

MAPAS DE INFLUENCIA DEL NÚCLEO DE TORMENTA SOBRE EL CAUDAL Y TIEMPO PICO: CASO CUENCA DEL RÍO DE LA SUELA

Weber, Juan F., Stehli, Pablo T.

Laboratorio de Hidráulica – Dpto. de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba Universidad Tecnológica Nacional. Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina, jweber@civil.frc.utn.edu.ar - 51485@civil.frc.utn.edu.ar, <http://www.frc.utn.edu.ar>

Resumen. Se presenta la aplicación del modelo hidrológico distribuido TREX, para obtención de la variabilidad en la respuesta de la cuenca del río La Suela (pcia. de Córdoba) para distintas posiciones del núcleo de la tormenta. Este tipo de resultados sólo son viables en modelos distribuidos como TREX, ya que los modelos agregados (de uso general en la aplicación ingenieril) no pueden considerar la variabilidad espacial, tanto de las propiedades de la cuenca como de la propia tormenta.

La cuenca del río La Suela se encuentra ubicada totalmente en la provincia de Córdoba. Tiene una superficie de 131,8 km² comprendida entre los 900 y los 2200 msnm. La cuenca está localizada en el núcleo central de las Sierras Pampeanas. Hidrográficamente el río de La Suela es tributario del Anizacate, afluente a su vez del Xanaes o Río Segundo. Se utilizó una clasificación de los tipos de suelo de la cuenca según el origen de los materiales de superficie: rocas graníticas, metamórficas o sedimentos aluvionales. Desde el punto de vista del uso del suelo, se clasificó en 5 tipos, según la especie y porcentaje de la cobertura vegetal.

Los procesos hidrológicos considerados por el modelo incluyen la precipitación, interceptación, infiltración, almacenamiento en depresiones, flujo terrestre hortoniano y el flujo en los canales. Las pérdidas por interceptación se restan de la precipitación para determinar la precipitación neta que llega a la superficie de la tierra. La infiltración es simulada con las relaciones de Green y Ampt. El flujo superficial se rige por la ecuación de conservación de masa y de momento (St. Venant - onda difusiva) en dos dimensiones. El flujo en los cauces también se rige por la misma ecuación, pero en una dimensión. La cuenca se discretiza en una malla regular de pixeles, de 90 x 90 m. Los parámetros del modelo fueron los ajustados en base a información histórica de precipitaciones y caudales, en trabajos previos.

La tormenta hipotética tuvo las siguientes características: una duración de 3 horas, una lámina total de 50 mm distribuida según un diagrama trapecial, un abatimiento areal dado por el modelo CoDA (Caamaño y Dasso, 2003) según un patrón circular. El centro de este patrón o núcleo de tormenta fue sistemáticamente posicionado en cada uno de los 17844 pixeles que constituyen la cuenca; obteniéndose, y asociándose a dicho pixel, el caudal pico Q_p y el tiempo de ocurrencia del pico t_p del hidrograma de crecidas resultante. Esto genera dos mapas, denominados “mapas de influencia” del núcleo de tormenta sobre Q_p y t_p .

Del análisis de estos mapas se concluye que existe una región central de la cuenca que maximiza la respuesta de la misma en términos de la magnitud del caudal pico (alcanzando su máximo absoluto en el sector NNW), disminuyendo esta respuesta en las zonas más cercanas o más alejadas a la sección de cierre; en tanto que en relación al tiempo de ocurrencia del pico, la respuesta más rápida se obtiene con núcleos de tormenta cercanos a dicha sección. Los resultados de este trabajo pueden replicarse en otras cuencas de la zona, lo que permitiría eventualmente detectar comportamientos similares regionalmente escalables.

INTRODUCCIÓN

Un modelo hidrológico, en términos generales, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. Los modelos pueden ser físicos, donde se representan a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta de la unidad hidrológica bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas.

La modelación hidrológica comienza a principios del siglo XIX utilizándose para el diseño de canales, redes de drenaje, presas, puentes, diques y sistemas de distribución de agua. Hasta mediados del siglo XX, la modelación hidrológica se limitó a tratar de explicar mediante expresiones matemáticas simples, los mecanismos individuales involucrados en los principales procesos del ciclo hidrológico. Entre ellos se pueden nombrar: el método racional, la curva de infiltración de Horton, los trabajos de Thornthwaite y Pennman para la estimación de la evapotranspiración, etc.

En la década de los 60, con el advenimiento de la revolución digital, se realizó el primer intento por representar casi en su totalidad al ciclo hidrológico en una cuenca. Surge así el Stanford Watershed Model-SWM de Crawford y Linsley en 1966 (Singh, 1996). Sin embargo, las máquinas disponibles eran caras y muy lentas respecto a los estándares actuales, por lo tanto los programas eran limitados en tamaño y complejidad (Beven, 2001). Como consecuencia, la modelación hidrológica fue planteada principalmente en forma agregada (Vieux, 2004). La aparición de computadoras más potentes, la mayor disponibilidad de datos distribuidos arealmente provenientes de sensores remotos y las herramientas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han permitido el desarrollo de modelos distribuidos que consideran explícitamente la variabilidad espacial y temporal tanto en las entradas del sistema (precipitación) como de los resultados (contenido de humedad, altura de almacenamiento de agua, infiltración, etc.).

Motivación

La caracterización de las lluvias de diseño involucra un conjunto de rasgos de índole diversa, algunos de los cuales se traducen en variables concretas interrelacionadas (Caamaño y Dasso, 2003). Entre estos rasgos o componentes se pueden citar: magnitud, persistencia, probabilidad, ubicación, distribución, y atenuación. Esta última se define como la reducción de lluvia local a escala de cuenca, para predecir descargas. La disminución del valor de la lámina precipitada depende del área de la cuenca, A , y de la duración de la lluvia. La forma usual de representarla es mediante curvas h-d-A. En lugar de la altura de lámina, se utiliza a veces el coeficiente de reducción areal. Estas funciones son propias de cada región y están afectadas en especial por su topografía, razón por la cual no es recomendable su transposición (Caamaño y Dasso, 2003).

El coeficiente de reducción areal CDA es un número comprendido entre 0 y 1 (para cuencas de superficie infinita y menores o iguales a 25 km², respectivamente) que tiene en cuenta, para su determinación, la posición de la estación núcleo en relación a la topología de la cuenca, en un sentido unívoco: para una determinada posición y lámina de la estación núcleo, y asumido algún valor del CDA , la precipitación media de la cuenca es única. La relación no es unívoca en sentido inverso, esto es, es posible obtener la misma precipitación media en la cuenca para infinitas posiciones de la estación núcleo, ajustando el valor puntual en la misma.

Un modelo hidrológico agregado produciría, en todos estos casos, el *mismo* hidrograma de crecidas. La versatilidad de un modelo hidrológico distribuido, que le permite considerar la geomorfología de la cuenca (representada por su red de drenaje), la variabilidad espacial de las propiedades del terreno (resistencia al flujo, capacidad de infiltración), y la distribución espacial de la precipitación, permitiría identificar la variabilidad en la respuesta hidrológica (hidrograma de

crecidas) de la cuenca, ante la misma precipitación media, e indirectamente, una estimación de los errores provenientes de la aplicación de modelos agregados.

LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se los entienda en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema. Un sistema es un conjunto de partes interconectadas entre sí que forman un todo (Chow et al., 1994). Desde este punto de vista, el ciclo hidrológico puede considerarse un todo compuesto por: agua atmosférica, agua superficial y aguas subterráneas, entre otros elementos. Este sistema global a la vez puede agrupar parte de sus elementos conformando subsistemas menores que faciliten su comprensión.

Un sistema hidrológico se define como: una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas. El objetivo del análisis de estos sistemas, es estudiar la operación del mismo y predecir su salida.

Clasificación de los modelos hidrológicos

Según Ponce (1994) los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes categorías: modelos físicos o materiales y modelos formales o matemáticos: estos últimos conciben el sistema por medio de un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objeto de simular la transformación de las entradas en salidas del sistema.

Seguando a Ponce (1994), en la práctica, pueden distinguirse cuatro tipos generales de modelos:

1. **Determinísticos:** son formulados siguiendo las leyes de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.
2. **Probabilísticos:** por el contrario, se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Pueden ser de dos tipos: estadísticos o estocásticos.
3. **Conceptuales:** son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.
4. **Paramétricos:** o también conocidos como empíricos o de caja negra. Son los más simples, consisten en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico.

Los fenómenos hidrológicos cambian en las tres dimensiones espaciales, pero tener en cuenta toda esta variación, puede hacer que los modelos sean muy complejos. De acuerdo a Chow et al. (1994), los modelos determinísticos y los conceptuales pueden clasificarse en:

1. **Modelos agregados:** el sistema es promediado en el espacio o considerado como un punto único sin dimensiones.
2. **Modelos distribuidos:** considera que los procesos hidrológicos ocurren en varios puntos del espacio y define las variables del modelo como funciones de las dimensiones espaciales.

