



Predicción probabilística del escurrimiento superficial y la pérdida de sedimento para eventos extremos. Parte II

Probabilistic prediction of discharge and sediment yield for extreme events. Part II: Case study

M.Sc. Gustavo Reinel Alonso-Brito

Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque. Cuba

RESUMEN. El objetivo de este estudio es mostrar un ejemplo de aplicación de la metodología para la predicción probabilística del escurrimiento y la pérdida de sedimento bajo condiciones extremas, la cual fue publicada en volumen anterior de esta revista. El estudio se enfoca en la subcuenca “V Aniversario”, perteneciente a la cuenca del Río Cuyaguaje, provincia de Pinar del Río. Usando series de lluvia, escurrimiento y sedimentos en río, e información de suelo y uso de la tierra, el modelo KINEROS (K2) fue calibrado y validado. Los máximos en la subcuenca se ajustan a una distribución teórica de probabilidades tipo II - Fréchet. En el estudio se muestran los resultados de predicciones de la respuesta hidrológica para un evento de 50 años de periodo de retorno.

Palabras clave: Predicción hidrológica, KINEROS2, análisis de extremos, desagregación de lluvia.

ABSTRACT. The objective of this study is to show a case study application of the blue print methodology for probabilistic prediction of discharge and sediment yield under extreme events, which was published in previous volumes of this Journal. The study focus on “V Aniversario” basin, which is located in the Cuyaguaje River Basin, Pinar del Río Province, west of Cuba. Using site-based rainfall, discharge and sediment series, and landuse and soil information the KINEROS (K2) model was calibrated and validated. The extreme maxima in the area fitted a theoretical probability distribution EV type II - Fréchet. Results of the hydrological response predictions for a 50-year return event are also shown in this paper.

Keywords: Hydrological prediction, KINEROS2, extreme analysis, rainfall disaggregation.

INTRODUCCIÓN

Este artículo pretende mostrar un ejemplo de aplicación de la metodología para la predicción probabilística del escurrimiento y la pérdida de sedimentos bajo condiciones extremas, publicada recientemente en esta revista (Alonso, 2016). Se recomienda leer primero la parte I pues ambas publicaciones son complementarias.

MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se enfoca en la subcuenca “V Aniversario”, perte-

INTRODUCTION

This paper intends to show a case study application of the blue print methodology for probabilistic prediction of discharge and sediment yield under extreme events, which was published in previous volumes of this Journal (Alonso, 2016). It strongly advised to read first the previous paper because both publications are complementary.

METHODS

Study area

The study focuses on the “V Aniversario” subwatershed, which has an area of 157 km². V Aniversario is located (22°24'6”

neciente a la cuenca del Río Cuyaguaje, provincia de Pinar del Río. La subcuenca tiene un área de 157 km² y se localiza en los 22°24'6" – 22°35'40" de latitud Norte y los 83°47'55" – 83°56'9" de longitud Oeste. La Figura 1 ilustra la geografía y la topografía del área de estudio. La cuenca Cuyaguaje como tal, es considerada una de las principales cuencas del país debido a su tamaño (723 km²) e importancia económica a través de la agricultura¹.

La región está sujeta a un clima subtropical con dos periodos bien definidos: seco y húmedo. El primero se extiende desde noviembre hasta abril. Las medias climáticas anuales son: precipitación 1766 mm, evaporación 1860 mm y temperatura 25,1 °C. La humedad oscila alrededor de 77% y 82% durante la estación seca y lluviosa, respectivamente¹. Debido a la posición geográfica, la región es frecuentemente afectada por huracanes, lo cual incrementa considerablemente la intensidad y acumulado de las lluvias y, por lo tanto, el escurrimiento y pérdida de sedimentos. La principal actividad económica en la cuenca es la agricultura, desarrollada principalmente en los valles intramontanos y con especial énfasis en el cultivo del tabaco².

– 22°35'40"N and 83°47'55" – 83°56'9"W) in Cuyaguaje River Basin, Pinar del Río Province, west of Cuba. Figure 1 illustrates the geography and topography of the study area. The entire basin is considered one of the main basins in the country due to its size (723 km²) and economic importance by means of agriculture¹.

The region is subjected to a subtropical climate with well-defined dry and wet seasons, the first one lasting from November to April. Mean annual climatic characteristics are: precipitation 1766 mm, evaporation 1860 mm and temperature 25.1 °C. Humidity oscillates around 77% and 82% during dry and rainy season, respectively¹. Due to its geographical position, the basin is frequently affected by hurricanes, which increase considerably the intensity and amount of rain and therefore the runoff and sediment response. The main economic activity in the basin is agriculture, which is mainly developed in the bottom valleys in 14000 ha, from which 1700 ha are dedicated to tobacco cultivation².

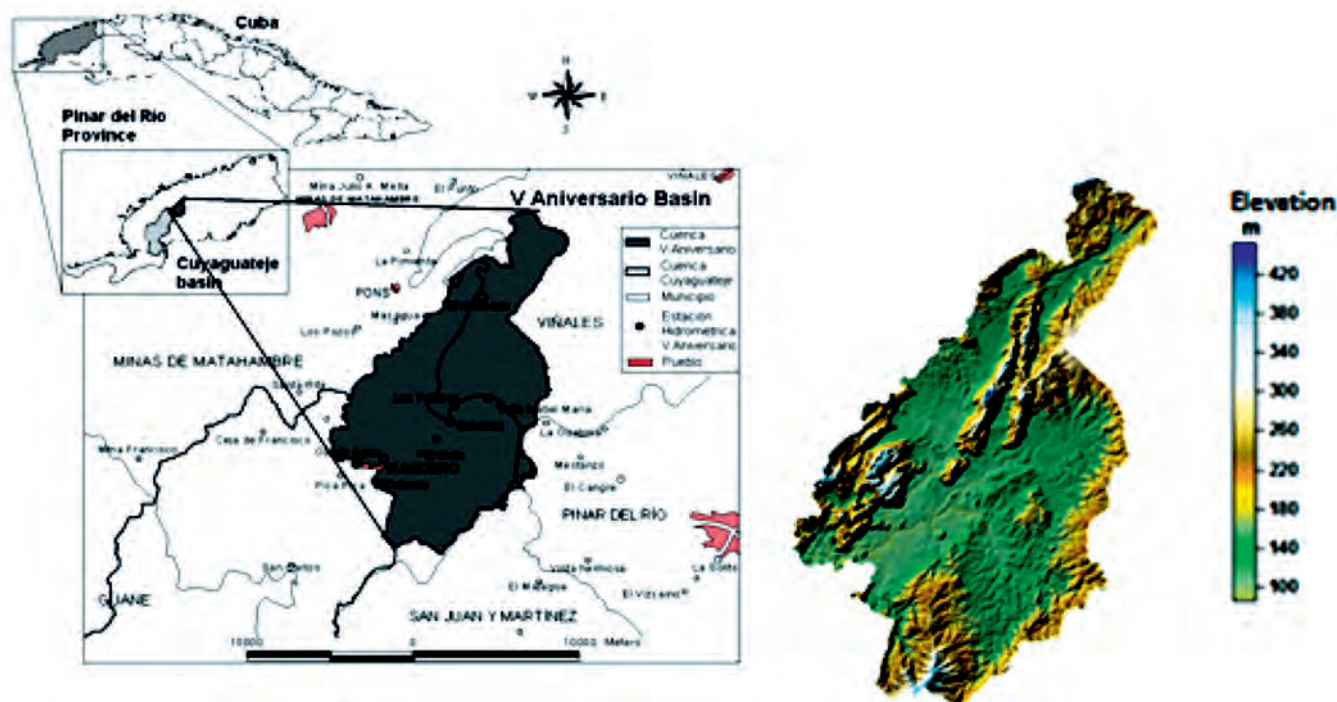


FIGURA 1. Localización geográfica de la subcuenca V Aniversario y Modelo Digital de Elevación (MDE).

FIGURE 1. V Aniversario subwatershed geographical location and Digital Elevation Model (DEM).

Serías de lluvia, escurrimiento y sedimento

La cuenca es monitoreada por una red de estaciones desde la década del 60. La red está conformada por 8 pluviómetros (acumulado diario) y 2 pluviógrafos (intensidad). El periodo activo de mediciones cubre desde 1963 al 2006 en el caso de la lluvia diaria, con algunos años perdidos para la mayoría de las estaciones. Las series de intensidad cubren desde 1964 al 2010, pero con solo 20 años de mediciones en este intervalo. La Figura 2a muestra los

Precipitation, discharge and sediment series

The basin is monitored through a network of rain gages the 1960's. The network is made up of eight stations in which total daily precipitation is recorded, and two of these also measure up to 5-minute rainfall (intensity). The period of active measurements covers from 1963 to 2006 for daily precipitation with missing years in the majority of the stations. The intensity records cover from 1964 to 2010, but with only 20 years of measurements. Figure 2a shows the historical daily precipitation

¹ INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS (INRH): Catálogo de Cuencas Hidrográficas (Río Cuyaguaje), Pinar del Río, Cuba, 27 p., 2000.

