



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Implementación del modelo HydroBID en la Cuenca Los Padres-Santa Fe-Argentina

Implementation of the HydroBID model in Los Padres-Santa Fe-Argentina Basin



Alejandra Arbuét ^{1*}, Graciela Pusineri ¹, Rosana Mazzón ², Héctor Hugo Bianchi ²
Carlos Scioli ¹, Marta Paris ¹, Juliana Corrales ³, Mauro Nalesso ⁴

Recibido: 11/12/2020

Aceptado: 09/05/2021

*Autor de correspondencia

Resumen

La parte central de la provincia de Santa Fe (Argentina) es un área de llanuras, con pendientes muy bajas con predominio del movimiento vertical del agua sobre el horizontal. Es el caso de la cuenca del arroyo Los Padres (670 km²) donde se implementó el modelo de balance HydroBID para analizar el impacto que generan los cambios en el uso del suelo en el balance hídrico, considerando condiciones hidrometeorológicas históricas y con cambio climático. Se analizó la sensibilidad del modelo considerando 3 escenarios teóricos, con un único uso del suelo en toda la cuenca. Además, se consideró el cambio climático de acuerdo con lo proyectado por KNMI, donde prevé en el periodo 2081-2100 un aumento de la temperatura de 3°C y de precipitación del 10%. Los valores obtenidos con el HydroBID muestran que en la escorrentía anual acumulada para cada subcuenca se observa un aumento del 18% para el uso tierras agrícolas seca y pastizales y del orden del 26% considerando el cambio climático. Los resultados obtenidos permiten realizar de manera fácil y sencilla los mapas en QGIS, y así representar las variaciones debido al cambio de uso de suelo y a los efectos producidos por cambio climático, dando luz de los lugares donde se deben priorizar medidas de mitigación.

Palabras clave: HydroBID, Balance Hídrico, Uso del Suelo, Cambio climático.

Abstract

The central part of the province of Santa Fe (Argentina) is a plain area with extremely low slopes and where the vertical movement of water predominates over the horizontal one. This is the case of the Los Padres creek basin (670 km²) where the implementation of the HydroBID model was used to analyze the impact generated on the water balance by changes in land use considering the historical hydrometeorological conditions and with climate change. The sensitivity of the model was analyzed considering 3 theoretical scenarios, with a single land use in the entire basin. In addition, climate change was considered in accordance with the projections of the KNMI where it foresees an increase in temperature of 3°C and precipitation of 10% in the period 2081-2100. The values obtained with the HydroBID show that in the accumulated annual runoff for each sub-basin, an increase of 18% is observed for the use of dry agricultural lands and pastures and of the order of 26% considering climate change. The results obtained allow the maps to be made easily and simply in QGIS, and thus represent the variations due to land use change and the effects produced by climate change, highlighting the places where mitigation measures should be prioritized.

Keywords: HydroBID, Water Balance, Land Use, Climate Change.

- 1 Centro de Hidrología y Gestión del Agua (CHyGA, I+D+i) - Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral (FICH-UNL), Santa Fe, Argentina. alearbuét@gmail.com, graciwapusineri@yahoo.com.ar, sciolicarlos@gmail.com, parismarta@gmail.com
- 2 Instituto Nacional del Agua - Subgerencia Centro Regional del Litoral (INA- SCRL), Santa Fe, Argentina. rosanamazzon@yahoo.com.ar, inghbianchi@gmail.com
- 3 RTI Internacional, Washington, EU. jcorrales@rti.org
- 4 Centro Soporte HydroBID, Washington, EU. mauron@iadb.org

1. INTRODUCCIÓN

Descripción del problema

Las cuencas del centro y norte de la provincia de Santa Fe (Argentina) tienen una particularidad que las hace diferentes a muchas de las zonas más productivas de Latino América y el Caribe, son cuencas de llanuras, con pendientes muy bajas. Las divisorias de aguas de estas cuencas son en muchos lugares difusas, por lo que la escorrentía superficial se deriva hacia una u otra cuenca. Además, pequeñas modificaciones antrópicas a la topografía (bordos, caminos, etc.) pueden generar cambios sensibles en la dinámica hídrica. En estos sistemas hidrológicos de llanura producto de las bajas pendientes predomina el movimiento vertical del agua sobre los horizontales (evaporación, transpiración e infiltración que –en períodos de balance hídrico positivo- hace ascender la freática hasta la superficie), excepto durante períodos de excedencia hídrica extrema. Por otra parte, los cambios de cobertura y uso del suelo son reconocidos como una de las principales causas de deterioro ambiental, con un avance de la agricultura sobre las tierras ocupadas por la ganadería y bosques nativos. El uso del suelo ha disminuido la capacidad de infiltración haciendo aún más necesario poder cuantificar qué pasa con el agua que está en superficie encharcando, anegando e inundando. Además, las profundidades desde las que las raíces extraen agua han cambiado: la vegetación natural superaba los 5 m; las pasturas plurianuales como la alfalfa extrae desde los 3 a 4 m, pero los cultivos anuales no llegan a los 2 m y con compactación del suelo. Más allá de las cuestiones geomorfológicas que naturalmente definen la dinámica hídrica de la cuenca, es importante resaltar a la acción antrópica

como característica común y factor determinante en el comportamiento de los escurrimientos. La región se presenta altamente intervenida por la mano del hombre, esto se ve reflejado por la presencia de rutas, caminos, terraplenes de defensas y canales que interconectan artificialmente zonas no conectadas naturalmente. Una cuenca en la región que representa las características y problemáticas mencionadas es la del A° Los Padres, la cual fue elegida para la implementación del modelo HydroBID (Moreda, et al, 2017). El HydroBID se aplica a unidades de cuencas pequeñas, considerando los usos de tierras y las condiciones del suelo. Utiliza la estructura de datos hidrológicos denominada *Analytical Hydrographic Dataset* (AHD) que contiene información de las cuencas y red de drenaje de la región Latino América y el Caribe (LAC), y además una base de datos (BD) de uso y tipo de suelos (argentina.sqlite). La Figura 1 es el esquema de los flujos y almacenamientos diarios del HydroBID en una cuenca. Para una lluvia (R) el modelo calcula la escorrentía (Q) aplicando método del Numero de Curva, la evaporación real (E) a partir de la humedad disponible y la evapotranspiración potencial (se calcula en función de la temperatura diaria y un factor de cobertura que depende el uso del suelo y condiciones de la cobertura). La percolación (P) ocurre cuando el agua en la zona no saturada sobrepasa la capacidad disponible de agua del suelo. El flujo base (G) y la percolación profunda (D) se calculan en función de las constantes de recesión de agua subterránea y de percolación respectivamente. Los volúmenes de agua almacenada en la capa no saturada (U) y saturada (S), se calculan por balance diario, considerando la situación del día previo y flujos del día.

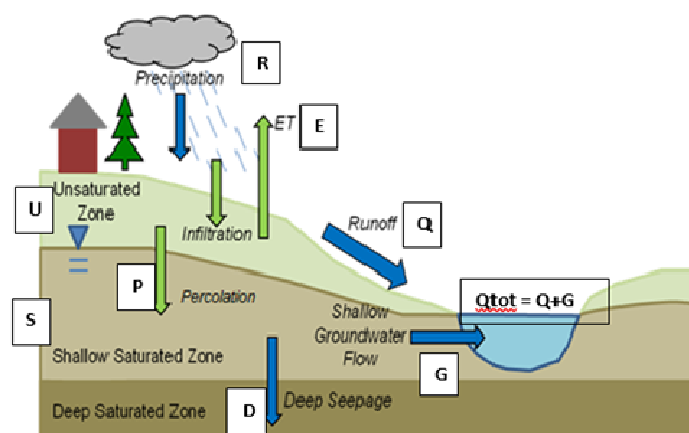


Figura 1. Esquema de flujos y almacenamientos del HydroBID

La implementación de un modelo de estas características, en un sistema tan complejo como son los sistemas de llanura es un desafío, ya que para la representación hidrológica de estos sistemas se recomienda la aplicación de modelos basados físicamente y distribuidos espacialmente. Por otra parte, el aporte de un modelo de simulación como HydroBID hace posible predecir de manera sencilla qué podría ocurrir si se realizan determinados cambios futuros y es un poderoso medio para promover la interdisciplinariedad ya que requiere de la intervención ordenada de las disciplinas, organizando el aporte de cada una. Además, puede ser de mucha ayuda para promover la articulación institucional tanto del ámbito público como del privado.