De acuerdo a la escala temporal, los modelos hidrológicos pueden clasificarse en:

1. **Modelos de eventos aislados:** son de corto plazo, diseñados para simular en eventos individuales la transformación de la lluvia en escurrimiento.
2. **Modelos de procesos continuos:** toman en cuenta todos los componentes del escurrimiento, incluyendo flujos superficiales, subsuperficiales y subterráneos. El objetivo

de este tipo de modelos es tener en cuenta el balance de humedad a largo plazo de toda la cuenca.

3. Modelos de simulación mixta: intentan representar ambas escalas temporales en una forma computacionalmente económica y con un acuerdo razonable con la realidad.

Desde esta perspectiva, el modelo que se utilizará en este trabajo puede ser clasificado como un modelo matemático determinístico-conceptual, distribuido, de simulación de eventos.

EL MODELO TREX

TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model) es un modelo bidimensional de escurrimiento, erosión y transporte de sedimentos y contaminantes. Está basado en el modelo de cuencas CASC2D. Los procesos hidrológicos simulados son: precipitación e intercepción, infiltración y pérdidas por transmisión en el cauce, almacenamiento, flujo superficial y en canales y derretimiento de nieve (England et al, 2007; Velleux et al, 2008).

El ciclo hidrológico comienza con la precipitación (pluvial y/o nival), una fracción de la misma quedará retenida en la vegetación, la precipitación excedente está disponible para infiltrar o escurrir superficialmente. En este modelo se utiliza la relación de Green y Ampt para definir la infiltración en la superficie del terreno y en los cauces. Si la tasa de precipitación supera a la de infiltración, el agua se almacena en las depresiones del terreno hasta un determinado umbral que da comienzo al flujo superficial. Este flujo está gobernado por las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, TREX utiliza la aproximación de la onda difusiva unidimensional en cauces y bidimensional en la superficie de la cuenca, suponiendo que el flujo es turbulento y que la resistencia al flujo se puede describir utilizando la formulación de Manning (Stehli et al., 2012).

Para simular el proceso hidrológico, TREX plantea una solución numérica explícita de las ecuaciones de balance de masa mediante la segmentación de la cuenca en elementos cuadrados iguales, a los cuales se le asignan los parámetros relativos a las características de infiltración del suelo y coeficientes de rugosidad.

Este modelo es de código libre, está escrito en el lenguaje de programación C y está disponible en la página web de la Universidad Estatal de Colorado, tiene una fuerte base física en la conceptualización de los procesos superficiales, pero no considera los procesos subsuperficiales y subterráneos (Jorquera et al., 2012).

Procesos hidrológicos en TREX

Se describen someramente a continuación las ecuaciones que representan los procesos hidrológicos relevantes incluidos en el modelo TREX (Velleux et al., 2008).

Precipitación, intercepción y almacenamiento

El volumen bruto de precipitación (V_g) que llega a la superficie en función del tiempo, es igual a la intensidad de precipitación bruta (i_g) por el área de la región donde ocurre la precipitación (A_s). El volumen neto (V_n) resulta de descontarle al bruto el volumen interceptado (V_i). El balance se explicita en la ecuación 1.

$$\frac{\partial V_g}{\partial t} = i_g \cdot A_s \Rightarrow V_n = V_g - V_i \quad (1)$$

Según el volumen interceptado sea mayor o menor al volumen bruto, habrá o no volumen neto de agua sobre la superficie de la cuenca. En este cálculo no se realiza ningún descuento referido a volumen evapotranspirado, ya que es un modelo de eventos y se puede desprestigiar ese término. El volumen de precipitación neta también se puede expresar como una tasa de precipitación neta (efectiva):

$$i_n = \frac{1}{A_s} \frac{\partial V_n}{\partial t} \quad (2)$$

Infiltración

Para definir la infiltración de agua en la superficie de la cuenca como así también en los cauces que la forman, el modelo TREX utiliza las relaciones de Green y Ampt (1911, citado por Chow et al., 1994).

$$f = K_h \left(1 + \frac{\psi(1 - S_e)\theta_e}{F} \right) \quad (3)$$

donde K_h es la conductividad hidráulica, ψ es la altura de succión del frente de saturación (altura de succión capilar), S_e es el porcentaje de saturación efectiva del suelo, θ_e la porosidad efectiva del suelo, f la tasa de infiltración y F la altura de infiltración acumulada, vinculadas a través de:

$$f = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

lo cual da lugar a una relación no lineal resuelta a través de un método iterativo (Chow et al., 1994).

La aplicación del modelo de Green-Ampt, requiere la estimación de la conductividad hidráulica K_h , la porosidad η y la altura de succión del frente de mojado ψ . La variación de la altura de succión y de la conductividad hidráulica con la humedad puede expresarse en función de una saturación efectiva, S_e .

Flujo superficial

La fracción de precipitación no retenida ni infiltrada genera un flujo superficial, tanto mantiforme (bidimensional) como en canales (unidimensional). El flujo superficial puede ocurrir cuando la profundidad del agua en el plano terrestre supera el umbral de almacenamiento de la depresión. El flujo superficial se rige por la conservación de la masa (continuidad) y la conservación de cantidad de movimiento. Las ecuaciones de continuidad para el flujo en dos dimensiones gradualmente variado, sobre un plano rectangular en coordenadas (x, y) son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = i_n - f + W = i_e \quad (5)$$

donde h es la altura de flujo superficial, W es un término fuente/sumidero (descarga/aporte unitario puntual), i_n es la intensidad de precipitación neta (obtenida a partir de 1), i_e es la intensidad de precipitación en exceso, y q_x , q_y son los caudales unitarios en la dirección x o y. Suponiendo que el flujo es turbulento y la resistencia se puede describir utilizando la formulación de Manning (en unidades del SI), las relaciones de escurrimiento-profundidad son:

$$q_x = \frac{S_{fx}^{1/2} h^{5/3}}{n} \quad (6)$$

$$q_y = \frac{S_{fy}^{1/2} h^{5/3}}{n} \quad (7)$$

mientras que en el flujo superficial en canales (ríos y arroyos) se aplica una formulación equivalente pero unidimensional.

Cálculos en TREX

Para simular el conjunto de los procesos hidrológicos descritos, se deben asignar los valores para cada parámetro del modelo y deben ser resueltas las ecuaciones de balance de masa definidas en el marco del modelo determinístico-conceptual. Las ecuaciones de conservación de masa (7 y 12) son discretizadas en diferencias finitas, mientras que la integración numérica temporal se realiza con un esquema hacia adelante (Euler):

$$s_{i+1} = s_i + s'_i \Delta t \quad (8)$$

siendo $s|_{t+\Delta t}$ el valor de la variable del modelo en el tiempo $t + \Delta t$, $s|_t$ el valor de la variable del modelo en el tiempo t , $\partial s / \partial t|_t$ el valor de la derivada de la variable con respecto al tiempo en el tiempo t , y Δt el paso de tiempo para la integración numérica.

La solución numérica explícita se consigue mediante la segmentación de la cuenca hidrográfica entera en elementos cuadrados iguales, a los cuales se les asignan los distintos parámetros relativos del modelo. Como cada parámetro está definido, se supone que es uniforme en toda el área de la celda, este valor actual es asignado a un punto central nodal (figura 1).

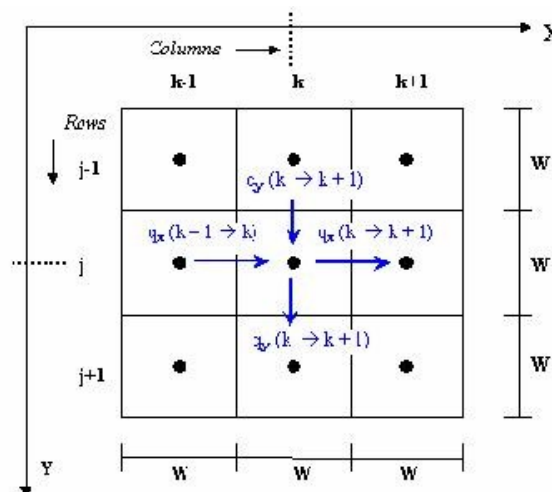


Figura 1: Discretización espacial en el modelo TREX

Datos y Parámetros a ingresar

TREX requiere un archivo de entrada principal que controla la mayoría de los aspectos de la simulación. Dentro de este archivo de entrada principal, las entradas se dividen en seis grupos de parámetros relacionados (Grupos de datos de A a F). Este archivo también especifica una serie de archivos de entrada auxiliares que se requieren para operar el modelo. Los archivos auxiliares de

entrada se utilizan para definir las características específicas de la simulación como los límites de la cuenca hidrográfica, la topografía, clases de suelos y uso de la tierra, etc.

La ventaja que posee TREX es que muchos de estos archivos auxiliares (como así también los archivos de resultados) pueden ser procesados y visualizados mediante un sistema de información geográfica (SIG), particularmente GRASS (Neteler y Mitasova, 2008), que tiene un nivel de integración muy alto con TREX a través de sus interfaces de lectura-escritura.

