, luego de calibrar.

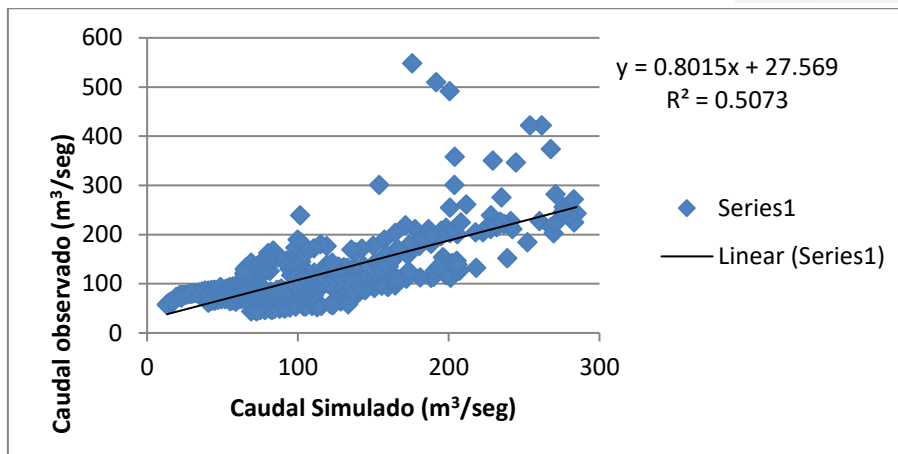


Figura: 7. Coeficiente de determinación para los caudales observados- simulados del Río Ypané. Fuente: Elaboración propia

Se observa en la figura 6 que en años de crecida replica mejor el modelo, pero en los picos se tiene sub estimación ya que no acompaña al hidrograma sintético, teniendo en cuenta la Figura: 7, se puede decir que la calibración es positiva alta, según el Coeficiente de Correlación de Pearson; pero, hay que tener en cuenta que se utilizó un método empírico, el método área pendiente que tiene sus limitaciones. Algunas son;

- La sección transversal estimada no es la correcta.
- La cota cero del nivel es estimada.
- Al igualar la ecuación de Manning con la pendiente de la superficie del agua con la pendiente del lecho del río se asume una condición de flujo permanente diario, lo cual no representa apropiadamente los eventos de crecidas.

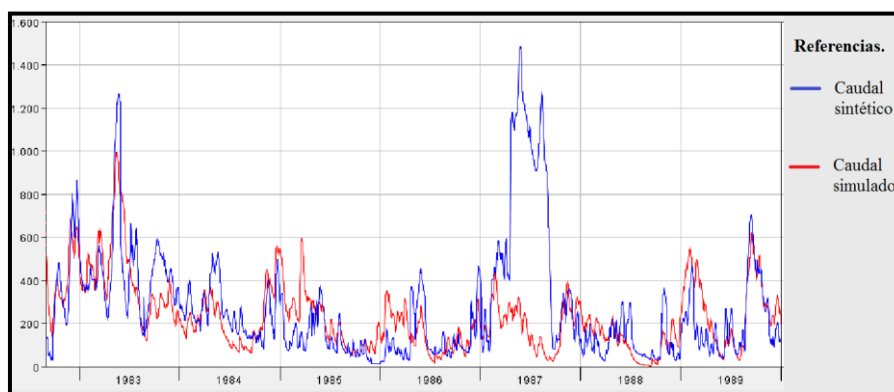


Figura: 8. Simulación río Jejuí luego de calibrar el modelo.

Para la cuenca del Río Jejuí se observa en la Figura: 8 la simulación de los caudales calibrados con un Pico Máximo de 993,5 m³/s, y un Volumen Total Escurrido de 2689,32 mm. En otras palabras, el modelo sub-estima el Pico Máximo en un -33% y sub-estima el Volumen Total Escurrido en un 16,15%. Observando la figura 9 se puede decir que la calibración tiene una correlación positiva alta, según el coeficiente de correlación.

