

# Análisis de los eventos de inundación del río Paraguay en Asunción, considerando los efectos causados por el cambio de uso/cobertura del suelo. Años de estudio: 2014, 2015-2016 y 2019

## Analysis of the flood events of the Paraguay River in Asunción, taking into account the effects caused by the change in land use / coverage. Yearsofstudy: 2014, 2015-2016

Rosa del Rocío Aseretto<sup>1\*</sup>, Julián Báez Benítez<sup>1</sup>, Carlos Echeverría<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción. Asunción, Paraguay <sup>2</sup>Universidad Paraguayo Alemana. Facultad de Ciencias y Tecnología. Asunción, Paraguay \*Autor de correspondencia: roaseretto@gmail.com.

Recibido: 2 mayo 2021 Recibido en versión modificada: 25 febrero 2022 Aceptado: 26 julio 2022

Aseretto, R. R., Báez Benítez, J., Echeverría, C. (2022). Análisis de los eventos de inundación del río Paraguay en Asunción, considerando los efectos causados por el cambio de uso/cobertura del suelo. Años de estudio: 2014,2015-2016 y 2019. *Revista investigaciones y estudios - UNA*, 13 (2), 16-28. <https://doi.org/10.47133/IEUNA22202b>

**Resumen.** Se presenta el análisis de los eventos de inundación de los años 2014, 2015-2016 y 2019 en la cuenca media del río Paraguay, teniendo en cuenta los efectos causados por los cambios de uso de suelo. El área de estudio comprende desde la cuenca del río Apa hasta Asunción. Para el estudio se utilizaron datos de series de tiempo hidrometeorológicas y; se elaboraron mapas de tipo de suelo y mapas de uso de suelo para los años 2014 y 2019. Los caudales simulados fueron calibrados con los caudales observados en Asunción, obteniendo buenos resultados, el periodo total de análisis comprende desde el año 1984 hasta el 2019, luego se realizó un análisis de sensibilidad

considerando dos escenarios; en el primer escenario se tomó el área de estudio sin cobertura boscosa, por un lado, para el segundo escenario se consideró el área de estudio con cobertura boscosa, obteniendo varios hidrogramas que dieron como resultado el aumento del caudal máximo al incrementarse la deforestación y la disminución del caudal mínimo, pero al aumentar el área boscosa disminuye el caudal máximo y aumenta el caudal mínimo, que concuerda con estudios realizados en cuencas experimentales en diferentes partes del mundo.

**Palabras clave.** modelo hidrológico; cuenca media; cambio de cobertura del suelo.

**Abstract.** The analysis of the flood events of the years 2014, 2015-2016 and 2019 in the middle basin of the Paraguay River is presented, taking into account the effects caused by changes in land use. The study area ranges from the Apa river basin to Asunción. For the study the utilities, data from

hydrometeorological time series and; Soil type maps and land use maps were prepared for the years 2014 and 2019. The simulated flows were calibrated with the flows observed in Asunción, obtaining good results, the total analysis period ranges from years 1984 to 2019, Then a sensitivity analysis was carried out considering two scenarios; In the first scenario, the study area without forest cover was taken, on the one hand, for the second scenario the study area with forest cover was considered, obtaining several hydrographs that resulted in an increase in the maximum flow as deforestation increased. decrease in the minimum flow, but as the forest area increases, the maximum flow decreases and the minimum flow increases, which is consistent with studies carried out in experimental basins in different parts of the world.

**Keywords.** hydrological model; middle basin; land cover change.

## INTRODUCCIÓN

Desde el año 1905 hasta el año 2010 en el río Paraguay se han presentado crecidas importantes, con un periodo de recurrencia entre 10 a 15 años. A partir del año 2014, se han producido inundaciones recurrentes del río Paraguay, incluyendo la más reciente, de abril a junio del año 2019, que deja en evidencia que, existen alteraciones en las condiciones de escurrimiento que podrían deberse a los cambios de cobertura/ usos del suelo, como a las intensas precipitaciones ocurridas. (Monte Domecq, 2019). Por lo tanto, los efectos de las alteraciones sobre el régimen hidrológico deben ser objeto de estudio. Una técnica de evaluación de los impactos sobre la esorrentía es a través de la modelación de grandes cuencas, propuesta por Missio Bayer

(2014), que plantea el análisis de correlaciones entre cuencas experimentales en diferentes regiones del mundo, con diferentes tipos de clima que presenten deforestación o reforestación. De un modo general, los resultados experimentales demuestran que la reducción de área de bosque produce aumento en el caudal, aunque las magnitudes de los aumentos pueden ser distintas (Bosch & Hewlett, 1982).

En este estudio se analizó las variaciones del caudal máximo y mínimo de la cuenca media del río Paraguay, con sus principales afluentes que forman parte de la cuenca media, son los ríos Apa, Aquidaban, Ypané, Jejuí y Manduvirá, los ríos Salado y Piribebuy se encuentran dentro de la subcuenca del área central y Asunción, mediante el Modelo de Grandes Bacias (MGB), para evaluar los escenarios de las inundaciones ocurridas en los años; 2014,2015-2016 y 2019.

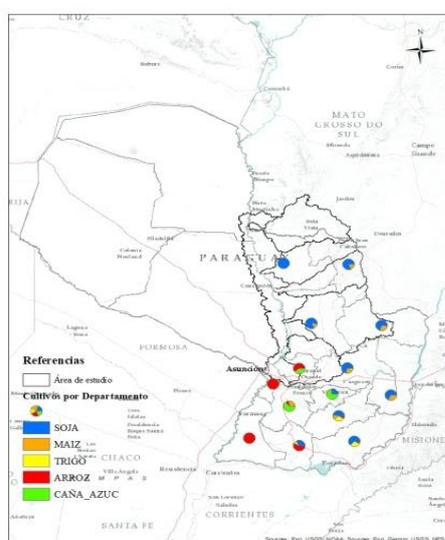
### Área de estudio

La cuenca del Río Paraguay ocupa 106.907 km<sup>2</sup> en la Región Oriental. Las cuencas hidrográficas más importantes se consideran como aporte lateral, siendo sus cauces los principales afluentes de río Paraguay: la Sub cuenca del Río Apa con 15.263 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Aquidaban con 11.769 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Ypané con 10.266 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Jejuí Guazú con 22.719 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Manduvirá con 10.583 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Piribebuy con 1.624 km<sup>2</sup>, Sub cuenca del Río Salado con 1.128 km<sup>2</sup>. Para este estudio se consideraron las subcuencas de mayor aporte al río Paraguay de la Región Oriental, enfocándose en las que afectan principalmente al caudal que llega a Asunción.