CUENCA EN ESTUDIO

La aplicación y calibración de modelos hidrológicos continuos requiere una calidad y densidad, tanto espacial como temporal, de datos de campo. En ese sentido, la cuenca del río de La Suela reúne dichos requisitos en su carácter de haber sido una de las ocho cuencas piloto representativas instaladas en distintas regiones como parte del Programa de Investigación sobre Cuencas Pilotos y Experimentales desarrollado en nuestro país a través de la UNESCO durante el Decenio Hidrológico Internacional (1960-1970) declarado por Naciones Unidas (Bustamante, 1978). El equipamiento instrumental y la medición sistemática de los procesos del ciclo hidrológico en estas cuencas, permitieron el desarrollo de metodologías con base científica y tecnológica en el área de la hidrología y los recursos hídricos. La alta densidad areal de su red histórica de estaciones de lluvia, de observaciones meteorológicas (temperatura, viento, humedad y otras variables) y de mediciones hidrológicas (niveles hidrométricos y caudales), hacen posible la implementación y experimentación de algoritmos que permitan simular, ya sea en forma total o parcial, los componentes y procesos del ciclo hidrológico. Los estudios específicos en aspectos climáticos, geológicos, geomorfológicos, de suelos, vegetación, infiltración, escurrimientos entre otros, brindan por su parte, antecedentes importantes para la modelación hidrológica (Weber et al., 2010).

Ubicación geográfica y aspectos fisiográficos

La cuenca del río de La Suela se encuentra ubicada totalmente en la provincia de Córdoba, al sur de la localidad de Villa Carlos Paz accediendo a ella por la Ruta Nacional 20 (Figura 2). Tiene una superficie de 131,8 km² comprendida entre los 900 y los 2200 metros sobre el nivel del mar. La cuenca está localizada en el núcleo central de las Sierras Pampeanas, entre los 31° 40' y 31° 30' de latitud sur y los 64° 30' y 64° 45' de longitud oeste, sobre el cordón de las Cumbres de Achala y sus estribaciones orientales. Hidrográficamente el río de La Suela es tributario del Anizacate, afluente a su vez del Xanaes o Río Segundo.

Geología y geomorfología

De acuerdo a un trabajo antecedente de Barbeito y von Müller (1981), los materiales de superficie de la Cuenca, corresponden a un basamento cristalino antiguo compuesto por: un 66 % de rocas graníticas y un 25 % de metamorfitas, correspondiendo el 9 % restante a sedimentos aluvionales modernos asentados en pequeños valles. Las fuerzas orogénicas que actuaron a lo largo de la evolución geológica de acuerdo a la rigidez de las rocas, resolvieron dos ambientes diferenciales: las cumbres propiamente dichas y sus estribaciones escalonadas. El primero, es producto de una intensa fracturación y posterior sobre elevación del basamento o zócalo que alcanzó los 2.200 m.s.n.m y el segundo, en respuesta a una tectónica menos intensa, adoptó una morfología escalonada con descenso hacia el este. Las cumbres de Achala en su conjunto, constituyen desde el punto de vista estructural, un Pilar Tectónico o "Horst", limitado por dos fallas transversales de rumbo meridional. Sobre estas, en el sector occidental de la Cuenca, comienza a organizarse el drenaje a través de un paisaje con predominio de formas abruptas, que evidencian un estado de juventud morfológica. Los interfluvios son angostos y de vertientes generalmente empinadas en

donde aflora con frecuencia la roca granítica. Las pendientes medias varían desde un 30 % hasta un 50 % en los sectores de mayor intensidad tectónica (Quebradas - Abruptos de Falla) y las formas planas son escasas y limitadas casi con exclusividad a las máximas altitudes.

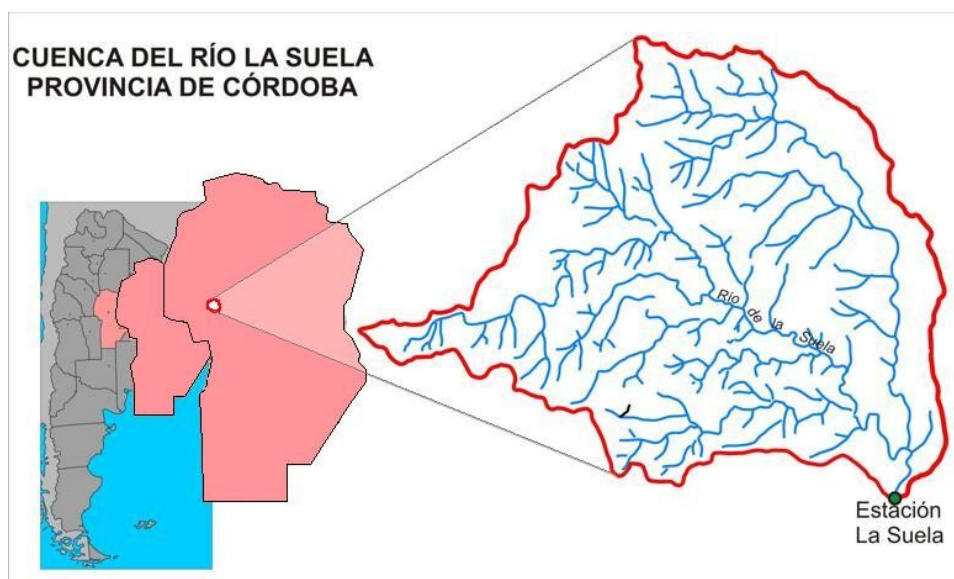


Figura 2: Ubicación geográfica cuenca del río de La Suela

Hacia el este, las estribaciones de la unidad estructural adquieren una fisonomía más suavizada. El paisaje aquí se representa por la abundancia de colinas convexas con gradientes medios entre 10 % y 15 %. Los interfluvios son más amplios y de laderas menos enérgicas en donde es mayor el asentamiento de suelos, disminuyendo por ende la rocosidad. La escasez de formas accidentadas limitadas a la acción erosiva lineal de los cursos de agua o a la tectónica, evidencia una cierta madurez morfológica. Estas dos grandes áreas geomorfológicas, influyen de acuerdo a sus medios físicos en las condiciones ecológicas con implicancia en la distribución de la vegetación.

Hidrografía e hidrología

La cuenca del río de La Suela constituye desde el punto de vista hidrográfico, la naciente norte de la cuenca imbrífera del río Segundo o Xanaes con desagüe en el sistema endorreico de la Laguna de Mar Chiquita o de Ansenúza. Dos subcuencas de carácter bien definidas que unen sus aportes a menos de 2 Km del cierre de la cuenca conforman el drenaje: la subcuenca del río de La Suela propiamente dicha que localiza sus nacientes en el Cordón de Achala a 2.200 m.s.n.m y la subcuenca del Arroyo de la Estancia, que lo hace a 1.500 m.s.n.m sobre las estribaciones de este, en la localidad de Copina.

La subcuenca La Suela (60 % del área) ubicada en el sector sudoeste de la cuenca, con nacimiento en el borde oriental de las Sierras Grandes. Su punto de mayor altitud se encuentra en las nacientes del arroyo del Carnero, uno de sus principales afluentes (Dasso, 1983). Se pueden nombrar varios arroyos perennes que aportan sus aguas a este tributario como: el arroyo del Carnero, el arroyo del Hinojo, el arroyo del Colgado, luego colecta las aguas del arroyo intermitente El Durazno y los últimos aportes los recibe del arroyo de Las Moras y el arroyo Puma Huasi. La subcuenca La Estancia es de menor altitud y respuestas más lentas (pendiente 2 %), está conformada por un arroyo de curso permanente: el arroyo San Bernardo que luego continúa como arroyo de La Estancia, y varios arroyos menores de escurrimientos intermitentes.

En la Figura 3 se muestra una imagen satelital con la delimitación de la cuenca y la red hidrográfica principal de ambas subcuencas. La longitud del río principal (Carnero – La Suela)

desde sus nacientes, hasta la estación de cierre es de 28,92 Km, con una pendiente media uniforme del 4 % alcanzando una pendiente máxima en el escalón tectónico del 13 %.

