



## Advances in Water in Agrosience

# Application of the Flood Guidance Model (FG) in the Yi River basin in Uruguay

Aplicación del modelo Guía de Crecidas en la cuenca del río Yi, Uruguay

Aplicação do modelo de Orientação para Inundações na bacia do rio Yi no Uruguai

Hastings, F. <sup>1</sup>; Chreties, C. <sup>2</sup>; Narbono, S. <sup>2</sup>; Uriburu, M. <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Montevideo, Uruguay

<sup>2</sup>Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay

<sup>3</sup>Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Buenos Aires, Argentina

### Editor

Pablo Gamazo   
Universidad de la República,  
Salto, Uruguay

Received 04 May 2023

Accepted 23 Set 2023

Published 06 Feb 2024

### Correspondence

Florencia Hastings  
ing.fhastings@gmail.com

## Abstract

This study focuses on the application/adaptation of the Flash Flood Guidance (FFG) model developed by the National Weather Service (NWS). The FFG is defined as the total amount of rainfall of a given duration sufficient to cause bankfull flow at the outlet of the watershed. Since flash floods do not occur in Uruguay due to the slower hydrologic response of the watershed, an adaptation of the above model is evaluated and renamed Flood Guidance (FG). Nine storm events that occurred between 2014 and 2020 in the Yi River basin in Uruguay were analyzed. The Natural Resources Conservation Service (NRCS) Curve Number model, a simple and widely used model, is used to determine effective precipitation. Two alternatives are considered to determine the antecedent soil moisture: the use of an antecedent precipitation index (API), and the use of SMOS satellite imagery. The FG is then calculated and compared to the precipitation forecast to determine if there is a risk of flooding at the watershed outlet. The results are compared to observations to evaluate the quality of the warning forecast. The application for forecasting flooded rural and agricultural areas using Sentinel-2 satellite imagery and the NDWI index is considered and analyzed.

**Keywords:** flood warnings, satellite imagery, antecedent precipitation index, rural flooding

## Resumen

Este estudio se centra en la aplicación/adaptación del modelo Flash Flood Guidance (FFG), desarrollado por la National Weather Service (NWS). El FFG se define como la precipitación total, con una determinada duración, requerida para alcanzar el nivel de bancas en la salida de la cuenca. Dado que en Uruguay no se presentan crecidas repentinas por la respuesta hidrológica más lenta de las cuencas, se evalúa una adaptación del mencionado modelo y se renombra como Flood Guidance (FG). Se analizaron nueve eventos de tormenta sucedidos en la cuenca del río Yi (Uruguay) entre los años 2014 y 2020. Se utiliza el modelo de la Curva Número del Natural Resources Conservation Service (NRCS) para determinar la precipitación efectiva, un modelo simple y ampliamente utilizado. Se consideran dos alternativas para determinar la humedad antecedente del suelo: mediante el uso de un Índice de Precipitación Antecedente (API) y mediante imágenes satelitales SMOS. Se calcula el FG y se compara con el pronóstico de precipitación para determinar si hay riesgo de inundación a la salida de la cuenca. Se contrastan los resultados obtenidos con las observaciones para



evaluar la calidad del pronóstico de alerta. Se plantea y analiza su aplicación para la predicción de áreas rurales y agrícolas anegadas a partir de imágenes satelitales Sentinel 2 y el índice NDWI.

**Palabras clave:** alertas crecidas, imágenes satelitales, índice de precipitación antecedente, inundaciones rurales

## Resumo

Este estudio foca na aplicação/adaptação do modelo de *Flash Flood Guidance* (FFG), desenvolvido pelo *National Weather Service* (NWS). O FFG é definido como a quantidade total de chuva de uma dada duração suficiente para causar o escoamento máximo no ponto de saída da bacia hidrográfica. Como inundações repentinas não ocorrem no Uruguai devido à resposta hidrológica mais lenta da bacia hidrográfica, uma adaptação do modelo acima é avaliada e renomeada como *Flood Guidance* (FG). Nove eventos de tempestade que ocorreram entre 2014 e 2020 na bacia do rio Yí no Uruguai foram analisados. O modelo de Número de Curva do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), um modelo simples e amplamente utilizado, é utilizado para determinar a precipitação efetiva. Duas alternativas são consideradas para determinar a umidade do solo antecedente: o uso de um índice de precipitação antecedente (API) e o uso de imagens de satélite SMOS. O FG é então calculado e comparado com a previsão de precipitação para determinar se há risco de inundação no ponto de saída da bacia hidrográfica. Os resultados são comparados com observações para avaliar a qualidade da previsão de alerta. A aplicação para previsão de áreas rurais e agrícolas inundadas usando imagens de satélite Sentinel-2 e o índice NDWI é considerada e analisada.

**Palavras-chave:** avisos de inundação, imagens de satélite, índice de precipitação antecedente, inundações rurais

## 1. Introducción

A nivel mundial las crecidas se destacan como uno de los desastres naturales más devastadores. En este contexto, la existencia de sistemas de predicción de crecidas adquiere una relevancia crítica, ya que permite la anticipación de eventos y la adopción de medidas preventivas para minimizar los impactos socioeconómicos<sup>(1)</sup>. En Uruguay las crecidas son recurrentes y afectan tanto a la población como al sector agropecuario. Como ejemplo, el costo de las crecidas del año 2007 se estimó en aproximadamente 3% del Producto Bruto Interno (PBI), ascendiendo a 17 y 4 millones de dólares para las zonas urbana y rural, respectivamente<sup>(2)</sup>.

El sistema Guía de Crecidas Repentinas (FFG) es un modelo que pronostica el umbral de precipitación a partir del cual se supera el nivel de bancas en la sección de salida de una cuenca específica. Dicho umbral se define para distintas duraciones de precipitación, como 1 hora o 6 horas. Este modelo fue desarrollado por el *National Weather Service* (NWS) de Estados Unidos, y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) lo está implementando a nivel operativo en más de 60 países en colaboración con la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), el *Hydrologic Research Center* (HRC) y la *US Agency for International Development* (USAID)<sup>(1)</sup>. Sin embargo, en zonas de llanura donde las crecidas son de naturaleza no repentina debido a las características topográficas, de suelo y

clima, surge el interés por analizar una metodología análoga a la FFG, pero utilizando duraciones de precipitación de 24 o 48 h.

En este estudio se analizaron nueve eventos de tormenta ocurridos en la cuenca del río Yí entre los años 2014 y 2020. Si bien existen investigaciones sistemáticas sobre las inundaciones en la ciudad de Durazno relacionadas con las crecidas del río Yí desde el año 2002<sup>(3)</sup>, aún no se ha abordado la predicción de las superficies rurales anegadas. Disponer de pronósticos sobre la extensión espacial de la inundación en zonas rurales permitiría una gestión más eficiente de la movilización del ganado hacia áreas de menor riesgo y brindaría mayor seguridad a los trabajadores rurales, al tiempo que se reducirían las pérdidas económicas.

## 2. Materiales y métodos

En este estudio se empleó un modelo simple y ampliamente utilizado a nivel internacional, el modelo de la Curva Número del *Natural Resources Conservation Service* (NRCS)<sup>(4)</sup>, para calcular las abstracciones y determinar la precipitación efectiva a partir de la precipitación registrada en la cuenca. Se exploraron dos enfoques para determinar la condición antecedente de humedad del suelo: el Índice de Precipitación Antecedente (API) y estimaciones remotas de humedad del suelo basadas en imágenes satelitales SMOS. Luego, se determinó el índice FG (*Flood Guidance*), que



es una adaptación del índice FFG, y se realizó un diagnóstico de alerta o no alerta. Finalmente, se contrastaron los resultados obtenidos con las observaciones reales para evaluar la calidad del pronóstico.

## 2.1 Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Yi, ubicada en los departamentos de Durazno y Florida, Uruguay (Figura 1). El punto de cierre de la cuenca considerado se encuentra en el puente de la ruta N.º 5, aguas arriba de la ciudad de Durazno, en las coordenadas longitud = -56,511 y latitud = -33,373. Esta cuenca tiene una extensión de 8863 km<sup>2</sup> y una pendiente media de 4,2%. El tiempo de concentración de la cuenca es de 54 horas, estimado según la formulación de Kirpich, que representa el tiempo de concentración promedio de los eventos considerados<sup>(3)(5)</sup>.



Figura 1. Localización de la cuenca del río Yi

Se utilizaron los datos de precipitación diaria de tres pluviómetros ubicados dentro de la cuenca (E. M. Durazno, Sarandí del Yi y Polanco del Yi) (Figura 1), en el período 2014-2020. Estos pluviómetros pertenecen a la red de la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE) y los datos están disponibles públicamente. Para cada día, se realizó una interpolación de la precipitación en toda la cuenca utilizando el método del inverso de la distancia al cuadrado<sup>(6)</sup>, con un exponente de potencia igual a 2. Por otra parte, los niveles y caudales del río Yi se obtuvieron a partir de los datos la Estación Hidrométrica Durazno perteneciente a la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), en el período 2014-2020 (Figura 1).