## Uso del suelo

Según estudios realizados por Ávila Schmalko & Monroy Sarta (2018) desde el 2002 hasta el 2017 se ha registrado una expansión intensiva de cultivos, además de la ganadería en el norte del país. Se analizaron seis rubros de cultivo; la soja, maíz, arroz con riego, caña de azúcar y girasol. En todos los Departamentos, excepto Central, se registra crecimientos superficiales destinados a algunos de los rubros como; soja, maíz, trigo, arroz con riego, caña de azúcar y girasol. Caaguazú registró en el año 2017, un crecimiento de casi 230 % más de cultivo que en el año 2002 (488.700 hectáreas). En el Departamento de Caazapá se observó un crecimiento de 102% que representa 153.800 hectáreas.

En la Figura 1 se puede observar que la soja y el maíz son los cultivos con mayor expansión, luego se encuentran la caña de azúcar, arroz y trigo, con menor superficie ocupada, ya que en los últimos años han tenido un crecimiento del 2%, considerando que el área estudiada abarca los departamentos de Concepción, San Pedro, Amambay, Caaguazú, Central, Cordillera y Canindeyú.



**Figura 1.** Mapa de cultivos en la región oriental. Fuente: Elaboración propia con los datos de Ávila Schmalko & Monroy Sarta (2018).

La expansión de la soja e intensificación de la ganadería van de la mano. Teniendo en cuenta que la ganadería está presente en todo el país, del área estudiada los departamentos que aumentaron su extensión entre los años 2002 y 2017 son; Concepción, San Pedro y Amambay. (Ávila Schmalko & Monroy Sarta, 2018).

## Cobertura boscosa de la Región Oriental

Para la Región Oriental la unidad de cobertura que ocupa una mayor extensión de superficie es la Tierra cultivada con 7.852.898 hectáreas (49,1% teniendo en cuenta la superficie de la región en la que se encuentra). Mientras que la segunda cobertura de mayor extensión, pese a su notable reducción en los últimos años, es la de Cobertura forestal con 2.615.102 hectáreas (16,4%). (Instituto Forestal Nacional [INFONA], 2017; FAO, 2020).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

Los datos de entrada al modelo son del tipo hidrometeorológicos y espaciales. Los datos utilizados para la preparación de las series de precipitaciones y caudales provienen de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) y de la Agencia Nacional de Aguas del Brasil (ANA), se utilizaron doce estaciones meteorológicas y climatológicas; para el caudal observado se utilizó la estación de Asunción.

En cuanto a los datos espaciales, estos comprenden el Modelo Digital de Elevación (MDE) para la discretización de la cuenca y los mapas de tipo y uso del suelo utilizados para la definición de la Unidades de Respuesta Hidrológicas (URHs). El modelo de elevación digital (MDE) fue el SRTM 1

Arc-Second Global con una resolución de 1 segundo de arco (90 metros), que fue elaborado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA); es de uso libre y se encuentra disponible en la página de USGS, que fue discretizado en 47 minicuecas.

El mapa de tipo de suelo utilizado fue el creado en el marco del Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (PRUT) y de la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA), para obtener los tipos de suelo del área de estudio. El Estudio de Suelos de la Región Oriental del Paraguay, cuenta con la descripción de perfiles de suelos, la capacidad de drenaje, espesor, porcentaje de arena, arcilla y materia orgánica de cada suelo. Por lo que se realiza una clasificación teniendo en cuenta la capacidad de drenaje y permeabilidad según el PRUT y EMBRAPA; los suelos con tendencia a generar menos escorrentía superficial fueron agrupados en la categoría denominada *suelos profundos* y los suelos más superficiales, que ocurren en regiones con topografía más accidentada, con tendencia a generar más escurrimiento superficial fueron agrupados en la categoría denominada *suelos superficiales*, considerando las especificaciones del software utilizado; entonces los suelos con textura arenosa, arenosa franca y francosa gruesa son suelos con buen drenaje por lo que no generaran escorrentía superficial; y se los clasificó como *suelo profundo* a los siguientes; Ultisol, Alfisol, Inceptisol, Entisol. Los suelos con textura arcillosa y francosa fina tienen un drenaje de pobre a muy pobre, según el PRUT; por lo que se consideró a; Mollisol, Oxisol, Vertisol, Tierras Miscelaneas y Ciudad como *suelos superficiales*. Reclasificando, se obtuvo el mapa de tipo de suelo.

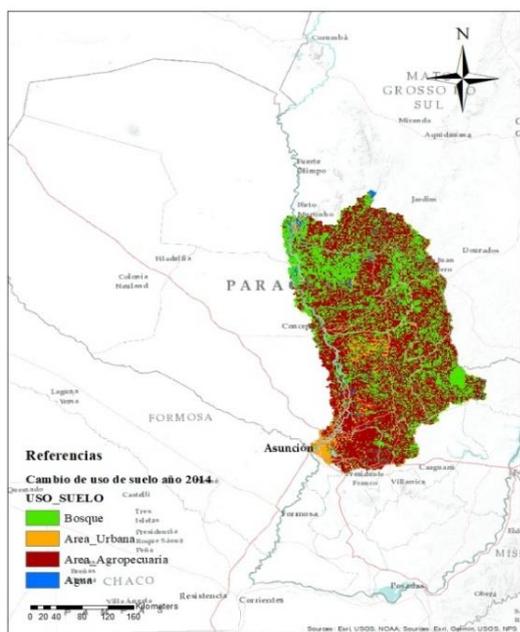
Para la creación de los mapas de uso de suelo se utilizaron imágenes satelitales de la USGS - Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor). El satélite recopila imágenes de la Tierra con un ciclo de repetición de 16 días. Las bandas espectrales del sensor OLI cuentan con 12 bandas, por lo que proporcionan una mejora de los instrumentos de los Landsat anteriores, y entregan el producto de datos OLI con una resolución de 30 metros, para los años 2014 y 2019, el mapa del año 2014 fue validado hasta el año 2016 por lo que la imagen satelital del año 2014 se utilizó para el análisis de los años 2014, 2015-2016. La imagen satelital del año 2019 se utilizó para el análisis del mismo año, las mismas fueron procesadas, y posteriormente se realizó el mapa de uso de suelo mediante la clasificación supervisada, obteniendo cuatro clases de uso; Bosques, área agropecuaria, área urbana y agua. (Figura 2).

