

INDICADORES FÍSICO-GEOGRÁFICOS EN EL ANÁLISIS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y SU APLICACIÓN A LA MICROCUENCA ESTERO, COSTA RICA

Marvin E. Quesada¹ & Matt Marsik²

1. Departamento de Ciencias Sociales, Universidad de Costa Rica, Sede de Occidente

*2. Department of Geography, University of Florida, Turlington Hall,
mmarsik@ufl.edu, marvinqq@gmail.com*

Recibido para evaluación: 9 de marzo de 2007/ Aceptación: Mayo 11 de 2007 / Versión final: Mayo 18 de 2007

RESUMEN

Se toman en consideración distintos indicadores físico-geográficos que son indispensables en un estudio hidrológico de una cuenca hidrográfica. Entre estos se destacan la precipitación, los suelos, la elevación, la interceptación, la infiltración, la escorrentía, la red de drenaje, entre otros. El uso de varios indicadores permitió la generación de datos para calibrar el software CASC2D y se demostró que se pueden obtener resultados más adecuados que permiten pronosticar el comportamiento hidrológico de una microcuenca. De forma indirecta se puede discernir, a su vez, la alteración ambiental que está ocurriendo en la microcuenca. Por consiguiente, al hacerse uso de los distintos indicadores se encontró que en la microcuenca Estero han presentado cambios hidrológicos como consecuencia de los cambios en el uso de la tierra, lo cual unido a los declives empinados, la expansión de caminos, carreteras y urbanizaciones han producido flujos superficiales concentrados, lo cual ha incrementado el tiempo de repuesta de la quebrada Estero, lo que a su vez está incrementando la magnitud de las inundaciones.

PALABRAS CLAVE: Cuenas Hidrográficas; Estereo (Microcuenca, Costa Rica); Red de Drenaje; Infiltración; Escorrentía; Suelos; Interceptación; Caudal; Precipitación

ABSTRACT

We consider different physical geographic indicators that are indispensable in a hydrologic study of watersheds. Among these those that stand out are precipitation, soils, elevation, interception, infiltration, runoff, and the drainage network, among others. The use of several indicators allowed the generation of data to create and calibrate the hydrologic model CASC2D for the micro-watershed Estero, Alajuela, Costa Rica. Results can be obtained more objectively to describe and predict the hydrologic behavior of micro-watersheds. Indirectly the model can be used to explore the environmental alteration that has happened in the micro-watershed. Therefore, when using different indicators in the micro-watershed Quebrada the modeling results showed hydrologic changes as a result of the changes in land use, specifically urbanization. Together with steep slopes and the expansion of roads and highways, urbanization has produced concentrated surface runoff, which has increased the response time of the Quebrada Estero as well as the magnitude of the floods.

KEY WORDS: Watershed; Estereo (Micro-watershed, Costa Rica); Drainage Network; Infiltration; Runoff; Soils; Interception; Precipitation

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento hidroclimatológico depende de ciertos factores como el relieve, los suelos, la vegetación, los flujos de agua, entre otras. Similarmente, es indispensable considerar elementos como la temperatura, la humedad, los vientos, la presión atmosférica, la radiación solar, y la precipitación. En el caso de las regiones tropicales todos éstos factores y elementos son muy importantes. Sin embargo, muchas veces sólo se cuenta con datos, de precipitación e incluso muchas regiones no cuentan ni con este tipo de datos dada la poca importancia que le dan los gobiernos nacionales o por falta de recursos económicos. Esta situación ha llevado también a que gran parte de las investigaciones en hidroclimatología se hagan en regiones grandes, considerando solamente la precipitación. En esta investigación se plantean todas aquellas variables físico-geográficas que deberían considerarse en el estudio hidrológico de cuencas hidrográficas. Además se proponen alternativas de análisis, ecuaciones y otros métodos para su adquisición, en especial en aquellos casos en que la información es inexistente.

Para la aplicación de las variables físico geográficas citadas anteriormente se escogió la microcuenca Estero localizada en el sector occidental de la región central del territorio costarricense. Esta microcuenca posee un área de 5 km², la cual es ideal para mostrar la forma y precisión en la que se pueden adquirir y emplear variables físico-geográficas. De la misma forma, la sociedad en general, considerando en este caso, comunidades, instituciones gubernamentales y políticas, consideran que un pequeño río o riachuelo (quebrada) no son propensos a producir catástrofes por inundaciones. No obstante, la variabilidad climática a la que están expuestas las regiones tropicales y sobre todo considerando factores como la alta densidad poblacional en sectores vulnerables y dada la escasa planificación existente en gran parte de los países del trópico, pueden con el tiempo producir eventos de alto riesgo como son avenidas máximas e inundaciones sobre comunidades que en el pasado han estado exentas de tal situación.

Durante los años 1996, 1998, 2005 se presentaron una serie de eventos hidroclimatológicos en la vertiente Pacífica de Costa Rica, que produjeron inundaciones, causando efectos negativos de carácter social, económico y ambiental. Entre ellas se pueden destacar pérdidas de

vidas humanas, animales, cosechas e infraestructura como viviendas, comercios, puentes, alcantarillas y deslizamientos, entre otras cosas (Waylen y Laporte 1999).

2. OBJETIVOS

En esta investigación pretende mostrar que mediante el uso de algunas variables físico-geográficas es posible estudiar una región pequeña desde el punto de vista hidroclimatológico. Igualmente, en las regiones tropicales dada la alta variabilidad de la lluvia, así como la desmedida alteración ambiental que se está dando en algunos países podrían provocar cambios lentos o paulatinos, aún en regiones que se encuentran a poca distancia.

2.1. Indicadores físico-geográficas indispensables para el análisis hidrológico de una región

El exceso de agua fluye por la superficie a través del gradiente topográfico hacia los arroyos y ríos que conforman la red fluvial. En tanto, una parte del agua se filtra verticalmente a través de los horizontes del suelo recargando los mantos freáticos. El proceso de infiltración es descrito por una función que disminuye con el tiempo y alcanza una proporción constante después de cierta duración de una lluvia o tormenta.