1.2 Objetivo

El objetivo de la modelación con el HydroBID es analizar el impacto en el balance hídrico que generan los cambios en el uso del suelo considerando condiciones hidrometeorológicas históricas y posteriormente con cambio climático, en la cuenca del A Los Padres (Santa Fe-Argentina). Se pretende, además, evaluar el desempeño del modelo para representar el proceso lluvia-escorrentía en sistemas hidrológicos de llanuras.

1.3 Descripción de la cuenca

En la cuenca del A Los Padres, elegida para la implementación del modelo, se trata de una cuenca no aforada, pues no se dispone de estaciones con registro sistemático de caudales que puedan ser utilizados para la calibración del mismo, situación muy común en la región. Por este motivo se adoptó para la calibración el criterio de contrastar los valores simulados por HydroBID con los obtenidos en el Plan Director de la Provincia de Santa Fe. Los mismos son el resultado de una simulación hidrológica realizada a nivel de planificación, con el modelo HEC-HMS desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del Cuerpo de Ingenieros de los E.E.U.U., que se corrió con los parámetros y condiciones de uso actual de suelo y con los relevamientos topográficos particulares de los distintos puntos de control.

La cuenca tiene una superficie de 660 km², se divide en la subcuenca A Los Troncos de 420 km² y subcuenca Cañada Malaquías de 250 km². La cota máxima es de 52.5 m y en la salida 12.5 m, referida al cero del Instituto Geográfico Nacional (IGN), lo

que da una pendiente media de la cuenca de 1m/km. Las siete localidades ubicadas en la cuenca son: Las Tunas, San Jerónimo Norte, San Carlos Norte, San Carlos Centro, San Carlos Sur, San Agustín y Matilde, que totalizan unos 30 mil habitantes.

En la figura 2, se puede observar la red hidrográfica-hidráulica, los bajos donde se acumula el agua en épocas de lluvia y la delimitación oficial de la cuenca de estudio. El desarrollo de la red de canales está conformado por el A Los Troncos, (cauce principal 27 km) y la Cañada Malaquías (canalizada 12 km) más 57 canales, que totalizan una longitud de 180 km.

Desde el punto de su comportamiento hidrológico - hidráulico se puede diferenciar dos zonas/tramos, un tramo superior donde se encuentra la cabecera de la cuenca, tienen como límite inferior la Autovía N° 19, y se caracterizan por no tener un canal o cauce definido de jerarquía, sino que presenta bajos relativos y una serie de canales de distinto orden que tratan de conducir los excesos hacia dicha ruta. En esta se producen trasvases desde y hacia la cuenca. Y un tramo inferior que se desarrolla hacia el sur de la Autovía N° 19. En este tramo Los Troncos presenta un cauce bien definido, en cambio en la subcuenca Malaquías se desarrolla una cañada que está localizada inmediatamente al oeste de la autopista y dada la escasa pendiente de esta zona, para situaciones de excesos, se producen desbordes laterales que son captados por algunas de las alcantarillas de drenaje de la autopista.

El puente ubicado en la sección de control del A Los Padres en la autopista Rosario - Santa Fe, tiene una capacidad máxima en el orden de los 250 m³/s.

La temperatura media anual en la zona de estudio es de 18°C, variando en los meses más fríos de invierno es de 11°C y en los meses más cálidos 26°C. En verano alcanzan como máximo los 38°C y en invierno, las temperaturas alcanzan como mínimo los -1°C.

La precipitación media anual varía entre 900 mm y 1,200 mm, pero han ocurrido años muy secos con valores de 600mm (2008). Los mínimos promedios mensuales se registran en julio (invierno), con valores de 23 mm y los máximos en marzo, con valores que pueden superar los 150 mm, por eso el año hidrológico en esta zona es interanual, inicia en setiembre y finaliza en agosto. Se han registrado valores máximos de precipitaciones diarias de 195

mm (25/abril/1999) y de 300 mm acumulado en dos días (marzo/2007). En la estación de Rafaela se registraron en los meses de febrero, marzo y abril del 2007 un acumulado de 735 mm.

La evapotranspiración varía entre 500 y 900 mm, según la ocupación que se haga del suelo y con qué cultivos. Teniendo en cuenta las disponibilidades agroclimáticas de la cuenca se puede cultivar trigo y maíz con muy poca deficiencia de agua.

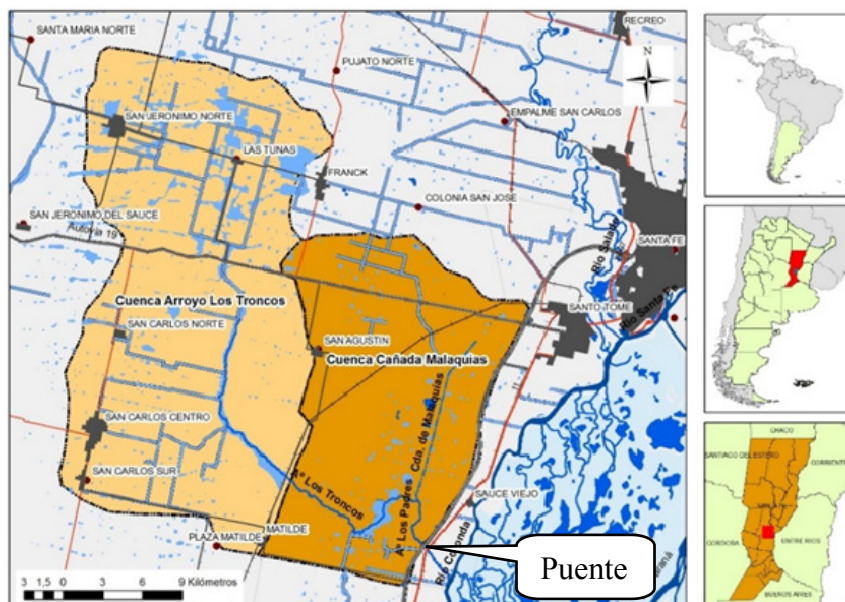


Figura 2. Ubicación de la cuenca del A Los Padres

Según la información suministra por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) a escala 1:500,000, la cuenca cubre un único suelo tipo “Franco limoso”, lo que significa un suelo tipo B de acuerdo con la clasificación hidrológica del Servicio de Conservación de Suelo (SCS) de EEUU, con capacidad de infiltración moderada entre 38 y 76 mm/h. El sistema productivo está conformado por actividades agrícolas-ganaderas, con algunos tambos. La ocupación del suelo puede variar en: un solo cultivo por año, dos cultivos por año (soja/trigo, maíz/trigo) o una pastura plurianual. Esto hace que en zona agrícolas los valores de Curva Número (CN) varían según el mes o época del año, cuando la superficie presenta suelos descubiertos los valores son mayores y cuando la superficie se encuentra cubierta por cultivos, los valores del CN son más bajos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Representación topológica del área de estudio - AHD Revisada

La *Analytical Hydrographic Dataset* (AHD) (Rineer et al, 2014) es una base de datos espacialmente explícita de aguas superficiales. Es un marco para la parametrización de modelos en una manera consistente, que provee la conectividad del flujo aguas arriba/aguas abajo necesarias para dichos modelos, y la data necesaria para mostrar los resultados en forma gráfica.

Para acceder a la AHD de Argentina, se debe utilizar el software libre QGIS donde se instala la herramienta AHD Tools (Nalesso & Coli, 2017). Esta base contiene los archivos de la delimitación de cuencas y cauces (formato shapefile) y la base de datos con la conectividad entre cuencas y los cauces (formato dbf). Allí se identificó el COMID 316421700 correspondiente a la cuenca de Los Padres.

En la AHD inicialmente suministrada por RTI se observaron algunos errores:

- la red de drenaje correspondiente al río Coronda tiene sentido de escurrimiento Sur-Norte, cuando debe ser Norte- Sur.

- las subcuencas con COMID 316398200 y 316414600 deben aportar a la 316421700, y lo hacen directamente hacia el río Coronda, no existiendo la cañada Malaquías.

Para solucionar estos problemas detectados, se recomendó la modificación de la AHD original, de manera que refleje la conectividad de las cuencas y los cauces. El resultado de este trabajo, realizado por los responsables de RTI, es una nueva AHD_Revised, en la que se modificaron el archivo de ríos (Flowlines_Argentina.shp) y la conectividad

(AHDFlow.dbf), manteniéndose igual el archivo de las cuencas. Además de la nuevo BD “argentina_revised.sqlite”.