Luego los mapas de uso y tipo de suelo se combinan en el preprocesamiento para crear los mapas de Unidades de Respuestas Hidrológicas (URHs), que son regiones de la cuenca que poseen las mismas características en cuanto a atributos geológicos y al tipo de uso de suelo. Estas unidades en teoría presentan las mismas respuestas en cuanto a parámetros de modelaje, como por ejemplo ejemplo la capacidad de almacenamiento del suelo o de generación de escorrentía. (Collischonn et al., 2020).

### Descripción e implementación del modelo MGB

La entrada principal del modelo es la precipitación, una parte de la misma es interceptada por la vegetación y la otra llega al suelo; la precipitación que llega al suelo puede ser infiltrada en la capa superficial del suelo y/o percolada a la

capa subsuperficial o subterránea del suelo, pero también puede generar escorrentía superficial que transita internamente en la cuenca mediante el método de reservorios lineales, una vez que llega al río se propaga en la red de drenaje principal, mediante el método de Muskingum-Cunge o por el método Inercial, en este trabajo se optó por el método inercial debido a que considera los eventos de inundación en la simulación.



**Figura 2. Mapa de uso del suelo para el año 2014.**  
Fuente: Elaboración propia.

### Interpolación de datos hidrometeorológicos

En la etapa de preparación de datos del modelo se realizó la interpolación de datos de puestos climatológicos y meteorológicos. Los valores de precipitación observados en los puestos pluviométricos son utilizados para estimar la precipitación en todas las células del modelo, en todos los días de la interpolación. (Collischonn & Tucci, 2001).

Se optó por utilizar el inverso de la distancia, es similar a la media aritmética; calcula el promedio de los datos pluviométricos de las estaciones ubicadas en el área geográfica determinada, pero tiene el

agregado de una ponderación por distancia, que al tener un factor cuadrático recibe una influencia bastante fuerte del monto pluvial de las estaciones más cercanas y al considerar una serie de puntos de estimación puede formar agrupaciones concéntricas en los montos estimados en torno a las estaciones. (Collischonn, 2020).

Este método divide la cuenca en celdas, considerando la precipitación dentro de una celda sin medida es una función de la precipitación de las celdas próximas que poseen medidas y del inverso de la distancia que las separa, elevada al cuadrado (Pizarro et al. 2003).

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

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

Donde;

$P_m$ : Precipitación media del área de estudio.

$P_i$ : Precipitación de la estación  $i$ ,

$d_i$ : Distancia entre estación y celda correspondiente

$n$ : Número de estaciones en análisis.

Después de la interpolación, el programa Interplu genera un archivo binario con los datos. Se utiliza esta metodología de preparación de datos para economizar algún tiempo de procesamiento durante la ejecución del modelo hidrológico. (Medeiros et al. 2020).

### Parámetros fijos y calibrables

El modelo consta de cuatro parámetros fijos y nueve parámetros calibrables. Los parámetros fijos tienen valores que se pueden medir o que no interfieren en los resultados, como el índice de área foliar (IAF), albedo, altura de la vegetación y resistencia superficial, que dependen de la época del año y de la vegetación asociada a cada URH; sus

valores pueden obtenerse del Manual de Aplicación del modelo MGB, por lo que no pueden ser calibrados. Los valores utilizados se encuentran en la tabla 1, según su parámetro y uso.

Los parámetros calibrables, por otro lado, son alterados a cada aplicación del modelo, buscando un buen ajuste entre los datos de caudal observados y calculados. Los parámetros calibrables están asociados a las URHs, como: Calibración de la

propagación subsuperficial. ( $C_i$ ) y Calibración de propagación superficial ( $C_s$ ), Parámetro de drenaje subsuperficial ( $K_{int}$ ), Caudal durante estiaje ( $K_{bas}$ ), Capacidad de almacenamiento del suelo ( $W_m$ ) y Relación entre el almacenamiento y la saturación. (b), en algunas situaciones también son incluidos los Parámetros de almacenamiento residual ( $W_c$ ) y los Parámetros de retardo del reservorio subterráneo ( $TK_B$ ). (Collischonn et al., 2020).

**Tabla 1. Valores para cada parámetro fijo del MGB.** Fuente: Manual del modelo MGB-IPH.

Parámetro	Uso	Valor mínimo	Valor promedio	Valor máximo
<i>Albedo</i>	Bosques	0.11	-	0.16
	Pastizal	0.18	-	0.26
	Agricultura	0.15	-	0.26
	Agua	-	0.08	-
<i>IAF</i>	Bosques	4	6	9
	Pastizal	1	2	4
	Agricultura	1	2	6
<i>IAF</i>	Agua	No aplica, se utiliza el valor 1		
<i>Altura de la vegetación</i>	Bosques	10	-	30
	Pastizal	0.5	-	1
	Agricultura	0.5	-	2
	Agua	-	0.5	-
<i>Resistencia superficial</i>	Bosques	-	100	-
	Pastizal	40	70	80
	Agricultura	40	70	154
	Agua	0	0	0

### Calibración del modelo. Análisis de sensibilidad

La calibración del modelo busca reproducir los hidrogramas ajustando parámetros del modelo. En esta etapa, muchas incertidumbres están asociadas con el proceso, como los datos de entrada y el modelo en sí, que es una representación matemática del sistema real. (Missio Bayer, 2014). Se calibró el modelo desde el año 1984 hasta el 2014 como primer escenario, el segundo escenario es desde el

año 1985 hasta el 2016 y el último escenario es desde el año 1989 al 2019. Se utilizó mismo mapa de URH en el modelo del año 2014 para los años 2015-2016 debido a que el mismo ya fue validado hasta el año 2016 y no se tuvieron cambios en el uso del suelo para estos años, no así para el año 2019; por lo que, para el modelo del año 2019 se utilizó el mapa de URH del año 2019.