La visión original de la escorrentía superficial era que los (FSO) (flujos superficiales Hortonianos) ocurren en forma normal y que se extienden espacialmente dentro de una cuenca dependiendo de la cobertura del suelo. A su vez éste está determinado por el hidrograma de una tormenta, cuando los suelos tienen una baja capacidad de infiltración (Dunne 1978). El conocimiento actual que se tiene sobre la presencia de los FSO en una cuenca se encuentra restringida, tanto temporal como espacialmente, dadas las propiedades físicas del suelo, las características de la cobertura del suelo de la cuenca y la dinámica del evento de precipitación. Según Dunne (1978) FSO es muy común en áreas áridas y semiáridas, o en áreas húmedas donde se han alterado los suelos y la vegetación nativa. Además, los FSO normalmente ocurren en superficies inclinadas donde la cubierta de vegetación es escasa y la permeabilidad de los suelos es baja, pero es raro en pendientes con cobertura vegetal, sobre todo en climas húmedos (Chorley 1978).

El flujo superficial de saturación (FSS) ocurre cuando la capacidad de almacenamiento de los suelos supera su capacidad, y la adición de precipitación a la superficie se convierte inmediatamente en escurrimiento (Dunne 1978). El FSS generalmente ocurre en valles de fondo ancho con pendientes moderadas y en suelos delgados donde el flujo subterráneo de agua produce que algunos sectores especialmente planos y semiplanos o lo largo de los arroyos se saturan. El FSS está espacialmente limitado a estas áreas por la lenta extensión de condiciones saturadas.

Además, los FSS pueden ocurrir en pendientes donde la permeabilidad del suelo disminuye con la profundidad, pudiéndose generar flujos de retorno (Dunne 1978). Esto conlleva a que el flujo subterráneo sea forzado a salir de los suelos hacia áreas donde el perfil de colina muestra cierta concavidad a lo largo de los frentes de filtración de la parte más baja del declive y/o la convergencia del flujo, o donde el espesor del suelo y/o la permeabilidad decrece cuesta abajo. Esta emersión de flujo subterráneo causa una zona saturada sobre la cual la lluvia directa es convertida en FSS. Otra fuente para el flujo de retorno causando FSS puede ser una capa de suelo impermeable cerca de la superficie en posiciones de declive medio y bajo, forzando que los flujos subterráneos fluyan hacia arriba.

Freeze (1974) introdujo la idea de área de fuente variable para incluir ambos procesos de generación de saturación, superficiales y subterráneos. Las fuentes de escurrimiento de las primeras, localizadas cerca de los arroyos, se expanden y se contraen según sean las condiciones hidrometeorológicas y la humedad del suelo inicial. En tanto, las últimas aumentan y disminuyen con el flujo subterráneo sobre una capa impermeable que produce escurrimiento superficial. En el concepto de área de fuente variable, tanto el Flujo Superficial Hortoniano como el Flujo Superficial de Saturación, pueden ocurrir en diferente tiempo en el mismo declive como resultado de la variación de las características del suelo, especialmente las conductividades hidráulicas en todas las capas del suelo y aún más importante, en la capa superior del suelo.

Los modelos hidrológicos a parte de considerar la realidad física, simulan el complejo ciclo hidrológico como un sistema simplificado. Los modelos determinísticos representan la hidrología de una cuenca como un sistema físico sin ningún componente al azar.

Es así como el modelo CASC2D ha sido usado en los Estados Unidos para la simulación de eventos de tormenta, para determinar errores de datos de entrada a un sistema que son inciertos. Además, se han utilizado en la valoración de la respuesta de inundación ante cambios en el uso de la tierra. Julien et al. (1995) describe la formulación y aplicabilidad de CASC2D haciendo una apreciación global de los componentes principales del modelo. El modelo, CASC2D fue aplicado a la cuenca Macks Creek, al sudoeste de Idaho, una cuenca empinada (1130-1830m), semiárida, de 32.2 km², usando tanto, los datos de medidas de precipitación como los de radar. El modelo reprodujo fielmente la respuesta del flujo de caudal para una tormenta de corta duración y alta intensidad usando cualquier registro de datos de precipitación.

Este modelo también fue usado en la cuenca semiárida Taylor Arroyo de 120 km² al sudeste de Colorado, para evaluar las prácticas de administración de tierra del Ejército norteamericano (Doe et al. 1996). Estas dieron como resultado tres escenarios de uso de tierra de condiciones alteradas y no alteradas, las cuales fueron simuladas usando eventos de lluvia, espacialmente distribuidos y temporalmente uniformes. Se le dio énfasis al desarrollo del modelo, su unión con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la visualización de las consecuencias del cambiante uso de la tierra.

3. DATOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Entre las principales variables consideradas en el análisis de la microcuenca Estero se tienen:

3.1. Precipitación

Los datos de la precipitación fueron medidos usando un registro automático de la medida de la lluvia por la inclinación de un cubo, Global Water Instrumentation RG200, localizado en la Universidad de Costa Rica – San Ramón (UCR-SR). La medida es hecha por un GL400-1-1 Global Logger 2-Channel data logger. Asimismo, la precipitación se midió en forma manual, mediante la ubicación de instrumentos medidores distribuidos en distintos sitios de la microcuenca.

3.2. Interceptación

La interceptación es modelada utilizando el método

deducido por Gray (1970) en la cual se necesitan dos parámetros, la capacidad de almacenamiento de la vegetación y el coeficiente de la interceptación, los cuales se representan en la siguiente ecuación:

$$i(t) = r(t) \text{ mientras } I < a \text{ y } i(t) = b * r(t) \text{ mientras } I > a \quad (1)$$

donde $i(t)$ es el valor de interceptación en mm. min^{-1} de tiempo t , $r(t)$ es la intensidad de lluvia en mm., min^{-1} de tiempo t , a es la capacidad de almacenamiento en mm., b es el coeficiente de interceptación, I es la profundidad de la interceptación acumulativa en mm. La interceptación iguala la intensidad de lluvia mientras la capacidad de almacenamiento de la precipitación es menor que la interceptación acumulada. Una vez que la profundidad de la interceptación acumulada es excedida, la interceptación es una función de la intensidad de lluvia y el coeficiente de la interceptación puede ser determinante para un tipo en particular de vegetación.

3.3. Infiltración

La infiltración en el suelo es modelada usando la teoría de la ley de Darcy para el flujo no saturado a través del suelo. El método modela la infiltración como el movimiento vertical descendiente de agua dentro de una profunda y homogénea columna de suelo. Al iniciar la infiltración, el agua se mueve dentro del suelo bajo la fuerza gravitatoria. Sin embargo, el comportamiento es muy distinto cuando se tiene un suelo seco que cuando se tiene un suelo húmedo o saturado por agua. De ahí que es muy importante distinguir el periodo estacional bajo el que se encuentra el estudio.