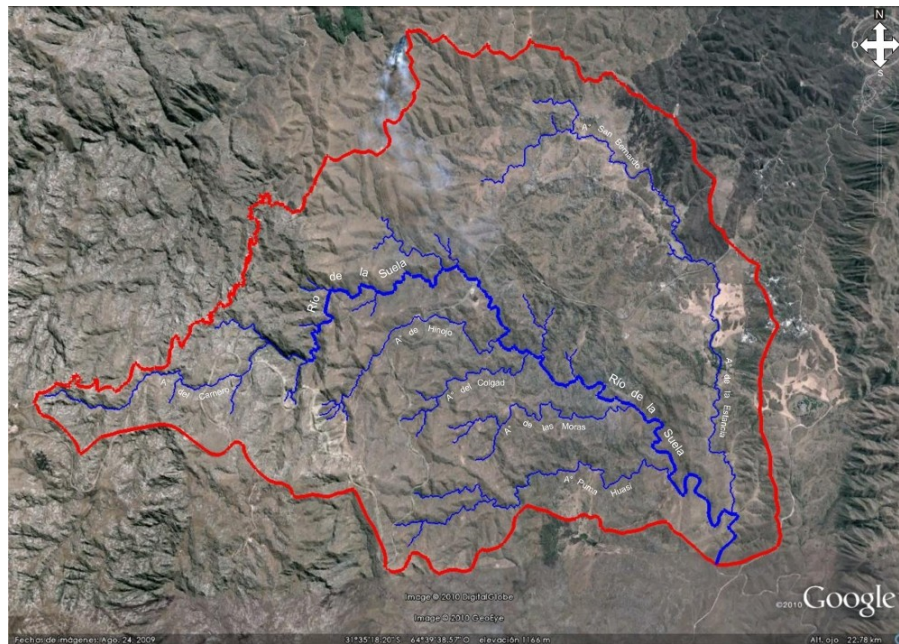


Figura 3: Imagen satelital de la cuenca del río de La Suela

Las crecidas en el río de La Suela presentan generalmente uno o más picos bien diferenciados, con tiempos de subida entre 15 y 30 minutos y de permanencia de 7 a 8 horas. El análisis de los hidrogramas evidencia el aporte de tiempos de retardo diferentes que incrementan el volumen y la permanencia de las crecidas (Caamaño y Dasso, 1990).

Tipos y uso del suelo

Se ajustan a las características de suelos azonales (litosólicos y regosólicos), cuya particularidad se traduce en la falta de horizontes definidos y a su reducido espesor. Derivan, de la alteración directa de la roca y su profundidad está supeditada a la posición topográfica que ocupen. En general, son suelos superficiales a muy superficiales, de buena permeabilidad, textura arenosa a franco arenosa y con regular cantidad de materia orgánica. Estas aptitudes permiten el paso de las raíces hasta el material originario, hecho que explica el por qué, de la presencia de ejemplares arbóreos donde hay suelos de poca profundidad (Barbeito y von Müller, 1981).

Un perfil típico con buen grado de desarrollo puede describirse con: un horizonte superficial (hasta aproximadamente 2 m) con restos orgánicos parcialmente descompuestos, uno o dos horizontes de colores oscuros de textura arenosa con abundantes raicillas en la parte superior y gravas y cantos de roca parcialmente alterada asentados sobre la roca madre granítica o basamento.

Los suelos de la cuenca del río de La Suela, ubicada íntegramente en el departamento Punilla ha sido clasificada como clase VII, correspondiente a suelos con muy graves limitaciones para el uso, resultando ineptos para cultivos. Su uso queda reducido exclusivamente para pasturas cultivadas, campos naturales de pastoreo o para bosques y refugio de la fauna.

Vegetación

Según Barbeito y von Müller (1981) la cobertura vegetal de la cuenca está caracterizada como vegetación de Las Sierras, la que se distribuye en tres pisos: monte serrano, arbustal o romerillal y pastizales y bosquesillos de altura, cuya existencia, amplitud densidad y elevación, están en

función de la altitud, latitud y orientación geográfica. La diferencia de altitud de la cuenca del río de La Suela, determinó la existencia de estos tres pisos distribuidos según dos grandes ambientes; Sub-andino: corresponde a las cumbres por encima de los 1.600 m.s.n.m y el Pedemontano por debajo de esta altitud.

En la baja cuenca, la cubierta está compuesta por elementos típicos del Monte Serrano entremezclados con ejemplares pertenecientes al Monte Xerófilo circundante, los que a medida que aumenta la altitud disminuyen para dar lugar a la flora del Monte Serrano típico que se extiende según sectores, hasta los 1.500 m.s.n.m con una textura abierta configurando manchones de grupos arbóreos (cocos – molles). Por encima de esta altitud el estrato del Monte, forma ecotonos con el piso del Romerillal y los pastos de altura, sin el predominio marcado de uno de ellos. Sobrepasando los 1.600 m.s.n.m, aparece el piso de los Pastizales y bosquecillos de altura, ya en el ambiente Sub-andino de las cumbres. En este caso los ejemplares arbóreos típicos del piso (tabaquillos), están limitados a quebradas que influyen localmente en las condiciones climáticas.

APLICACION

Modelado de la cuenca

La cuenca fue modelada en base al procesamiento de la información disponible a través de GRASS GIS (Neteler y Mitasova, 2008). El mapa digital de elevación de la cuenca fue generado a partir de la información disponible públicamente de la misión del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Esta misión se llevó a cabo con el objetivo de generar datos topográficos digitales de gran parte del mundo. La resolución de las celdas de los datos fuente es de 1 segundo de arco, sobre Estados Unidos y en el resto del mundo, 3 segundos de arco, lo cual se traduce en la región de las sierras de Córdoba en un pixel de aproximadamente 90 x 90 m.

Con estos datos, y con ayuda de GRASS GIS, se delimitó la cuenca del río La Suela, obteniendo así el mapa máscara de la cuenca, el mapa digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés), como así también mapa de cauces y de segmentos de cauces. En la figura 4 se presenta el modelo digital de elevación de la cuenca del río La Suela (Stehli et al., 2012). A partir del mismo TREX permite generar la red de drenaje de la cuenca, como se muestra en la figura 5. El modelo de cuenca así obtenido quedó discretizado en 17844 celdas (pixeles) activas en la cuenca.

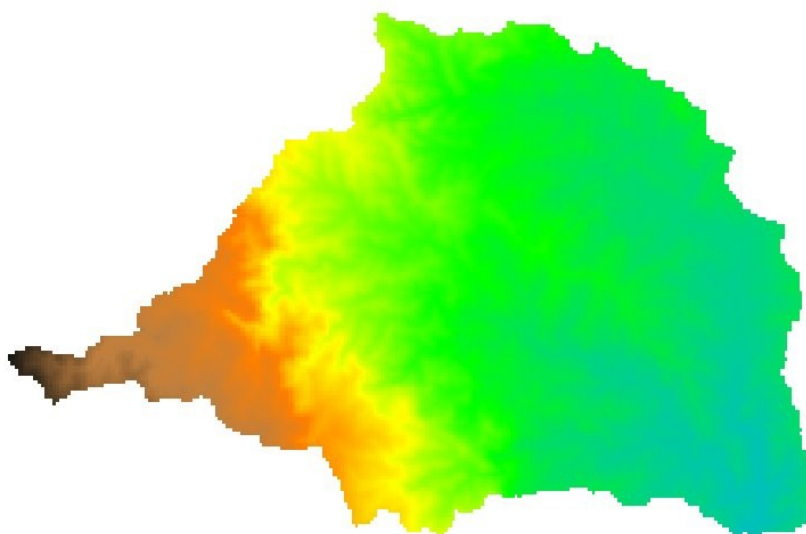


Figura 4: Modelo digital de elevación de la cuenca del río de La Suela



Figura 5: red de drenaje de la cuenca del río de La Suela

Cada mapa es utilizado por T-REX para realizar sus cálculos; el mapa máscara identifica las celdas activas que pertenecen a la cuenca, el DEM sirve para definir las pendientes en la cuenca, número de cauces indica los cauces y el orden de cálculo (definiendo cual se encuentra aguas abajo y cual aguas arriba), por último el mapa de número de segmentos de cauces, divide a cada cauce en segmentos de igual tamaño (en correspondencia del tamaño de la celda) para poder definir sus características específicas (coeficiente de rugosidad de Manning, sección, altura, sinuosidad, etc), luego, en un archivo auxiliar.

Otro conjunto de información requerida por T-REX lo constituyen los mapas de tipo y usos de suelo (este último caracterizado por el grado de cobertura vegetal). Para la elaboración de estos mapas, se realizó la digitalización de mapas elaborados por trabajos precedentes (Font y Bustamante, 1983), sobre vegetación y erosión en cuencas de carácter torrencial. En la figura 6 se muestran los dos mapas indicados que fueron digitalizados a partir de la información original en formato analógico.