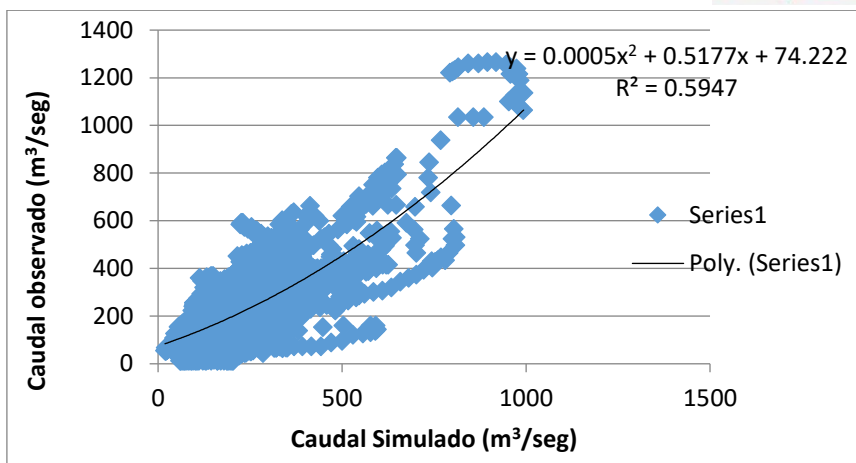


Figura: 9. Coeficiente de determinación para los caudales observados- simulados del Río Jejuí. Fuente: Elaboración propia.

5.1. Comparación de los resultados obtenidos: Proyecto-Tesis

Como se mencionó, este trabajo forma parte del Proyecto UCA-CONACYT, INV 280 por lo que se realizó una comparación de los hidrogramas de las cuencas del río Ypané y del Río Jejuí.

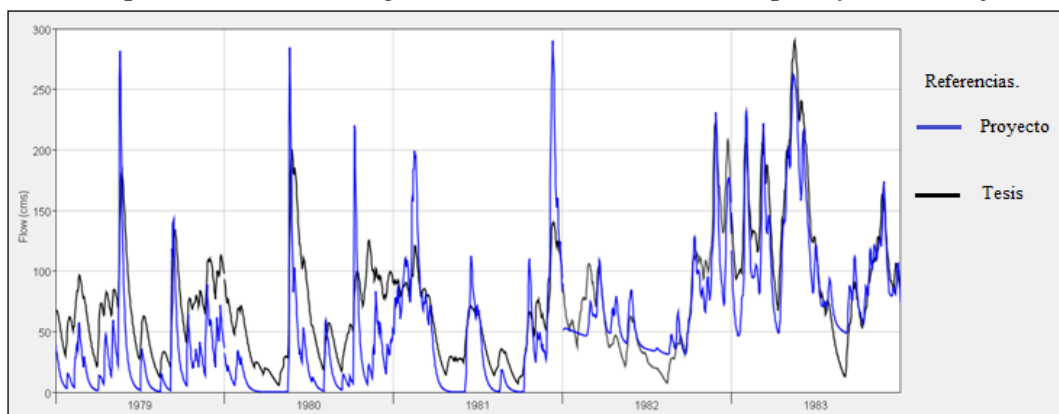


Figura: 10. Comparación de los hidrogramas en DSS obtenidos en la cuenca del Río Ypané

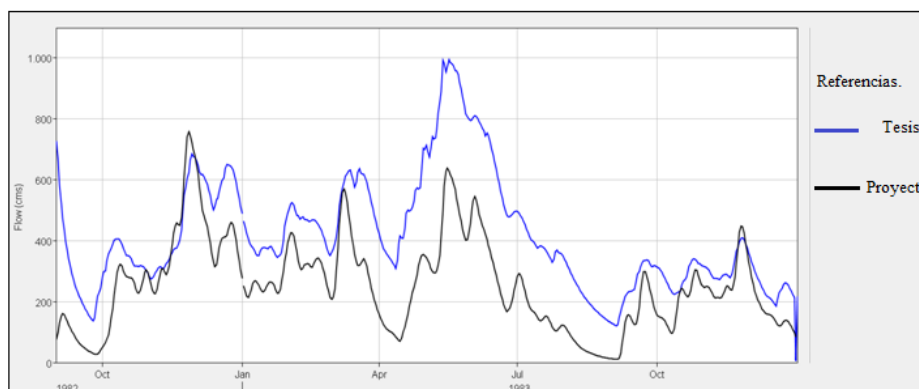


Figura: 11. Comparación de los hidrogramas en DSS obtenidos en la cuenca del Río Jejuí..

Observando las Figuras: 10 y 11, ambos hidrogramas tienen la misma forma, el de la tesis está sobre estimado, comparando con el hidrograma del proyecto, se debe a las estaciones utilizadas, ya que en el proyecto se tuvieron cuatro estaciones y para la tesis cinco estaciones; la distribución de la precipitación fue hietograma especificado y el método de distribución fue por polígonos de Thiessen en el proyecto; en la tesis el método de distribución de la precipitación fue inverso de las distancias. La subdivisión en subcuencas en el proyecto fue de siete subcuencas y en la tesis se subdividió en once subcuencas.

Por lo que se concluye que las diferencias son en función a las estaciones meteorológicas utilizadas, como a los métodos de distribución de la precipitación y a la sub división de las cuencas.