La ecuación de para calcular la infiltración es la siguiente:

$$F = Ks [1 + (Hc * (\Phi - \theta r - \theta i)) / F] \quad (2)$$

donde f es la tasa de infiltración en mm min^{-1} , Ks es la conductividad hidráulica saturada en cm hr^{-1} , $(\Phi - \theta r - \theta i)$ es el déficit en la humedad del suelo, Φ es la porosidad total de del suelo, θr es la saturación residual, θi es el volumen de humedad de tierra inicial, y F es el total de profundidad infiltrado en mm. Los valores de estos parámetros, para un tipo de textura de suelo específico, pueden obtenerse de las medidas del campo o de los valores de estudios proporcionados por Rawls et al. (1983).

La porosidad moldeada es de hecho la porosidad efectiva (Dingman 1994), que es el espacio disponible para transmitir agua en el suelo en los espacios capilares o poros del suelo. La conductividad hidráulica saturada controla el movimiento de agua de la superficie dentro de la zona saturada del suelo. El contenido inicial de humedad y la cabeza capilar controla el movimiento de agua infiltrada de la zona saturada a la no saturada.

3.4. Suelos

Para determinar el tipo de suelo se utilizaron muestras completamente saturadas de agua y luego se agitaron vigorosamente por dos minutos y se le dejó en reposo. Las partículas medidas de arena por lo general se asentaron en menos de treinta segundos, el limo en seis horas, y la arcilla entre dos o tres días.

3.5. Escorrentía

El agua que escurre entre las superficies subterráneas o superficiales usando una formulación de diferencia finita bidimensional (Julien et al. 1995) donde un modelo de elevación digital (MED) representa la superficie de la tierra. El agua es pasada de una celda de rejilla a otra celda de rejilla solamente en x y y , siguiendo direcciones de descenso.

Para representar el flujo de agua sobre el suelo, se tiene la ecuación de continuidad e impulso de St Venant, que consiste en una solución de la diferencia finita explícita, por medio de la cual la velocidad y profundidad son calculadas, sobre un sistema de rejillas basada en los valores de los datos anteriormente conocidos (Beven 1985) para cada celda en el MED. Esta combinación de ecuaciones de continuidad e impulso se utilizan en aquellos casos de flujo uniforme pero inestable a través de la superficie y para efectos de estancamiento debido a inclinaciones adversas, por medio de las cuales el agua puede fluir a la superficie de la tierra. La ecuación de continuidad modela el balance del agua escurrida y almacenamiento para cada celda del MED y es dada por la siguiente ecuación:

$$\partial h / \partial t + \partial q_x / \partial x + \partial q_y / \partial y = i_e \quad (3)$$

donde h es la profundidad del flujo en la superficie, q_x es la descarga en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ en la dirección x , q_y es la descarga

en $m^3 s^{-1}$ en la dirección y , i_e es el exceso de lluvia después de la infiltración e intercepción, y t es el tiempo.

La ecuación de impulso modela el balance de las fuerzas del movimiento del agua en cada celda de la MED y es simplificada en forma de escorrentía difusa para modelar solamente la inclinación sobre la tierra y el cambio en la profundidad del agua, ignorando tanto el término de fricción como el de gravedad del impulso. La forma difusa de la ecuación del impulso en las direcciones x y y son las siguientes:

$$Sfx = \delta h / \delta x - S_o x \quad (4)$$

$$Sfy = \delta h / \delta y - S_o y \quad (5)$$

donde S_f es la inclinación de fricción, h es la profundidad del flujo sobre tierra en m, x y y son las direcciones espaciales, y S_o es la inclinación en la superficie de la tierra.

Cuando se desea modelar un flujo turbulento sobre una superficie irregular, es necesario emplear la ecuación de resistencia de Manning. Esta incorpora los efectos de fricción de un flujo sobre la superficie, tomando en consideración la escorrentía difusa (Julien et al. 1995) de la siguiente forma:

$$q_{x/y} = \beta a_{x/y} h^{5/3} / n \quad (6)$$

donde $\beta = 5/3$, los subíndices x y y indican la dirección del flujo, q son las descargas del flujo por tierra, n es el coeficiente de aspereza (irregularidad de la superficie) de Manning, y b es una constante. Esto se calcula para la velocidad a la cual el agua fluirá bajo el declive dependiendo de la fricción del declive sobre tierra como esta indicado en el coeficiente de Manning.

3.6. Dirección del cauce

La descarga usada para calibrar CASC2D en la quebrada Estero se calculó usando una relación de profundidad-descarga. Se utilizó un instrumento llamado "Water Level Logger de Global Water Instrumentation WL15" instalado en la quebrada principal de la microcuenca en estudio. En este sitio la quebrada Estero se encuentra canalizada y proporciona medidas de profundidad continuas mínimas de 0.01 pies cada dos minutos. Los datos que registró la quebrada fueron almacenados automáticamente en un "logger de datos", algo similar a un disco duro y son

recuperables en formato de hoja de cálculo usando una computadora portátil.

En un punto aproximadamente diez metros río arriba del registrador de profundidad la velocidad del cauce es medida usando una sonda de flujo de "Global Water Instrumentation FP101" en aproximadamente 0.6 de la profundidad del agua durante flujos normales y de lluvias intensas o tormentas. Se efectuaron también medidas de profundidad y anchura del cauce en cm., las cuales se hicieron manualmente para proporcionar estimaciones de descarga a esta sección de cruce rectangular (anchura de 1.3 m y una profundidad de 0.9 m).