Se presenta un análisis de sensibilidad del modelo MGB-IPH a los cambios del uso/cobertura

del suelo, para representar los impactos de la deforestación o una cobertura total de bosques sobre el caudal del área estudiada. La primera variación de los valores iniciales se realizó considerando al área de estudio sin área boscosa (deforestada) y se denominó **caso 1**, por lo que se asignaron para cada URH los valores mínimos aceptados por el modelo, que se encuentran en la tabla 1. Para la segunda variación se consideró el área de estudio cubierta de bosques y se lo denominó **caso 2**, se utilizaron los valores máximos de los parámetros fijos (Tabla: 1), pero considerando que toda el área agropecuaria, es bosque.

## RESULTADOS

### Caudales calibrados para el período de los años 1984-2016

Se realizaron varias iteraciones, y se utilizó la calibración manual, para conocer los parámetros más sensibles a los cambios bruscos, en la vegetación (cambio de uso de suelo) o en el suelo (infiltración y percolación de la precipitación), que corresponden a los parámetros fijos y calibrables, primeramente, se aumentó los parámetros del suelo; uno de los principales parámetros del modelo MGB que tiene efecto sobre los valores de caudal en la época estiaje es el parámetro  $C_b$ . Este parámetro define al reservorio subterráneo de cada minicuenca, dentro del marco del concepto de reservorios lineales que se usó en el MGB para la propagación de la escorrentía en cada minicuenca. En la figura 3 se observa el hidrograma obtenido luego de la calibración, el hidrograma de color azul corresponde al observado y el hidrograma de color rojo al

simulado por el modelo. El periodo de calibración corresponde desde el año 1984 hasta el año 2016, el caudal observado corresponde a Asunción.

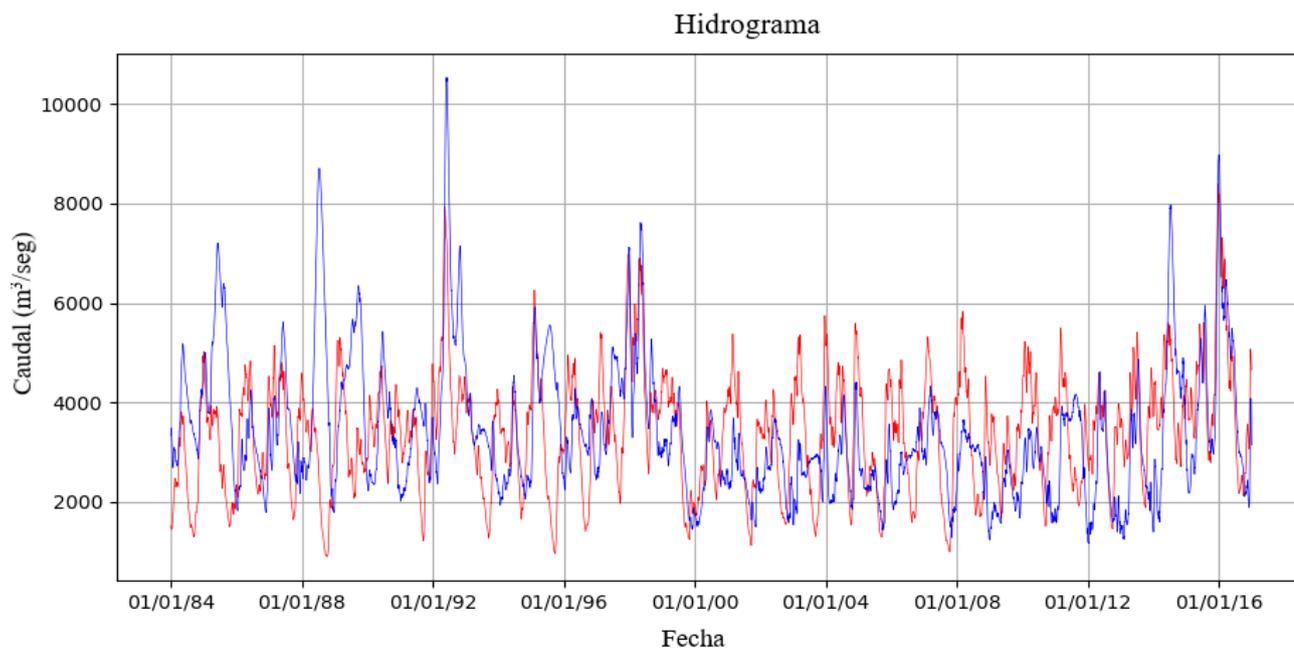
El modelo representa mejor los picos de los caudales máximos, no así en los caudales mínimos donde se puede ver mayor diferencia. Se ve una pequeña subestimación. Así mismo, también se realizó una comparación entre las curvas de permanencia de los caudales. Arrojando un coeficiente  $R^2$  de 0.68, el cual está influenciado por los caudales máximos, por lo que se obtuvo un mejor ajuste en los mismos. Se considera como un buen resultado de acuerdo con lo definido por Collischonn.

### Caudales calibrados para el período de los años 1989-2019

Para la calibración correspondiente a los años 1989-2019 (Figura 4), donde el hidrograma de color azul corresponde al observado y el hidrograma de color rojo al simulado por el modelo, se obtuvo una mejoría en los caudales mínimos y en los máximos, obteniéndose una diferencia entre el caudal simulado contra el observado de 209.80 m<sup>3</sup>/seg. El hidrograma simulado acompaña mejor al observado desde el año 2012, no así para el periodo de 1988 al 1998, esto se podría atribuir a la imagen satelital que se utilizó para elaborar el mapa de URH, ya que se tuvieron cambios en la cobertura/uso del suelo para esos años.