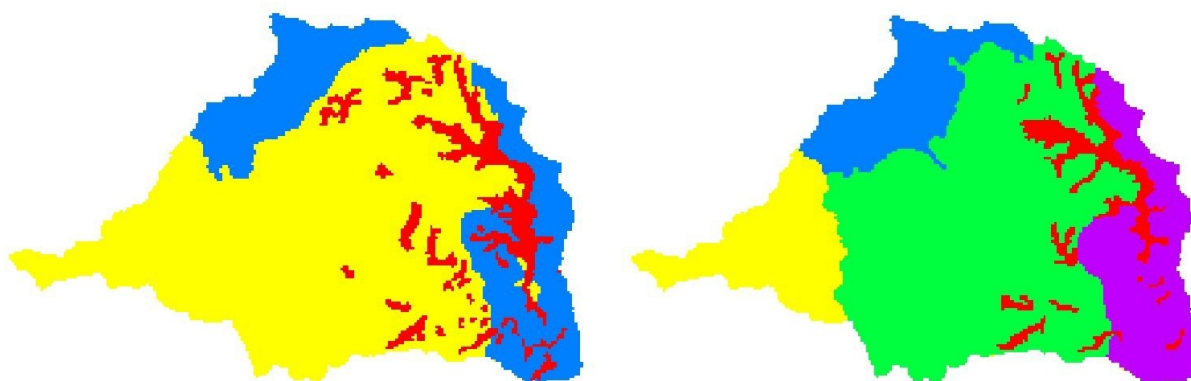


Figura 6: mapas del tipo (izquierda) y uso (derecha) del suelo de la cuenca del río de La Suela

Simulaciones hidrológicas previas

Stehli et al (2012) presentan la calibración de los parámetros del modelo T-REX para tres eventos con registros simultáneos de precipitaciones y caudales. En las Figuras 7 y 8 se presentan los hidrogramas observado y calculado correspondiente a los eventos del 14 de enero de 1979 y 27 de enero del mismo año.

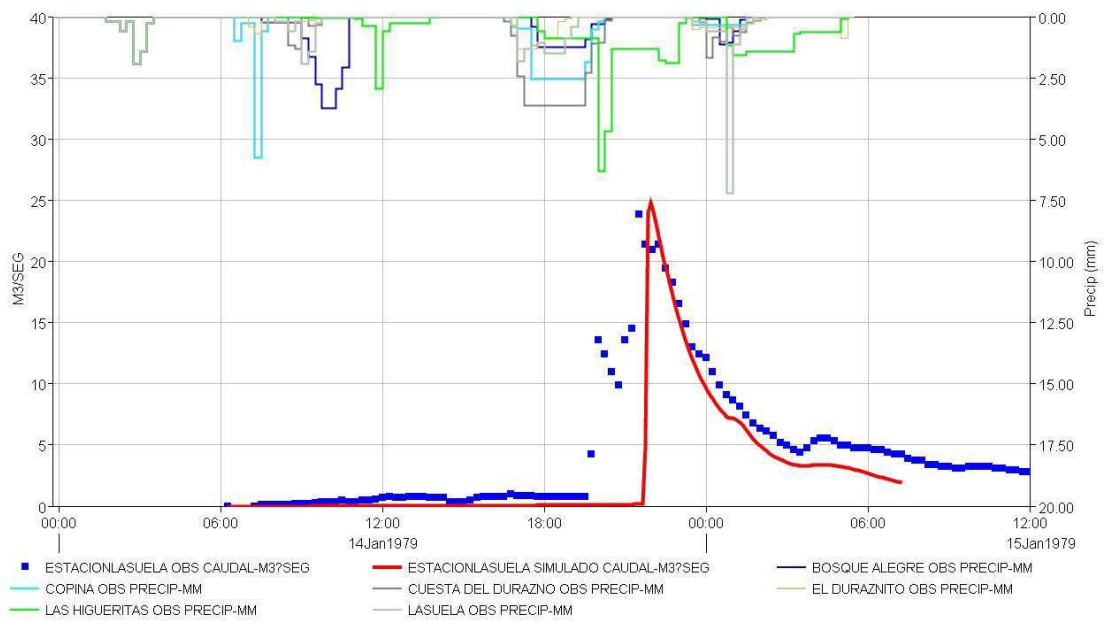


Figura 7: Hidrograma simulado para el evento del 14 de Enero de 1979

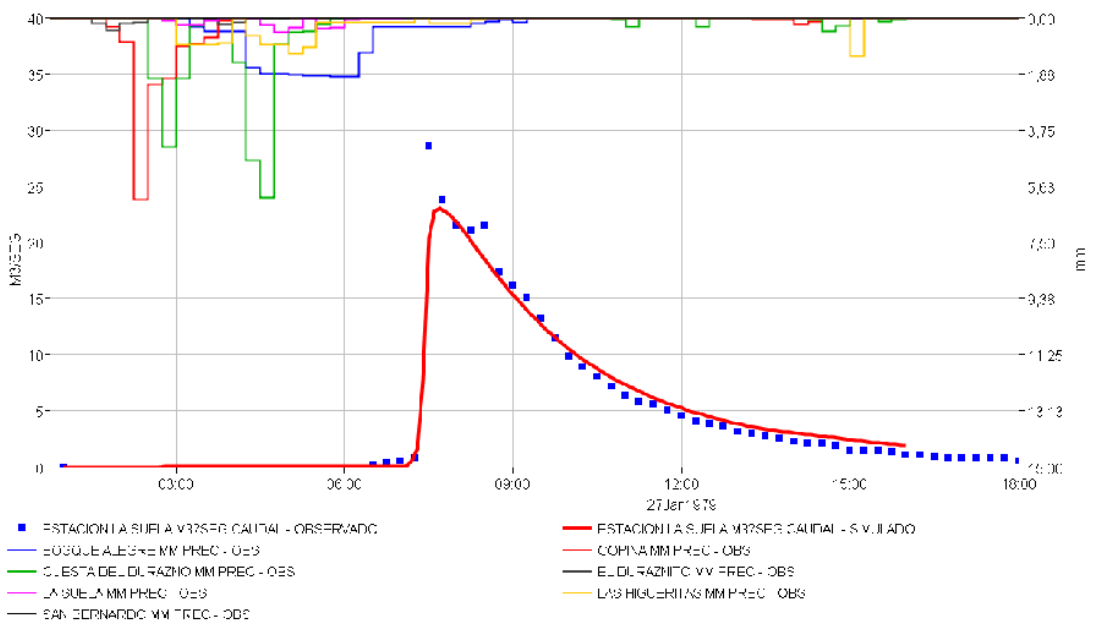


Figura 8: Hidrograma simulado para el evento del 27 de Enero de 1979

Se realizó una calibración manual de los parámetros de infiltración, como así también los parámetros de rugosidad superficial y de los cauces para los eventos seleccionados. Para la calibración de los parámetros de infiltración, en primer lugar, se estableció la textura del suelo según el contenido de cada fracción del mismo (arena, limo y arcilla), luego, teniendo en cuenta que esos parámetros varían en función del grado de saturación de los mismos, se utilizó para establecer la conductividad hidráulica las relaciones de Rawls et al (1982) . Para establecer el nivel de saturación de los suelos en la cuenca, se utilizó como dato de entrada los valores obtenidos por la calibración de un modelo hidrológico continuo desarrollado en la misma cuenca (Jorquera , 2010).

Definición de tormentas de análisis

Considerando la representación raster de la cuenca, es posible definir para cada pixel una tormenta cuyo centro o núcleo esté posicionado en dicho pixel y decaiga, según alguna ley, a medida que se aleja de éste. En la Figura 9 se aprecian cuatro tormentas centradas en distintos pixeles pertenecientes a la cuenca.