Los datos sobre los suelos se obtuvieron de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a una escala de 1:1.000.000<sup>(7)</sup>. Para cada unidad de suelo los datos fisicoquímicos se extrajeron de las calicatas representativas y se utilizó el modelo *Soil, Plant, Atmosphere, and Water* (SPAW) del US Department of Agriculture (USDA)<sup>(8)</sup> para determinar los contenidos de agua en la saturación,

a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente. Además, se consideró la clasificación de los suelos en grupos hidrológicos (GH) realizada por Durán<sup>(9)</sup>. En la Figura 2 se muestra la distribución de estos grupos hidrológicos, donde el GH D abarca la mayor parte de la cuenca (53%), seguido por los grupos C (33%) y B (14%).

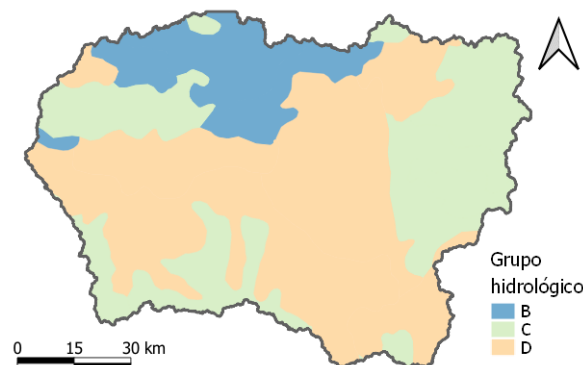


Figura 2. Grupos hidrológicos según la carta de suelos escala 1: 1.000.000

Para representar el uso del suelo se empleó un mapa de uso de suelo simplificado basado en el *Mapa integrado de cobertura/uso del suelo del Uruguay año 2018*<sup>(10)</sup>. Este mapa identifica tres clases predominantes de cobertura: pastizales, bosques y cultivos (Figura 3). La categoría pastizales agrupa las subcategorías de pastizal natural, pastizal regenerado y bañados. La categoría bosques agrupa las subcategorías de bosque nativo, bosque plantado y bosque plantado nuevo, cosecha, rebrote. Finalmente, la categoría cultivos agrupa las subcategorías de cultivo extensivo de secano, cultivo extensivo en predios lecheros, rastrojo de cultivo de secano, cultivo extensivo con riego por pivote, mezcla de cultivos, pasturas y rastrojos y olivares. Estas tres categorías representan 77%, 9% y 13% del área total de estudio. El restante 1% del área corresponde a otras categorías minoritarias que excluyeron del análisis (zonas urbanas y urbanizadas; canteras, areneras, minas a cielo abierto; playas, dunas y médanos fijos y semifijos; cuerpos de agua artificiales; represas para riego; cuerpos de agua naturales). Para la reclasificación de esta área en las tres categorías seleccionadas se utilizó GRASS GIS (v7.4.2), asignando a cada píxel el valor modal de los píxeles vecinos (r.neighbours).

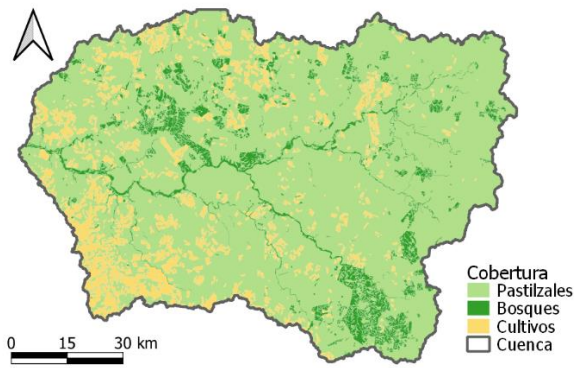


Figura 3. Mapa de cobertura del suelo simplificado

## 2.2 Guía de Crecidas (Flood Guidance, FG)

La Guía de Crecidas (FG) se define como la cantidad de precipitación acumulada ( $P$ ) en un intervalo de duración  $t$  necesaria para que se alcance en la salida un caudal a nivel de bancas. Se aplica a la salida de una cuenca determinada, que tiene un cierto contenido de humedad de suelo (SMC). Contrasta el resultado de FG con el pronóstico de precipitación (24 o 48 h) para determinar si hay una alerta o no (resultado binario: sí o no). Es importante señalar que este modelo no pronostica la magnitud de la crecida.

El parámetro fundamental de FG es el umbral de escorrentía (Threshold Runoff, ThR). Se define como la cantidad de precipitación efectiva acumulada (mm) en un intervalo de duración  $t$  sobre una cuenca, necesaria para que se alcance en la sección de salida un caudal a nivel de bancas ( $Q_b$ ). Se calcula mediante la Ec.1:

$$\text{Ec. 1 } ThR(t) = \max \left\{ 0, \frac{Q_b - Q(t)}{hp} \right\}$$

Donde  $hp$  ( $m^3/s/mm$ ) es la ordenada pico del hidrograma unitario asociado a la duración  $t$ . En este caso, se utilizó el hidrograma triangular sintético del Soil Conservation Service (ahora NRCS).

El método de la Curva Número (NRCS) es un modelo simple para estimar la precipitación efectiva a partir de la precipitación total. Fue desarrollado en la década de 1950 y todavía se utiliza ampliamente en la actualidad<sup>(4)</sup>. Diversos estudios han abordado críticas al método y han explorado alternativas y mejoras en su aplicación en diversas condiciones y regiones<sup>(11-14)</sup>; sin embargo, el método se distingue por su simplicidad y robustez, ya que requiere poca información, que se encuentra tabulada y estandarizada.

La precipitación efectiva ( $Pe$ ) se determina a partir de la precipitación total ( $P$ ) y un índice de almacenamiento ( $S$ ), que representa la retención potencial

máxima de la cuenca. La relación entre  $Pe$  y  $P$  se expresa mediante la ecuación hiperbólica (Ec. 2):

$$\text{Ec. 2 } Pe = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda) S} \text{ si } P \geq \lambda S, \text{ si no } Pe = 0$$

Donde:  $\lambda S$  representa la retención en el suelo al comienzo del escurrimiento y  $\lambda$  es un parámetro que varía según las características específicas de la cuenca y las condiciones de la tormenta. Aunque el valor tradicional de  $\lambda$  es de 0,2, se han propuesto diferentes valores en revisiones del método, dentro de un rango de 0 a 1<sup>(11)</sup>. Por ejemplo, Woodward *et al.* sugieren un valor de  $\lambda = 0,05$ , aunque concluyen que las diferencias más notables en los resultados de la precipitación efectiva se observan en cuencas con valores bajos de CN o cuando la precipitación tiene un período de retorno bajo<sup>(12)</sup>. En este trabajo se adopta un valor de  $\lambda = 0,2$ , en concordancia con las condiciones locales y las recomendaciones de otros estudios aplicados en Uruguay<sup>(15)</sup>.

Por lo tanto, para una precipitación efectiva  $Pe = ThR$ , resulta  $P = FG$ , por lo que, resolviendo la ecuación anterior, se obtiene (Ec. 3):

Ec. 3

$$FG = \frac{(ThR + 0.4 S) + \sqrt{(ThR + 0.4 S)^2 - 4(0.04 S^2 - 0.8 S ThR)}}{2}$$

El índice de almacenamiento  $S$  es una medida del potencial de respuesta hidrológica de la cuenca y se calcula con la Curva Número (CN) según Ec.4:

$$\text{Ec. 4 } S[mm] = 25400/CN - 254$$

El valor de la CN, desde el punto de vista conceptual, varía según la intensidad, la duración y el total acumulado de la precipitación, las condiciones de humedad, el estado de crecimiento de la cobertura, y la temperatura, que en conjunto se denominan condición antecedente de escorrentía (Antecedent Runoff Condition, ARC). ARC se divide en tres estados: II para condiciones promedio, I para condiciones secas y III para condiciones húmedas. Varias ecuaciones han sido propuestas para determinar los valores de la CN para las condiciones de humedad I y III ( $CN_I$  y  $CN_{III}$ ). A continuación, se presentan dos formulaciones consideradas en este estudio:

Chow y otros<sup>(16)</sup>

$$\text{Ec. 5 } CN_I = (4.2 CN_{II}) / (10 - 0.058 CN_{II})$$

$$\text{Ec. 6 } CN_{III} = (23 CN_{II}) / (10 + 0.13 CN_{II})$$



Arnold y otros<sup>(17)</sup>

Ec. 7

$$CN_I = CN_{II} - \frac{20(100 - CN_{II})}{100 - CN_{II} + \exp[2,53 - 0,0636(100 - CN_{II})]}$$

Ec. 8  $CN_{III} = CN_{II} \exp[0,00673(100 - CN_{II})]$

El parámetro CN está tabulado para ARC II, según el uso del suelo y la condición hidrológica. En la Tabla 1 se muestran los valores de CN utilizados.

Tabla 1. Curva Número ARC II (condición hidrológica buena)

| Clase      | Tratamiento o método | Grupo hidrológico |    |    |
|------------|----------------------|-------------------|----|----|
|            |                      | B                 | C  | D  |
| Pastizales | ---                  | 61                | 74 | 80 |
| Árboles    | ---                  | 55                | 70 | 77 |
| Cultivo    | hileras rectas       | 78                | 85 | 89 |

Las condiciones antecedentes ARC se caracterizan únicamente por la humedad del suelo. Se evaluaron tres alternativas para determinar la humedad del suelo:

(1) Índice de precipitación antecedente (API), calculado como:

Ec. 9  $API(t) = API(t-1) \gamma + P(t)$

Donde: API(t-1) es la condición inicial,  $\gamma$  es una constante ajustada, y P(t) es la precipitación acumulada entre t-1 y t.