### Análisis de sensibilidad del MGB-IPH con las alteraciones de la vegetación. Caso 1

Se realizó la modificación de los archivos; vegetación y suelo, para analizar el cambio de la cobertura del suelo.



**Figura 3. Hidrograma obtenido para los años 1984-2016.** Fuente: Elaboración Propia con el modelo MGB.

Para el escenario 1984-2016 se utilizó el **mapa URH 2014** y se consideró que los bosques adoptaron los valores de pastura, para todos los parámetros fijos (parámetros de vegetación) y para los parámetros calibrables (parámetros del suelo) se utilizaron los valores mínimos, para el tiempo de concentración, capacidad de almacenamiento de la capa superficial, calibración de propagación superficial  $C_s$  y  $C_i$  que multiplica el tiempo de concentración para definir el tiempo de respuesta superficial y subsuperficial de cada URH. En la figura 5 se encuentra el hidrograma obtenido con los valores mínimos, donde el hidrograma de color azul corresponde al observado y el hidrograma de color rojo al simulado; en la misma se observa que, con respecto al hidrograma observado los picos máximos se encuentran muy sobre estimados, alcanzando una diferencia de entre 2000 a 5951.1  $m^3/seg$ , lo que significaría que si toda la cobertura boscosa que se tenía en el año 2014 desapareciera y ocurre un evento del niño como se tuvo en los años 2015-2016, las inundaciones generadas por el evento

serían de mayor envergadura y con un menor tiempo de respuesta ante el mismo. Se hace énfasis en los caudales máximos porque podrían generar eventos de inundación. Utilizando el **mapa URH 2019**, considerando el área totalmente deforestada y utilizando los valores mínimos para la vegetación y suelo, se obtuvo un aumento máximo de 92% en los picos, que se pueden observar en la figura 6, el caudal máximo observado es de 10500  $m^3/seg$  y el caudal máximo simulado es de 12.500  $m^3/seg$ . Esto se debe a que la mayor parte de la precipitación genera escorrentía superficial, al saturarse rápidamente el suelo, además el tiempo de concentración se considera menor por lo que escurre con mayor rapidez y se tienen picos muy pronunciados. Comparando con el hidrograma del año 2014, se tienen más picos para los mismos valores, esto se podría deber a que en el mapa URH del año 2019, se tenía una disminución del área boscosa y un aumento del área urbana y agropecuaria.

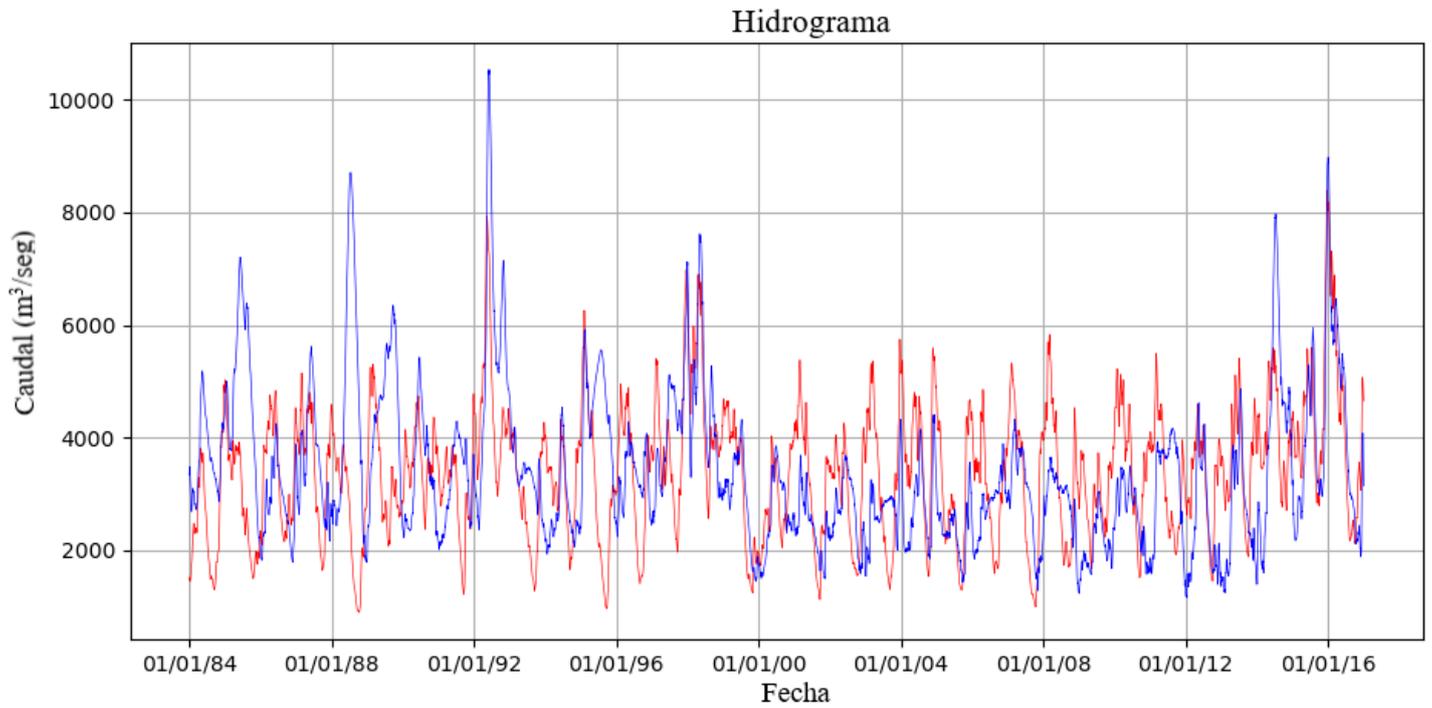


Figura 4. Hidrograma calibrado. Fuente: Elaboración propia con el modelo MGB.