6. CONCLUSIONES.

En este trabajo de investigación de implementación del modelo hidrológico HEC-HMS tuvo un resultado aceptable, a pesar de las limitaciones de datos, por lo que se realizó la selección de los datos de niveles históricos, ya que en algunos años en la serie de tiempo se encuentran incompletos y/o los datos presentan valores incoherentes (valores negativos), para obtener una curva Altura-Caudal con el menor error posible.

Como se puede observar el modelo replica en épocas de crecidas; y en estiaje acompaña, la forma del hidrograma simulado, se puede decir que se tuvo un resultado aceptable con una bondad de ajuste para el Río Ypané de $R^2= 6,05$ y para el Río Jejuí $R^2= 0,594$, según el coeficiente Nash. Lo que significaría que el modelo puede ser utilizado para predicciones de eventuales crecidas, mediante la simulación del cambio de estado del régimen hidrológico y que está sujeto a una posterior calibración teniendo en cuenta caudales deben ser medidos.

Además, la investigación contribuyó al proyecto UCA-CONACYT “DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE PRONOSTICO DE NIVELES Y CAUDALES DEL RIO PARAGUAY”, con las metodologías empíricas utilizadas que fueron aplicadas al proyecto como a este trabajo.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo fue desarrollado como Tesis Final de Grado para obtener el título de Ingeniera Ambiental, por lo que corresponde agradecer especialmente al Ing. Roger Monte Domecq y al M.S. Ing. Roberto Takahashi, por la disponibilidad de tiempo, predisposición y orientación en todo momento durante la realización de este trabajo.

7. REFERENCIAS

- APARICIO, F.J. *Fundamentos de Hidrología de Superficie* – 1ra Edición. México, Editorial LIMUSA, 1992. ISBN 968-18-3014-8.
- BANCO MUNDIAL & MAG. (1995). *Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra*. Asunción - Paraguay.
- CHOW, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana.
- COLLISCHONN, W., & TASSI, R. (2008). *Introduzindo Hidrologia* (5ta. ed.). Porto Alegre - Brasil: Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH-UFRGS.
- FATTORELLI, S., & FERNÁNDEZ, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico*. Edición digital publicada en la biblioteca virtual de la WASA-GN. ISBN: 978-987-05-2738-2.
- FRANCÉS, F., & MÚNERA, J. (2008). “*Modelación hidrológica distribuida de la cuenca de los ríos saja-besaya con el modelo tetis v.7.2, para estimación probabilística de avenidas en los períodos de estiaje*”. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias - Colombia.
- ITAIPU-FPTI (2011). “*Proyecto: Inventario de los Recursos Hidroenergéticos de las cuencas Hidrográficas de los ríos afluentes del Paraná y Paraguay en la Región Oriental del Paraguay (RHPY)*”. Atlas Potencial Hidroenergético del Paraguay, Vol. 1 y Vol. 2
- KIRPICH, JUN (1940). *Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds*.
- PONCE, V.M. (1989). *Engineering Hydrology*. Prentice Hall.
- SAXTON, K.E, RAWES W.J. (2006). “*Soil Water Characteristics Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions*”.
- VISSMAN, W. J. & LEWIS, G. L. (2003) 5ta. Edición, *Introduction to Hydrology*.
- USACE - U.S. Army Corps of Engineers. (2016). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User’s Manual*. Version 4.2.



MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS: YPANÉ Y JEJUI, UTILIZANDO HEC-HMS CON FINES DE PRONÓSTICOS HIDROLÓGICOS EN EL RÍO PARAGUAY

Rosales Asensio, Roger Motta Domínguez, Roberto Takahashi,
Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción"

Introducción

En el área de los recursos hídricos, se puede contar la falta de información actualizada, tanto las crecidas y sequías de los períodos últimos del Río Paraguay, que a su vez son causadas por el cambio climático, como la contaminación por actividades agropecuarias, urbanas, industriales, entre otras, que generan un aumento de la contaminación del agua. En este sentido, el presente artículo tiene como objetivo general proporcionar información sobre los pronósticos hidrológicos en las cuencas de los ríos Ypané y Jejui, considerando el uso de los modelos hidrológicos HEC-HMS y HEC-RAS, en el contexto del río Paraguay. El área de estudio de la cuenca del río Paraguay es de 10.200 km² y el río principal es el río Paraguay, que tiene una longitud de 1.200 km. El río principal del río Paraguay es el río Paraguay, que tiene una longitud de 1.200 km. El río principal del río Paraguay es el río Paraguay, que tiene una longitud de 1.200 km.