Se propone determinar la humedad del suelo a partir de API como:

Ec. 10

$$SMC(t) = PMP + (SAT - PMP) \ln \left[ \frac{API_t}{phi} - shift \right]$$

Donde: PMP (mm) es el contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente, SAT (mm) es el contenido de agua en el suelo en saturación, shift (--) y phi (mm) son constantes que fueron ajustadas.

(2) Producto satelital de humedad del suelo: Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) y operativo desde 2009. Este producto estima la humedad del suelo (en una capa superficial de aproximadamente 5 cm de espesor), con una resolución espacial aproximada de 2,2 km y un tiempo de revisita de 3 días en el Ecuador.

La humedad del suelo se determina como:

Ec. 11  $Si \ SMOS < 1 \rightarrow SMC(SMOS) = SMOS \times SAT$

Ec. 12  $Si \ SMOS > 1 \rightarrow SMC(SMOS) = SAT$

(3) Una combinación de los dos métodos anteriores, SMOS-API, se calcula el Índice API a partir de la humedad de suelo SMOS cuando se dispone de imagen satelital y, en caso contrario, el índice API se calcula considerando el API(t-1) y P(t).

Si se cuenta con un producto SMOS en el tiempo t se calcula el API a partir de Ec. 10:

Ec. 13  $API2(t) = \left( \exp \left( \frac{SMOS - PMP}{SAT - PMP} \right) + shift \right) phi$

Si no se cuenta con un producto SMOS en el tiempo t:

Ec. 14  $API2(t) = API2(t-1) \times \gamma + P(t)$

Para utilizar el modelo de CN en simulaciones hidrológicas continuas, el valor del parámetro CN puede ser continuo entre ARC I y III o discreto (I, II y III). Se consideraron dos métodos continuos para calcular el índice de almacenamiento S(t) (y CN(t)) para aplicar a las dos formulaciones presentadas antes, respectivamente.

Considerando el Índice de Precipitación Antecedente (API):

Ec. 15  $Aux = \ln \left[ \frac{API(t)}{phi} - shift \right],$   
 $0 \leq Aux \leq 1$

Ec. 16  $CN_t = CN(API(t)) = CN_I + [CN_{III} - CN_I] \cdot [Aux]$

Formulación propuesta por Arnold y otros<sup>(17)</sup>:

Ec. 17

$$S(t) = S_{max} \left( 1 - \frac{SW(t)}{SW(t) + \exp(w_1 - w_2 SW(t))} \right)$$

Donde: S es el índice de almacenamiento (mm); Smax es el índice de almacenamiento máximo (valor de S cuando CN=CN<sub>I</sub>); SW es el contenido de humedad del suelo restando la humedad del punto de marchitez permanente (mm), w<sub>1</sub> y w<sub>2</sub> son coeficientes de forma determinados por:

Ec. 18  $w_1 = \ln \left[ \frac{CC}{1 - S_3 \times S_{max}^{-1}} - CC \right] + w_2 \times CC$

Ec. 19

$$w_1 = \frac{\ln \left[ \frac{CC}{1 - S_3 \times S_{max}^{-1}} - CC \right] - \ln \left[ \frac{SAT}{1 - 2.54 \times S_{max}^{-1}} - S \right]}{SAT - CC}$$

Donde: CC es la humedad del suelo a capacidad de campo (mm);  $S_3$  es el índice de almacenamiento cuando  $CN = CN_{III}$ ; SAT es el contenido de humedad en el suelo cuando está saturado (mm); 2,54 es el índice de almacenamiento cuando  $CN = 99$  (suelo saturado).

En resumen, se consideraron cuatro opciones para calcular el FG según la humedad antecedente y la formulación de  $CN(t)$ . Las opciones analizadas se nombran con las letras A-D y se resumen en la Tabla 2. Los parámetros del modelo ( $\gamma$ , shift, phi y API ( $t=0$ )) fueron ajustados de forma manual con el objetivo de maximizar los índices de acierto y minimizar los índices de falla (ver Sección 2.4).

Tabla 2. Opciones de cálculo de FG

| Op. | Humedad antecedente | Calculo $CN_I$ y $CN_{II}$     | Calculo $CN(t)$                |
|-----|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| A   | API                 | Chow y otros <sup>(16)</sup>   | Logaritmo                      |
| B   | SMOS                | Arnold y otros <sup>(17)</sup> | Arnold y otros <sup>(17)</sup> |
| C   | SMOS- API           | Arnold y otros <sup>(17)</sup> | Arnold y otros <sup>(17)</sup> |
| D   | SMOS- API           | Chow y otros <sup>(16)</sup>   | Logaritmo                      |

### 2.3 Eventos de tormenta

Se consideraron nueve eventos de tormenta previamente identificados en el trabajo de tesis *Incorporación de información satelital de humedad del suelo en modelos hidrológicos para pronóstico de inundaciones en cuencas del Uruguay*<sup>(18)</sup>. De estos eventos, en cuatro casos se superó el nivel de alerta en el río Yi (9,63 m), en la ciudad de Durazno. En la Tabla 3 se presentan las fechas de inicio y la duración en días considerados para cada evento, junto con el nivel máximo alcanzado por el río Yi en la ciudad de Durazno. Se resaltan en rojo los niveles que excedieron el nivel de alerta. Además, en la Tabla 9 (Material complementario) se presentan las características principales de cada evento: fecha de ocurrencia, precipitación total del evento, precipitación máxima diaria, nivel máximo alcanzado por el río Yi en la ciudad de Durazno, cantidad de evacuados y período de retorno del evento.

Tabla 3. Eventos de tormenta considerados y cantidad de imágenes SMOS disponibles por evento

| ID | Fecha inicio | Duración (días) | Nivel máx. (m) | Cant. SMOS |   |
|----|--------------|-----------------|----------------|------------|---|
| 1  | 2014_11      | 11/1/2014       | 6              | 8,36       | 2 |
| 2  | 2014_12      | 11/22/2014      | 13             | 8,73       | 3 |
| 3  | 2016_12      | 12/22/2016      | 7              | 6,46       | 4 |
| 4  | 2017_09      | 8/19/2017       | 28             | 9,79       | 5 |
| 5  | 2018_12      | 12/9/2018       | 13             | 8,16       | 4 |
| 6  | 2019_01      | 12/29/2018      | 21             | 10,98      | 7 |
| 7  | 2019_06      | 6/10/2019       | 11             | 12,69      | 5 |
| 8  | 2019_10      | 10/1/2019       | 18             | 9,90       | 9 |
| 9  | 2020_06      | 6/18/2020       | 12             | 9,26       | 4 |

### 2.4 Verificación de las alertas

La verificación de la ocurrencia de alertas es fundamental para evaluar la capacidad del método en la predicción de crecidas<sup>(19)</sup>. En este estudio se compararon los registros históricos de alerta (o su ausencia) con las alertas generadas (o no) por el modelo FG. Para los eventos analizados se consideraron todos los días desde el inicio al final de cada evento. Se siguió el método propuesto para verificar los productos de FFG<sup>(19)</sup>.

- (1) Crear una tabla de contingencia para cada duración de tormenta (Tabla 4).

Tabla 4. Tabla de contingencia

| Pronóstico | Registro   |                        |
|------------|------------|------------------------|
|            | Qobs>Qb    | Qobs<Qb                |
| PcpPr.>FG  | H: acierto | FA: falsa alarma       |
| PcpPr.<FG  | M: omisión | CN: correcta no-alarma |

Donde: PcpPr es la precipitación pronosticada (mm); FG es el índice calculado (mm); Qobs es el caudal registrado ( $m^3/s$ ); y Qb es el caudal cuando el nivel del río es el nivel de bancas ( $m^3/s$ ).

- (2) Calcular los siguientes índices:

Probabilidad de detección (Probability of Detection, POD): fracción de ocurrencias simuladas correctamente en relación con el total de ocurrencias observadas.

Ec. 20  $POD = \#H / (\#H + \#M)$

Ratio de falsa alarma (False Alarm Ratio, FAR): fracción de ocurrencias simuladas incorrectamente



(es decir, no registradas) en relación con el total de ocurrencias simuladas.

$$\text{Ec. 21} \quad FAR = \#FA / (\#H + \#FA)$$

Probabilidad de falsa alarma (False detection o False Alarm Rate, F): fracción de ocurrencias simuladas incorrectamente en relación con el total de no-ocurrencias observadas.

$$\text{Ec. 22} \quad F = \#FA / (\#CN + \#FA)$$

Índice crítico de éxitos (Critical Success Index, CSI): describe la capacidad general del modelo en relación con las observaciones.

$$\text{Ec. 23} \quad CSI = \#H / (\#H + \#M + \#FA)$$

Los cuatro índices varían en un rango de 0 a 1, # representa la cantidad de aciertos u omisiones en cada caso. En el caso de POD y CSI, 0 es desfavorable y 1 el mejor resultado posible. Por otro lado, FAR y F tienen un comportamiento opuesto, donde 0 es el mejor resultado y 1 es desfavorable.