En la figura 3 se comparan las cuencas que drenan hacia el COMID 316421700 de AHD original y la revisada con la nueva conectividad. En esta última se identifica una superficie de 729 km² para la cuenca total, valor que supera a la cuenca oficial realizada por el INA-SCRL de 660 km² en 69 km², lo que representa una diferencia del 10%.

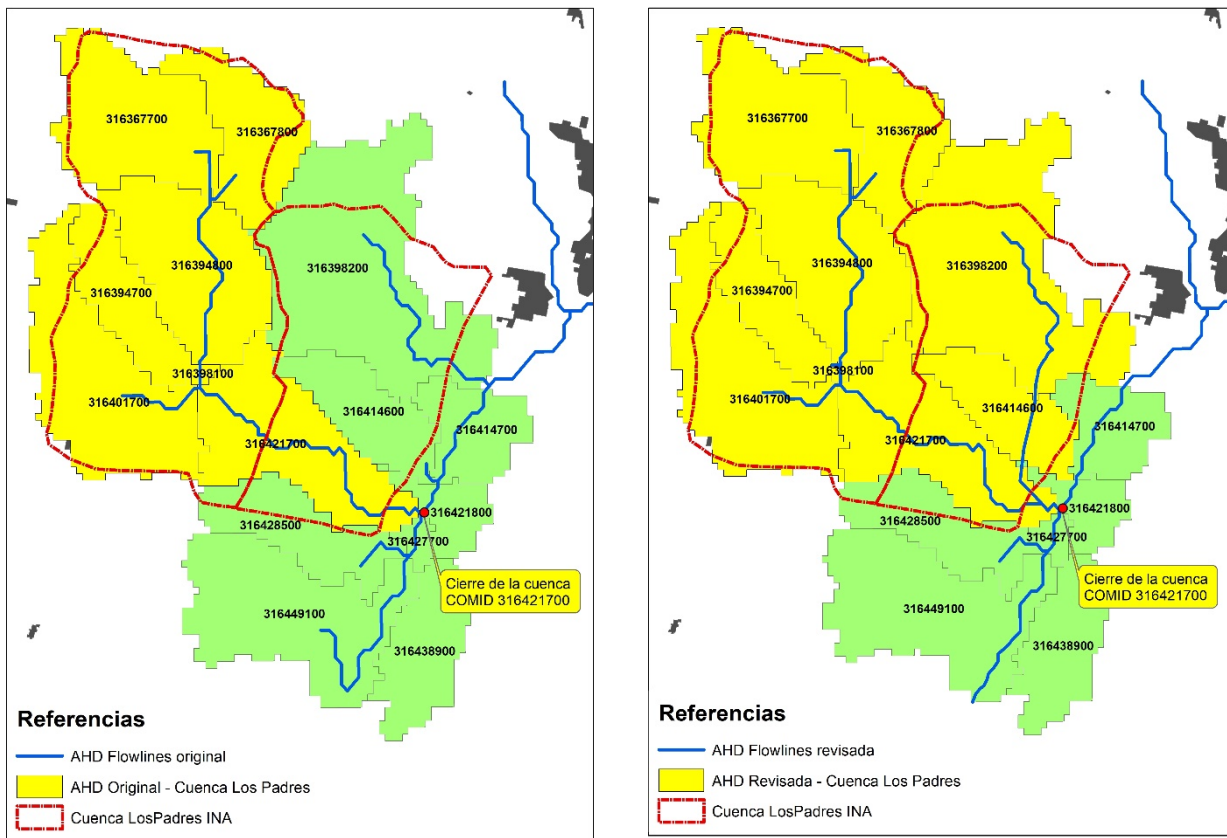


Figura 3. Comparación de AHD original (a) y revisado (b), con cuenca oficial del INA

2.2 Preparación de datos

2.2.1 Clima

El modelo HydroBID requiere como datos de entrada series diarias de precipitación y temperatura media para cada subcuenca. Esas series las calcula a partir de series medidas en determinadas estaciones. Existen en la zona información hidrometeorológica proveniente de diversas fuentes, para este estudio se utilizaron los datos históricos observados en tres estaciones, seleccionadas considerando su ubicación

geográfica, la extensión de los registros, la cantidad y la calidad de los datos.

- “Sauce Viejo Aero” del Servicio Meteorológica Nacional (SMN), a 3 km de distancia hacia el Este
- “Santa Fe CIM” de la Facultad de Ingeniería y Cs. Hídricas (FICH), a 12 km hacia el Este
- “Rafaela INTA” del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), a 50 km de distancia hacia el Noroeste

Obtenidas las series diarias de los datos observados en las estaciones seleccionadas, se realizó un análisis exploratorio de los datos. Así se identificó que la estación Sauce Viejo cuenta con registros en el periodo 1958- 2017, la estación Rafaela 1961-2017 y la estación Santa Fe CIM entre los años 1989-2018.

Las series de precipitaciones diarias, así como las de temperaturas diarias de las estaciones Rafaela INTA y Sauce Viejo Aero estaban disponibles completas. La serie de datos de precipitación de la estación Santa Fe CIM, presenta datos ausentes entre los años 2009 y 2017, por ello se realizó el relleno de los datos faltantes, con el fin de completar el periodo de estudio común 1989-2016.

A partir de los valores completos de cada estación se generó la figura 4 que muestra la variación de la precipitación media mensual el período 1989-2016, con un comportamiento similar en las tres estaciones consideradas. Se observa como los máximos de precipitación se registran en los meses de marzo y diciembre, y las menores precipitaciones en los meses de invierno.

El promedio anual de precipitación para la estación Sauce Viejo es de 1,072 mm, para la estación Rafaela INTA es de 1,016 mm, mientras que 1127 mm para Santa Fe CIM.

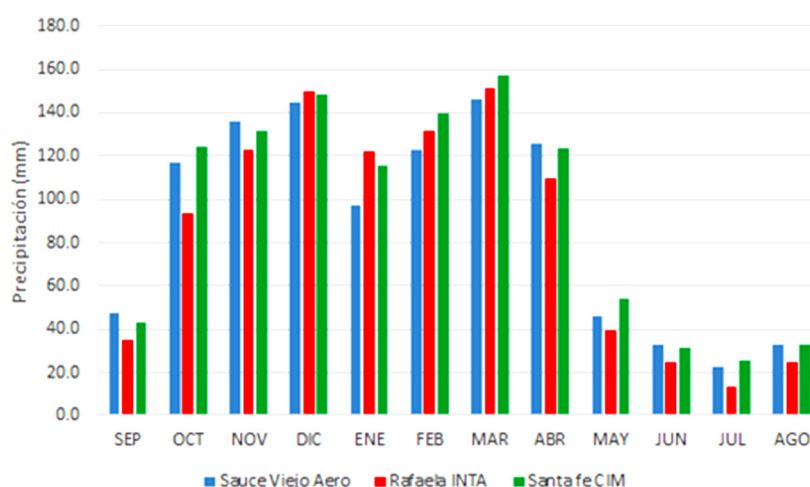


Figura 4. Variación de la precipitación media mensual en el período 1989-2016

En la variación de la temperatura media mensual para el período 1989-2016, también se observa de modo general un comportamiento estacional regular. El ciclo medio anual promedio sobre el área en estudio muestra un rango térmico de 15.0 °C, con el máximo valor en enero (26.5 °C) y el mínimo en julio (11.5 °C). Una vez definidas las estaciones con las que se trabajó y realizado el relleno de las series diarias de precipitación (cm) y temperatura (°C), se definió el periodo de estudio y se generaron los archivos de acuerdo con las especificaciones establecidas (Nalesso & Coli, 2017).

Todas las series tienen como fecha de inicio el 01/01/1989 y finalizan el 31/12/2016, lo que da un total de 28 años de registros. Las series de datos meteorológicos diarios de cada estación se interpolan espacialmente para obtener las series promedio para cada cuenca, a través de la

herramienta de Interpolación de Datos Climáticos (*Climate Data Interpolation Tool* - CDIT), que aplica la técnica conocida como la Distancia Inversa Ponderada (IDW) utilizando el centroide de las cuencas como el punto de predicción. La distancia entre el centroide y las estaciones se calcula por medio de las coordenadas. Utilizando la herramienta CDIT de la interfaz del HydroBID, donde se ingresan los archivos de clima para el período de estudio, se generó la nueva tabla llamada “Clima 1989_2016LP” en la base de datos (BD) “argentina_revised.sqlite”,

2.2.2 Tipo y uso del suelo

En la tabla “catchment_nlcd_soils” de la BD “argentina_revised.sqlite”, suministrada por RTI, se almacenan los parámetros de tipo y uso de suelo de cada subcuenca, identificada por su COMID.