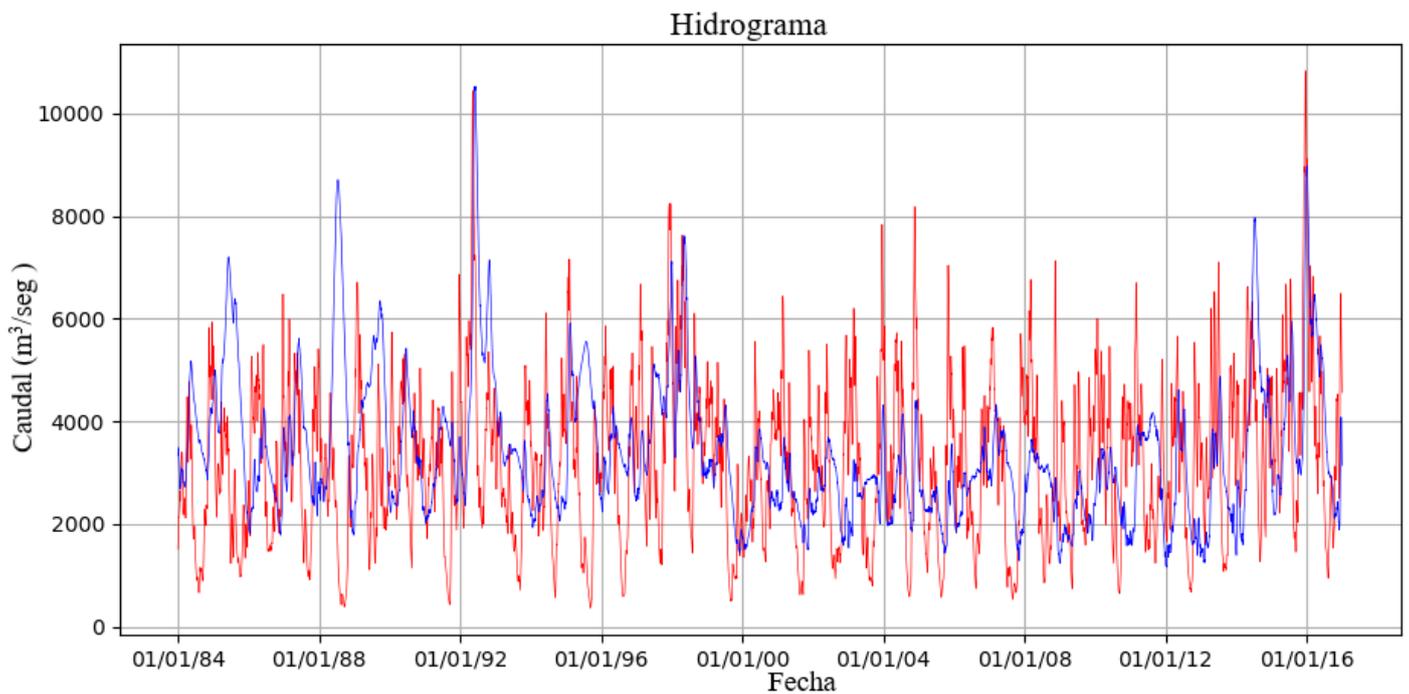
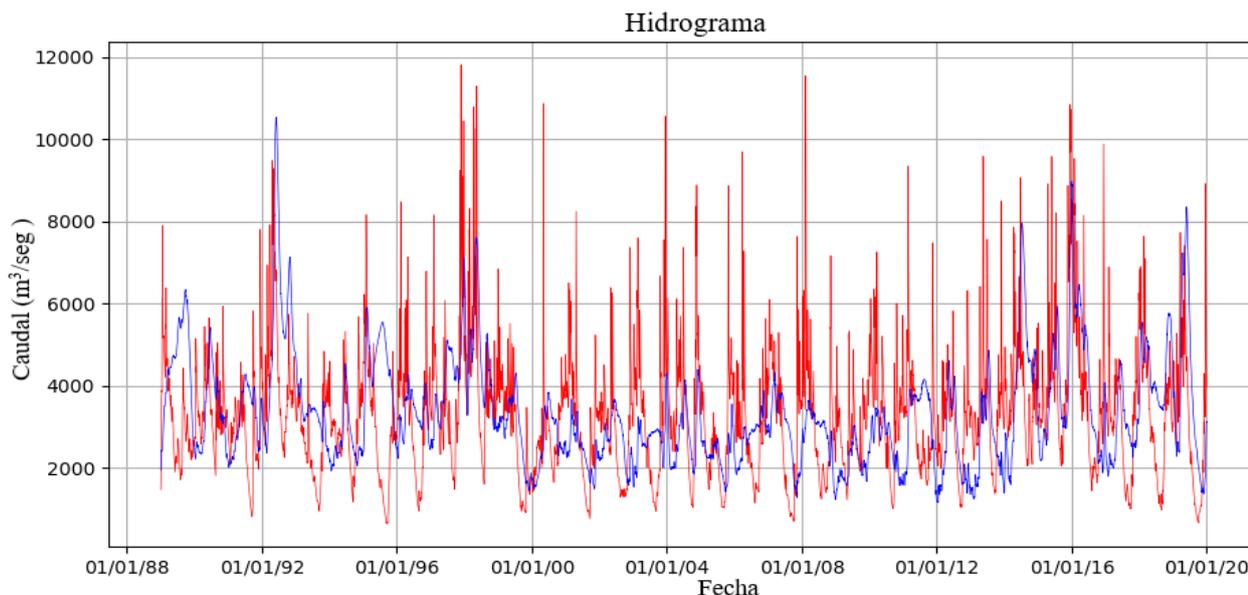


Figura 5. Hidrograma simulado con los valores mínimos para el caso 1. Fuente: Elaboración propia.