El agua es pasada desde la superficie del flujo por el suelo hacia la red del cauce donde es dirigido a la salida de la microcuenca. El método de onda difusa es aplicado a una ecuación de continuidad unidimensional que modela el flujo del cauce (Julien et al. 1995) y es dado por la siguiente ecuación:

$$q_t = \delta Ax / \delta t + \delta Q / \delta x \quad (7)$$

donde Ax es el ancho del cauce en m^2 , Q es el total de descarga del cauce en $m^3 s^{-1}$, q la tasa de flujo en $m^3 s^{-1}$ por longitud de unidad dentro (+) o fuera (-) del cauce. En esta ocasión se consideraron especialmente los flujos altos o avenidas máximas que ocurrieron en la quebrada Estero durante la época lluviosa del año 2005. La ecuación de resistencia Manning es incorporada dentro de la ecuación de continuidad y modela la fricción en el cauce por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{1}{n} Ax R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (8)$$

donde Q es la descarga del cauce, $m^3 s^{-1}$, R es el radio hidráulico del cauce, S_f es el declive de fricción del cauce, y n es el coeficiente de aspereza de Manning. El cauce segmenta el flujo en el centro de las celdas de la rejilla y es conectada con el flujo por el suelo para permitir el traslado de agua dentro y fuera del cauce desde la superficie de la tierra (Julien et al. 1995). El modelo CASC2D sustenta muchas formas de secciones transversales del cauce, incluyendo la trapezoidal. Una de las ventajas que posee este modelo es que permite hacer mediciones dentro de cualquier parte de la microcuenca o de la red del cauce (Wong y Chen 1994).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA APLICACIÓN DE LOS INDICADORES EN LA MICROCUENCA ESTERO

4.1. Suelos

La textura del suelo dentro de la microcuenca fue determinada por medio de los porcentajes de arena, limo y arcilla y usando el triángulo de textura del suelo USDA.

Se recolectaron veintidós muestras de suelo de diferentes sitios (Figura 1) dentro de la microcuenca, las cuales se escogieron siguiendo los siguientes criterios:

1. Representación de distintos usos de la tierra,
2. Representaciones de varias elevaciones e inclinaciones y que se ubicaran tanto en las partes alta, media y baja de la microcuenca. De esta forma, la cantidad de arena, limo y arcilla es estimada usando una técnica de saturación de agua (Sammis 1996). Se encontró que la arcilla es la textura del suelo dominante en la microcuenca, en un segundo plano se encontraron

los sedimentos, mientras que las arenas son prácticamente inexistentes. Esto es evidente dada las formaciones superficiales que componen la microcuenca; al haber existido durante un periodo geológico anterior una formación lacustre con dominancia de arcillas en esta región de San Ramón y Palmares (Quesada, 2001). Al ser estos suelos dominantes en la microcuenca, se utilizaron los rangos y sus respectivos valores para la infiltración en suelos arcillosos saturados, los cuales se citan la Tabla 1.

Para aplicar el modelo CASC2D en la infiltración de suelos se utilizaron celdas de rejillas Raster de 25 m de tamaño para cada uno de los cuatro parámetros del suelo.

El valor de 385 cm³, es valor de la saturación máxima de las arcillas. Similarmente, rejillas similares son generadas para la conductividad hidráulica saturada (0.06 cm hr⁻¹) y para la capilaridad (31.63 cm). Las celdas de rejillas ocupadas por residencias, caminos y urbanización fueron consideradas como superficies

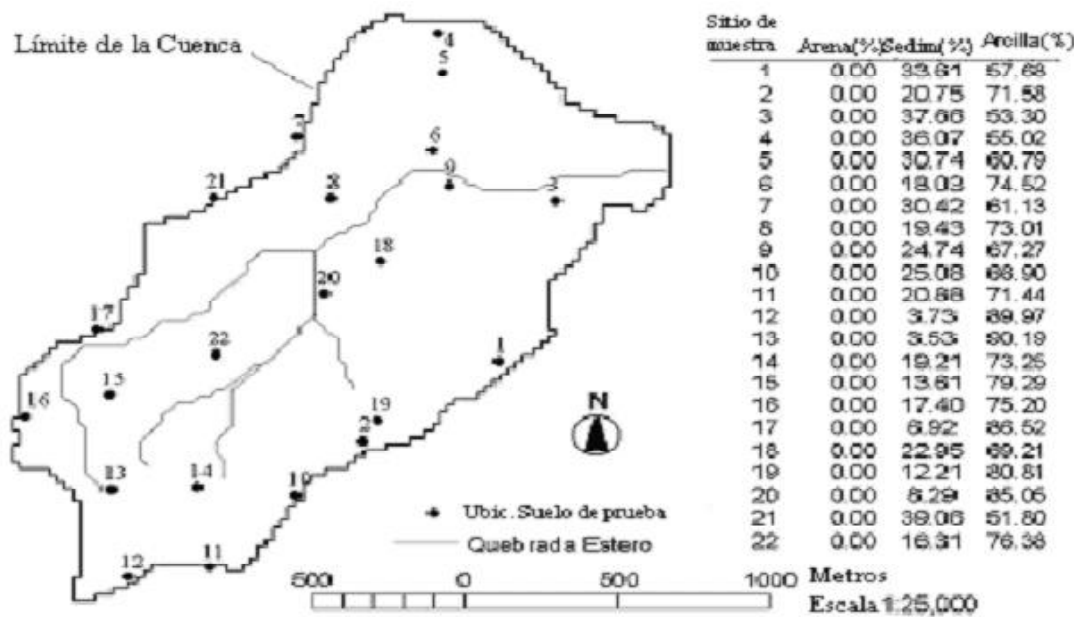


Figura 1. Ubicación de las muestras de suelo dentro de la microcuenca quebrada Estero.

Tabla 1. Parámetros de infiltración para suelos arcillosos (datos en centímetros) (Rawls et al., 1983)

Parámetro	Mínimo	Máximo	Recomendado	Áreas Impermeables
Humedad Inicial (cm ³ cm ⁻³)	0	0.385	0.272	0
Capilaridad (cm.)	6.39	156.5	31.63	0
Conductividad Hidráulica Saturada (cm hr ⁻¹)	0.05	0.10	0.06	0
Porosidad Eficaz (cm ³ cm ⁻³)	-	-	0.385	0

(Rawls et al, 1983)

impermeables; por lo tanto, el parámetro de infiltración del suelo se fija en cero de acuerdo con Ogden et al.(2000).

4.2. Elevación

Se elaboró un modelo de elevación digital (MED) utilizando curvas de cada 10 metros a escala 1:10.000, el cual representa la elevación en CASC2D (Figura 2) El MED sirvió para mostrar como el flujo de agua escurre por las pendientes. El MED se realizó por medio de interpolación TOPOGRID en ArcGIS (Hutchinson 1989).

El tamaño escogido de las celdas de rejilla para el MED es de cinco metros, con la idea de representar las características topográficas más pequeñas existentes en el mapa a escala 1:10.000. Sin embargo, este tamaño de la celda causó inestabilidad numérica en CASC2D debido

a la acumulación de agua durante las simulaciones preliminares, en depresiones del MED, y a través de las pruebas de ensayo, entonces, el tamaño de la celda se aumentó a 25 m. Además, las celdas a lo largo de las cuales fluye la red de drenaje fueron pulidas para quitar obstrucciones artificiales que impidieran el flujo normal del cauce.