Realizando un filtro para las nueve subcuencas que se identificaron en la zona de estudio, se obtuvieron los parámetros de tipo y uso que contiene la tabla *catchment_nlcd_soils*.

En la tabla 1 se puede observar los seis usos del suelo identificados, con los respectivos valores de CN y las sumas de las superficies calculadas en porcentaje respecto al total de la cuenca. La mayor superficie le corresponde al uso 2-Tierras agrícolas secas y

pastizales, con casi un 60% de la superficie de la cuenca y le sigue el 5-Agricultura/Pastizales con un 27%. El valor ponderado arealmente de CN es de 71. Esta será la situación de uso de suelo que se considerará como “original” en este trabajo. Se observa que el tipo hidrológico de suelo, en todos los casos es B, coincidiendo con el suelo determinado por el INTA.

Tabla 1. Resumen de las superficies para cada uso de suelo en la cuenca Los Padres

nlcd_id	Uso de suelo	Valor Curva Numero (CN)	Grupo Hidrológico	Área (%)
1	Urbano	88	B	0.41
2	Tierras agrícolas secas y pastizales	75	B	59.84
5	Agricultura/Pastizales	64	B	27.15
6	Agricultura/Bosques claros	64	B	6.74
7	Pastizales	70	B	5.81
	Humedales arbolados	70	B	0.04

Como no se dispone de una capa de usos de suelo de la cuenca, se analizó la sensibilidad del modelo mediante tres escenarios teóricos de uso del suelo. Se utilizó la herramienta de Parametrización, para crear nuevas tablas, que se guardan en el BD *argentina_revised.sqlite*.

Con esta herramienta los valores de CN para cada COMID se asignan usando los archivos de entrada de cobertura vegetal y tipo de suelo definidos por el usuario.

En los tres escenarios teóricos analizados se consideró en toda el área de estudio un mismo tipo de uso del suelo:

- Escenario 1: 5 -Agricultura/Pastizales (CN 64)
- Escenario 2: 17- Humedales (CN 70)
- Escenario 3: 2 -Tierras agrícolas seca y pastizales (CN 75)

Cada caso fue representado por una capa que contiene un único polígono, con el valor de tipo de uso que corresponde según la tabla 1.

2.3 Aplicación práctica del modelo

Como se ha mencionado anteriormente, dado que no existen registros de caudales observados, se compararon los resultados del HydroBID, solo a los efectos de aprender el uso de dicho modelo, con los resultados obtenidos con el modelo HEC-HMS en la

modelación realizada en el marco del Plan Director de Recursos Hídricos de la Provincia de Santa Fe (Plan Director).

Esta comparación no pretende ser una calibración sino solamente contar con una serie de caudales/volúmenes simulados con otro modelo con el fin de aprender la metodología utilizada por HydroBID. En la modelación con el HEC-HMS se consideró la discretización en 4 subcuencas, los datos físicos y parámetros fueron los utilizados en el Plan Director, actualizándose solo la serie de precipitación de la estación Sauce Viejo Aero, con el fin de que coincida el período de simulación en ambos modelos.

2.3.1 Descripción de modelo antecedente HEC-HMS

Ante la inexistencia de series de caudales observados, se tomaron como válidos los parámetros que se utilizaron para dos cuencas cercanas que si cuentan con aforos y pertenecen a la misma región hídrica.

Estas son Cuenca del A Colastiné y Cuenca A Carrizales. Se utilizó la cuenca oficial del Plan Director con 659 Km² dividida en 4 subcuencas, teniendo como punto de cierre la subcuenca del A Los Troncos el puente de la ruta 50-S y la cuenca total el puente sobre la autopista Rosario-Santa Fe. En la tabla 2 se puede observar la discretización de las subcuencas utilizadas, que difieren en un 10% con la superficie de AHD (729 km²).

Tabla 2. Superficies de las subcuencas utilizadas en el modelo HEC-HMS

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	Long. cauce (km)	Cota (m)		Pendiente
				A Arriba	a abajo	
Los Troncos	L1	167.3	2.9	35.33	33.8	0.00054
	L2	241.8	17.6	33.80	20.1	0.00078
Malaquías	ML1	88.3	5.1	25.69	13.58	0.00917
	ML2	161.3	13.8	13.59	10.21	0.00024

El puente sobre la ruta 50-S tiene una capacidad de conducción aproximada es de 110 m³/s y el puente sobre la autopista Rosario-Santa Fe tiene una capacidad aproximada es de 250 m³/s.

Los sub - modelos utilizados en el proyecto son: Precipitación Efectiva, Método del Hidrograma Sintético de Clark (para la propagación en cuenca), Método de Muskingum-Cunge (para la propagación en cauce) y también se modeló la influencia de los principales puentes sobre algunas rutas utilizando embalses con reservorios.

El modelo continuo de humedad del suelo (SMA), simula el movimiento del agua a través de distintos niveles de almacenamiento: en la cobertura vegetal, en la superficie del suelo, en el perfil de suelo y de agua subterránea. Conocida la precipitación y la evapotranspiración potencial, el modelo estima el escurrimiento superficial, el flujo subterráneo y la percolación. Este modelo permite simular la respuesta de la cuenca con base de tiempo continuo, en periodos inter-lluviosos, por este motivo se descartó utilizar el método del CN.

Se utilizó la serie de precipitación diaria y la evaporación media mensual como datos de entrada al modelo, correspondiente a la estación Sauce Viejo Aero. Clark deriva su Hidrograma Unitario Sintético representando dos procesos críticos en la transformación del exceso de la precipitación en escurrimiento: proceso de traslación pura seguido de un proceso de atenuación. Si bien ambos procesos se manifiestan en forma conjunta, Clark los considera separados, es decir, primero realiza la traslación del flujo producido por una lluvia neta unitaria hasta la sección de control y posteriormente incorpora la atenuación mediante la propagación de dicho hidrograma a través de un elemento ficticio de almacenamiento lineal ubicado a la salida de la cuenca. El método de Clark utiliza dos parámetros para caracterizar el hidrograma unitario: el tiempo de concentración Tc y el coeficiente de almacenamiento R. El tiempo de concentración Tc es el parámetro utilizado habitualmente para caracterizar la respuesta de una cuenca ante episodios aislados de lluvia. El

modelo de Muskingum Cunge propone la obtención de parámetros en función de las características geométricas del canal. Las dimensiones de los canales utilizados son los naturales y no se consideraron los trasvases desde y hacia la cuenca de Los Padres.

Los embalses son un tipo de elemento que recibe uno o varios flujos entrantes, procedentes de otros elementos y proporciona como resultado del cálculo un único flujo saliente. Se utiliza para poder representar fenómenos de laminación de avenidas en lagos y embalses. Este método se utilizó para representar el efecto de regulación que producen algunos puentes ubicados sobre las rutas principales. En el caso del A Los Troncos, el puente del ferrocarril junto con el puente de la ruta 50-S, producen un amortiguamiento de los caudales picos, este efecto de laminación se ve acentuado aguas abajo de dichos puentes por efecto de la topografía casi plana, hasta el cruce del A Los Padres con la autopista Rosario - Santa Fe, punto de control final de la modelación.

Se obtuvieron así los caudales diarios en la sección de control para la serie simulada (1989 - 2016), aplicando el modelo HEC-HMS considerando y sin considerar el efecto regulador de los puentes existentes. Estos resultados no contaron con un proceso de calibración, pero se consideran aceptables en función de la comparación con los resultados obtenidos en dos cuencas calibradas cercanas, pertenecientes a la misma región, y con las características topográficas similares.

2.3.2 Aplicación del modelo HydroBID

Una vez que se ha completado la BD argentina_revised.sqlite, con las tablas de datos climáticos interpolados y las tablas de coberturas de suelo, se realizaron las corridas del modelo HydroBID. Luego en el proceso de comparación se ajustaron los parámetros del modelo, para representar de manera adecuada los caudales obtenidos por el modelo HEC-HMS. En la tabla 3 se presentan los parámetros finales obtenidos.