### 3. Resultados

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos en el estudio. Los cálculos se realizaron en forma espacialmente distribuida, utilizando QGIS y anaconda-python en el procesamiento de datos y R para el análisis de resultados.

#### 3.1 Preprocesamiento

Se calcularon el punto de marchitez permanente (PMP), la capacidad de campo (CC) y la saturación (SAT) para cada unidad de mapeo de suelos. Estos cálculos se realizaron utilizando el software SPAW<sup>(20)</sup> y los datos de textura y contenido de materia orgánica obtenidos de las calicatas representativas de cada unidad de suelo. A partir del mapa de suelos se generaron mapas para cada uno de estos parámetros.

Se construyó un mapa para la CN<sub>II</sub> (Figura 4) teniendo en cuenta el mapa de uso del suelo, el grupo hidrológico asociado a cada unidad según Duran<sup>(9)</sup> y los valores tabulados que fueron presentados en la Tabla 1. También se construyeron mapas para las CN<sub>I</sub> y CN<sub>III</sub> a partir de las formulaciones de Chow y otros<sup>(16)</sup> y Arnoldy otros<sup>(17)</sup>.

El pronóstico de precipitación acumulada en 24 y 48 horas se construyó a partir de la precipitación observada e interpolada en la cuenca. Finalmente, se generó un mapa de precipitación para cada día interpolando los datos de los pluviómetros.

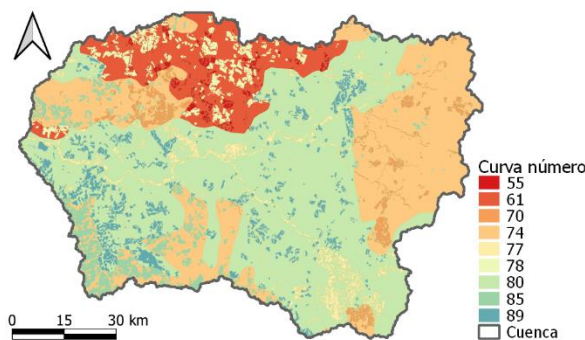


Figura 4. Mapa CN<sub>II</sub>

#### 3.2 Ajuste de parámetros

Se llevó a cabo un ajuste manual de los parámetros del modelo (Tabla 5) con el objetivo de maximizar los índices POD y CSI y minimizar F y FA. Los resultados del ajuste de parámetros se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros calibrados

| Parámetro | Unidad | Valor |
|-----------|--------|-------|
| Phi       | ---    | 50    |
| Shift     | ---    | 0,2   |
| $\gamma$  | mm     | 0,88  |
| API (t=0) | mm     | 90    |

#### 3.3 Alertas

Para cada día, se calcula la variable ThR teniendo en cuenta el caudal medio diario observado en Durazno, el caudal de bancas (1564 m<sup>3</sup>/s que corresponde a un nivel de 9,63 m) y el valor de la ordenada pico del hidrograma unitario triangular sintético (HUT) (41,5 para 24 horas y 32,7 m<sup>3</sup>/s/mm para 48 horas). Para el cálculo del pico del HUT se utilizó la formulación de USDA – NRCS<sup>(21)</sup> y se consideraron el área y el tiempo de concentración de la cuenca.

Se calcula el FG para cada día de acuerdo con las opciones presentadas en la Tabla 2 y se compara con el valor pronosticado de precipitación acumulada (Pcp.Pr.). Si el valor de la precipitación pronosticada es mayor que FG entonces se emite una alerta. Además, se considera una alerta cuando la diferencia entre FG y Pcp.Pr. es menor a 5 mm.

En el estudio se analizaron nueve eventos, en cuatro de los cuales se registraron alertas, mientras que en los cinco restantes no se registraron alertas. Un resultado destacado es que, para los cinco eventos sin registro de alerta, el modelo pronosticó correctamente que no habría alerta en

ninguno de los días, según las cuatro opciones de cálculo. En los otros cuatro eventos con alertas registradas, las tres opciones de cálculo continuas (A, C y D) emitieron alertas, aunque se observaron atemporalidades en el momento de emisión. En la sección de Material complementario se presentan detalles adicionales para cada evento, incluidos la precipitación y el nivel observado diario en Durazno, el cálculo de los parámetros CN y S, y el FG junto al pronóstico de precipitación para 24 y 48 horas. Además, en la Figura 2 se muestran para los cuatro eventos con alerta las alertas emitidas por cada opción de cálculo (puntos) en comparación con las alertas registradas (barras color rojo). Además, de la Figura 8 a la Figura 16 se presentan en forma detallada para cada evento la precipitación diaria, el nivel del río Yi, y para cada método de cálculo el valor de la curva número, el almacenamiento, el índice FG y la precipitación pronosticada en 24 o 48 horas.



Figura 5. Alertas registradas y pronosticadas para 24 y 48 horas

### 3.4 Verificación de las alertas

A partir de las simulaciones y los registros se calcularon los índices para verificar las alertas, cuyos resultados se presentan en la Tabla 6 y Tabla 7, para 24 y 48 horas, respectivamente. Se observa que la opción A, método de cálculo con API, tiene el mejor resultado global (CSI) y alcanza aproxi-

madamente 0,5 en ambos casos. En el caso del método B, que se basa en el producto SMOS, el cálculo de los índices implica un número menor de simulaciones y depende de la disponibilidad de imágenes. En los casos C y D, donde se “corrige” el método API por las imágenes SMOS, los índices no muestran mejores resultados que la opción A, aunque sí mejoran los de la opción B.

Además, se realizó una verificación de las alertas dividiendo el ThR en rangos (para los métodos continuos A, C y D). Se dividió el ThR en tres rangos y se calcularon los índices, los resultados se muestran en la Figura 3. Se observa que los mejores resultados (mayor CSI y POD, menor FAR y F) se obtienen en el rango intermedio de ThR, que corresponde a 13-26 mm y 16-32 mm de precipitación efectiva en cada caso.

Tabla 6. Índices verificación de las alertas, 24 horas

| Op, | POD  | FAR  | F    | CSI  |
|-----|------|------|------|------|
| A   | 0,57 | 0,27 | 0,03 | 0,47 |
| B   | 0,14 | 0,00 | 0,00 | 0,14 |
| C   | 0,21 | 0,57 | 0,04 | 0,17 |
| D   | 0,21 | 0,50 | 0,03 | 0,18 |

Tabla 7. Índices verificación de las alertas, 48 horas

| Op, | POD  | FAR  | F    | CSI  |
|-----|------|------|------|------|
| A   | 0,61 | 0,31 | 0,05 | 0,48 |
| B   | 0,13 | 0,50 | 0,03 | 0,11 |
| C   | 0,33 | 0,33 | 0,03 | 0,29 |
| D   | 0,33 | 0,33 | 0,03 | 0,29 |

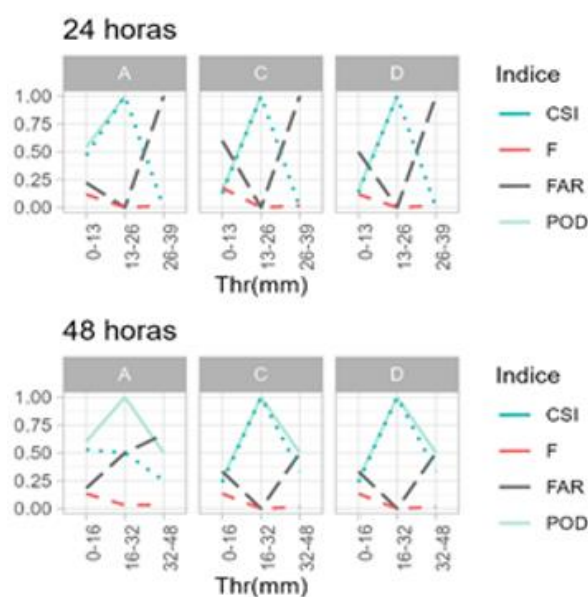


Figura 6. Índices verificación de alertas para 24 y 48 horas según rangos de ThR





## 4. Discusión

El método FG se utiliza para pronosticar la ocurrencia de crecidas basado en la precipitación acumulada necesaria para superar el nivel de bancas en la sección de salida de una cuenca. En este estudio, se destacan varios puntos de discusión:

(1) Temporalidad de las alertas: Se observa que las alertas modeladas pueden adelantarse o atrasarse en comparación con las alertas registradas durante eventos de crecida. Según los datos observados en el registro de las crecidas 2017\_09, 2019\_01 y 2019\_06 las alertas registradas ocurrieron durante el horario matutino (10 am, 6 am y 2 am, respectivamente), para estas crecidas las alertas modeladas en general se adelantan un día. Por otro lado, la alerta para la crecida 2019\_10 se registra en el horario de la noche (8 pm) y las alertas que fueron pronosticadas se atrasan uno y dos días. Esto sugiere que actualizar el ThR con un paso horario (en lugar de utilizar el valor promedio diario) y recalculer el FG podría mejorar la precisión en el inicio de las crecidas.