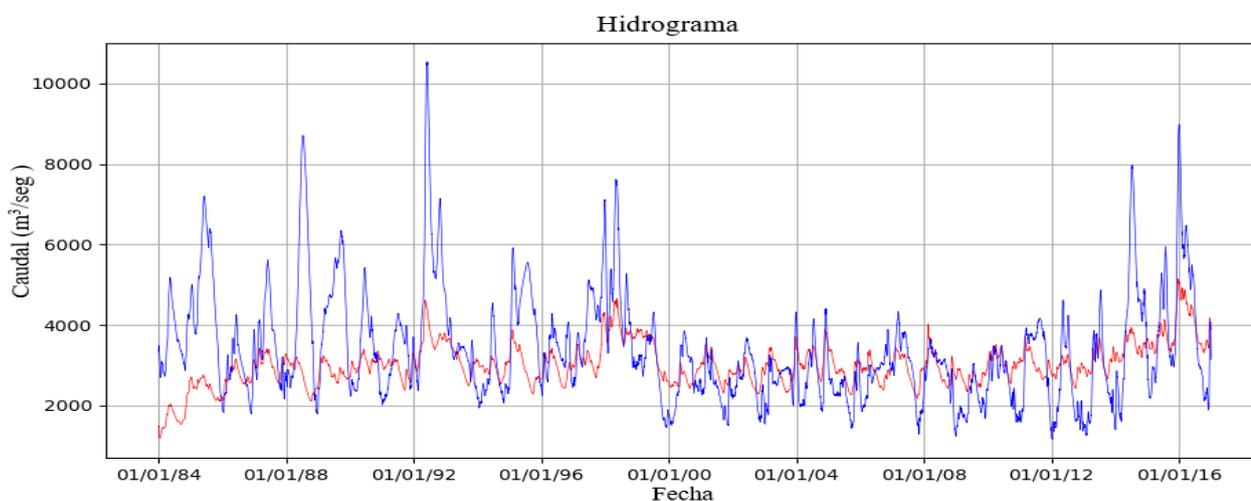


**Figura 6. Hidrograma del año 2019 con los valores mínimos.** Fuente: Elaboración propia con el modelo MGB.

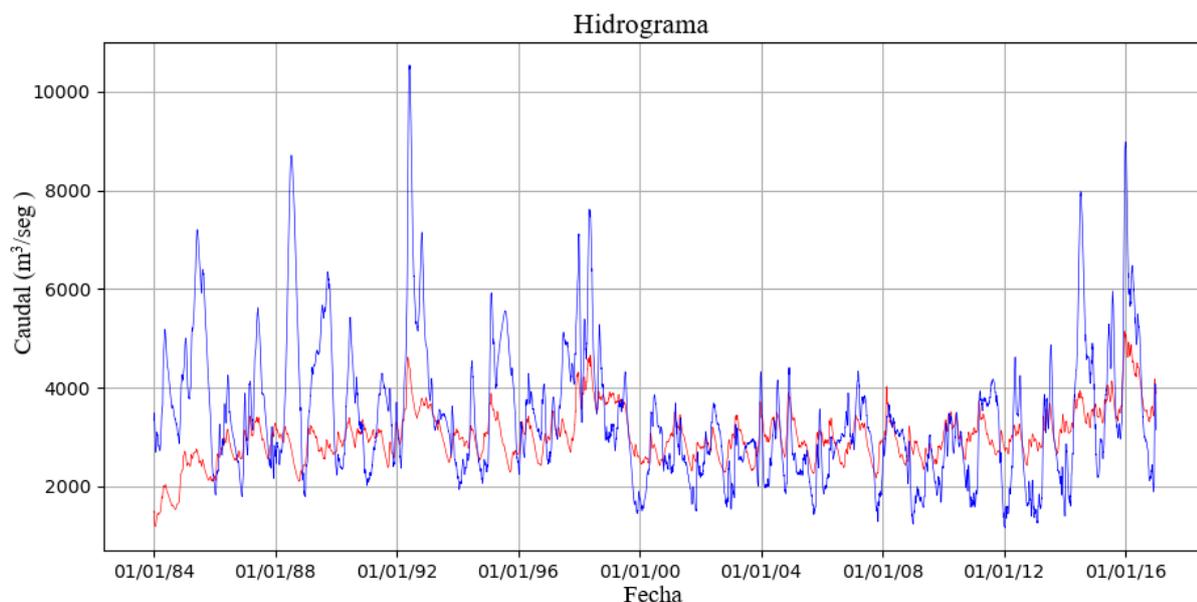
### Análisis de sensibilidad del MGB-IPH con las alteraciones de la vegetación. Caso 2

Para realizar la simulación en el periodo **1984-2016** se utilizó el **mapa de URH del año 2014**, donde se considera toda la cuenca cubierta de bosques, en el área urbana se utilizó los valores medios y en los demás uso se utilizaron los valores máximos para los parámetros de vegetación y para los parámetros del suelo, del mismo los parámetros que más influyen para suavizar o alterar los picos son el tiempo de concentración, con los parámetros de calibración de propagación superficial y

subterránea; en la figura 6 se encuentra el hidrograma simulado, donde se aprecian picos suavizados, subestimados en su totalidad con respecto al hidrograma observado, se puede observar la diferencia de los caudales máximos obtenidos con una disminución de hasta el 48 %, se hace énfasis en los caudales máximos debido a que estos están asociados a las inundaciones registradas en el periodo simulado, en los caudales mínimos también se tiene un ligero aumento, pero estos son necesarios en época de sequía. (Figura 7).



**Figura 7. Hidrograma correspondiente a los años 1984-2016.** Fuente: Elaboración propia con el modelo MGB.



**Figura 8. Hidrograma para el periodo 1989-2019, para el caso 2.** Fuente: Elaboración propia con el modelo MGB.

Para el periodo **1989-2019** se utilizó el **mapa URH del año 2019**. Considerando que el área se encuentra totalmente cubierta de bosques; en el hidrograma obtenido, en el caudal mínimo se tiene un aumento. Esto se podría deber a que los bosques interceptan la precipitación y no se genera escorrentía superficial en exceso, como ocurre en el caso 1, además, el tiempo de concentración es más lento, a esto se debe que los picos estén suavizados, sabiendo que los mismos representan los eventos de inundación ocurridos en el área estudiada. Para el año 2019 se tiene una diferencia del caudal observado con el simulado de  $3966.62 \text{ m}^3/\text{seg}$  (51.92%), es decir los bosques pueden disminuir el impacto que genera una inundación. Por lo que se analizó los caudales máximos y los caudales mínimos, considerando los casos de estudios ya mencionados más arriba. (Figura 8).