Por medio de este MED se encontró que los sectores periféricos y, sobre todo, en la parte superior de la microcuenca existen áreas con un alto escurrimiento en periodos de tormenta. Un caso particular lo constituye el sector que se ubica en los alrededores de la Sede de Occidente de la Universidad de Costa Rica donde por la pendiente y la forma de embudo que muestra la topografía, las aguas se canalizan y producen fuertes avenidas en períodos intensos de lluvia.

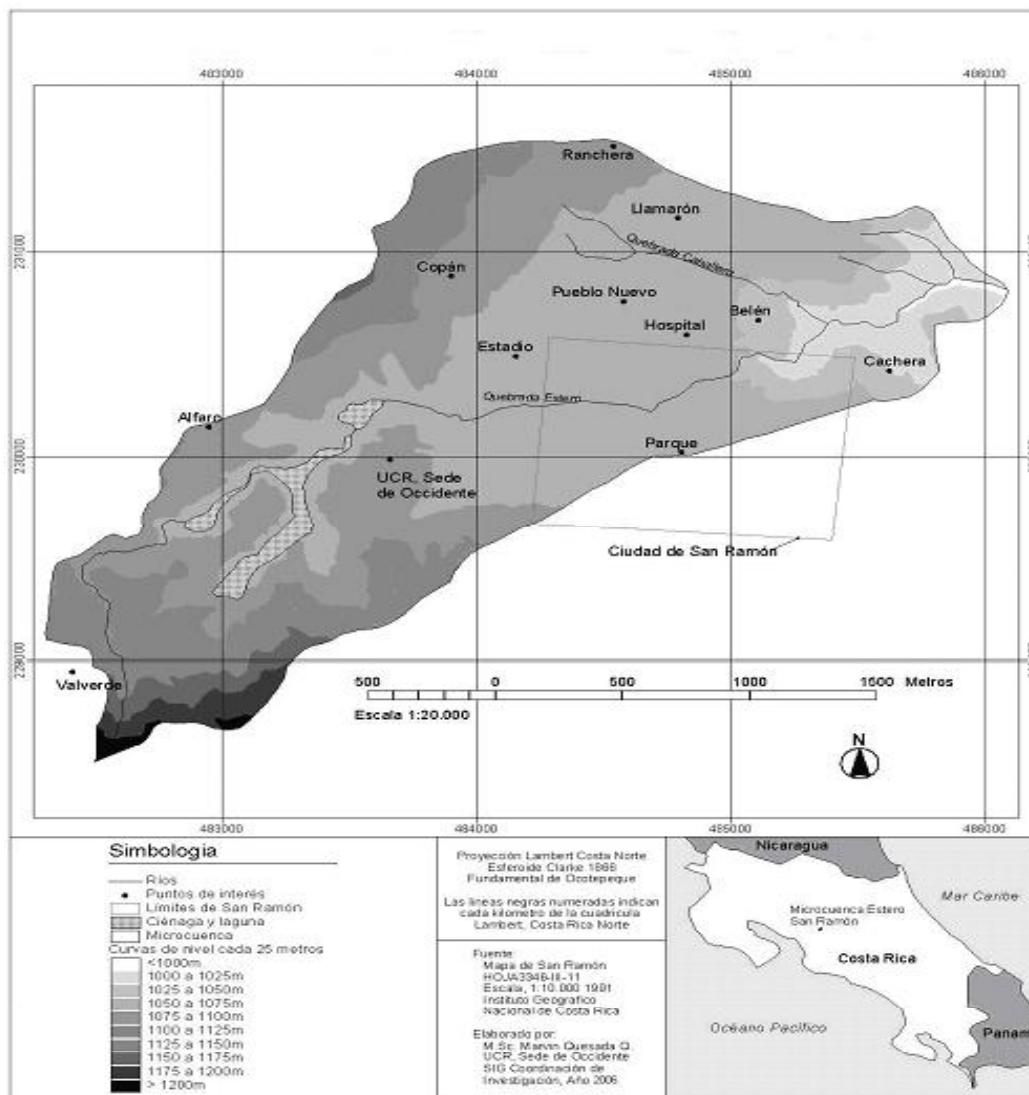


Figura 2. Formas del relieve en la microcuenca Estero, 2006.

4.3. Interceptación

Los parámetros de la interceptación (Tabla 2) para CASC2D fueron utilizados para estudiar los valores de coeficientes de interceptación y capacidad de almacenamiento (Koenigs 1998; Gray 1970). En estudios de campo, se han medido precipitaciones que se han recolectado en contenedores idénticos de aluminio de 354 ml, los cuales por lo general se colocaron en dos tipos distintos de uso de la tierra. Por ejemplo, se ubicaron en sectores como: bosque (1 contenedor), café (3 contenedores), matorral (2 contenedores), y en el campo abierto (1 contenedor).

La capacidad de almacenamiento y coeficientes de la interceptación (Tabla 2) para el bosque y el matorral fueron calculados por medio de una regresión lineal de precipitación al aire libre y la precipitación interceptada (precipitación abierta menos precipitación medida bajo cada tipo de vegetación).

El bosque y el matorral mostraron una relación lineal significativa indicada por un valor ajustado R^2 . Los valores calculados para la capacidad del almacenamiento y coeficiente de interceptación tienen valores más bajos que los valores investigados por Gray (1970), los cuales fueron

calculados para vegetación en climas templados. La capacidad de almacenamiento y los valores de coeficientes de interceptación fueron asignados a cada celda de la rejilla 25 metros en Arc GIS de acuerdo con la cubierta de la tierra en 1979, 1989, 1999 y 2005. Estas rejillas fueron convertidas al formato de entrada de CASC2D.

Estos datos mostraron que a pesar de que existe cierta capacidad de almacenamiento en la microcuenca, también existe la posibilidad de escurrimiento superficial, especialmente en aquellas superficies descubiertas como son café sin sombra, terrenos baldíos, urbanizaciones, carreteras construidas a favor de la pendiente como es el caso de las dos carreteras que circundan las instalaciones de la Sede de la Universidad de Costa Rica (sector Oeste de la microcuenca).