² CONSEJO TERRITORIAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS (CTCH) DE PINAR DEL RÍO: Catálogo de Cuencas Hidrográficas Río Cuyaguaje, 2000.

acumulados históricos de precipitación en la subcuenca, calculados como la mediana de las 8 estaciones. El tiempo de referencia, fijado en día 0 en el gráfico, corresponde a 1 enero de 1963. En la Figura 2b se muestra la función de probabilidad acumulada de esta serie, donde el eje y usa un escala de cuantiles normal.

values in the basin, which were computed as the median of the available records from the 8 stations. The reference time, set to day 0 in the graph, corresponds to January 1st, 1963. In Figure 2.2b the daily rain depth vs. cumulative probability is plotted. Because of the sample's long tail logarithmic distribution, the y-axis uses a quantile normal scale.

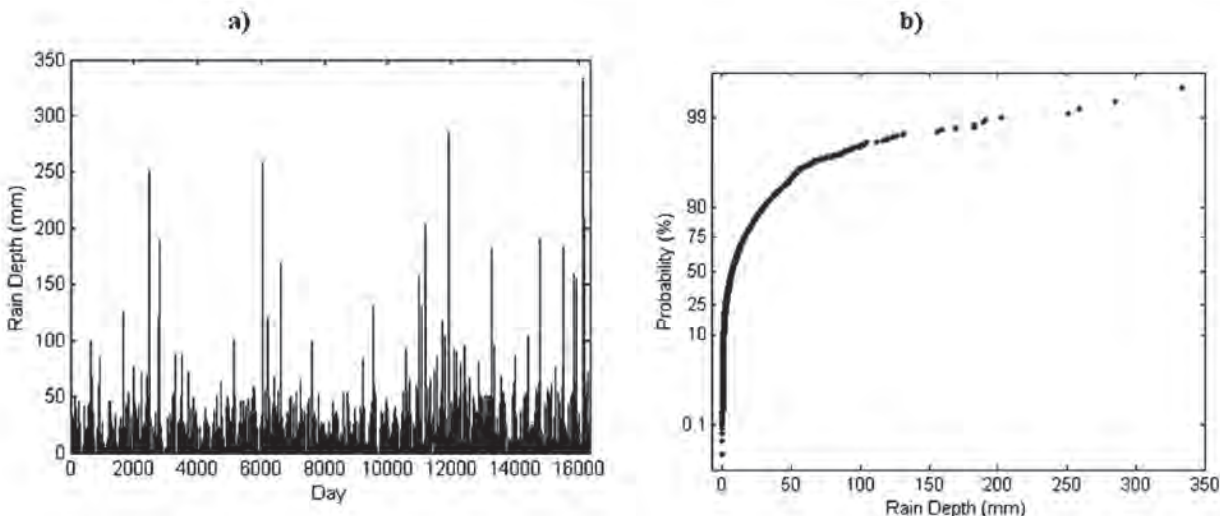


FIGURA 2a). Precipitación diaria. b) Función empírica de densidad acumulada.
 FIGURE 2a). Daily precipitation from 1963-2006. b) Empirical cumulative density function.

Las series de escurrimiento y pérdida de sedimentos fueron usadas para calibrar y validar el modelo de base física. Estas variables son monitoreadas en la desembocadura de la subcuenca (estación hidrométrica) por los métodos tradicionales, usando molinete y batómetro de muestreo y la medición constante del nivel con un limnómetro. La data disponible para este estudio son, el escurrimiento medio diario y la concentración de sedimentos, ambos medidos durante el periodo de 1971–1990, además varios hidrogramas de escurrimiento. En el estudio, los valores medios diarios fueron convertidos, aproximadamente, a totales diarios para obtener valores comparables, los cuales serán usados para la calibración y validación del modelo. La conversión se realizó multiplicando el valor medio por 86400 segundos contenidos en un día.

Observed discharge and sediment yield series were used to calibrate and validate the physically-based model. These variables have been monitored at the subwatershed's outlet (V Aniversario hydrometric station) by the traditional methods, using a current meter and sampling to determine the suspended sediment concentration and the water level is also monitored continuously with a limnimeter. The data available for this study were daily discharge mean and sediment concentration rates from the period 1971–1990, and some response hydrographs. In this study, daily means were roughly converted to daily total for obtaining comparable values to be used for model calibration and validation. This approximation was made by multiplying the mean rate by the total seconds in a day.

Propiedades y uso de suelo

El uso de suelo y sus propiedades son parámetros de entrada en KINEROS2. Esta información se obtuvo a partir de los mapas de suelo y uso de tierra (escala 1:25000) y estudios previos desarrollados³. Este estudio envolvió 20 perfiles de suelo característicos en la subcuenca, en los cuales se determinaron propiedades físicas, químicas e hidráulicas, y se realizaron estudios de erosión a través de parcelas de simulación. Algunos de estos resultados fueron usados para la configuración del modelo, específicamente: la distribución de partículas (PSD, siglas en inglés), conductividad hidráulica de saturación (*Ks*), curva de retención de humedad (*SWC*) y erodibilidad del suelo (*K*). La factor erodibilidad del suelo *K*, de la Ecuación Universal

Soil and landuse

Soil and landuse properties are needed as input parameters in KINEROS2. This information was obtained from the soil and landuse maps (scale 1:25000) and previous soil studies developed³. The last involved 20 characteristic soil profiles of the basin, on which physical, chemical and hydraulic properties were determined, and erosion studies were carried out through rainfall simulation plots. Some of these results were used here for the K2 setup, specifically: the particle size distribution (*PSD*), saturated hydraulic conductivity (*Ks*), soil-water characteristic curve (*SWC*) and the surface soil erodibility (*K*). The soil erodibility factor *K*, from the Universal Soil Loss Equation (USLE), was obtai-

³ ALONSO, G.R.: Estimación del Riesgo de Erosión Hídrica en la Subcuenca V Aniversario del Río Cuyaguaje, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Agraria de La Habana, Tesis de Maestría, La Habana, Cuba, 2008.

de Pérdida de Suelo (USLE), fue obtenido según Wischmeier y Smith (1978), usando las parcelas de simulación de lluvia (5 m largo por 2 m ancho y suelo desnudo). Los valores de K están también corregidos por el factor de largo y pendiente (LS), el cual fue estimado según Foster *et al.* (1977) y McCool *et al.* (1989).

Configuración del modelo

La delimitación, discretización y parametrización de la cobertura vegetal fueron realizadas usando el paquete AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment). Para la delimitación de la subcuenca y la discretización se usó el MDE sin depresiones y para la delimitación de los planos e iniciación de canales un 10% de área contribuyente (CSA, siglas en inglés). La geometría de canales fue seleccionada de las opciones de AGWA como: trapezoidal natural con relación hidráulica. La relación hidráulica establece el ancho y la profundidad de los canales como una función del área acumulativa.

Con el objetivo de obtener los parámetros de cobertura sobre AGWA, el mapa de uso de suelo fue interceptado con la table “nalc_luc” y una nueva clase editada: “Macizo”. La clase Macizo representa las atípicas formaciones geológicas conocidas como Mogotes. La vegetación sobre estas formaciones es arbórea y posee una erodibilidad extremadamente baja, lo cual afecta el parámetro “pavimento” (Pave). El parámetro Pave para la clase Macizo fue fijado en 95%, dejando solo un 5% de la superficie con posibilidades de ser erosionada debido a la incipiente formación de suelo y el sustrato de la vegetación. El resto de los parámetros para esta clase fueron mantenidos como bosques.