(2) Fuentes de incertidumbre: El método del HUT utilizado es una simplificación que puede afectar en los tiempos de tránsito y la llegada del pico de la creciente. Considerar otro método de cálculo podría contribuir a mejorar la precisión en la estimación de los tiempos. Por otra parte, la representación de la distribución espacial de la precipitación puede introducir incertidumbre en los resultados. Al tratarse de eventos extremos, la cantidad de estaciones pluviométricas en relación con la superficie de la cuenca puede influir en la precisión de la estimación de la precipitación, incluso para un modelo agregado sencillo como el que se implementó. Más allá de las incertidumbres temporales mostradas para algunos eventos, se entiende que la implementación de FG permite reproducir de manera adecuada la existencia o no de un nivel de alerta en el punto de cierre de la cuenca.

(3) Superficie anegada y nivel de alerta en zonas rurales: Si bien el análisis se realizó considerando el cierre de cuenca en la ciudad de Durazno (a efectos de evaluar FG implementado), la propuesta de utilizar el FG para determinar el nivel de alerta para zonas rurales aguas arriba de Durazno parece ser una aproximación interesante. Al asociar el nivel del río Yi en Durazno con la superficie anegada aguas arriba, se puede establecer un nuevo “caudal de bancas” en Durazno que refleje el nivel de alerta para las zonas rurales asociadas a la planicie de inundación del río Yi. Una aplica-

ción alternativa, independiente del caudal de bancas del cierre de cuenca (rural) que se quiera, sería utilizar el FG para Durazno determinando cuál es el nivel en Durazno de alerta (bancas), pero ya no de la población urbana, sino de la zona rural aguas arriba. Para ello, una alternativa es asociar el nivel del río Yi en Durazno a superficie anegada aguas arriba, y determinar la superficie anegada “crítica” o “límite” o de “alerta” para la zona rural. El nivel del río Yi en Durazno asociado a esa superficie de “alerta” rural sería el nuevo “caudal de bancas” en Durazno, y sobre esta base se podría directamente aplicar FG. El uso de imágenes satelitales Sentinel 2 y el índice NDWI para determinar la superficie anegada en función de diferentes niveles del río Yi en la ciudad de Durazno es una estrategia innovadora. Esto permite relacionar directamente los niveles del río con la superficie inundada y definir un umbral de alerta basado en datos observados. Se buscaron imágenes (con nubosidad menor al 10%) para los eventos estudiados, en fechas donde se supere o iguale el nivel promedio del río (3,16 m, en el período 2014-2020). Fueron recuperadas 5 imágenes (Figura 4); las imágenes satelitales son tomadas aproximadamente a las 14 h y según la fecha y la hora se asociaron al nivel observado en la ciudad de Durazno. En la Tabla 8 se presentan para las 5 imágenes el nivel observado en Durazno, la superficie de agua determinada por el NDWI para un tramo del río Yi con longitud de 105 km y la fecha. Definiendo una superficie “crítica” para la zona rural, con base en la relación H-Q en Durazno, es posible obtener el “caudal de bancas asociado a la zona rural”. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta implementación asume que la superficie anegada queda definida por el nivel en Durazno. Aunque el flujo en el río Yi generalmente es subcrítico, crecidas de diferente tipo podrían comportarse de manera diferente.

En resumen, el método FG implementado parece ser capaz de predecir la ocurrencia de niveles de alerta en la cuenca del río Yi en función de la precipitación acumulada. Aunque existen algunas incertidumbres y desafíos en la implementación, este enfoque ofrece la posibilidad de pronosticar crecidas y niveles de alerta en áreas rurales aguas arriba de Durazno, pero el método requiere una validación y un ajuste cuidadosos para garantizar su precisión y confiabilidad en la gestión de inundaciones.



Figura 7. Superficie anegada determinada a partir de imágenes Sentinel 2 y el índice NDWI

Tabla 8. Nivel en Durazno, superficie de agua y fecha

| Nivel | Sup. agua (ha) | Fecha      |
|-------|----------------|------------|
| 3,03  | 417            | 2/5/2019   |
| 4,74  | 731            | 10/23/2019 |
| 7,27  | 1186           | 9/18/2017  |
| 9,74  | 2862           | 10/18/2019 |
| 12,69 | 13189          | 6/20/2019  |

## 5. Conclusiones

Se implementó la Guía de Crecidas (FG) en una cuenca con inundaciones lentas (no instantáneas) y se evaluaron varias alternativas para estimar la humedad del suelo. Los resultados muestran que FG es capaz de determinar si un evento superará el umbral de precipitación para generar una alerta, aunque con algún desfase en la temporalidad. Además, la herramienta mostró ser sensible a las opciones de cálculo de la humedad del suelo. La opción de cálculo con el índice API (opción A) mostró los mejores resultados. La habilidad en la predicción de alerta de FG se evaluó en la ciudad de Durazno, aprovechando la información observada y los niveles de alerta y emergencia urbanos disponibles. La herramienta resultó útil y simple de aplicar, requiriendo poca información y ofreciendo información valiosa para la gestión de crecidas. Sin embargo, se identificó la necesidad de mejorar la temporalidad de la predicción, que podría lograrse mediante una reducción del paso temporal de análisis y una mejor representación espacial de la precipitación en la cuenca.

Además, se propone una aplicación de FG a zonas rurales, como las que se encuentran aguas arriba de la ciudad de Durazno. Para ello se proponen dos alternativas: i) obtener el caudal de bancas en el lugar de interés (muchas veces no se conoce y está asociado a características muy locales del sitio); ii) determinar un nuevo caudal de bancas en Durazno que responda a la anegación de la superficie rural límite/crítica/de alerta. El

siguiente paso en esta línea de investigación sería evaluar cuantitativamente la habilidad y calibrar los parámetros de estas alternativas de aplicación FG en la zona rural mencionada.

En resumen, este estudio ha sentado las bases para la implementación de FG como una herramienta de alerta temprana en la gestión de crecidas en la cuenca del río Yi, con el potencial de extender su aplicación a zonas rurales aguas arriba de Durazno. La mejora en la temporalidad de las predicciones y la validación de estas aplicaciones son áreas importantes para futuras investigaciones.

## Agradecimientos

Parte de los resultados presentados en este artículo fueron generados en el marco del proyecto de investigación FMV-ANII136852 y con el respaldo de una beca de posgrado otorgada por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) en favor de Santiago Narbono. Asimismo, queremos expresar nuestro agradecimiento a la beca de maestría POS\_NAC\_2020\_1\_164287, concedida a Florencia Hastings, que facilitó en forma parcial la realización de este trabajo.

## Declaración de transparencia de datos

Disponibilidad de datos: El conjunto completo de datos que respalda los resultados de este estudio fue publicado en el propio artículo.

## Declaración de contribución de los autores

Diseño conceptual: F.H., M.U. y C.C. Recopilación y análisis de información requerida: S.N. Implementación metodológica y obtención de resultados: F.H. Análisis de resultados: F.H. y C.C. Discusión y conclusiones: F.H., M.U. y C.C. Redacción del artículo: F.H. Revisión del artículo: C.C., S.N. y M.U.

## References

1. World Meteorological Organization. Manual on flood forecasting and warning [Internet]. Geneva: WMO; 2011 [citado 2023 Set 1]. 142p. Disponible en: <https://library.wmo.int/idurl/4/35881>