Para calcular la interceptación se utilizaron los valores de Koenigs, los cuales se basan en datos de cobertura de la tierra, así como de la capacidad de almacenamiento y su respectivo coeficiente de interceptación. Estos datos se aplicaron a cada uno de los usos de la tierra existentes en la microcuenca y con ello se obtiene una idea de la capacidad de interceptación existente en la microcuenca de la quebrada Estero.

Tabla 2. Resultados de la regresión lineal en dos tipos de uso de la tierra, microcuenca Estero

Cubierta de La tierra	Regresión Interceptada	Coefficiente de Regresión	Capacidad de Almacenamiento	Coefficiente Interceptación	R^2
Bosques	-2.12	0.82	0.211	0.18	0.91
Matorral	-2.13	0.88	0.213	0.12	0.99

Tabla 3. Valores de interceptación de Koenigs (1998)

Cobertura de la tierra	Capacidad de Almacenaje (mm.)	Coefficiente de interceptación
Café	0.508	0.40
Ornamental	0.508	0.41
Pastoreo	0.750	0.46
Pastoreo/Bosque	0.750	0.46
Residencial	0.254	0.05
Caminos	0.254	0.05
Caña de azúcar	0.508	0.10
Pantano	0.750	0.46
Urbanización	0.254	0.05
Hortalizas/Granos	1.016	0.41

4.4. Red de Drenaje

La red que compone la microcuenca se generó a partir del MED usando el algoritmo de delineación TOPAZ en WMS. Este está constituido por un umbral de 160 celdas para asegurar que los arroyos delineados sigan la red del arroyo del mapa topográfico de San Ramón en escala 1: 10.000.

Una vez que se delimitó la microcuenca, se homogenizaron los sectores que representaban la red de drenaje para eliminar hoyos de elevación erróneos o depresiones que interferirían con la asignación de la ruta, del cauce donde el canal fluye a través de una celda y solamente fluye hacia su vecino vía dirección ortogonal, no en dirección diagonal. Las reglas de conectividad del canal implícito en CASC2D requieren que cada segmento del canal, y cada celda de rejilla que constituyen el segmento, sean consideradas como eslabones o uniones, respectivamente. Esto se facilita usando WMS.

La geometría de la sección del cauce se caracteriza por poseer una forma trapezoidal a lo largo de su recorrido y los parámetros respectivos de profundidad, ancho, y declive lateral del cauce, fueron asignados a cada segmento con base en medidas del campo.

4.5. Precipitación

Como ya se mencionó se establecieron estaciones manuales y una automática como se puede ver en la Figura, 3.

Para obtener sitios de fácil acceso y representativos para

medir la precipitación se tomaron en consideración varios aspectos como son:

1. A cada recipiente colector de lluvia se le puso un nombre determinado con el fin de distinguirlos y para evitar confusiones.
2. Se hizo una distribución espacial dispersa y de manera equitativa para considerar varios sectores de la microcuenca.
3. Se tomaron en cuenta distintas elevaciones.

Los totales de la precipitación medida fueron recolectados en ocho eventos de tormenta durante la época lluviosa del 2005. Cada punto de medida de la red se ajustó al equipo (logger data) ubicado en la Sede de Occidente de la UCR-SR para comparar la proporción de precipitación aportada por cada estación manual.

4.6. Datos del flujo de drenaje

La descarga usada para calibrar CASC2D en la quebrada Estero se calculó usando una relación de profundidad-descarga. Los datos que registra la quebrada son almacenados automáticamente en un "logger de datos". En un punto que se ubica diez metros río arriba del registrador de profundidad de la quebrada. La velocidad del caudal se mide en pies (ft s^{-1}), medida que se hace usando una sonda de flujo de "Global Water Instrumentation FP101" en aproximadamente 0.6 de la profundidad del agua durante flujos normales y de lluvias intensas o tormentas. Se efectuaron también medidas de profundidad y ancho del cauce que se hicieron

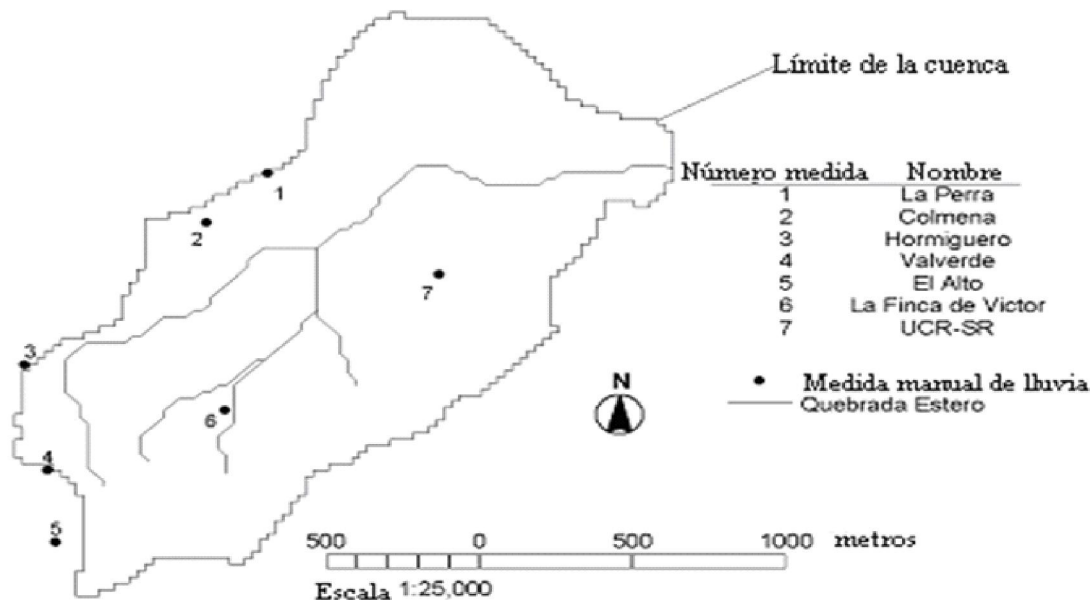


Figura 3. Localización de la red de medidas de lluvia manuales dentro de la microcuenca quebrada Estero.

manualmente para proporcionar estimaciones de descarga a esta sección del cruce rectangular (ancho de 1.3 m y una profundidad de 0.9 m).