Tabla 3. Valores de los parámetros finales

Parámetro	Tipo	Valor
Comienzo de la temporada de cultivo	Valor unico	1
Final de la temporada de cultivo	Valor unico	365
Numero de Curva (CN)	Multiplicador	0.88
Contenido Disponible de Agua (CDA)	Multiplicador	0.85
Coefficiente de Recesion (r)	Valor unico	0.007
Coefficiente de Percolacion (s)	Valor unico	0.001

Para lograr un mejor ajuste se debieron afectar los parámetros del CN y CDA por un coeficiente menor a 1, que produce una reducción de dichos valores iniciales. El valor de CN se afectó por un coeficiente igual a 0.88, reduciendo el valor aproximadamente un 12 %. Esta variación coincide con resultados de estudios locales que determinaron que valor de CN obtenido de tablas se ve disminuido un 20 % en regiones con poca pendiente. Es decir, la poca pendiente genera una disminución de la escorrentía superficial y favorece el movimiento vertical del agua, aumentando la infiltración.

En total se realizaron ocho corridas porque son cuatro tablas con diferentes usos del suelo (valores de CN) y dos series de caudales modelados, obtenidos como salidas de la aplicación del HEC-HMS, con y sin puentes. Las cuatro tablas utilizadas son: *catchment_nlcd_soils* (Original), Escenario 1 (5-Agricultura/Pastizales), Escenario 2 (17-Humedales), Escenario 3 (2-Tierras agrícolas seca y pastizales).

Luego se realizó una corrida considerando el cambio climático de acuerdo a lo proyectado por el Atlas del cambio climático de KNMI (KNMI, 2020) para Argentina y en particular el área de estudio, donde

prevé para el periodo 2081-2100 un aumento de la temperatura de 3°C y de precipitación del 10% (multiplicador 1.1), para la condición original de uso del suelo.

3. RESULTADOS

3.1 Caudales diarios

HydroBID provee diferentes opciones para evaluar su desempeño en cada corrida. El hidrograma que muestra la variabilidad en el tiempo de alguna información hidrológica, por ejemplo el caudal diario en toda la serie temporal, y en este caso permite comparar los caudales pico simulados con HydroBID con los simulados con HEC-HMS. En la tabla 4 se pueden ver algunos parámetros de los resultados obtenidos con el modelo HydroBID, utilizando las diferentes tablas de la BD *argentina_revised.sqlite*, que hacen variar el valor del CN promedio de la cuenca y considerando dos series de caudales simulados, con y sin puentes. El valor (*) corresponde al promedio ponderado arealmente. Donde QMHMS es el caudal máximo simulado con el HEC-HMS y QMHydro el caudal máximo simulado con el HydroBID.

Tabla 4. Resultados de las distintas corridas del HydroBID para la cuenca A Los Padres

Situación mod. HMS	Parametrización	CN	CN calibrado (CN *0.88)	QMMS	QMHydro
				m ³ /s	m ³ /s
Con Puente	Original	71(*)	62.5	236	1,010
Sin Puente	Original	71(*)	62.5	551	1,010
Con Puente	Agricultura/ pastizales	64	56.3	236	916
Sin Puente	Agricultura/ pastizales	64	56.3	551	916
Con Puente	Humedales	70	61.6	236	1,003
Sin Puente	Humedales	70	61.6	551	1,003
Con Puente	Tierras agrícolas secas y pastizales	75	66.0	236	1,071
Sin Puente	Tierras agrícolas secas y pastizales	75	66.0	551	1,071

Si bien los volúmenes calculados con ambos modelos son parecidos, los caudales máximos tienen una gran diferencia, especialmente en los días donde se registraron eventos extremos. Comparando los valores de caudales máximos obtenidos en la modelación del HEC-HMS considerando la existencia de los puentes es del orden de los 240 m³/s, con los valores de caudales máximos obtenidos con el HydroBID que varían entre los 920 y 1,010 m³/s, se observa que es el HydroBID valores cuatro veces mayor. Como se ha mencionado, la capacidad máxima del puente ubicado en la autopista es de 250 m³/s y nunca fue sobrepasado por una crecida.

No se registran diferencias sustanciales en los caudales máximos en los diferentes escenarios de uso de suelo aplicados.

3.2 Balances de agua

El HydroBID genera como resultados tablas con los valores diarios de cada parámetro del balance

hidrológico. A partir de los valores diarios se calcularon los acumulados por mes y para cada año, para la condición de uso del suelo original. A partir de los valores anuales para cada uno de los parámetros del balance, obtenidos con la suma de los valores mensuales de toda la serie analizada, se calcularon los estadísticos (promedio, máximo y mínimo) que se observan en la tabla 5.

Analizando la tabla 5 se puede verificar lo dicho en la introducción, que en estos sistemas hidrológicos de llanura predomina el movimiento vertical del agua (evaporación, transpiración e infiltración) sobre los horizontales.

Además, se calcularon para los valores mensuales, promedio de toda la serie, los estadísticos calculados para la serie 1990 – 2016, que se observan en la tabla 6.

Tabla 5. Estadísticos del balance anual (1990-2016)

Estadístico anual	R Precipitación (mm)	Q Escorrentía (mm)	E Evapotrans. (mm)	P Percolac. (mm)	D Percolac. Profunda (mm)	G Descargas de Aguas Subte. (mm)	U Almacenam. No saturado (mm)	S Almacenam saturado (mm)
Promedio	1,088.8	94.8	844.2	145.7	17.8	125.2	24,174.2	17,897.6
Máximo	1,562.2	278.6	959.1	369.2	54.5	383.6	33,883.5	54,723.4
Mínimo	626.2	12.0	628.7	0.0	0.1	0.6	5,151.1	86.0

Tabla 6. Estadísticos del balance mensual (1990-2016)

	Estadístico mensual	Total	Máximo	Mínimo
R	Precipitación (mm)	1,088.10	153.5	22.9
Q	Escorrentía (mm)	94.6	23.1	0
E	Evapotranspiración (mm)	845.1	125.2	32.5
P	Percolación (mm)	145	34.8	0.2
D	Percolación Profunda (mm)	17.1	2.2	1
G	Descargas de Aguas Subterránea (mm)	124.8	15.9	7.1
U	Almacenamiento no saturado (mm)	24,147.30	2,821.50	1,311.30
S	Almacenamiento saturado (mm)	17,846.90	2,259.70	1,007.30

Para una mejor visualización de la variación anual de los cuatro parámetros principales (precipitación, escorrentía, evaporación y percolación) en el periodo 1990-2016, se elaboró la figura 5. Allí se observa que los valores de precipitación obtenidos en el balance anual varían entre un mínimo de 630 mm para el año

2008 hasta un máximo de 1,562 mm para el año 2000. En la evolución de la evapotranspiración anual se observan años donde se superan los valores de precipitación, como ocurrió en el 2008, cuando se registró la peor sequía de los últimos 20 años, generado pérdidas millonarias en la región. El valor

promedio calculado para toda la serie (844 mm) es muy similar a los valores registrados en la región (900 mm), siendo el 77% de la precipitación. La escorrentía anual promedio es de 95 mm (8% de la precipitación), registrándose los máximos en los años 2000 y 2007, ocasión en que se registraron las mayores precipitaciones. Con respecto a la percolación anual los valores varían entre 370 mm y

0 mm, con un promedio de 146 mm (13% de la precipitación).

Para analizar la variación en el año hidrológico de los valores promedios se elaboraron las figuras 6 y 7 para el caso del año 2007, por ser un año atípico situación de exceso hídrico con una precipitación anual de 1,311 mm.

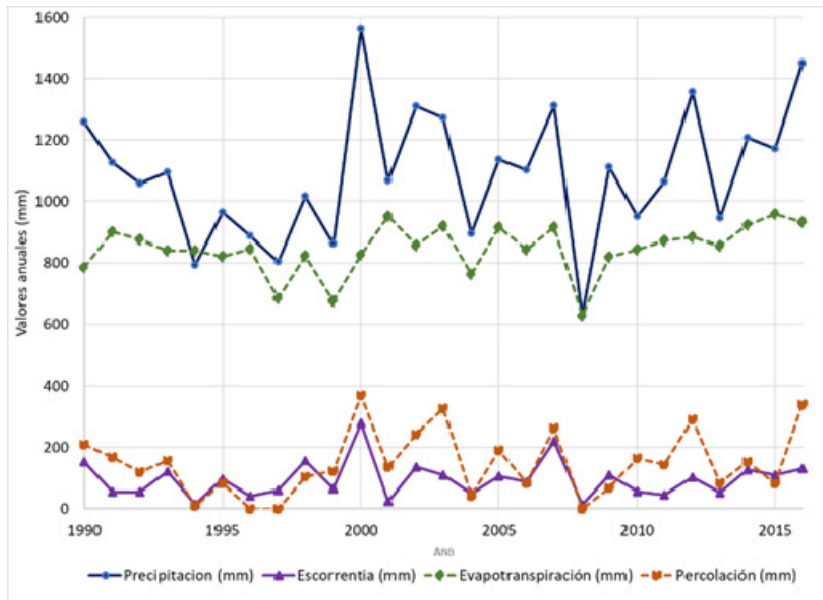


Figura 5. Variación anual de precipitación, escorrentía, evaporación y percolación, resultado del HydroBID