### Caudales Máximos

Para el caso 1, donde se consideró el área de estudio deforestada se obtuvieron incrementos de hasta  $4900 \text{ m}^3/\text{seg}$ , con respecto al caudal observado,

esto implica que a menor porcentaje de bosque los picos máximos aumentan considerablemente, si además a esto se le suma un evento del niño, el impacto del mismo será mayor en magnitud y en tiempo de llegada a las zonas ribereñas que son las más afectadas en con estos eventos.

Para el caso 2, la cuenca estaba totalmente cubierta de bosques, los picos se suavizaron (disminuyeron) en su totalidad, atenuando hasta los eventos extremos que se registraron en los años de estudio, para el año 2014-2016 la misma no es tan considerable como los es para el año 2019, donde se tiene una mayor diferencia entre el observado y simulado, esto se debería a que el área urbana tuvo un aumento, y los bosques disminuyeron.

### Caudales Mínimos

Los caudales mínimos están relacionados con la época de estiaje, ya que mantienen el caudal base del río en periodos donde no hay precipitación. Para el **caso 1**, se tiene una disminución al tener una alta tasa de deforestación, ya que la mayor parte de la precipitación escurre y no percola la cantidad

necesaria, para mantener el caudal del río en época de sequía.

Para el **caso 2**, se observó que en el área totalmente

cubierta de bosques se tiene un aumento del caudal mínimo, es decir en época de sequía el caudal del río no llegaría a niveles críticos, debido a que son alimentados por aportes de aguas subterráneas, por lo que se considera que también favorece a una buena percolación.

## DISCUSIÓN

En zonas con cobertura boscosa, las inundaciones presentan una tendencia a ser atenuadas por la mencionada cobertura. Además, durante los periodos de sequía mantiene el caudal mínimo requerido (caudal ecológico) para que el nivel del río no llegue a niveles críticos, aunque también se debe tener en cuenta que la inundación es un ciclo del río, que en los últimos años ha aumentado en frecuencia e intensidad, como también los impactos generados especialmente en las zonas ribereñas, ya que se encuentran asentadas varias ciudades.

En contraste, en las zonas rurales donde los bosques fueron reemplazados por cobertura destinada para la agricultura y la ganadería, los mismos no funcionan como sustitutos del área deforestada, no sólo, debido a que los fenómenos de la intercepción de la precipitación y la evapotranspiración se ven claramente afectados en magnitud y duración, afectando indefectiblemente al ciclo hidrológico.

Para los escenarios simulados del caso 1 con los mapas de URH del año 2014 en el hidrograma se obtuvo una diferencia menor entre los picos observados y simulados, en comparación con el

mapa de URH del año 2019 donde se obtuvo una diferencia más amplia, esto podría deberse a que en el mapa del año 2014 se tiene mayor área boscosa que en el mapa del año 2019.

Por lo que se puede concluir que los caudales máximos tienden a aumentar con el tiempo considerando la deforestación, con relación a los caudales sin deforestación. y para los caudales mínimos la tendencia es de disminuir para la misma formulación. (Tucci, 2002).

Los resultados permitieron demostrar el aumento del caudal medio de la cuenca del río Paraguay, debido a los cambios del uso del suelo que ocurrieron en el área estudiada. El mismo incremento fue observado con los datos validados del puerto de Asunción, lo que confirma la veracidad de los resultados. El desafío es identificar las medidas de adaptación apropiadas y oportunas para un ambiente cambiante.

### Sugerencias

Fortalecer la investigación y la creación de sistemas de alerta temprana para respaldar la cooperación con miras a progresar en los estudios de vulnerabilidad, en las acciones de adaptación al cambio climático, y en la promoción de enfoques innovadores para la educación y el fortalecimiento de capacidades

Se plantea migrar del cultivo tradicional a la agrosilvicultura, que ayudaría a reforestar gran parte de la zona ganadera y en menor escala la zona agrícola, generando un impacto positivo en el clima.

Implementar el Plan de Ordenamiento Urbano Territorial a nivel país, para delimitar las áreas urbanas y así evitar la deforestación para realizar asentamientos urbanos en zonas no aptas.

## AGRADECIMIENTO

Este trabajo forma parte del Programa de Maestría en Gestión de Riesgo de Desastre y Adaptación al Cambio Climático, financiado por el Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) y el Fondo para la Excelencia de la Educación y la Investigación (FEEI).

**Fuente de Financiamiento.** sin financiamiento externo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ávila Schmalko, C. & Monroy Sarta, A. (2018). Mapeando el agronegocio en Paraguay. Asunción. Base Investigaciones Sociales. p. 39-41.
- Bosch, J. M. & Hewlett J. D. (1982). A review of catchment experiment to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55, 3-23.
- Collischonn, W. & Tucci, C. E. M. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6(1), 95-118.
- Collischonn, W., Buarque, D. C., Paiva, R. C. D., Fan, F. M. & Kayser, R. H. B. (2020). *Manual de Aplicación del Modelo MGB Utilizando la Herramienta IPH-Hydro Tools y la Plataforma QGIS*.
- FAO (Food and Agriculture Organization) (2020). Evaluaciones de los Recursos Forestales Mundiales (FRA)-INFORME Paraguay. Disponible en: <https://www.fao.org/3/cb0111es/cb0111es.pdf>
- Instituto Forestal Nacional (2017). Mapas de Cobertura Forestal de los años 2000-2005-2011-2013-2015-2017. INFONA
- Medeiros, M. S., Fleischmann, A. S., Oliveira, A. M., Corati, B. K., Fan, F. M., Martinbiancho, G. K., ... & Collischonn, W. (2020). Manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools. Universidade do Porto A Acesso em, 19. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Missio Bayer, D. (2014). Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala. (Tesis de Doctorado). IPH-UFRG, 172 p.
- Monte Domecq, R. (2019). Reflexiones sobre el impacto de las inundaciones del río Paraguay en los bañados de Asunción. Confederación de Religiosos del Paraguay.
- Pizarro, R., Ramírez, C. & Flores, J. P. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *Bosque (Valdivia)*, 24(3), 31-38.
- Tucci, C. E. M. (2002). Hidrologia: ciência e aplicação, chapter Escoamento em rios e reservatórios. 2º ed. Editora da U. pp. 443-483.