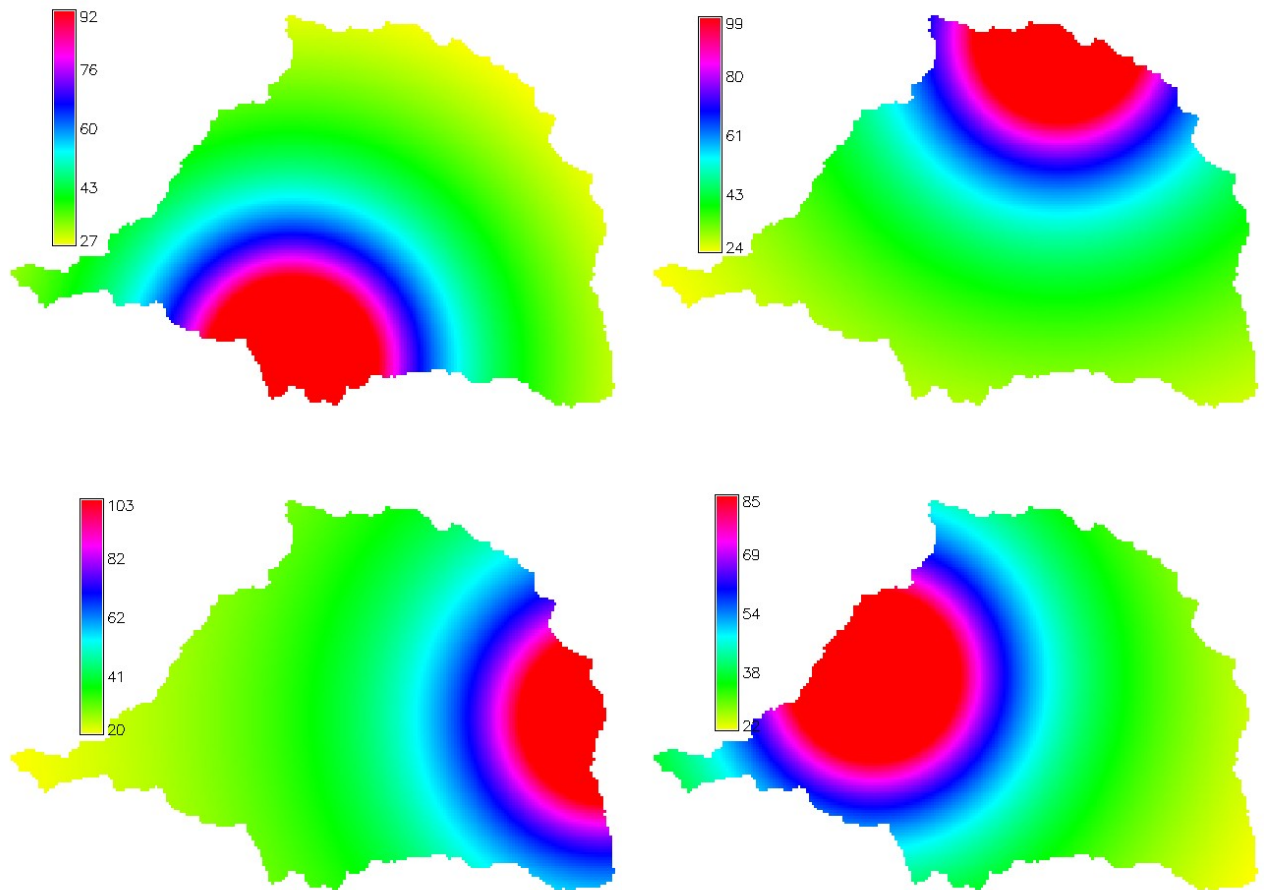


Figura 9: Distintas posiciones de la tormenta

Las tormentas así definidas poseen las siguientes propiedades:

- patrón espacial circular, con intensidad máxima en el centro y decaimiento en función de la distancia al centro según lo establecido en el modelo CoDA (Caamaño y Dasso, 2003), dado por:

$$CDA = 25^{-k} A^k \quad (9)$$

donde A es el área del círculo centrado en el pixel núcleo (en km) y k un exponente función de la duración d dado por:

$$k = -2.0759 d^{-0.5073} \quad (10)$$

donde d es la duración de la tormenta, en minutos. La aplicación de este modelo CoDA en base a áreas circulares concéntricas da lugar a una distribución radial simétrica de la intensidad de lluvia, cuyo coeficiente de decaimiento areal decae en función de la distancia al núcleo como se muestra

en la Figura 10.

- distribución temporal según se indica en la Figura 11, para cada pixel de la cuenca, donde i_{\max} es la máxima intensidad definida para ese pixel, según se describió previamente;
- la posición de la tormenta permanece fija a lo largo de la simulación.

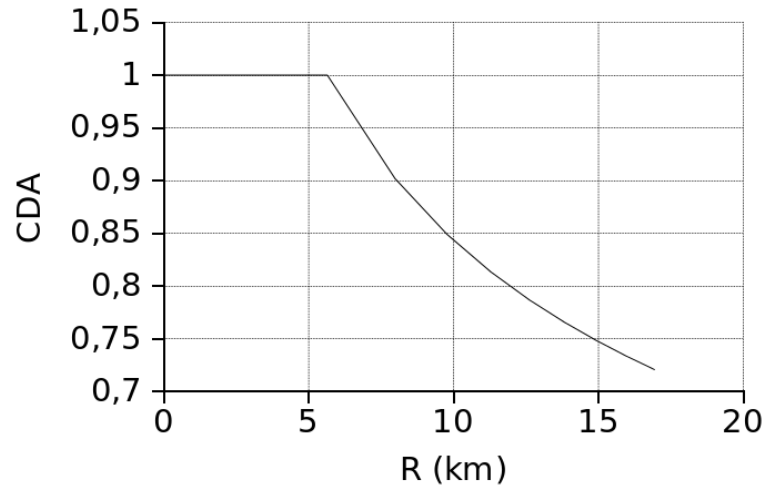


Figura 10: decaimiento del CDA en función de la distancia al núcleo de tormenta

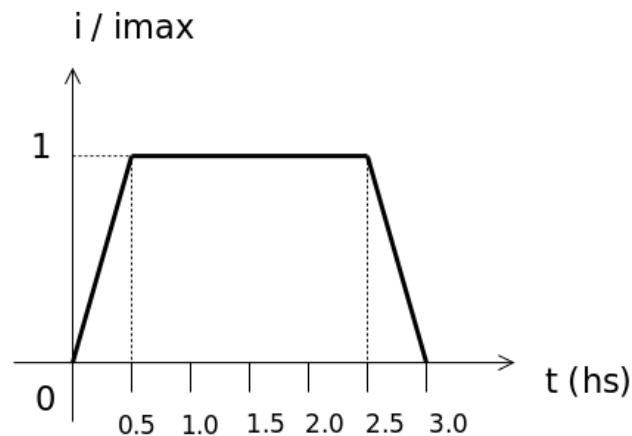


Figura 11: distribución temporal de la intensidad relativa de lluvia

Los valores así obtenidos de intensidad de precipitación pixel a pixel fueron escalados de modo que la precipitación media en la cuenca fuera la misma para cada una de las 17844 tormentas así generadas, e igual a 50 mm. De esta forma se construyeron 17844 mapas de entrada de precipitación para TREX en el formato "radar" materializado a través de dos archivos de entrada:

- Un archivo con las coordenadas de cada celda de la cuenca.
- Otro archivo que siguiendo el orden de celdas definido en el archivo anterior define la intensidad de la lluvia en cada intervalo para cada pixel.

Definición de mapas de influencia

Como resultado de la aplicación del modelo TREX, a partir de cada una de las tormentas de análisis es posible obtener un hidrograma de crecidas. En la Figura 12 se presentan los hidrogramas de crecidas correspondientes a las tormentas de la Figura 9.

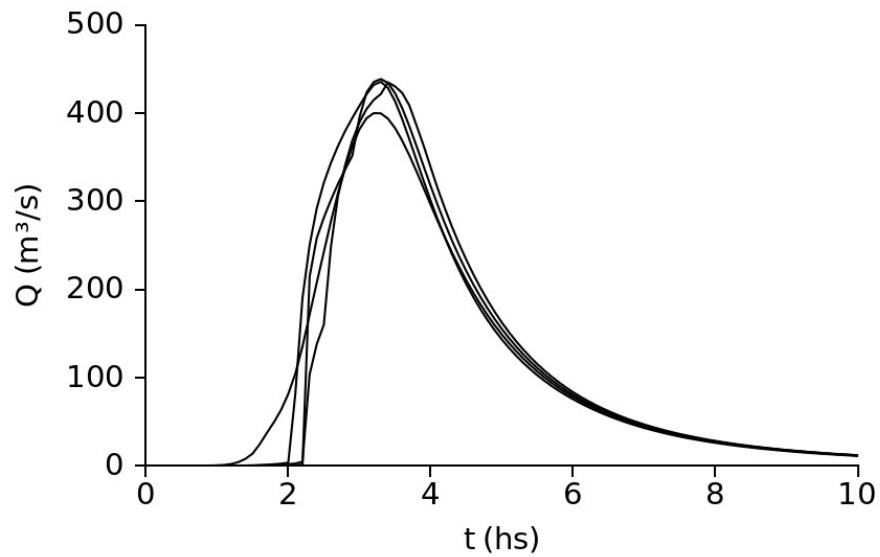


Figura 12: ejemplos de hidrogramas de crecida

De este modo se obtuvieron 17844 hidrogramas de crecidas, de los cuales se extrajeron como información relevante la magnitud (Q_p) y tiempo de ocurrencia (t_p) del caudal pico.

Como cada pixel activo de la cuenca corresponde a un hidrograma de crecidas resultante, es posible asignar a cada pixel el valor de Q_p o t_p , generando de este modo dos mapas, denominados en lo que sigue mapas de influencia del caudal pico o del tiempo del pico, según se indica en la Figura 13.

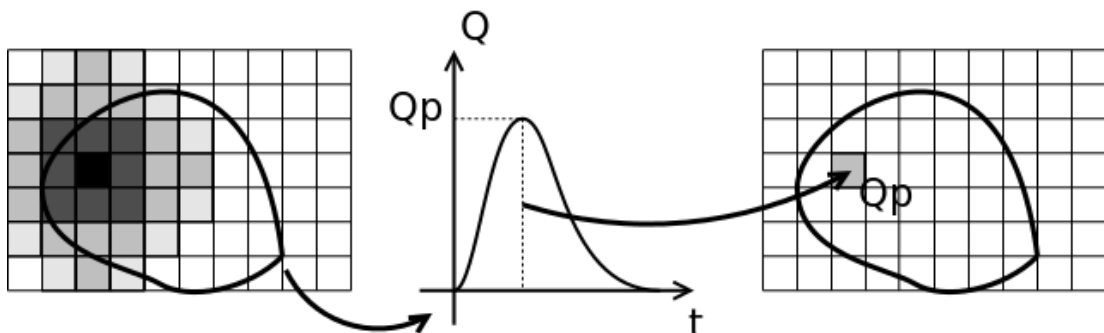


Figura 13: construcción conceptual del mapa de influencia del caudal pico

El nombre de mapa de influencia se eligió por analogía evidente al concepto de “línea de influencia” en la Estática Gráfica: es la representación gráfica de la función que corresponde a la respuesta de una variable del sistema ante un desplazamiento de la sollicitación (la carga en el caso de una viga). En la Figura 14, se muestra, a modo de ejemplo, la línea de influencia de la reacción R_B ante el desplazamiento de la carga P . En el problema bajo análisis, la sollicitación es representada por la precipitación (que se desplaza pixel a pixel a lo largo de la cuenca) y la variable del sistema cuya variación se analiza es el caudal pico Q_p o el tiempo de ocurrencia del pico t_p .