2. Barrenechea P, Saráchaga D. Evaluación económica de costos de las inundaciones en Durazno, Soriano y Treinta y Tres [Internet]. Montevideo: Sistema Nacional de Emergencias; 2008 [citado 2024 Feb 3]. 10p. Disponible en: [http://www.preventionweb.net/files/15250\\_5costosinundacionespedrobarrenechea.ppt](http://www.preventionweb.net/files/15250_5costosinundacionespedrobarrenechea.ppt)
3. Silveira L, Chreties C, Crisci M, Usera G, Alonso J. Sistema de alerta temprana para previsión de avenidas en la ciudad de Durazno. INNOTECH. 2015;(10):56-63. Doi: 10.26461/10.05.
4. Hawkins RH, Ward TJ, Woodward DE, Van Mullem JA, editores. Curve Number Hydrology: State of the practice. Reston: ASCE; 2009. 115p.
5. Silveira L, López G, Chreties C, Crisci M. Steps towards an early warning model for flood forecasting in Durazno city in Uruguay. J Flood Risk Manag. 2012;5(3):270-80.
6. Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. En: Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference. New York: ACM Press; 1968. p. 517-24.
7. Durán A. Los suelos del Uruguay. 2a ed. Montevideo: Hemisferio Sur; 1991. 398p.
8. Saxton KE, Willey PH, Rawls WJ. Field and pond hydrologic analyses with the SPAW model. Contribución presentada en 2006 ASABE Annual Meeting; 9 - 12 July 2006; Portland, Oregon, US. Doi: 10.13031/2013.20709.
9. Durán A. Clasificación hidrológica de los suelos del Uruguay. Agrociencia. 1997;1(1):15-29. Doi: 10.31285/AGRO.01.1009.
10. Petraglia C, Dell'Acqua M, Pereira G, Yussim E. Mapa integrado de cobertura / uso del suelo del Uruguay, año 2018. En: Anuario OPYPA 2019. Montevideo: MGAP; 2019. p. 523-31.
11. Mishra SK, Suresh Babu P, Singh VP. SCS-CN method revisited. En: Advances in Hydraulics and Hydrology. Littleton: Water Resources Publication Colorado; 2007. 36p.
12. Woodward DE, Hawkins RH, Jiang R, Hjelmfelt Jr, AT, Van Mullem JA, Quan QD. Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. En: World Water & Environmental Resources Congress 2003. Reston: ASC; 2003. 10p. Doi: 10.1061/40685(2003)308.
13. Shi W, Wang N. Improved SMA-based SCS-CN method incorporating storm duration for runoff prediction on the Loess Plateau, China. Hydrol Res. 2020;51(3):443-55.
14. Moglen GE, Sadeq H, Hughes LH, Meadows ME, Miller JJ, Ramirez-Avila JJ, Tollner EW. NRCS Curve Number Method: comparison of methods for estimating the curve number from Rainfall-Runoff Data. J Hydrol Eng. 2022;27(10). Doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002210.
15. Ministerio de Ambiente, DINAGUA (UY). Manual de diseño y construcción de pequeñas presas [Internet]. Montevideo: MVOTMA; 2011 [citado 2023 Set 13]. Disponible en: <https://bit.ly/4biN1SR>
16. Chow VT, Maidment DR, Mays LW. Applied Hydrology. New York: McGraw-Hill; 1988. 572p.
17. Arnold JG, Williams JR, Nicks AD, Sammons NB. SWRRB: A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management. Texas: Texas A&M Press; 1990. 252p.
18. Narbondo S. Incorporación de información satelital de humedad del suelo en modelo hidrológicos para pronóstico de inundaciones en cuencas del Uruguay [tesis de maestría]. Montevideo (UY): Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 2021. 117p.
19. Georgakakos KP, Modrick-Hansen TM, Shamir E, Cheng Z. Verification Guidelines for the Flash Flood Guidance System component products and derivative warnings. San Diego: HRC; 2019. 113p.
20. Saxton KE, Rawls WJ. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Sci Soc Am J. 2006;70(5):1569-78.
21. United States Department of Agriculture, NRCS. Hydrographs. En: National Engineering Handbook: Part 630- Hydrology [Internet]. Washington: NRCS; 2007 [citado 2024 Feb 3]. 50p. Disponible en: <https://www.hydrocad.net/neh/630ch16.pdf>
22. Silveira L, Terra R, Usera G, Chreties C, López G, Crisci M, De Vera A, Symonds S, Rodriguez G, Piperno A, Sierra P, Osimani V, Francisco A, Garcia P, Sabaño O, Matos A, Alcoz S, Irazábal B, Rodríguez JM, Garcés C, Patrone J, Platt A, Failache G, Queirolo JL, Cortese W, Aldana JL, Pedocchi R. Proyecto piloto PROHIMET: alerta temprana para la ciudad de Durazno ante las avenidas del río Yí. Montevideo: Fundación Julio Ricaldoni; 2012 [citado 2024 Feb 3]. 208p. Disponible en: [https://drive.google.com/file/d/1O5OoWYsApEYdHQdMh0sxSUCBPbvSca8e/view?usp=drive\\_web](https://drive.google.com/file/d/1O5OoWYsApEYdHQdMh0sxSUCBPbvSca8e/view?usp=drive_web)



23. Silveira L, Usera G, Cazes G, Chreties C, Alonso J, Crisci M, De Vera A, Rodríguez G, Perazza G, Menta A, Narbondo S, Sierra P, Piperno A, Álvarez J, Amado M, Lejtregger R, D'Ambrosio M, López N, Cabrera M, Barrenechea P. SATI-Uy: Sistema de Alerta Temprana para previsión y gestión de inundaciones. Montevideo: Universidad de la República; 2017. 56p.



## Material complementario

En la Tabla 9 se presentan las características principales de cada evento, que incluyen la fecha de ocurrencia, la precipitación total del evento, la precipitación máxima diaria, el nivel máximo alcanzado por el río Yi en la ciudad de Durazno (se resaltan en rojo los niveles que excedieron el nivel de alerta de 9,63 m), la cantidad de evacuados y el período de retorno del evento. La estimación del período de retorno se realizó utilizando la función Gumbell, que demostró ser la que mejor se ajustó a los datos<sup>(22-23)</sup>. Además, en la Figura 8 a Figura 16 se presentan los siguientes gráficos para cada evento:

- Precipitación: Las barras azules representan la precipitación (Pcp.) acumulada diaria en mm para cada día del evento. Los días en que se registraron alertas se indican con una barra de fondo rojo.
- Nivel del río Yi: En color celeste se representa el nivel (m) del río Yi en la ciudad de Durazno, mientras que la línea horizontal punteada de color rojo representa el nivel de alerta (9,63 m). Los días en que se registraron alertas se indican con una barra de fondo rojo.
- Curva número: Se muestra el valor de la curva número diario calculado con los métodos A, C y D, las líneas punteadas de color rojo representan el valor de CN para las condiciones de humedad I y III (CN<sub>I</sub> y CN<sub>III</sub>).
- Almacenamiento: Se muestra el valor del índice de almacenamiento (S) en mm calculado a diario para los métodos A, B, C y D.
- FG y pronóstico Pcp.Pr. 24 h (o 48 h): Las líneas y los puntos representan el valor del índice FG calculado con cada método, y las barras azules indican la precipitación pronosticada acumulada en 24 horas (o 48 horas). Cuando la precipitación pronosticada supera el valor de FG, se pronostica una alerta. Los días en que se registraron alertas se indican con una barra de fondo rojo.
- Alertas 24 h (o 48 h): Se muestran (solo para los cuatro eventos con alerta) las alertas emitidas por cada opción de cálculo (puntos) en comparación con las alertas registradas (barras de color rojo). Los puntos de menor tamaño indican que la diferencia entre FG y Pcp.Pr. es menor a 5 mm.

Tabla 9. Fechas y principales características de los eventos

| ID | Fecha   | Precipitación total (mm)   | Precipitación máx. diaria (mm) | Nivel máx. (m) | Evacuados (hab.) <sup>(18)</sup> | Período de retorno (años) <sup>(22-23)</sup> |      |
|----|---------|----------------------------|--------------------------------|----------------|----------------------------------|--|------|
| 1  | 2014_11 | 1-6 nov. 2014              | 72                             | 32             | 8,36                             | ---  | 1,8  |
| 2  | 2014_12 | 22 nov. - 4 dic. 2014      | 159                            | 49             | 8,73                             | ---  | 3,0  |
| 3  | 2016_12 | 22-28 dic. 2016            | 130                            | 88             | 6,46                             | ---  | 1,1  |
| 4  | 2017_09 | 19 ag. - 15 set. 2017      | 305                            | 48             | 9,79                             | ---  | 4,5  |
| 5  | 2018_12 | 9-21 dic. 2018             | 155                            | 60             | 8,16                             | ---  | 1,5  |
| 6  | 2019_01 | 29 dic. 2018 - 18 en. 2019 | 317                            | 110            | 10,98                            | 746  | 10   |
| 7  | 2019_06 | 10-20 jun. 2019            | 300                            | 130            | 12,69                            | 5000   | >100 |
| 8  | 2019_10 | 1-18 oct. 2019             | 267                            | 97             | 9,90                             | ---  | 4,8  |
| 9  | 2020_06 | 18-29 jun. 2020            | 142                            | 72             | 9,26                             | ---  | 4,3  |