Por otra parte, la parametrización del suelo fue realizada con herramientas de ArcGIS y siguiendo el mismo procedimiento propuesto en AGWA. El paquete no fue usado en este caso debido la inconsistencia de su base de información y la clasificación de suelos disponibles para este estudio. Los parámetros de suelo que el modelo necesita son: fracción de arena, limo y arcilla; conductividad hidráulica de saturación (K_s) y su coeficiente de variación (C_v - opcional); **índice de distribución de tamaño de poros (λ)**; capilaridad neta (G); porosidad (ϕ); coeficiente de cohesión (C_g) y golpeteo (C_p); y en caso de **más de varios horizontes de suelo, la profundidad del horizonte A.**

El índice de distribución de tamaño de poros y el potencial matricial a la entrada de aire Ψ_b , ambos parámetros del modelo de Brooks y Corey (Brooks y Corey, 1964), fueron determinados por ajuste del modelo a los pares de potencial – humedad volumétrica ($\Psi_m - \theta$). La capilaridad neta, parámetro G , fue estimado según Morel-Seytoux *et al.* (1996), y usando la función $K(\Psi)$ de Brooks y Corey. Los parámetros de cohesión y golpeteo se determinaron a partir del factor de erodibilidad K siguiendo el procedimiento explicado en el artículo anterior (parte I). A los polígonos de Macizos se le asignaron parámetros hidráulicos nulos y coeficientes de cohesión y golpeteo imperceptibles, 0,0005 and 8, respectivamente. Por otra parte, los canales naturales estándar asumidos tienen fondo arenoso con 0,9% de arena, 0,05% de limo e igual cantidad de arcilla, y porosidad de 0,44. La infiltración es permitida con los siguientes

según Wischmeier & Smith (1978), usando rain fall simulation plots (5 m long by 2 m wide and bare soil). The K values are also corrected by the slope-length (LS) USLE factor, which is estimated according to Foster *et al.* (1977) & McCool *et al.* (1989).

Model setup

The watershed delineation, model discretization and land cover parameterization were carried out by using the Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) package. The watershed delineation and discretization were based on the depressionless DEM and 10% of the watershed size used as contributing source area (CSA) for delineating planes and initiation of channels. The stream geometry was selected from the AGWA's options as natural trapezoidal channels and default hydraulic geometry relations. The last uses bankfull hydraulic geometry relationships, or the same, establishes width and depth of the channel as a function of the cumulative area.

In order to obtain land cover parameters on AGWA, the land use map of the basin was correlated with the “nalc_luc” look-up table and a new class was edited and included in this table: “Masizo”. Masizo class represents the Mogotes present in the area. The vegetation on top of the Mogotes behaves like forest but the extremely low erodibility of the rock affects the parameter pavement (Pave). This parameter was set to 95%, leaving thus 5% of the Mogotes surface with the possibility of being eroded due to the incipient soil formation and vegetation substrate on top of the rock. The rest of parameters were kept the same as forest.

Soil parameterization, on the other hand, was performed with ArcGIS tools and following the same procedure of AGWA. It was not implemented with the package due to inconsistencies between available soil data for this study and the soil classifications of AGWA's look up tables. KINEROS2's soil parameters are: sand, silt and clay fractions; saturated hydraulic conductivity (K_s) and its coefficient of variation (C_v - optional); pore size distribution index (λ); net capillarity drive (G); soil porosity (ϕ); cohesion (C_g) and splash (C_p) coefficients; and in case of two layered soil, like here, the first soil layer depth (soil A horizon).

The pore size distribution index and the bubbling pressure parameter Ψ_b (soil matric potential at air entry), both parameters of Brooks and Corey SWC model (Brooks & Corey, 1964), were founded for each soil by fitting the mentioned equation to the available matric potential – volumetric water content ($\Psi_m - \theta$) pairs. The net capillary drive, parameter G , was estimated as proposed by Morel-Seytoux *et al.* (1996), and using the function $K(\Psi)$ from the soil characteristic relation of Brooks and Corey. The cohesion and splash parameters were determined from the erodibility factor K following the procedure explained in the paper part I. Null hydraulic parameters and imperceptible cohesion and splash coefficients, 0,0005 and 8, respectively, were assigned to the Mogotes polygons. On the other hand, the assumed standard natural channels have a sandy bottom with 0.9% of sand, 0.05% of silt and clay, and porosity of 0.44. Infiltration is allowed with the following soil hydraulic parameters:

parámetros: $K_s = 10 \text{ mm h}^{-1}$ (valor promedio en la subcuenca), $\lambda = 0,54$ y $G = 100 \text{ m}$. El coeficiente de cohesión para la erosión fluvial es $0,005 \text{ s}^{-1}$.

Calibración y validación

Calibración de parámetros. La calibración del modelo fue realizada cambiando los parámetros más sensibles: conductividad hidráulica de saturación y coeficiente de rugosidad de Manning, y los coeficientes de cohesión y golpeo para los procesos hidrológicos y de erosión respectivamente. Estos parámetros se variaron a través de la opción de multiplicadores que ofrece el ejecutable del modelo y la calibración se detuvo al obtener un ajuste satisfactorio. La calibración se basó en 5 eventos, los cuales cumplen un amplio rango de características hidrológicas y sus respuestas no se solapan con otros eventos independientes, según el tiempo de concentración de la subcuenca. La Tabla 1 resume las características de los 5 eventos usados.

$K_s = 10 \text{ mm h}^{-1}$ (basin average value), $\lambda = 0.54$ and $G = 100 \text{ m}$. The soil cohesion coefficient for fluvial erosion is 0.005 s^{-1} .

Model calibration and validation

Parameters calibration. Model calibration was performed by changing the most sensitive parameters: saturated hydraulic conductivity and Manning’s roughness coefficient, and soil cohesion and splash coefficients for hydrologic and erosion processes, respectively. These parameters were changed by the option of multipliers offered in the model prompt and the calibration was stopped when a satisfactory fit was obtained. The calibration was based on five events. The event selection follows a wide range of hydrological characteristics and avoids the overlapping effects with other independent events paying attention to the basin concentration time. Table 1 summarizes the used events’ characteristics.

TABLA 1. Resumen de eventos usados en calibración
TABLE 1 Summary of events used in calibration

ID	Event date	Antecedent rain depth	Rain depth ^a	Max. rain rate ^a	Rain depth ^b	Max. rain rate ^b	Runoff depth	Peak runoff	Total sediment
		mm	mm	mm h ⁻¹	mm	mm h ⁻¹	mm	mm h ⁻¹	kg
6	13/05/1990	56.8	13.5	24.0	49.8	66.7	2.56	0.22	170899.2
7	04/12/1990	21.5	9.4	5.1	37.8	200.0	1.84	0.15	62208.0
8	03/03/1991	9.9	94.6	85.7	51.2	105.5	3.70	0.40	-
16	18/07/1992	11.5	45.1	41.2	31.4	88.8	3.75	0.32	-
19	18/09/1992	52.8	96.9	72.0	-	-	4.98	0.52	-

^a and ^b raingage-station 122 and 140, respectively. Empty cells, related to precipitation data, mean no rain.

Durante la calibración, el desempeño del modelo, contra los hidrogramas observados, se comprobó visualmente y con medidores de bondad de ajuste. La eficiencia Nash-Sutcliffe, el error de balance de masa y el tiempo al pico de descarga fueron usados para comprobar objetivamente las salidas del modelo. Como K2 no simula el flujo base, fue necesario adicionar un aproximado al hidrograma modelado para comparación. El mínimo valor del gasto, dentro de la marcada recesión del hidrograma, fue usado como flujo base aproximado y adicionado constantemente a la curva simulada.

La pérdida de sedimento fue calibrada basado en las medias diarias observadas. El valor promedio de gasto sólido fue multiplicado por el total de segundos del día para obtener totales diarios [kg] de pérdida de sedimento y después sumado los días bajo la influencia del evento. Estos valores fueron comparados con los simulados, los cuales se obtuvieron integrando el sedígrama de salida.

Otro parámetro que se usó para calibrar el modelo fue el contenido inicial de humedad del suelo, en este caso como elemento de fina variación. El resto de los parámetros en calibración son constantes mientras el contenido inicial de humedad varía de un evento a otro. Debido al desconocimiento de los valores reales, los valores iniciales, para ser variados finamente, se estimaron en función de la lluvia antecedente. Considerando las características de la subcuenca, la humedad del suelo está influenciada por una lluvia de hasta 7 días a priori al evento. En

In the calibration, the model performance was tested against observed hydrographs through visual comparison and by evaluating goodness of fit measures. Nash-Sutcliffe efficiency, mass balance error and time to peak (hydrograph maximum) performance measures were used to test objectively the model outputs. As K2 does not simulate baseflow, it was necessary to add an approximated base value to the modeled hydrograph. The minimum discharge value from the observed hydrographs (with marked recession) was used as the approximated baseflow and constantly added to the simulated curve.

Suspended sediment yield was calibrated based on the available daily mean observations. Mean sediment rate was multiplied by the total seconds in a day to obtain daily totals and the days under event response influence were added for a total sediment yield [kg] per event. These values were compared with the simulated ones, which were obtained by integration of the output hydrograph.