Estas medidas de profundidad y velocidad son grabadas durante flujos bajos en tres ubicaciones, uniformemente espaciadas a través del ancho del cauce. En aquellos momentos cuando estaba ocurriendo una tormenta, solamente fue posible hacer una medida de la altura del nivel del agua y de su velocidad, debido a los altos flujos.

donde Q es la descarga en m^3s^{-1} y S es la profundidad del cauce registrada en m. La información de profundidad del registrador de profundidad puede ser convertida a descarga para ser usada en la calibración del modelo y sus respectivas simulaciones.

Bajo ciertos usos de la tierra se dieron coeficientes de fricción menores, como es el caso de los bosques, café, ornamentales. Hay otros usos como son los residenciales, caminos y cultivos con granos, entre otros. Algunos usos, contribuyen con una mayor infiltración de las aguas,

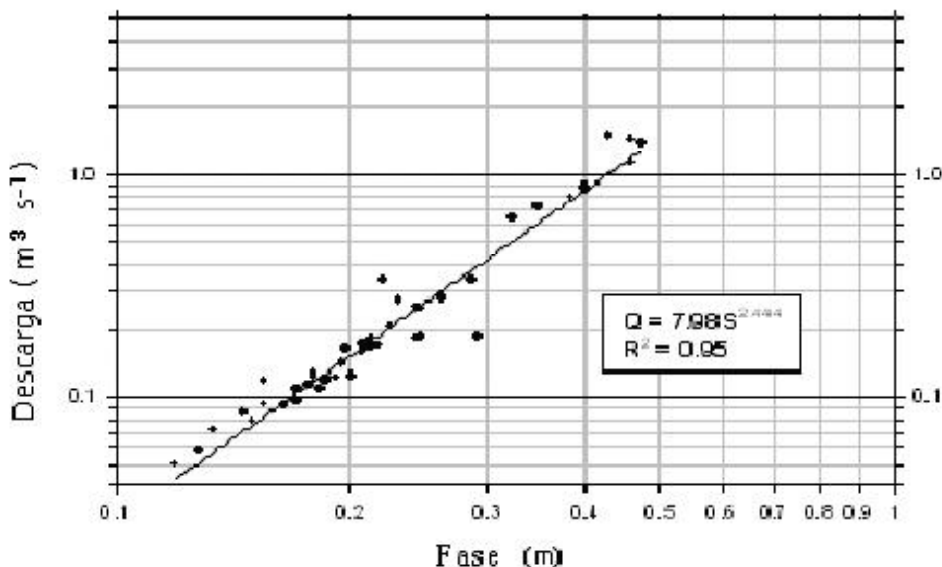


Figura 4. Curva de valoración Fase-descarga para la quebrada Estero

Las velocidades son convertidas a $m s^{-1}$, y la descarga es calculada como:

$$Q = A * V \tag{9}$$

donde Q es la descarga en metros/segundo (m^3s^{-1}), A es el área en m^2 del flujo del cauce a lo largo del perímetro de la quebrada y V es la velocidad del caudal, la cual es proporcionado por la sonda de flujo.

La relación entre la fase observada en la ubicación de la medida de profundidad automática y la descarga estimada (Figura 4) puede representarse matemáticamente como:

$$Q = 7.98S^{2.444} \tag{10}$$

mientras que los otros, contribuyen con una mayor escorrentía superficial, al ser superficies prácticamente impermeables.

La Figura 4 muestra que existen ciertos sectores con un coeficiente de Manning inferior como es el caso de algunos afluentes ubicados en la parte alta de la microcuenca (mediciones 1, 2, 3, 6, 7, 8 y 13), mientras que algunos sectores ubicados en la parte media y baja de la microcuenca presentan coeficientes superiores (mediciones 4, 5, 9, 10, 11, 12). Asimismo, se puede observar que cuando es mayor el ancho del canal también es mayor la profundidad, correspondiendo ambas con un mayor coeficiente de Manning.

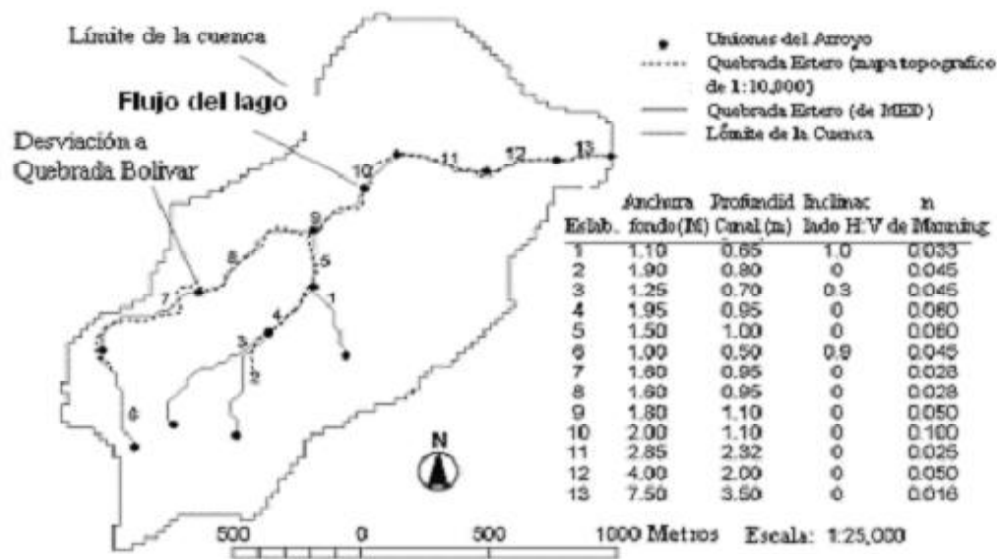


Figura 5. Aplicación del coeficiente de Manning en varios sectores de los cauces de quebrada Estero.

5. CONCLUSIONES

En varios sectores de la microcuenca se han dedicado en los últimos diez años terrenos para la construcción de urbanizaciones, los cuales presentan limitaciones debido a las fuertes pendientes. Esta situación se ha convertido en un obstáculo, dado que se hace muy difícil proveer ciertos servicios básicos como recolección de desechos, red de alcantarillado de aguas residuales y aguas negras, entre otros, y facilita la ocurrencia de deslizamientos. Además de que gran parte de la quebrada tiene construcciones sobre y en sus márgenes. Se está empezando a construir en la parte alta de ésta, lo cual está alterando el balance hídrico al quedar áreas, que deberían estar bajo cobertura forestal, más bien están desprovistas de ésta. Esta situación está contribuyendo con la ocurrencia de inundaciones en sectores medios y bajos de la microcuenca.