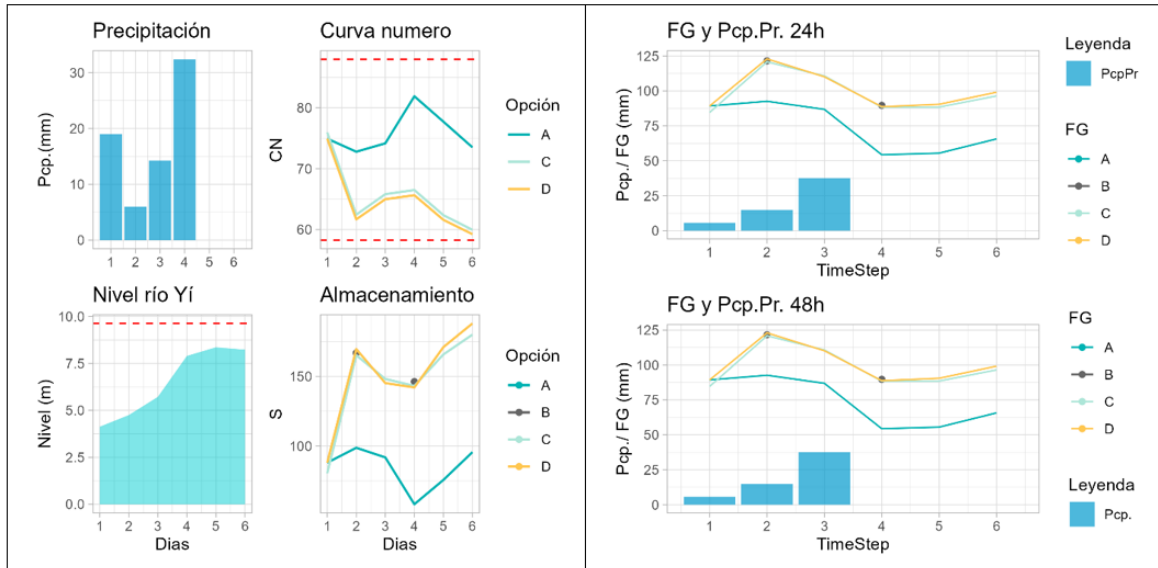


Figura 8. Evento 2014\_11

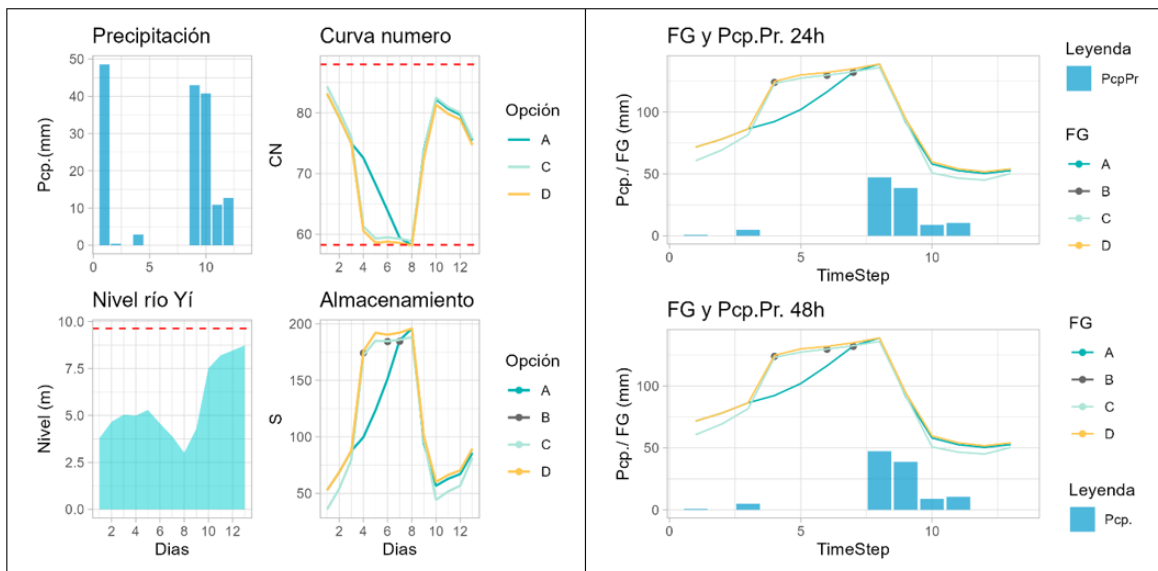


Figura 9. Evento 2014\_12

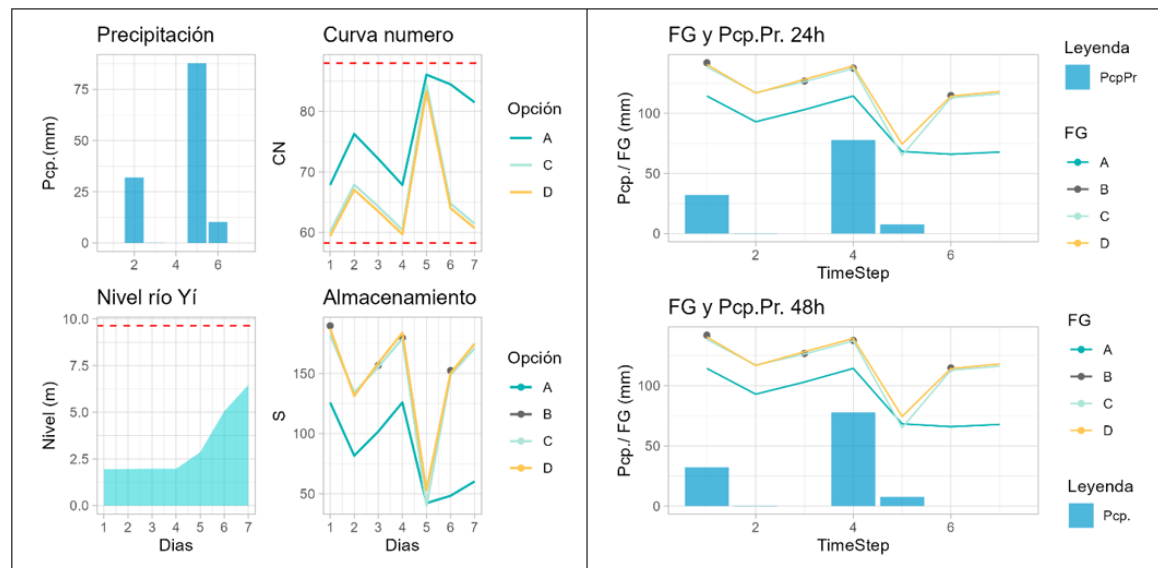


Figura 10. Evento 2016\_12

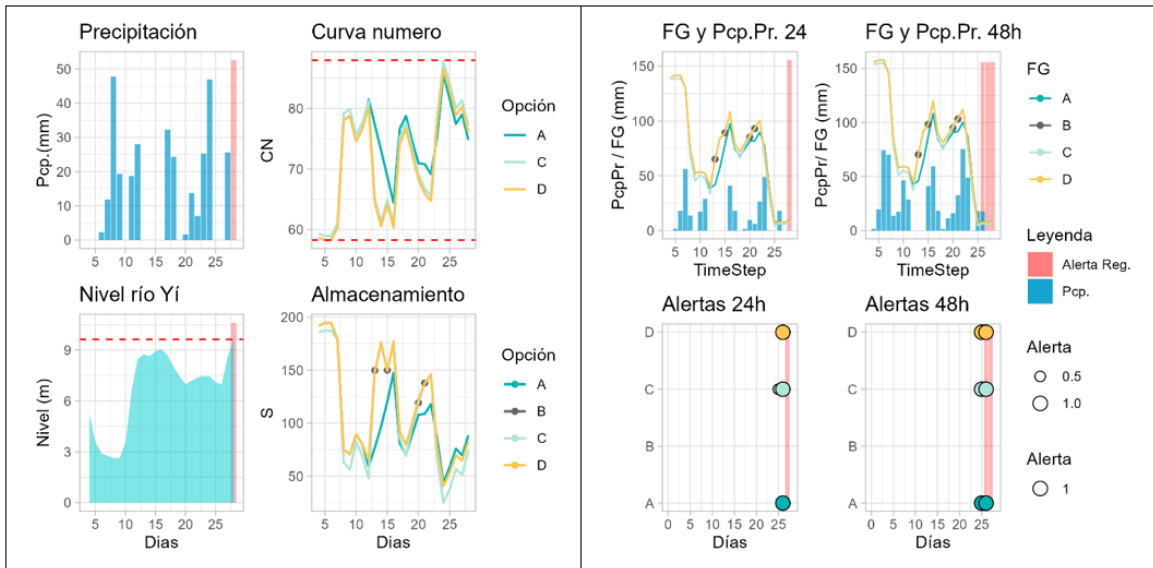


Figura 11. Evento 2017\_09

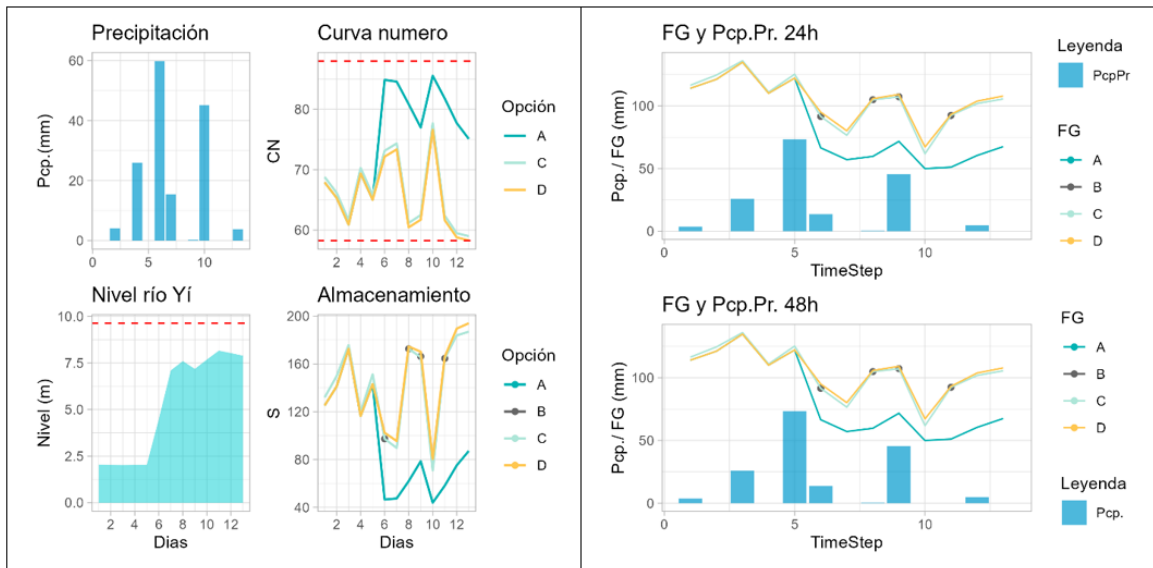