Another parameter that influenced calibration was the initial water content. Calibration of discharge and erosion consists of a constant set of basin’s parameters for all the selected events while initial water content could vary for each event, as a fine turning parameter. Due to unknown initial values, these were related to the antecedent rain for estimations. Considering basin characteristics, the soil moisture is influenced by rain precipitated up to around 7 days prior to the event. Before starting the calibration, three initial conditions

relación a este acumulado antecedente se establecieron condiciones: seca (0,2 de saturación relativa), media (0,5) y húmeda (0,8). Esta relación fue re-chequeada después del mejor ajuste para todos los eventos.

Validación para extremos. Basado en el propósito de esta investigación, de modelar eventos extremos, se decidió validar el modelo con los extremos observados. Los eventos extremos fueron seleccionados a partir de la función de densidad acumulada del gasto diario y posteriormente se vincularon al evento de precipitación que lo ocasionó. Como extremos fueron considerados aquellos eventos con una probabilidad de excedencia $P(X>=x)$ of 5%. Desafortunadamente, la data de precipitación correspondiente a estos eventos no está disponible en algunos casos debido a problemas de funcionamiento bajo estas condiciones. La Tabla 2 muestra un resumen de las características de los extremos disponibles.

were identified in relation to antecedent rain: dry, medium and wet, with relative saturation of 0.2, 0.5 and 0.8 (scaled water content), respectively; and this relation is finally re-checked with the selected set of parameters.

Validation for extremes. Based on the purpose of this research to model extreme events, it was decided to validate the model performance on the observed extremes. The extreme events were selected from the cumulative density function (cdf) of the daily discharge and later linked to the corresponding precipitation events. Extremes were then considered those events with an exceedance probability $P(X>=x)$ of 5%. Unfortunately, precipitation data for the most extreme events were totally or partially missed due to problems with the gauging devices functioning under the extreme situation. Table 2 shows a summary of the available extremes.

TABLA 2. Resumen de eventos extremos usados para validar el modelo
TABLE 2. Summary of extreme events used for model validation

ID	Event date	Antecedent rain depth	Rain depth ^a	Max. rain rate ^a	Rain depth ^b	Max. rain rate ^b	Mean disch. rate [*]	Mean sed. rate [*]
		mm	mm	mm h ⁻¹	mm	mm h ⁻¹	m ³ s ⁻¹	kg s ⁻¹
5	24/09/1975	44.9	39.8	30.0	94.4	58.2	54.7	21.4
6	09/10/1976	45.1	11.9	18.6	68.3	40.0	67.2	15.1
20	20/06/1986	93.3	75.8	90.5	-	-	60.6	17.2
25	27/09/1990	25.7	78.1	120.0	-	-	54.2	9.7
33	28/08/1985	43.5	-	-	80.9	153.3	38.4	10.8
34	03/09/1985	64.4	35.8	62.8	160.2	113.6	42.6	16.4
42	21/11/1976	1.7	69.0	85.7	111.8	88.0	28.9	9.2
53	11/04/1985	37.9	33.5	46.4	99.3	51.7	29.6	12.0
60	10/07/1990	42.8	38.3	114.0	21.8	120.0	23.3	6.5
62	27/05/1975	126.7	29.5	40.8	56.0	67.5	18.3	5.8
65	28/08/1990	50.4	28.5	44.0	71.0	200.0	18.6	4.7

^a and ^b raingage-station 122 and 140, respectively. Empty cells mean no rain recorded. ^{*} Daily means of discharge and sediment rate (maximum related to the precipitation event).

Esta vez, tanto el gasto líquido como el sólido fueron validados contra las medias diarias observadas, usando el mismo procedimiento explicado anteriormente en la calibración. Debido a la respuesta de los eventos y la homogeneidad durante el día, el segundo día de respuesta fue usado principalmente para las comparaciones. Para una mejor validación, la comparación debe basarse en hidrogramas y sedigramas, pero estos no estaban disponibles para extremos.

En este caso, no existía idea sobre el régimen de flujo base y por consiguiente, los volúmenes totales de escurrimiento y sedimentos deben ser subestimados con K2. Este elemento influye más en los volúmenes acumulados que las variables intensivas. No obstante, el análisis será cualitativo y para identificar los elementos positivos que concluyan sobre el desempeño del modelo. Para futuros estudios, si los volúmenes fueran el interés, algunos procedimientos pueden ser implementado, por ejemplo: adicionar flujo base característicos de una estación o específico del tipo de evento. Otra solución práctica para esta limitante puede ser ajustar una función entre las desviaciones del modelo y los volúmenes simulados, asumiendo que estas desviaciones son producto de la

Here, discharge and sediment were validated against the available daily means observations by using the same procedure explained in the calibration. Due to event response duration and day-homogeneity criterion, the second day of the event response was majorly used for comparison. A proper validation should be based on hydrographs and sedigraphs, but these were not available.

In this case, there were no idea about the baseflow regime and consequently, the total runoff and sediment volumes simulated with K2 are expected to be under-predicted. This element has more influence on accumulated volumes than on the rate variables. Anyhow, the analysis will be based on a qualitative assessment and identification of positive features that argue about model performance. If the study focuses on volumes, some other procedures could be implemented like adding seasonal or specific baseflows for different regimes. Another practical solution can be to fit a function between simulation bias and simulated volumes. The resultant event type-specific curve could be later used for retrieving approximated baseflows volumes.

falta del flujo base. La función resultante puede servir para retribuir las diferencias de volúmenes según el régimen.

La saturación relativa inicial para estos eventos fue estimada según la relación establecida durante la calibración. Esta relación entre la humedad inicial y la lluvia precedente ajustó una función lineal, la cual fue directamente usada en la validación.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

Resultados de calibración

La calibración del modelo en la parte hidrológica se realizó cambiando los multiplicadores de K2, básicamente K_s y el coeficiente de rugosidad de Manning ($Mann_n$). La calibración satisfactoria se obtuvo duplicando ambos parámetros: 2 K_s and 2 $Mann_n$. La Figura 3 muestra los hidrogramas observados y simulados junto a la precipitación promediada espacialmente según el modelo. En todos los casos, las simulaciones ajustan bien importantes detalles del hidrograma como el tiempo de respuesta y el tiempo al pico de inundación. El tiempo de respuesta es notablemente distinto para cada evento, sin embargo todas las simulaciones reaccionan en fase con las mediciones. Este elemento positivo, atendiendo la variabilidad especial de los eventos de lluvia, hace presumir que la distribución especial de los parámetros es apropiada.

Los picos de inundación también son bien reproducidos por K2, con excepción del evento 19 donde el pico simulado es 10% mayor que el observado. La onda es más ancha en los hidrogramas observados que en los simulados. Este último es un comportamiento esperado debido al concepto de K2: discretización espacial, aproximación del largo medio del flujo y la falta del flujo base; las mismas razones que explican la subestimación de volúmenes. Las medidas de bondad de ajuste se presentan en la Tabla 3. El error en el balance de masa evidencia el déficit en los volúmenes simulados. El error en tiempo al pico es pequeño, solo es considerable en el evento 16, donde, el pico simulado se adelanta en 56 min. La estadística de Nash-Sutcliffe (E) está en la mayoría de los casos por encima de 0.8, lo cual es considerado un buen desempeño; estos valores comparables con los resultados obtenidos en una región tropical por Memarian *et al.* (2012). E está principalmente afectado por la ligera sobrestimación del pico de gasto para todos los casos.

The initial relative saturation for these events was assessed from the same relation established in the calibration step with antecedent rain. A linear function was fitted between calibrated initial soil moisture and preceding rain. This linear function was directly used here.

RESULTS AND DISCUSSION

Model calibration results

The model calibration of the hydrological part was performed by changing K2 multipliers, basically K_s and Manning's roughness ($Mann_n$) parameters. A satisfactory calibration was obtained by doubling both parameters: 2 K_s and 2 $Mann_n$. Figure 3 shows observed and simulated hydrographs together with the rainfall rate areal average for the selected events. In all cases, simulations fit well the important hydrograph details like response time and time to flood peak. The response times after precipitation storms are notably different among the events, and all the simulations reacted in phase with the flow rate measurements. This particular property of the model, attending the spatial variability of the selected storms, makes one presume that the spatial distribution of the parameter set is also well calibrated.