De este modo se obtiene la representación raster de un par de funciones continuas $Q_p(x,y)$ y $t_p(x,y)$ donde x e y representan las coordenadas del núcleo de tormenta. En cada pixel queda almacenado el correspondiente valor de Q_p o t_p .

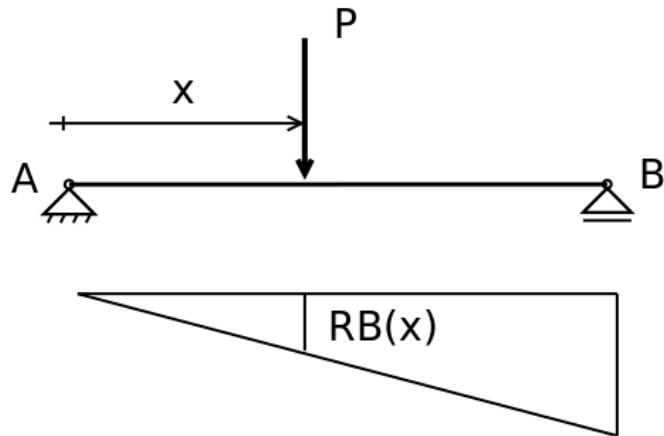


Figura 14: línea de influencia de la reacción R_B ante el desplazamiento de la carga P

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 15 y 16 se presentan los mapas de influencia de Q_p y t_p , respectivamente, para la cuenca del río de La Suela, mientras que en la Tabla 1 se presentan los estadísticos principales de los resultados obtenidos. Además, en la Figura 17 se presenta el histograma de Q_p obtenido.

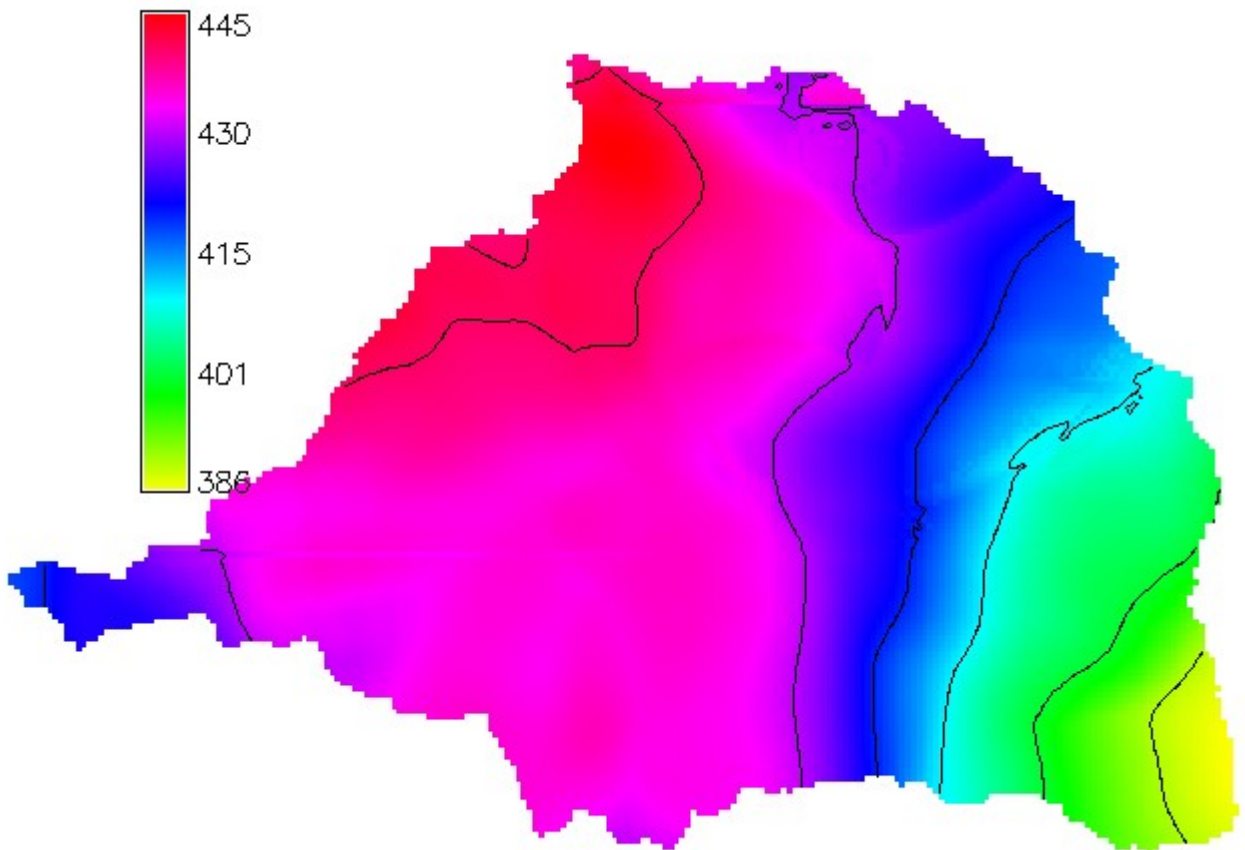


Figura 15: mapa de influencia del caudal pico Q_p – cuenca del río de La Suela

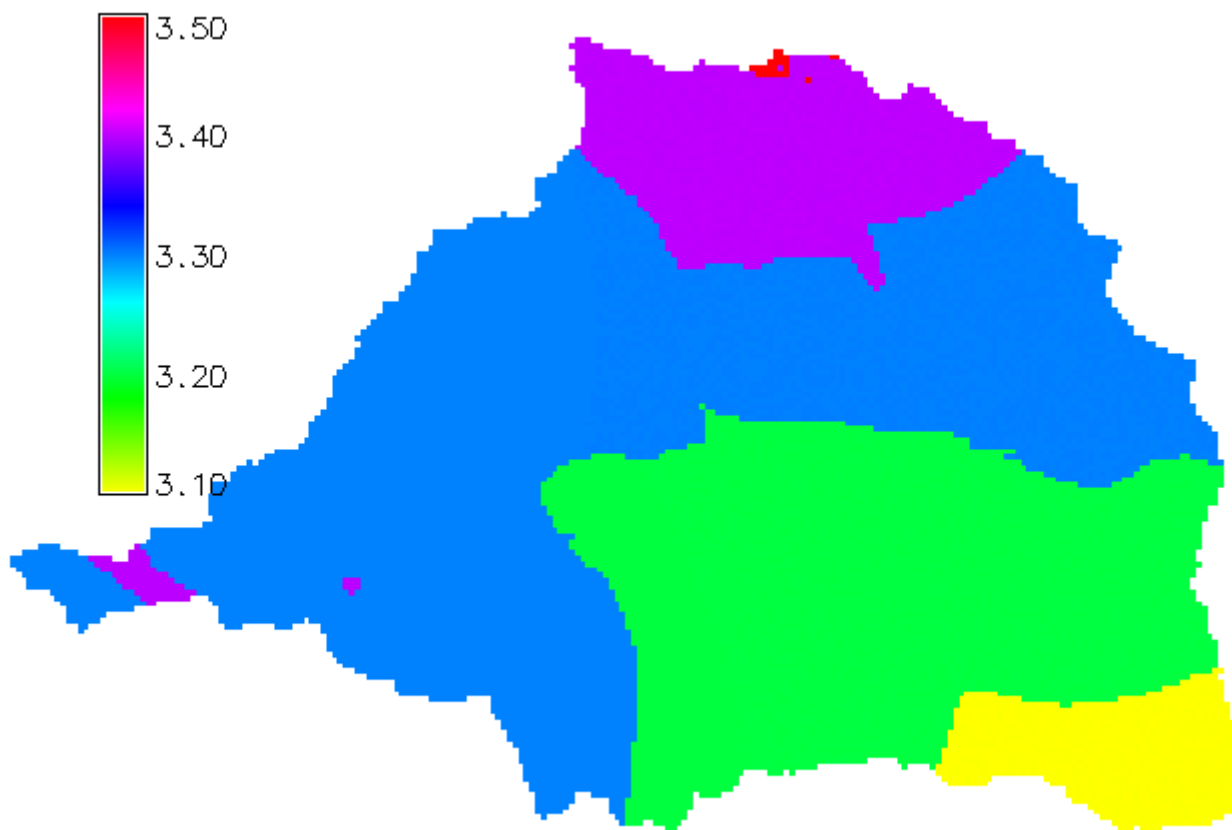
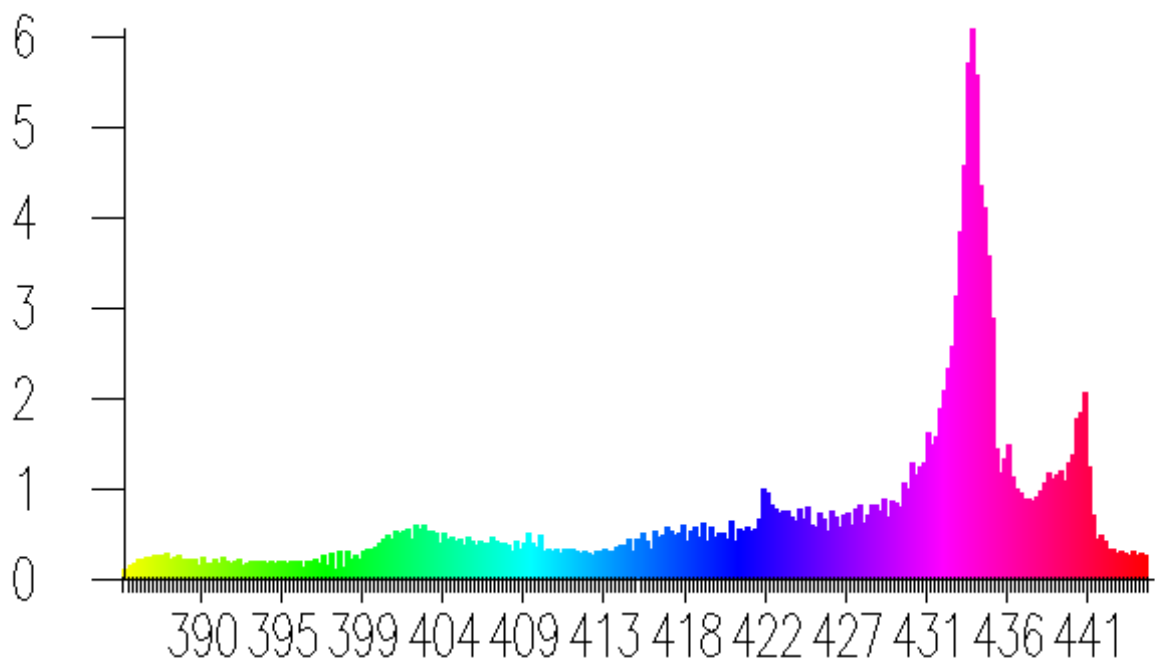