Materiales y Métodos

Variable	Unidad	Valor	Observaciones
Superficie	km ²	10.200	Cuenca del río Paraguay
Longitud	km	1.200	Longitud del río principal
Altitud	m	100	Altitud promedio

Resultados

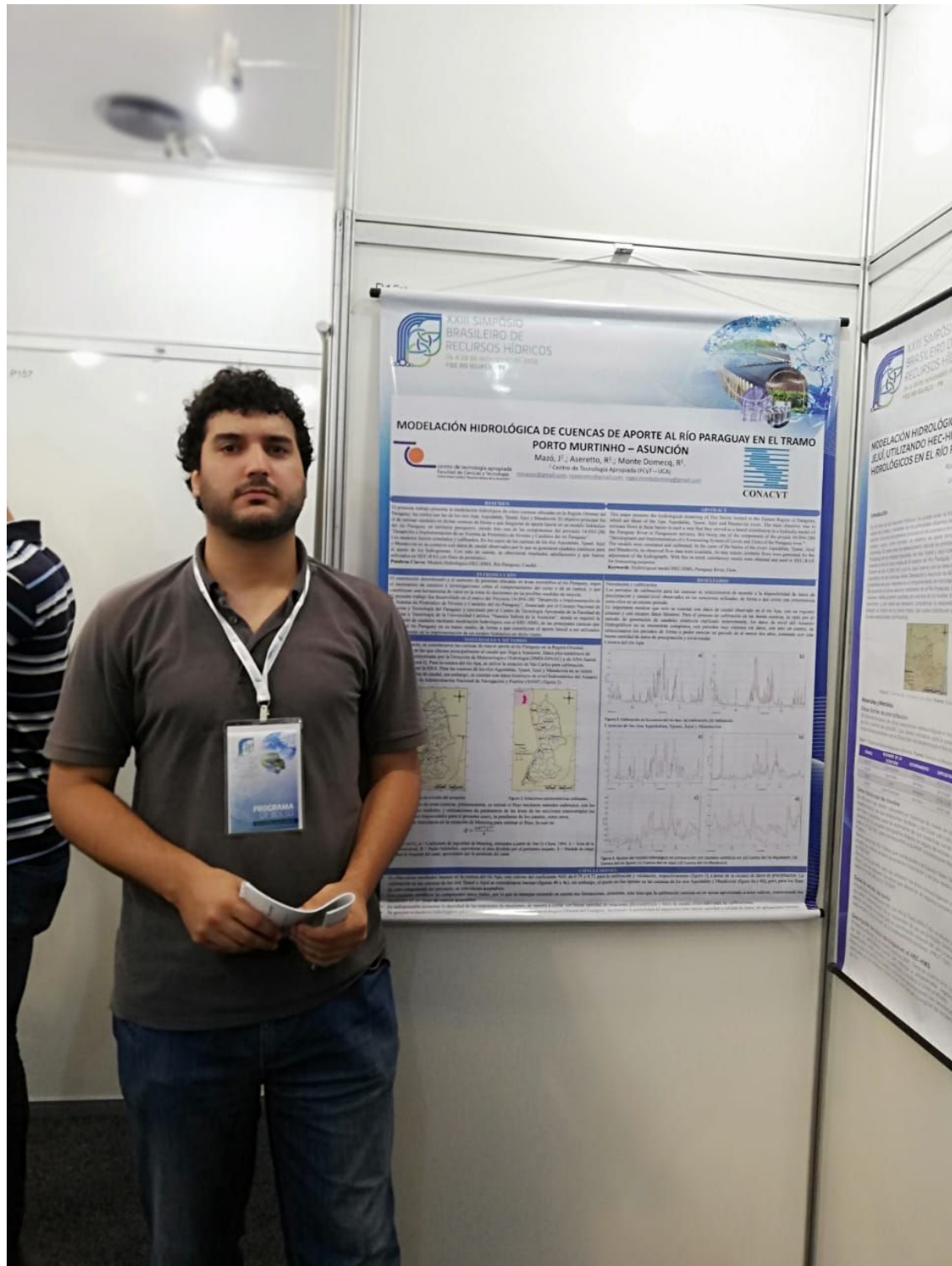
Después de realizar los ajustes necesarios y actualizar a los parámetros del modelo, se realizaron los análisis de los datos de las estaciones de monitoreo de las cuencas de los ríos Ypané y Jejui. Los datos utilizados para la calibración en la cuenca del río Ypané fueron desde el año 1970 a 1984 y para la cuenca del río Jejui desde el año 1982 a 1990. Los datos de salida del modelo se compararon con los datos de salida de las estaciones de monitoreo.