The flood peaks are also well fitted by K2 simulations, with the exception of event 19 where simulated peak is 10% higher than observed. The observed hydrograph waves are wider than simulated ones. This is an expected behavior based on K2 concepts of: space discretization, mean flow length approximation and missing baseflow modeling; these same reasons are responsible for the underestimation of total volumes. The quantitative goodness of fit results is presented in Table 3. The mass balance error gives evidence of the deficits in simulated volumes. Based on the base time of the plots, the error in timing of the peak is small, only event 16 brings forward the peak by an hour (56 min). Nash-Sutcliffe (E) statistics is in most of the cases over 0.8, which is considered a good performance; these values are comparable with the fitting results obtained in a tropical region by Memarian *et al.* (2012). E statistics are mainly affected by the slightly overestimation of the runoff peak in all the cases.

TABLA 3. Medidas de bondad de ajuste
TABLE 3. Goodness of fit measurement

Goodness of fit	Event 6	Event 7	Event 8	Event 16	Event 19
PM _{peak}	-0.13	-0.01	0.05	-0.16	-0.11
Nash-Sutcliffe efficiency (E)	0.84	0.81	0.85	0.70	0.87
Mass Balance error (m)	-14.85	-11.81	-16.27	10.36	-15.54

Desafortunadamente, la disponibilidad de datos de sedimentos es limitada para esta calibración y solo dos (evento 6 y 7), de los cinco, presentan observaciones diarias. La cantidad de puntos es, por lo tanto, escasa para una correcta calibración, no obstante, el procedimiento es comentado para ejemplificar.

Unfortunately, sediment data availability is limited for this calibration and only two (event 6 and 7) of the five events used in the hydrological improvements have daily sediment records. This yields insufficient points for a proper calibration; nevertheless, the procedure is commented here for exemplification.

La pérdida de sedimento fue calibrada cambiando los multiplicadores de C_g , parámetro que resulta más sensible que C_f . El mejor ajuste fue obtenido con un multiplicador de 0.001 C_g . La figura 4a muestra la comparación entre la pérdida total diaria observada y simulada. La respuesta del evento 6 dura 32 horas, desde 14/05/1990-0:05 hasta 15/05/1990-8:00, y el evento 7 – 27,5 horas (04/12/1990-20:30 - 05/12/1990-24:00). Considerando la influencia de la respuesta durante el día, el primero día para el evento 6 y el segundo para el 7 son los mejores para la comparación establecida. Estos puntos aparecen circulados en la Figura 4a. En el gráfico es notable el buen ajuste del evento 6 y la sobrestimación del 7. No obstante, en ambos casos, la simulación tiene el mismo orden de magnitud que las observaciones, lo cual se considera un buen resultado cuando se estiman sedimentos.

The sediment yield was calibrated by changing the C_g multiplier, which is more sensible than the C_f . The best fit was achieved with a multiplier of 0.001 C_g . Figure 4a shows the comparison between simulated and observed daily totals sediment yield during the event response. The response of event 6 lasts for 32 hours, from 14/05/1990-0:05 until 15/05/1990-8:00, and event 7 lasts for 27.5 hours from 04/12/1990-20:30 to 05/12/1990-24:00. Considering the influence of the event response during the 24 hours, the first day for event 6 and the second day for event 7 are the best daily values for the established comparison with the observations. The point representation of these values was circled in Figure 4a. By looking at the graph, it is notable the good fit of event 6 and the overestimation of event 7. Nevertheless, in the two cases the simulation is in the same order of magnitude which is presumably a good result when fitting.

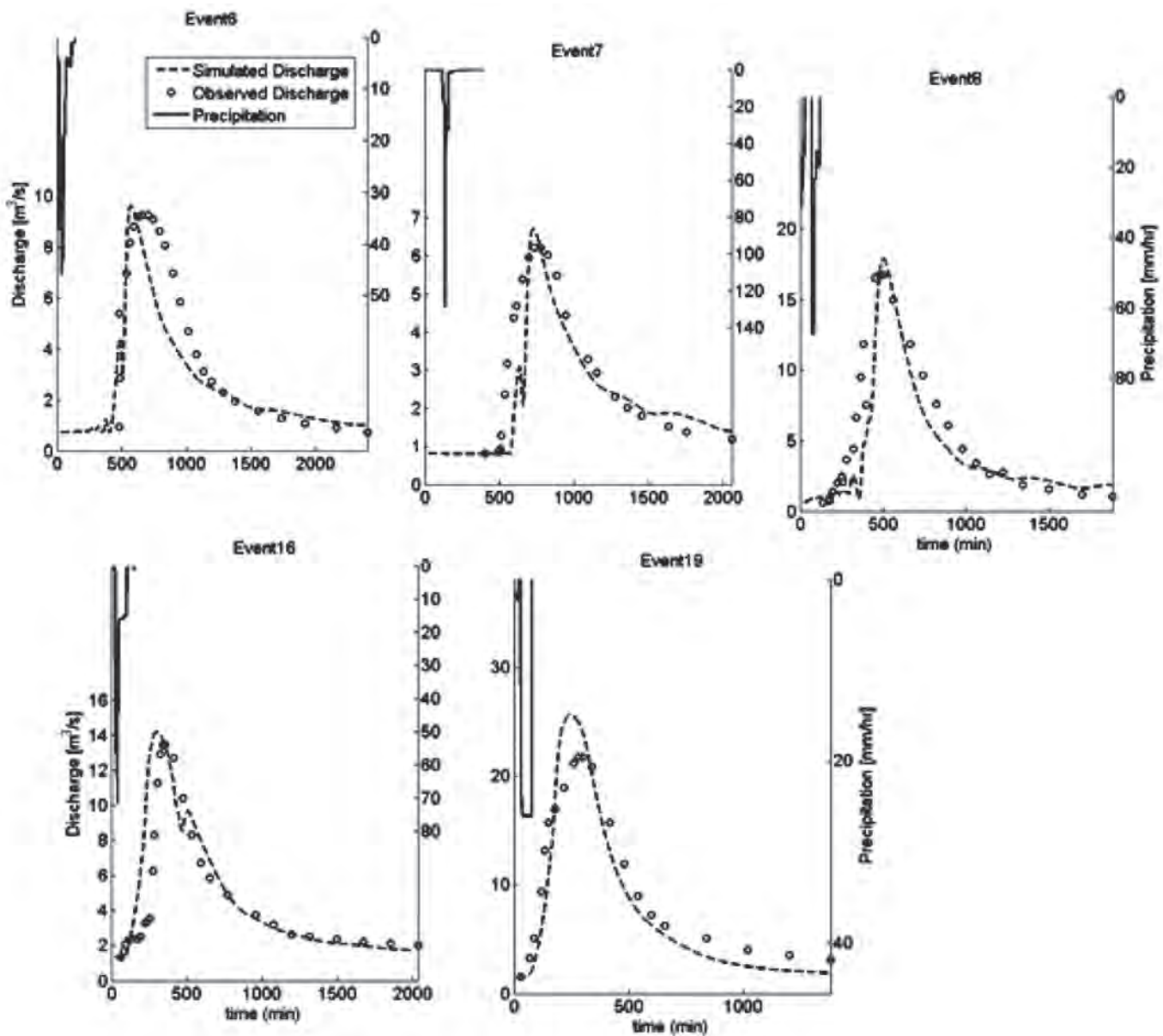


FIGURA 3. Eventos usados en calibración. Intensidad de lluvia e hidrogramas simulados y observados.
 FIGURE 3. Hydrographs used in K2 parameters calibration. Plots show the rainfall rate, and observed and simulated discharge.