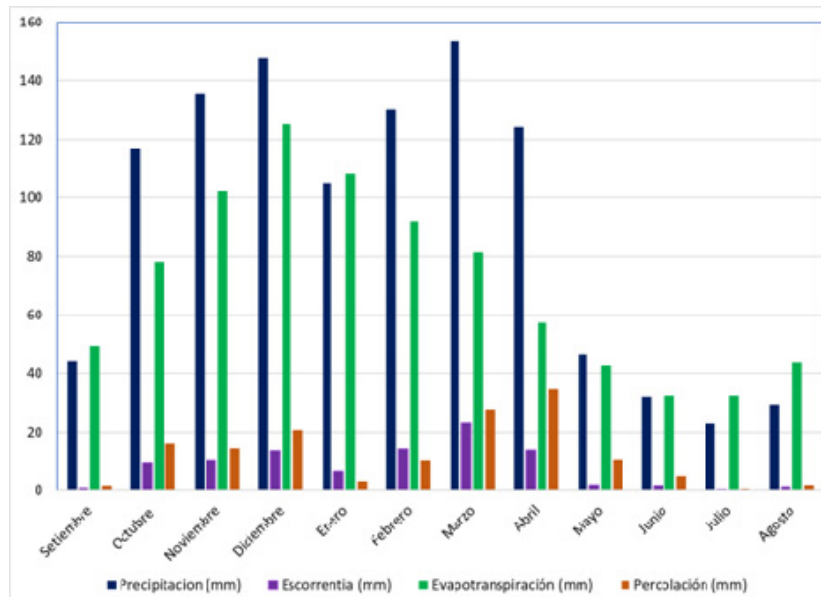


Figura 6. Variación mensual de precipitación, escorrentía, evaporación y percolación profundos promedios, resultado del HydroBID (1990-2016)

En la figura 6 se puede observar que las mayores precipitaciones mensuales se dan en marzo y diciembre (verano), superando los 140 mm y en julio y agosto (invierno) los menores valores que son de 30 mm. Además, se observa claramente como en varios meses la evapotranspiración supera a la precipitación y la escorrentía es casi nula (setiembre, enero, junio, julio y agosto). También se observa como en la mayoría de los meses (excepto enero y febrero) la percolación supera a la escorrentía, llegando a triplicarla.

En la figura 7 se puede observar el evento de lluvia extremo que ocurrió en marzo de 550 mm, superando ampliamente el valor promedio para ese mes de 153 mm. Además, se puede ver que en los meses anteriores también habían ocurrido lluvias importantes, lo que provocó el anegamiento de muchos campos y las inundaciones de varias ciudades.

Cabe resaltar los valores de la escorrentía y percolación que llegaron a superar los 200 mm en marzo, mucho más elevados a los valores promedios para ese mes, que son del orden de los 25 mm.

En las figuras 8 y figura 9 se pueden observar el esquema del balance con los valores de marzo/1993 que fue un año promedio y marzo/2007, situación de

exceso hídrico, con los valores obtenidos con el HydroBID y HEC-HMS.

En el balance del mes de marzo del 1993, considerado como un año promedio (precipitación anual 1095 mm), se puede observar que la precipitación es menor a la evapotranspiración y que tanto la percolación como la escorrentía son nulas. El aporte a los cauces se debe a la descarga del flujo base.

En el balance de marzo del 2007, considerado como un año de exceso (precipitación anual 1,311 mm), se puede observar el elevado valor de la precipitación (567 mm), y como aumentaron los valores percolación y escorrentía con respecto a los valores promedios, cada variable es del orden del 36% de la precipitación. El aporte a los cauces se debe fundamentalmente al aporte de la escorrentía y en menor medida a la descarga del flujo base. La percolación es elevada llegando casi a igualar la escorrentía. De la comparación entre los resultados obtenidos con los dos modelos se puede observar que los valores de la Evaporación del HydroBID son mayores a los del HMS y en el caso de marzo/2007 el flujo base es mucho mayor en el HMS, seis veces mayor.

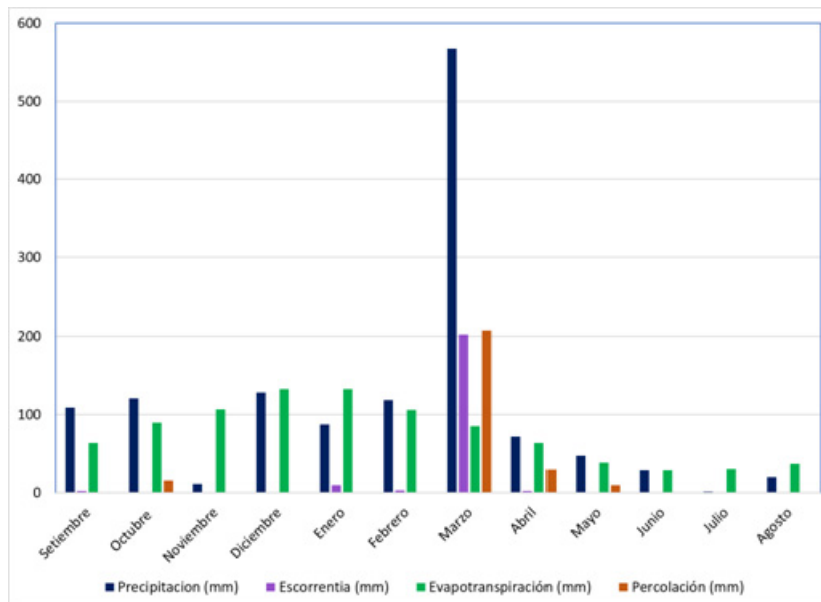


Figura 7. Variación mensual de precipitación, escorrentía, evaporación y percolación profunda para el año 2007, resultado del HydroBID

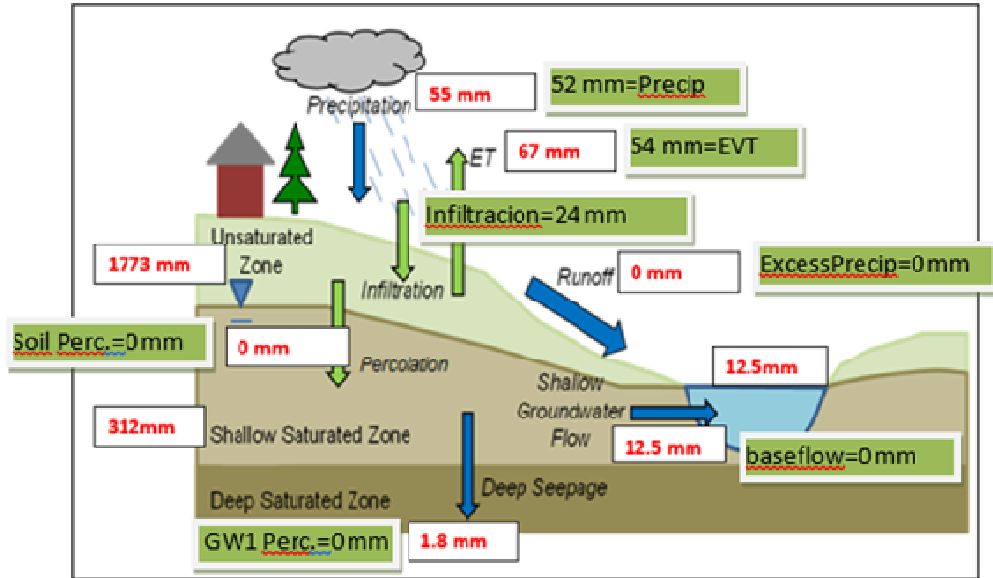


Figura 8. Balance para el mes de marzo-1993 (año promedio), resultados de HydroBID (rojo) y HEC-HMS (verde)