Para la cuenca del río Jejui, se utilizaron los datos de las estaciones de monitoreo desde el año 1982 a 1990. Los datos de salida del modelo se compararon con los datos de salida de las estaciones de monitoreo.

Comparación de los resultados obtenidos. Propuesta de un modelo de pronóstico hidrológico para la cuenca del río Paraguay, considerando el uso de los modelos HEC-HMS y HEC-RAS.





XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
16 a 20 de Setembro, 1998
192 Rio de Janeiro, RJ

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS DE APORTE AL RÍO PARAGUAY EN EL TRAMO PORTO MURTINHO - ASUNCIÓN
Mazo, F., Asereto, R., Monte Domercq, R.
Centro de Tecnología Aplicada
Instituto de Ciencia y Tecnología
Universidad de Chile
CONACYT

RESUMEN
El presente trabajo presenta la modelación hidrológica de cuencas de aporte al río Paraguay en el tramo Porto Murtinho - Asunción, Paraguay. Se consideró un área de 1000 km², localizada en el departamento de Itapúa, Paraguay. El estudio se realizó en el marco del Proyecto de Cooperación Científica y Tecnológica entre Chile y Paraguay, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) de Chile y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONACYT) de Paraguay. El estudio se realizó en el marco del Proyecto de Cooperación Científica y Tecnológica entre Chile y Paraguay, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) de Chile y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONACYT) de Paraguay.

INTRODUCCIÓN
El presente trabajo presenta la modelación hidrológica de cuencas de aporte al río Paraguay en el tramo Porto Murtinho - Asunción, Paraguay. Se consideró un área de 1000 km², localizada en el departamento de Itapúa, Paraguay. El estudio se realizó en el marco del Proyecto de Cooperación Científica y Tecnológica entre Chile y Paraguay, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) de Chile y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONACYT) de Paraguay.

CONCLUSIONES
El presente trabajo presenta la modelación hidrológica de cuencas de aporte al río Paraguay en el tramo Porto Murtinho - Asunción, Paraguay. Se consideró un área de 1000 km², localizada en el departamento de Itapúa, Paraguay. El estudio se realizó en el marco del Proyecto de Cooperación Científica y Tecnológica entre Chile y Paraguay, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) de Chile y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONACYT) de Paraguay.

Figura 1 Ubicación geográfica de la cuenca de estudio en el departamento de Itapúa, Paraguay. La cuenca tiene una extensión de 1000 km² y se encuentra ubicada en el tramo Porto Murtinho - Asunción del río Paraguay.

Figura 2 Diagrama de precipitación y caudal en la estación de Porto Murtinho. El diagrama muestra la precipitación mensual y el caudal mensual durante un período de 12 meses.

Figura 3 Diagrama de precipitación y caudal en la estación de Asunción. El diagrama muestra la precipitación mensual y el caudal mensual durante un período de 12 meses.

Figura 4 Diagrama de precipitación y caudal en la estación de Asunción. El diagrama muestra la precipitación mensual y el caudal mensual durante un período de 12 meses.

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
16 a 20 de Setembro, 1998
192 Rio de Janeiro, RJ

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO UTILIZANDO HEC-HMS EN CUENCAS HIDROLÓGICAS EN EL RÍO P...

RESUMEN
El presente trabajo presenta la modelación hidrológica de cuencas de aporte al río Paraguay en el tramo Porto Murtinho - Asunción, Paraguay. Se consideró un área de 1000 km², localizada en el departamento de Itapúa, Paraguay. El estudio se realizó en el marco del Proyecto de Cooperación Científica y Tecnológica entre Chile y Paraguay, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) de Chile y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONACYT) de Paraguay.

INTRODUCCIÓN
El presente trabajo presenta la modelación hidrológica de cuencas de aporte al río Paraguay en el tramo Porto Murtinho - Asunción, Paraguay. Se consideró un área de 1000 km², localizada en el departamento de Itapúa, Paraguay. El estudio se realizó en el marco del Proyecto de Cooperación Científica y Tecnológica entre Chile y Paraguay, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) de Chile y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONACYT) de Paraguay.

CONCLUSIONES
El presente trabajo presenta la modelación hidrológica de cuencas de aporte al río Paraguay en el tramo Porto Murtinho - Asunción, Paraguay. Se consideró un área de 1000 km², localizada en el departamento de Itapúa, Paraguay. El estudio se realizó en el marco del Proyecto de Cooperación Científica y Tecnológica entre Chile y Paraguay, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) de Chile y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONACYT) de Paraguay.