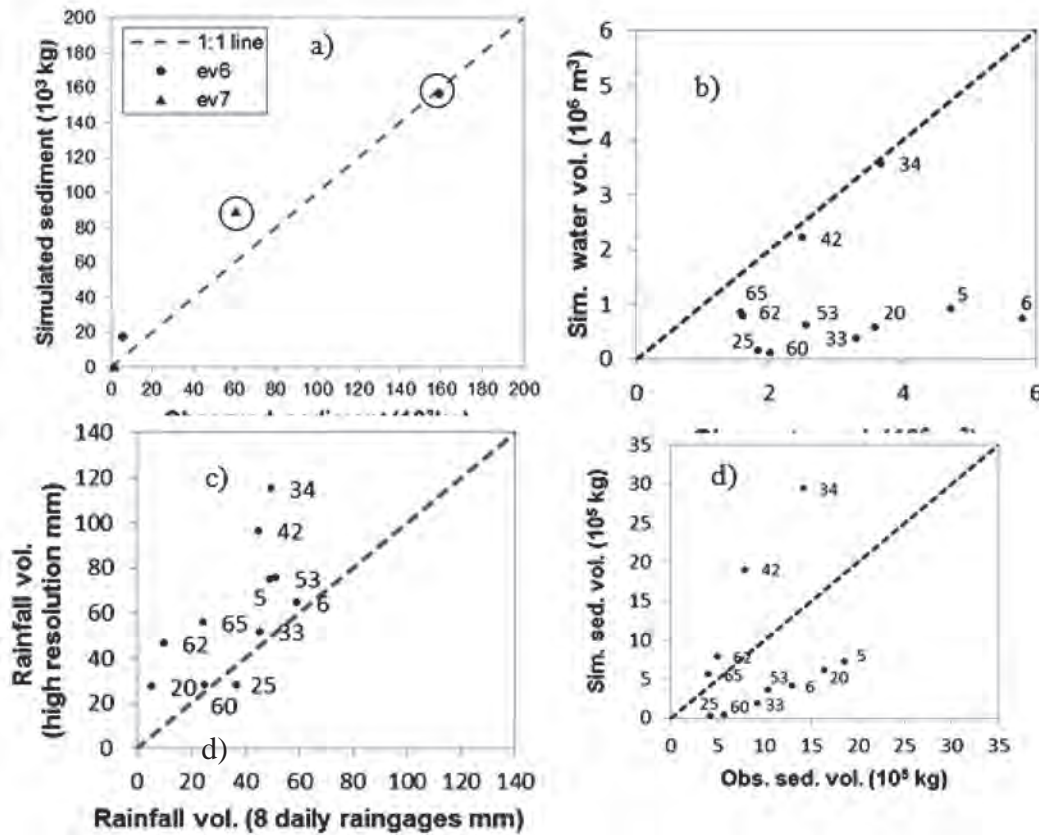


FIGURA 4a). Calibración de pérdida de sedimentos. Gráfico de volumen simulado vs observado b) de escurrimiento y c) de sedimentos. d) Relación entre totales de lluvia obtenidos con K2 y promediados a partir de las 8 estaciones.
 FIGURE 4a). Sediment yield calibration. Simulated and observed daily b) water and c) sediment volumes comparison. d) Relationship between event basin average rainfall volumes obtained with K2 and mean value of daily rainages network.

Resultados validación para extremos

Los 11 eventos extremos, de acuerdo al criterio de probabilidad de excedencia del 5%, fueron corridos en K2. La figure 4b y c muestra la comparación entre volúmenes diarios simulados y observados. Los valores ploteados corresponden al mejor día para la comparación (segundo día después de evento de precipitación) en términos de la influencia de la respuesta durante las 24 horas. Como estos son eventos extremos de lluvia, producen avenidas que se prolongan durante todo el segundo día.

El modelo se comporta como esperado para la mayoría de los eventos: 5, 6, 20, 25, 33, 56 and 60. La distribución de estos puntos muestra un correcto incremento de la subestimación como función de la intensidad del evento. Este patrón es observado en ambos gráficos (Figuras 4b y c), sin embargo la pendiente de la distribución es mayor en el gráfico de sedimentos, lo que indica menos subestimación. Esto está relacionado al hecho que el arrastre de sedimentos es menos afectado por el flujo subsuperficial. El flujo subsuperficial contribuye al transporte de partículas solo en canales. Adicionalmente, merece advertir que el ajuste de la condición inicial de humedad, establecida en calibración, ligeras diferencias en el resultado.

Por otra parte, los eventos 34, 42, 60 y 62 resultaron en simulaciones inesperadas, cerca de la línea 1:1 en el gráfico de escurrimiento y sobrestimando el volumen de sedimento arrastrado. Considerando un posible error inducido por la in-

Results of model validation for rare events

The eleven extreme storms, corresponding to daily discharges with an exceedance probability of 5%, were run in K2. Fig. 4b and 4c shows the simulated and observed daily volumes comparison. Here, plotted values correspond to the best comparable day (second day after precipitation event) in terms of discharge response influence during the day. As these events correspond to extreme precipitation storms, their produced flow rate waves last mostly the whole second day.

In spite of the small degree of freedom related to a possible fine-turning of the initial water content parameter, the model behaves as expected for the majority of the events: 5, 6, 20, 25, 33, 56 and 60. The distribution of these points shows a right underestimation increment with the event intensity. This pattern is observed in both graphs (Fig. 4b and 4c); nevertheless, the slope of the distribution is higher in the sediment plot, indicating less underestimation. The latter is related to the fact that sediment load is less affected by the absence of sub-surface flow, which does not contribute to upland erosion. Sub-surface flow will contribute only to erosion and particles transport in the channels. Additionally, it is worth saying that the adjustment of the initial moisture conditions, which was established from the empirical relationship (limited sample) found in calibration, could yield slightly different results.

On the other hand, events 34, 42, 60 and 62 are unexpected model outputs, close to line 1:1 in flow volume and over-predicting

terpolación especial de la lluvia en estos eventos, se estableció la comparación que se explica a continuación. Las series de intensidad de lluvia introducidas en K2 son medidas en solo 2 estaciones en toda la subcuenca. La interpolación que genera el modelo puede entonces sub o sobrestimar el volumen real de la precipitación. Para comprobar este argumento, los volúmenes obtenidos con K2 fueron comparados con la mediana de las 8 estaciones de lluvia diaria, (Figura 4d). Los valores diarios se sumaron cuando el evento se prolongó a más de un día. En el gráfico puede observarse que existe una sobreestimación en algunos eventos, y que esta es más marcada en los eventos 34, 42, 60, y 62. Este comportamiento es también directamente relacionada con las desviaciones del escurrimiento y la pérdida de sedimentos encontrados en la Figuras 4b y c.

Análisis de extremos

La distribución de máximos anuales de precipitación diaria para la subcuenca se ajusta a una función Fréchet, también conocida como EV- tipo II, con los siguientes parámetros: localización $\mu = 72,67$, escale $\sigma = 38,16$, y forma positiva $\xi = 0,38$. La función es mostrada en un diagrama Gumbel en la Figura 5. A través de esta función se puede obtener la magnitud de la precipitación diaria que es excedida en promedio una vez en T años y vice-versa. Por ejemplo, los valores correspondiente a 5, 10, 20, 50 y 100 años de periodo de retorno son: 150,2; 209,5; 285,1; 419,9 y 558,0 mm respectivamente. El periodo de retorno de 50 años, ejemplo simulado en este trabajo, es también mostrado en la Figura 5.

the sediment volume. Considering a possible mismatch of input rainfall data for these events, the following comparison was established. High resolution rainfall series introduced in K2 are measured at two raingages, which is a low spatial density for the basin area. The rainfall interpolation generated in K2 can yield to over or underestimation of the actual spatial precipitation pattern. The total rainfall volume obtained with K2 (areal average) was then compared with the average of daily rainfall values measured at the raingage network with eight stations, see Figure 4d. The daily values were summed when the precipitation event was longer than one day. In this plot it can be noted that there is overcatch in some events, and it is more marked in the events 34, 42, 60, and 62. The overcatching behavior in these storms is linearly related to the water and sediment deviations found in Figure 4b and 4c.

Extreme value analysis

Annual maximum distribution of daily precipitation for the V Aniversario watershed is best fitted by the Fréchet function, also known as the EV- type II function, with the following parameters: location $\mu = 72.67$, scale $\sigma = 38.16$, and positive shape $\xi = 0.38$. The quantile function is shown together with the Gumbel diagram in the Figure 5. By means of this function, it is possible to obtain magnitude of daily precipitation that is exceeded on average once in T years in the watershed and vice-versa. For instance, return levels for 5, 10, 20, 50 and 100 year return periods are: 150.2, 209.5, 285.1, 419.9 and 558.0 mm, respectively. The 50-year return period, example simulated hereafter in this work, is also shown in the Figure 5.

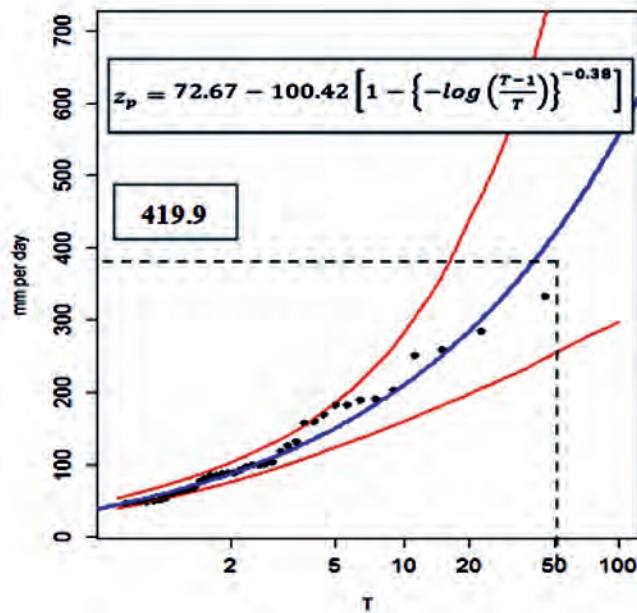


FIGURA 5. Diagrama Gumbel con máximos de precipitación diaria, función EV ajustada y CI de 90%.
 FIGURE 5. Gumbel diagram with daily rainfall block maxima and fitted and 90% confidence bands GEV.