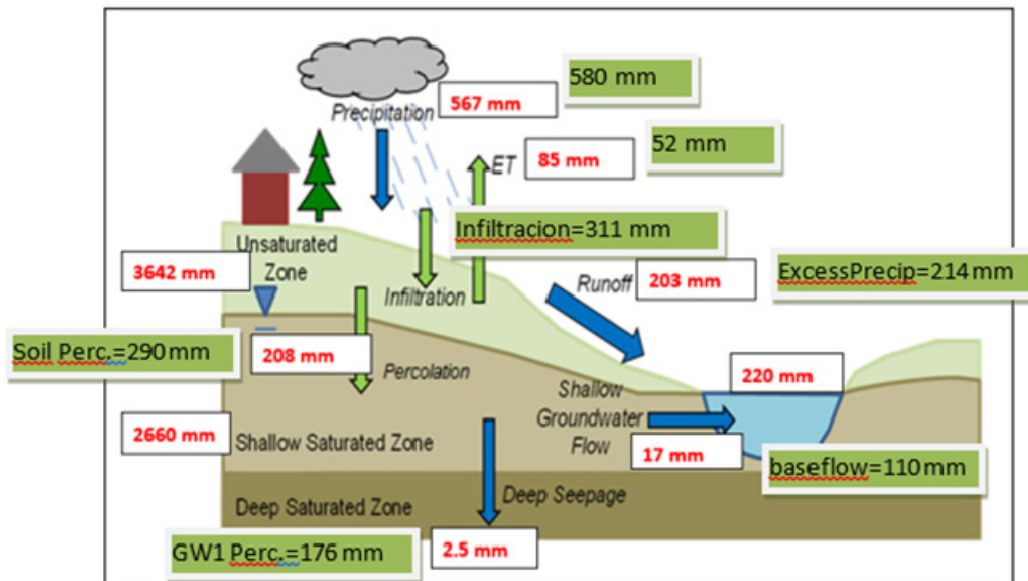


Figura 9. Balance para el mes de marzo-2007, resultados de HydroBID (rojo) y HEC-HMS (verde)

3.3. Mapas de escorrentía

El modelo HydroBID para cada corrida genera varios archivos con los resultados, uno de ellos es el "spatial_file-Los_Padres_Original.csv", que contienen los valores de varios parámetros para cada una de las subcuencas (COMID). Uno de esos parámetros es la escorrentía acumulada, denominada "Local CumulativeRunoff (cm/año)". En la tabla 7 se listan los valores resultantes de las cuatro corridas (original y tres escenarios teóricos) realizadas para

los distintos escenarios de uso y otra corrida considerando el cambio climático. Se recuerda que el valor inicial de CN fue ajustado por el coeficiente de 0.88 (ver la tabla 2).

Se puede observar que cuanto mayor es el valor del CN mayores son los valores de escurrimiento (la relación es directamente proporcional), y en el porcentaje de variación respecto a la situación original en los escenarios 2 y 3 en algunas subcuencas se supera el valor original.

Analizando la variación de los valores promedios en la cuenca de dicha variable, entre el escenario original (CN 62.5 promedio areal) y los teóricos se observa: en el escenario 1 (Agricultura/ Pastizales CN 56.3) una disminución del 28%, en el escenario 2

(Humedales CN 61.6) una disminución del 5%, en el escenario 3 (Tierras agrícolas seca y pastizales CN 66) un aumento del 18%. Por lo tanto, la situación de menores valores de escorrentía se va en el escenario con Agricultura y Pastizales.

Tabla 7. Valores de escorrentía (cm/año) para cada subcuenca, los 4 escenarios y cambio climático

COMID	Original		Escenario 1 (CN 56.3)		Escenario 2 (CN 61.6)		Escenario 3 (CN 66)		Original con cambio climático	
	(cm/año)	(%)	(cm/año)	(%)	(cm/año)	(%)	(cm/año)	(%)	(cm/año)	(%)
316367700	9.01	100	6.52	72	8.64	96	10.80	120	11.41	127
316398200	10.49	100	6.65	63	8.79	84	10.96	105	13.21	126
316367800	10.71	100	6.68	62	8.83	82	11.02	103	13.45	126
316394800	8.47	100	6.56	77	8.67	102	10.83	128	10.71	126
316401700	8.44	100	6.47	77	8.57	102	10.71	127	10.67	126
316394700	8.44	100	6.50	77	8.61	102	10.76	127	10.67	126
316414600	8.99	100	6.55	73	8.59	96	10.68	119	11.36	126
316398100	9.99	100	6.48	65	8.58	86	10.72	107	12.60	126
316421700	8.42	100	6.47	77	8.54	101	10.65	126	10.68	127
Promedio de la diferencia			72		95		118		126	

Con los valores obtenidos en cada escenario se generaron cuatro mapas, para así mostrar y analizar la variación espacial de la escorrentía en cada subcuenca. En todos los mapas se utilizó la misma simbología, de manera de poder comparar los resultados, como se observa en la figura 10. Analizando la tabla 7 y la figura 10, se puede observar que en las subcuencas del norte (COMID 316367800 y 316398200) se registran los mayores valores de escorrentía. En el caso de la situación original, esto se debe a que en esas subcuencas es elevado el porcentaje de uso de suelo 2 -Tierras agrícolas seca y pastizales, lo que da un valor de CN promedio areal de 65.4 y 65.1 respectivamente (valores ajustado con el coeficiente 0.88) resultando mayor la escorrentía. Para los otros escenarios teóricos, donde el uso de suelo y por lo tanto el valor de CN es el mismo en todas las subcuencas, se pueden observar variaciones en las escorrentías, siendo las mayores en las mismas subcuencas de la zona norte (en el mapa del escenario 2 se puede observar más claramente). Es por eso que se puede estimar que los valores altos de escorrentía en las subcuencas del norte, están además influenciada por la precipitación, de acuerdo a la interpolación climática realizada, esta parte de la cuenca recibe más lluvia que las otras áreas. Se realizó otro mapa para la situación original sin y con cambio climático

(aumento de la temperatura de 3°C y de precipitación del 10%), con otra simbología, por ser muy diferentes los valores de escorrentía obtenidos, como se observa en la figura 11. La diferencia entre los valores de escurrimiento entre la situación original sin y con cambio climático es del orden del 26% de aumento. Aquí se puede apreciar que las subcuencas del norte (COMID 316367800 y 316398200), que tienen mayores valores de CN y precipitación, ante los efectos del cambio climático, serían las subcuencas que tendrían mayor impacto y sufrirían más las consecuencias que las subcuencas del sur. Estos resultados son muy importantes porque pueden dar luz de los lugares donde se deben priorizar medidas de mitigación.

4. CONCLUSIONES

La utilización de la AHD con la delimitación de cuencas y tramos de cauce y una base de datos asociada facilita el trabajo de preparar los datos para aplicar el modelo, pero en cuencas de llanura con intervención antrópica (canalizaciones) y en la zona del valle de inundación del río Paraná, debe ser revisada antes de utilizarse, pues puede tener errores de conectividad y sentido de escurrimiento, debiendo ser modificada.