Figura 12. Evento 2018\_12

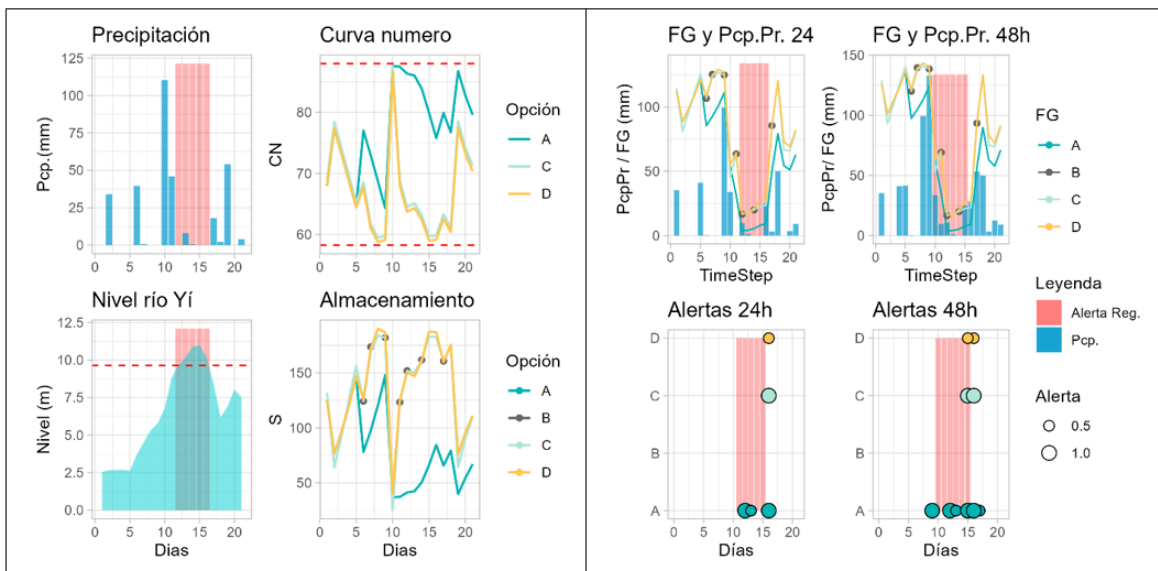


Figura 13. Evento 2019\_01

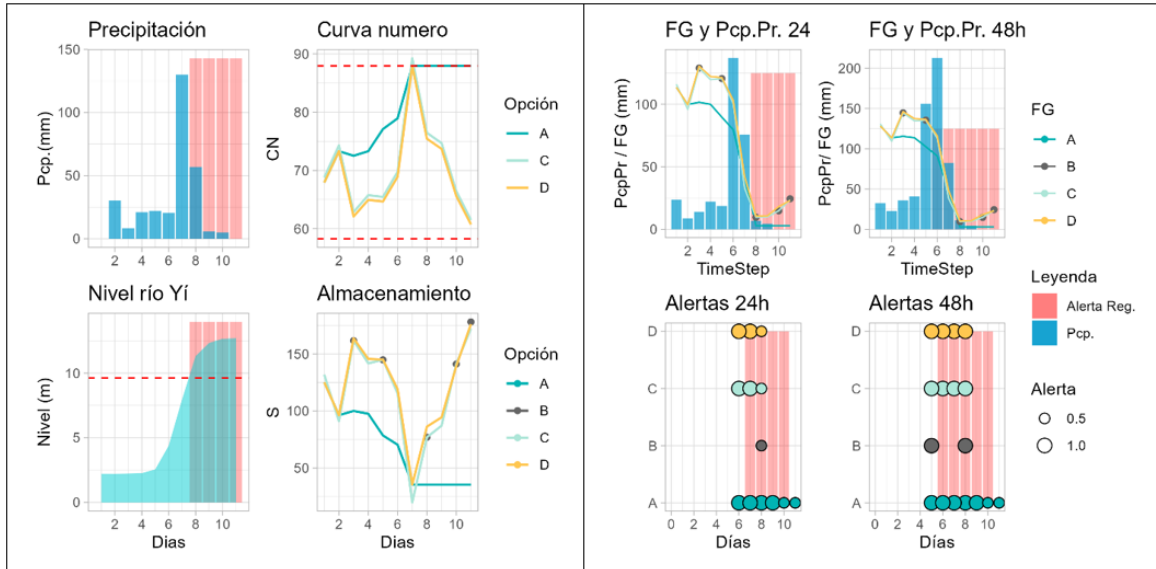


Figura 14. Evento 2019\_06

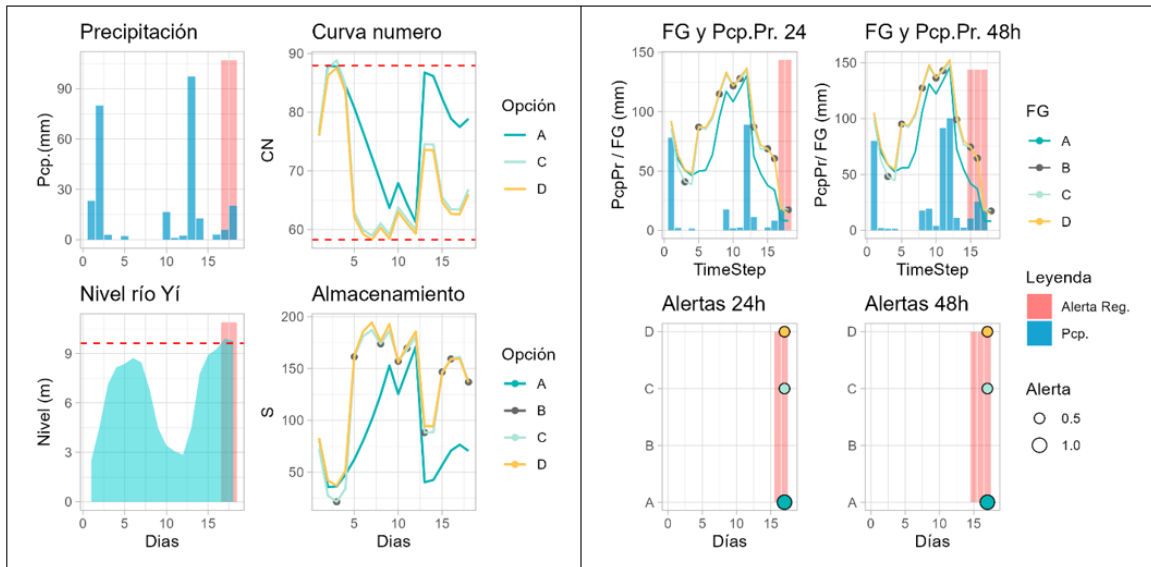


Figura 15. Evento 2019\_10

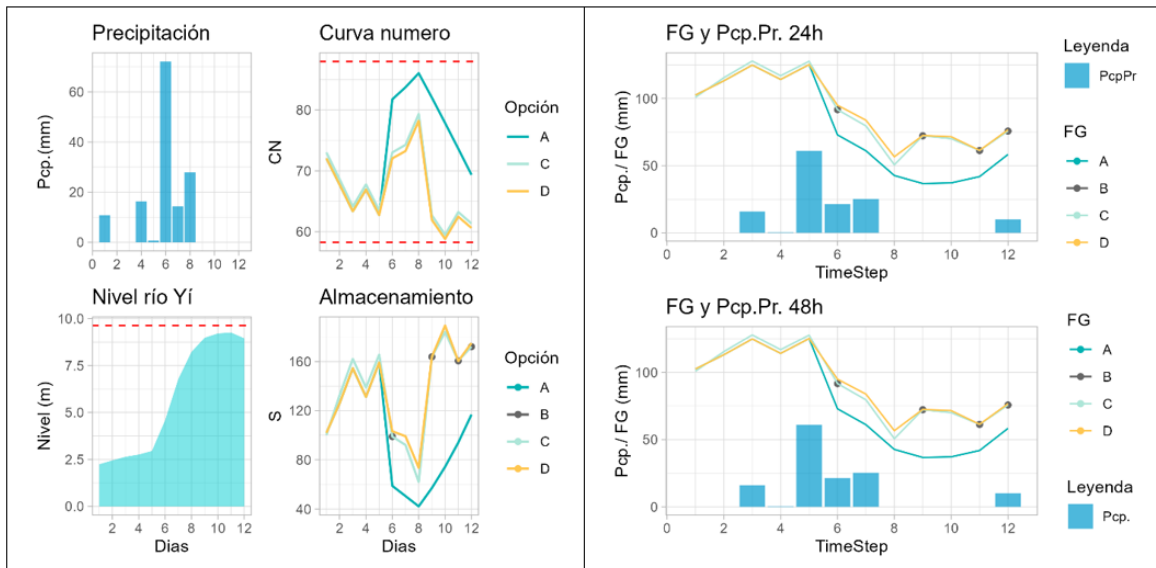


Figura 16. Evento 2020\_06