Figura 16: mapa de influencia del tiempo de ocurrencia del caudal pico t_p – cuenca del río de La Suela

Tabla 1: propiedades estadísticas de la distribución de Q_p y t_p – cuenca del río de La Suela

Estadístico	Q_p (m ³ /s)	t_p (h)
Tamaño de la muestra	17844	17844
mínimo	386.24	3.1
máximo	444.51	3.501
rango	58.27	0.401
media	425.67	3.26979
Desvío estándar	13.85	0.0759144
Varianza	191.88	0.005763
Coefficiente de variación	3.25416 %	2.32169 %



X-AXIS: Cell Values
 Y-AXIS: Number of cells in hundreds

Figura 17: histograma de frecuencias del caudal pico Q_p – cuenca del río de La Suela

En el mapa de influencia de Q_p (Figura 15) puede apreciarse una zona ubicada en el extremo norte de la cuenca (color rojo) que maximiza el valor de Q_p para la misma precipitación media, decayendo esta respuesta para el extremo oeste (punto más alejado de la sección de cierre) y para la zona sudeste (sector próximo a la sección de cierre). El intervalo modal de Q_p se desarrolla en una amplia zona central de la cuenca (ver Figura 17). Un comportamiento similar se aprecia en el mapa de influencia de t_p (Figura 16) aunque no con el mismo patrón espacial de distribución.

El rango de caudales pico obtenidos se desarrolla aproximadamente entre los 386 y los 444 m^3/s , con un valor medio de 426 m^3/s , lo cual corresponde a un rango porcentual de (-9.4% ; +4.2%), es decir una amplitud de 13.6%; mientras que el rango de tiempos de ocurrencia del pico se desarrolla aproximadamente entre las 3,1 y 3,5 hs, con un valor medio de 3,27 hs, y un rango porcentual de (-5.2% ; +7%) y una amplitud de 12,2%.

La distribución de frecuencias de Q_p representada en el histograma de la Figura 17 muestra un comportamiento asimétrico, con un pico principal en el orden de los 434 m^3/s y una asimetría positiva, con una cola a izquierda ampliamente desarrollada correspondiente a las zonas cercanas a la sección de cierre y una cola a derecha más corta correspondiente a la región crítica que maximiza la respuesta de la cuenca para Q_p . Además, se aprecian picos secundarios en el histograma de la Figura 17, tanto a izquierda como a derecha del pico principal.

CONCLUSIONES

Ha sido posible, utilizando en conjunto un modelo hidrológico distribuido y un algoritmo para el abatimiento areal de la lámina precipitada, analizar la respuesta de una cuenca ante diversas posiciones del núcleo de tormenta. La representación gráfica de la relación unívoca entre ubicación del núcleo y magnitud de Q_p o t_p , variables hidrológicas características del hidrograma de descarga resultante, ha sido denominada mapa de influencia.

Estos mapas de influencia muestran que existe una región central de la cuenca que maximiza la respuesta de la misma en términos de la magnitud del caudal pico (alcanzando su máximo absoluto en el sector NNW), disminuyendo esta respuesta en las zonas más cercanas o más alejadas a la sección de cierre; en tanto que en relación al tiempo de ocurrencia del pico, la respuesta más rápida se obtiene con núcleos de tormenta cercanos a dicha sección.

Los resultados de este trabajo pueden replicarse en otras cuencas de la zona, lo que permitiría eventualmente detectar comportamientos similares regionalmente escalables. Además permitirían identificar, en tareas de diseño de redes de monitoreo hidrometeorológico orientadas al reconocimiento de eventos extremos (redes de alerta), los sitios más apropiados para la ubicación de futuras estaciones pluviométricas/pluviográficas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbeito O.L. y von Müller N.B. Estudios de erosión cuenca experimental del río de la suela – reconocimiento y mapeo de la cubierta vegetal. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1981.
- Beven K.J. Rainfall-Runoff modelling. The Primer. John Wiley & Sons, 2001.
- Bustamante E. Cuencas piloto representativas y experimentales – programa de investigación en Argentina. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1978.
- Caamaño G. y Dasso C. Relaciones paramétricas en el modelo exponencial infiltración - percolación generalizado. Incidencia de la distribución espacial de la lluvia. In Actas del XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, volumen 2, páginas 627–638. IAHR, Montevideo, Uruguay, 1990.
- Caamaño G. y Zamanillo E. Desarrollo de modelos hidrológicos de simulación para planeamiento y proyecto. Informe Técnico, CONICOR, 1991.
- Caamaño Nelli G. y Dasso C.M. Lluvias de diseño. Universitas, Córdoba, 2003.
- Chow V.T., Maidment R., y Mays L. Hidrología Aplicada. Mc Graw-Hill, 1994.
- Dasso C.M. Cuenca piloto experimental del río de la suela: caracterización geométrica y topológica de su sistema de drenaje. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1983.
- Eaton J.W., Bateman D., y Hauberg S. GNU Octave: a high-level interactive language for numerical computations. Free Software Foundation, www.octave.org, 2007.
- Font P.M. y Bustamante E. El comportamiento del suelo frente a la erosión, valoración de los distintos índices de erosión en cuencas de carácter torrencial. Informe Técnico, CIHRSA - INA, 1983.
- Jorquera, E. Desarrollo, calibración e implementación de un modelo hidrológico de simulación mixta para una cuenca de la región semiárida. Tesis de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina. 2010.
- Jorquera E., Weber J.F., Reyna S.M. Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada. Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As. 2012.
- Neteler M. y Mitsova H. Open Source GIS: A GRASS GIS Approach, volumen 773 de The International Series in Engineering and Computer Science. Springer, New York, 2 edición, 2008.
- Ponce V.M. Engineering Hydrology. Principles and practices. Prentice Hall, 1994.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. y Saxton, K.E. Estimation of Soil Water Properties. Transactions of the ASAE 25(5): 1316 – 1330 pp. 1982.
- Singh P.V. Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, 1996.

Stehli P.T., Weber J.F., y Jorquera E. Implementación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido de simulación de eventos. In Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As., 2012.

Velleux M., England J., y Julien P. Trex: Spatially distributed model to assess watershed contaminant transport and fate. *Science of the Total Environment*, 404(1):113–128, 2008.

Vieux B.E. Distributed hydrologic modeling using GIS, volumen 48. Water Science and Technology Library, 2004.

Weber J.F., Dasso C.M., y Jorquera E. Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica Computacional*, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 29:4013–4037, 2010.