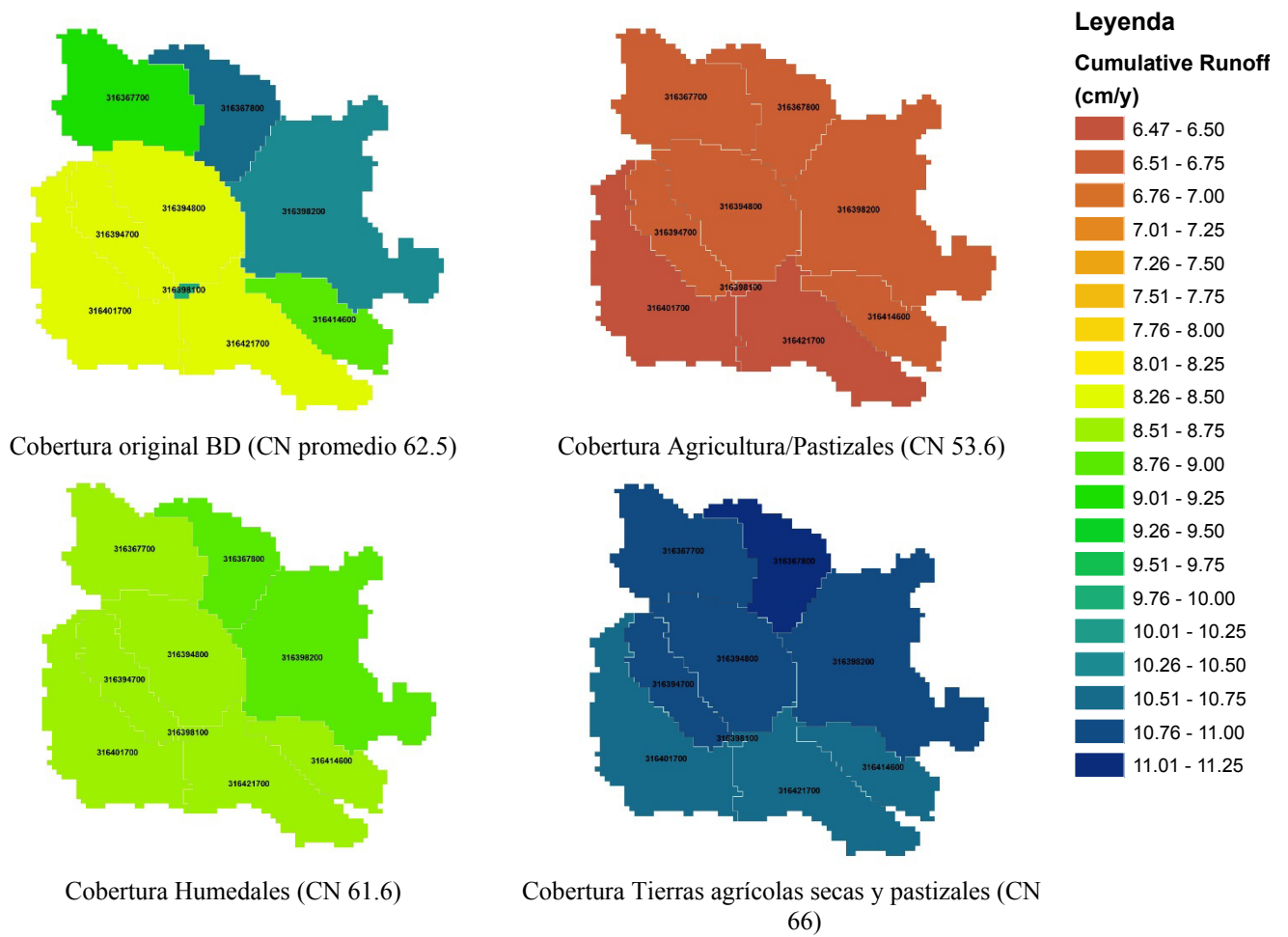


Figura 10. Mapas de escorrentía para las 4 uso de suelo considerado

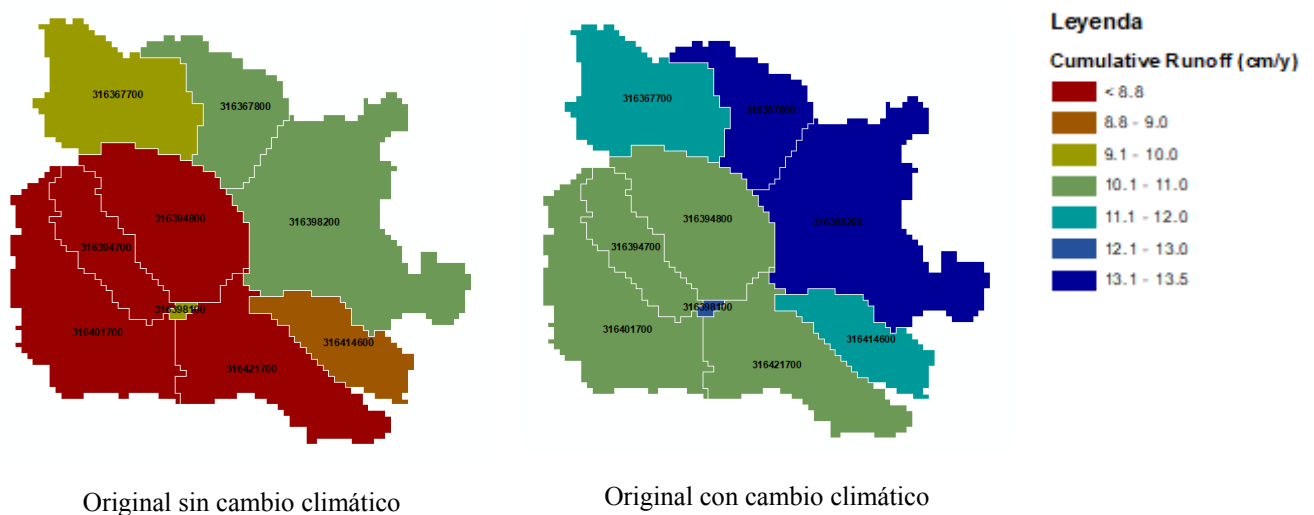


Figura 11. Mapas de escorrentía sin y con cambio climático

Además, se deben analizar los valores de uso del suelo de la tabla `Catchment_nlcd_soils`, en la BD `argentina_revised.sqlite`, para conocer los tipos de uso del suelo se estarán modelando en la cuenca de estudio. HydroBID requiere para su aplicación series diarias de precipitación y temperatura con valores completos, que muchas veces no se dispone. En este caso no existía una estación en la cuenca, por lo que se seleccionaron tres estaciones confiables, dos cercanas y una a 50 km de la cuenca. La serie debió ser completadas en los datos faltantes, siendo el periodo de estudio de 28 años (1989-2016). Una vez generados los datos necesarios para aplicar el modelo, es muy fácil y sencillo realizar las distintas corridas. Se realizaron las corridas utilizando cuatro tablas con diferentes usos del suelo (original y 3 escenarios teóricos) y además considerando el cambio climático, con un aumento de la temperatura de 3°C y de precipitación del 10%, para la condición original de uso del suelo. Los parámetros que se ajustaron en el HydroBID fueron el CN y el contenido de disponible de agua (CDA) con valores multiplicativos menores a la unidad, 0.88 y 0.85 respectivamente. HydroBID muestra un buen desempeño para representar los volúmenes mensuales del balance hídrico, pero sobrestima significativamente los caudales diarios máximos de crecidas. Es un modelo pensado para cuantificar el balance hídrico y no para la modelación de eventos. Los valores obtenidos en los balances de agua anuales dan como resultado valores similares a los promedios registrados en la zona, como la precipitación de 1,089 mm y la evapotranspiración de

844 mm. Además, que la percolación supera a la escorrentía, verificándose lo dicho que en estos sistemas hidrológicos de llanura predomina el movimiento vertical del agua (evaporación, transpiración e infiltración) sobre los horizontales. Los mapas generados con los valores de escorrentía obtenidos para cada subcuenca, resultantes de las corridas realizadas para los 4 escenarios de uso del suelo, se puede observar que cuanto mayor es el valor del CN mayores son los valores de escurrimiento (runoff), variando entre 6.5 y 11 cm/año, mostrando cuales son las subcuencas con mayores valores. Para los escenarios teóricos analizados se obtuvo para el escenario 1 (Agricultura/ Pastizales) una disminución de la escorrentía del 28%, en el escenario 2 (Humedales) una disminución del 5%, en el escenario 3 (Tierras agrícolas seca y pastizales) un aumento del 18%, lo que demuestra una buena sensibilidad del modelo. El aumento de los valores de escorrentía considerando el escenario de cambio climático previsto para el período 2081-2100, es muy importante, llegando al 26%, siendo las subcuencas del norte las más afectadas, por tener los mayores valores de CN y precipitación, por lo tanto, sufrirían más las consecuencias que las subcuencas del sur. Que el modelo HydroBID de como resultados estos escurrimientos promedios por subcuenca, permite realizar de manera fácil y sencilla los mapas en QGIS, y así representar las variaciones debido al cambio de uso de suelo y a los efectos producidos por cambio climático, dando luz de los lugares donde se deben priorizar medidas de mitigación.

REFERENCIAS

- KNMI, K. N. (1 de Marzo de 2020). Atlas del cambio climático de KNMI. (K. N. Instituut, Editor) Obtenido de https://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.py
- Moreda, F., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz, R. (2017). Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio. Washington: BID.
- Nalesso, M., & Coli, P. (2017). Guía paso a paso: Manual de Hydro-BID. Washington: BID. Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Gu%C3%ADa-paso-a-paso-Manual-de-Hydro-BID.pdf>
- Rineer, J., Bruhn, M., Miralles-Wilhelm, F., & Muñoz Castillo, R. (2014). Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe. Washington: BID. Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Base-de-Datos-de-Hidrolog%C3%ADa-Anal%C3%ADtica-para-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>

Como citar este artículo:

Arbuet A. *et al.*, (2021). Implementación del modelo HydroBID en la Cuenca Los Padres-Santa Fe-Argentina. *Aqua-LAC* Volumen 13(1), 81-96. doi: 10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-06



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license