Desagregación estocástica de lluvia

La lluvia diaria con periodo de retorno de 50 años obtenida según la función EV fue desagregada con un modelo micro-canónico de cascada aleatoria, explicado en Parte I (Alonso, 2016). Para encontrar la distribución de pesos de

Stochastic rainfall disaggregation

The 50-year return value of daily precipitation obtained from the fitted GEV was disaggregated by means of a microcanonical random cascade model, explained in Part I (Alonso, 2016). Seventeen events (closest observations to 50-year value) were used to find the weight

ambos, la parte intermitente y no intermitente, se usaron los 17 eventos extremos más cercanos al periodo de retorno de 50 años. La Figura 6 ilustra la distribución empírica de los pesos obtenidos en la agregación de los 17 eventos. Como se puede observar en el histograma, la frecuencia de los pesos no se ajusta bien a una distribución Beta simétrica. Esto es, presumiblemente, un resultado de los pocos pares de agregación en el análisis debido a la baja probabilidad de ocurrencia de estos eventos. No obstante, la función Beta se asumirá como la función convergente de este proceso y, por consiguiente, de ella se extraerán los coeficientes aleatoriamente. El pico notable en el peso 0,5 es resultado de la interpolación lineal usada para obtener series uniformes con 10 min de intervalo. La influencia de este error disminuye a medida que el nivel de agregación aumenta.

La Figura 6b muestra la probabilidad de intermitencia de la lluvia a las diferentes escalas y la función lineal ajustada en espacio logarítmico. Esta función fue usada para indicar la probabilidad $P(0,W)$ de estar en un caso intermitente para cada en el momento de la desagregación. $P(0,W)$ incluye la suma de la probabilidad subdivisión izquierda y derecha. En el momento de la generación estocástica, estos dos casos tienen la misma probabilidad de ocurrir. Observando este gráfico, se puede notar la alta dependencia con la escala de la intermitencia de extremos. La probabilidad de ser 0 uno de los dos intervalos siguientes varía desde 64% en el nivel $n = 0$ (día) hasta 15% en $n = 6$. El último nivel desagregado en este estudio, $n = 4$, presenta una $P(0,W) = 20\%$.

distributions of both the non-intermittency and the intermittency part. Figure 6a illustrates the empirical distribution of the weights obtained with the aggregation of the seventeen events. As can be observed in the histogram, the weight frequencies did not fit well a symmetric Beta distribution. This is presumed to be a result of the few aggregation data pairs used in the analysis due to the low probability of occurrence of extremes. Nevertheless, the Beta function will be assumed as the long term convergence distribution of and, therefore, random coefficients were extracted from it. The notable peak observed in the weight 0.5 is a result of the linear interpolation used to obtain uniform 10 min interval rainfall series. This interpolation was implemented to convert the non-uniform high resolution rainfall records into same time-interval series. The influence of this obligatory artifact decreases as the levels increase.

Figure 6b shows the probability of rainfall intermittency at different timescales and the fitted linear function in log-space. This function was used to indicate the probability $P(0,W)$ of being in an intermittency case per each timescale at the moment of disaggregation. $P(0,W)$ includes the sum of right and left chance to be 0. At the moment of the stochastic generation, when intermittency appears, it was assumed that each of these cases has the same probability of occurrence. By looking at this plot, it is possible to see the high scale dependence of extreme intermittency. The likelihood of being 0 one (right or left) of the next two intervals when disaggregating varies from 64% at level $n = 0$ (daily level) to 15% at $n = 6$. The last level disaggregated in this study, $n = 4$, presents a $P(0,W) = 20\%$. The high probability of intermittency throughout all the scales indicates on average high rainfall concentrations. Taking into consideration that such an amount of rain precipitates most probably in a short period of time, it is possible to get an insight of the intensity of discharge and sediment responses coming out from it.

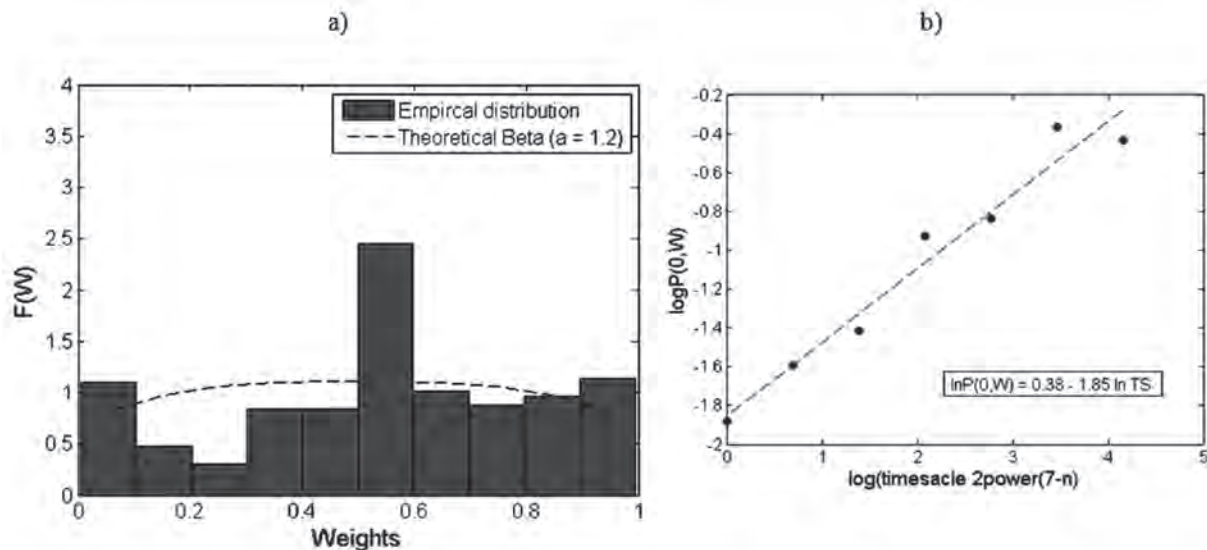


FIGURA 6. Distribución de pesos, a) funciones: empírica de pesos y Beta ajustada y b) funciones: empírica de intermitencia y lineal ajustada en espacio logarítmico.

FIGURE 6. Weights distributions, a) non-intermittency empirical and theoretical Beta function and b) empirical and fitted linear function in log-space of the intermittency of rain.

En la Tabla 4 se muestra un resumen comparativo de las principales características de distribución diaria de las precipitaciones, observadas y simuladas. Según estos valores, el modelo de desagregación reproduce bien los elementos de la distribución de la lluvia observada durante el día. No obstante, el

A quantitative comparison of daily distribution characteristics between observed and stochastically generated data is summarized in Table 4. The main characteristics of the storm distribution during the day are well reproduced by the disaggregating model. Nevertheless, the model

modelo sobrestima el número de sub-eventos y por consiguiente la duración total del evento. Esto puede estar influenciado por la poca cantidad de generaciones estocásticas usadas para el análisis (20 en lugar de más de 100). Las características promedio de las observaciones serán mayor reproducidas según sea mayor el número de realizaciones.

overestimates the number of sub-events and therefore the total event duration. This can be influenced by the few stochastic generations taken into consideration in the analysis (20 instead of more than 100). The average characteristics of the observations will be better reproduced as bigger is the model realization sample.

Tabla 4. Comparación de las características de distribución diaria entre las generaciones del modelo y los datos observados. (meanstd)

TABLE 4. Comparison of daily distribution characteristics between the model generations and observed data. (meanstd)

	Dry periods		Sub-event		Event duration		Sub-event duration	
	-		-		hr		hr	
Generation	2.95	0.94	2.35	1.23	4.8	3.1	2.4	1.9
Observation	3.00	1.37	2	1.22	4.5	2.5	2.4	1.2

Predicción probabilística

La Tabla 5 resume las estadísticas de la distribución para dos condiciones iniciales de humedad (SI). EL valor más probable del pico de avenida es 1683 m³ s⁻¹ y 1790 m³ s⁻¹; para SI = 0,2 y SI = 0,5; respectivamente. En el mejor caso (mínimo probable), para las condiciones de humedad del suelo secas y húmedas respectivamente, el pico de avenida es 936 m³ s⁻¹ y 995,1 m³ s⁻¹, y en el peor caso (máximo probable) 2757 m³ s⁻¹ y 2854 m³ s⁻¹. El pico de sedimentos es menos variable que el de escurrimiento para las distintas simulaciones del modelo. El pico de sedimentos para un evento de 50-años de retorno será con mayor probabilidad 1213 kg s⁻¹ para las condiciones iniciales secas y 1327 kg s⁻¹ para condiciones húmedas. En el caso donde la distribución del evento favorecerá menos la erosión, el pico estará alrededor de 470 kg s⁻¹ y en el peor caso 500 kg s⁻¹.

Probabilistic prediction

Table 5 summarizes the distribution statistics of the predictions for two different initial moisture (SI) conditions. The expected value of peak discharge is 1683 m³ s⁻¹ and 1790 m³ s⁻¹, for SI equal to 0.2 and 0.5, respectively. In the best case (minimum), for dry and wet soil moisture conditions respectively, the peak discharge is 936 m³ s⁻¹ and 995.1 m³ s⁻¹, and in the worst case (maximum) 2757 m³ s⁻¹ and 2854 m³ s⁻¹. Sediment peaks appear less variable in relation to the discharge peaks, having a lower coefficient of variation Cv. The sediment peak response from a 50-year return storm is going to be most probably around 1213 kg s⁻¹ for initial dry conditions and 1327 kg s⁻¹ for previous wet conditions. In the case that a storm distribution less favors the erosion, the sediment peak will be around 470 kg s⁻¹ less than the averages mentioned before and in the worst case, 500 kg s⁻¹ more than the averages.

TABLA 5. Estadísticas de distribución de picos de escurrimiento y sedimentos
TABLE 5. Discharge and sediment peak distribution statistics

	SI 0.2	mean	var	std	Qrt.1	Qrt.3	min	max	Cv	skew
Discharge Peak (m ³ /s)		1683.5	194194.8	440.7	1314.7	1969.4	936.0	2757.2	0.26	0.29
Sediment Peak (kg/s)		1213.5	81516.7	285.5	980.3	1392.0	740.7	1726.7	0.24	0.01
	SI 0.5									
Discharge Peak (m ³ /s)		1790.0	207445.5	455.5	1375.2	2069.8	995.1	2854.9	0.25	0.13
Sediment Peak (kg/s)		1327.0	94468.4	307.4	1093.9	1523.2	853.4	1906.7	0.23	0.04

CONCLUSIONES

- La metodología ajusta la predicción probabilística de la respuesta hidrológica y de transporte de para eventos extremos. Después de la calibración manual, K2 muestra buen desempeño modelando el proceso de lluvia-escurrimiento, incluso para un rango amplio de eventos en términos de intensidad de lluvia y acumulados, y variabilidad espacial. El modelo fue capaz de ajustar bien importantes detalles del hidrograma, por ejemplo, el tiempo de respuesta y el tiempo al pico de avenida. La pérdida de sedimentos fue calibrada cambiando el parámetro más sensible, Cg. La limitación de datos afectó la validación del modelo, no obstante, con la comparación de totales diarios se puede concluir que el modelo se comporta como esperado para la mayoría de los eventos. El comportamiento inesperado para unos pocos

CONCLUSIONS

- The methodology fits the probability prediction of discharges and sediment transport for extreme events. After a trial and error calibration procedure, K2 shows good performance in modeling the rainfall-runoff process, even for a wide range of events in terms of rainfall intensity and amount, and spatial variability. The model was able to fit well important hydrograph details like response time and time to flood peak, and in general all event timing. The sediment yield was calibrated by playing with the most sensible parameter Cg. The limitation of data affect the model validation, nevertheless, using daily totals comparison, it can be concluded that it behaves as expected for the majority of events. The unexpected behavior of some events was successfully

eventos fue exitosamente explicado por un error de medición espacial de la lluvia.

- Por otra parte, las precipitaciones extremas en la región están caracterizadas por la distribución de probabilidades teóricas Fréchet. Los eventos de lluvia generados sintéticamente, a través de modelo de cascada estocástico, tienen una distribución similar a los observados dentro de las 24 horas. Esta generación estocástica incluye la incertidumbre relacionada a la distribución temporal del evento y permite predecir un rango de posibles ocurrencias. Por ejemplo, el pico de avenida y sedimentos correspondiente a un periodo de retorno de 50- años será con mayor probabilidad $1683 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $1790 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y 1213 kg s^{-1} y 1327 kg s^{-1} , para condiciones iniciales secas y húmedas, respectivamente. Los picos aparecen en promedio 10 horas después de comenzada la respuesta de la subcuenca, 3 h en el caso más rápido y 20 h para el mayor retraso posible. Estas variables intensivas no son afectadas considerablemente las condiciones iniciales de humedad.
- En este estudio, K2 fue calibrado y validado con el objetivo de analizar la respuesta hidrológica en la salida de la subcuenca. No obstante, K2 también ofrece simulación para cada elemento del modelo, tanto planos como canales. Esta posibilidad permite caracterizar patrones espaciales de las variables modeladas pero para ello se debe ejecutar una validación a diferentes escalas.

explained by a raingage overcatching problem rather than a model mismatch.

- On the other hand, the extreme precipitations in the region are mainly characterized by the Fréchet theoretical probability distribution. The synthetic rainstorms generated by means of the stochastic cascade model have similar 24-hour distributions compared with observations. This step deals with the uncertainty related to rainfall distribution and allows the prediction of a range of possible occurrences instead of one deterministic basin response. For instance, the discharge and sediment response peaks for the 50-year return event is expected to be more probably $1683 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and $1790 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, and 1213 kg s^{-1} and 1327 kg s^{-1} , for dry and wet initial moisture conditions respectively, and the delay of peaks appear on average 10 hr after the response starts, with the fastest possible response in 3 hr and the longest delay in 20 hr. These variables are not really affected by the initial moisture conditions.
- In this study, K2 was calibrated and roughly validated in order to analyze the hydrological response at a basin scale. Nevertheless, K2 also offers simulation results per each model element, both planes and channels. This allows characterizing the spatial pattern of modeled variables but indeed, a proper use of this option might first need some validation at different scales.

REFERENCIAS / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, B.G.R.: "Predicción probabilística del escurrimiento superficial y la pérdida de sedimento para eventos extremos. Parte I: Metodología", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3): 31-42, septiembre de 2016, ISSN: 2071-0054, DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.36800.94727>
- BROOKS, R.H.; COREY, A.T.: *Hydraulic properties of porous media*, ser. Hydrology papers, no. ser. 3, Ed. Colorado State University, Fort Collins, 27 p., 1964.
- FOSTER, G.R.; MEYER, L.D.; ONSTAD, C.A.: "A Runoff Erosivity Factor and Variable Slope Length Exponents for Soil Loss Estimates", *Transactions of the ASAE*, 20(4): 0683-0687, 1977, ISSN: 2151-0059, DOI: 10.13031/2013.35628.
- MCCOOL, D.K.; FOSTER, G.R.; MUTCHLER, C.K.; MEYER, L.D.: "Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation", *Transactions of the ASAE*, 32(5): 1571-1576, 1989, ISSN: 2151-0059, DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.31192>
- MEMARIAN, H.; BALASUNDRAM, S.K.; TALIB, J.; SUNG, C.T.B.; SOOD, A.M.; ABBASPOUR, K.C.; HAGHIZADEH, A.: "Hydrologic analysis of a tropical watershed using KINEROS2", *EnvironmentAsia*, 5(1): 84, 2012, ISSN: 1906-1714.
- MOREL-SEYTOUX, H.J.; MEYER, P.D.; NACHABE, M.; TOURNA, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.; LENHARD, R.J.: "Parameter Equivalence for the Brooks-Corey and Van Genuchten Soil Characteristics: Preserving the Effective Capillary Drive", *Water Resources Research*, 32(5): 1251-1258, 1996, ISSN: 0043-1397, DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/96WR00069>
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D.: *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning, [en línea]*, ser. Agriculture handbook (United States. Department of Agriculture), no. ser. 537, Ed. U.S. Dept. of Agriculture, Science and Education Administration, Washington, D.C., 67 p., 1978, Disponible en: <http://purl.fdlp.gov/GPO/gpo31516>, [Consulta: 3 de noviembre de 2016].

Received: 27/12/2015.

Approved: 08/07/2016.

Gustavo Reinel Alonso-Brito, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Grupo de Investigaciones Agro-físicas, San José de las Lajas, Mayabeque. Cuba. Correo electrónico: gustavo@unah.edu.cu