A parte de la alteración ambiental que provoca las construcciones en sitios inapropiados como son sobre la quebrada y en sitios de pendiente inclinada, el coeficiente de Manning es un indicativo de que las construcciones en este tipo de sitios provocan una mayor disección y por ende una mayor escorrentía superficial sobre todo en aquellos casos de tormentas intensas y de corta duración, dada la poca capacidad de infiltración que tiene la microcuenca sobre todo en los sectores medios y bajos.

La distribución espacial de la precipitación observada a través de la microcuenca Estero mostró que en ciertos sectores de la microcuenca se han dado descargas cumbres, particularmente para los eventos más grandes. Las tormentas pequeñas pareciera que a pesar de ser de corta duración, éstas se ven incrementadas por la impermeabilidad del suelo. Este problema se hace más importante en décadas recientes debido a que la parte más baja de la microcuenca ha ocurrido un incremento en las áreas urbanizadas y pavimentos.

En décadas pasadas (1979-1989) en la parte superior de la microcuenca el tipo de cobertura existente (bosque, cultivos) permitió una mayor infiltración de las aguas en el suelo. Sin embargo, esta situación a partir de la ubicación de las instalaciones de la Universidad de Costa Rica (Sede de Occidente), incluyendo sus alrededores ha cambiado radicalmente el patrón de retención de las aguas, provocándose una mayor escorrentía superficial. Esto se ha dado no sólo por la presencia de sectores urbanizados, sino también por la irregular topografía del terreno, que incluso tiene forma de embudo, lo que contribuye no sólo a canalizar, sino también a que las aguas adquieran una mayor velocidad. Una forma de mejorar este estudio en un futuro sería por medio de la instalación de medidores de lluvia automáticos adicionales dentro de la microcuenca, lo que podría cuantificar mejor la distribución espacial actual de los eventos de precipitación.

REFERENCIAS

- Bedient, P. B. y Huber, W. C., 1988. Hydrology and floodplain analysis, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Bonell, M., 1993. Recent scientific developments and research needs in hydrological processes of the humid tropics. Hydrology and water management in the humid tropics, M. Bonell, ed., Cambridge University Press, pp. 167-260.
- Betson, R. P., 1964. What is watershed runoff?. Journal of Geophysical Research, 69, pp. 1541-1552.
- Beven, K. J., 1985. Distributed models. Hydrological forecasting, M. G. Anderson and T. P. Burt, eds., Wiley, Chichester, England, pp. 405-435.
- Chorley, R. J., 1978. The hillslope hydrological cycle. Hillslope hydrology, M. J. Kirkby, ed., John Wiley and Sons, Chichester, pp. 1-42.
- Dingman, S. L., 1994. Physical hydrology, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Doe, W. W., III, Saghafian, B., y Julien, P. Y., 1996. Land-use impact on watershed response: The integration of two-dimensional hydrological modelling and geographical information systems. Hydrological Processes, 10(11), pp. 1503-1511.
- Dunne, T., 1978. Field studies of hillslope processes. Hillslope hydrology, M. J. Kirkby, ed., John Wiley and Sons, Chichester, pp. 227-294.
- Freeze, R. A., 1974. Streamflow generation. Review of Geophysics and Space Physics, 12, pp. 627-647.
- Giambelluca, T. W., 2002. Hydrology of altered tropical forest. Hydrological Processes, 16(8), pp. 1665-1669.
- Gray, D. M., 1970. Handbook on the principles of hydrology, with special emphasis directed to Canadian conditions in the discussions, applications and presentation of data, Ottawa, Secretariat, Canadian National Committee for the International Hydrological Decade.
- Hewlett, J. D. y Hibbert, A. R., 1967. Factors affecting the the response of smalll watersheds to precipitation in humid areas. Forest hydrology, W. E. Sopper and H. W. Lull, eds., Pergamon Press, Oxford, New York, pp. 275-290.
- Horton, R. E., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions of the American Geophysical Union, 14, pp. 446-460.
- Hutchinson, M. F., 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology, 106(3-4), pp. 211-232.
- Instituto Geográfico Nacional Costa Rica, 1991. Mapa 1:10,000, San Ramón. Ed. IGNCR. San José.
- Julien, P. Y., Saghafian, B., y Ogden, F. L., 1995. Raster-Based Hydrologic Modeling of Spatially-Variied Surface Runoff. Water Resources Bulletin, 31(3), pp. 523-536.
- Koenigs, D. M., 1998. Computer assisted instruction as an effective addition to classroom teaching of runoff modeling. Master's Degree in Landscape Architecture, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Ogden, F. L., Sharif, H. O., Senarath, A., et al, 2000. Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997. Journal of Hydrology, 228(1-2), pp.82-100.
- Ogden, F., 2002. Theory, development, and applicability of the surface water hydrologic model CASC2D. Hydrological Processes, 16(2), pp. 255-275.
- Quesada M., 2001. Evaluación socioambiental del riesgo de inundación de la quebrada Estero, San Ramón. Proyecto de Investigación. Universidad de Costa Rica.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., y Miller, N., 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 109(1), pp.62-70.
- Rogers, P., 1994. Hydrology and water quality. Changes in land use and land cover : A global perspective, William B.Meyer and B.L.Turner II, eds., Cambridge University Press, New York, NY, pp. 231-257.
- Sammis, T., 1996. Soil texture analysis. Online. April 15, 2002. http://weather.nmsu.edu/Teaching_Material/soil456/soiltexture/soiltext.htm.
- Waylen, P., Poveda, G., Mesa, O., et al., 1998. Rainfall distribution and regime in Costa Rica and its response to the El Niño-Southern Oscillation. Conference of Latin Americanist Geographers Yearbook, 24 (1998) pp. 75-84.
- Waylen, P.R., y S. Laporte., 1999. Flooding and the El Niño Southern Oscillation phenomenon along the Pacific cost of Costa Rica. Hydrological processes, 13. pp. 2623-2638.
- Whipkey, R. Z. y Kirkby, M. J., 1978. Flow within soil. Hillslope hydrology, M. J. Kirkby, ed., John Wiley and Sons, Chichester, pp. 121-144.
- Wong T.S.W. y Chen, C.-N. 1994. Use of a tropical basin model to assess the importance of urbanized land condition on the increase of flood peak. Water Science & Technology, 29(1-2), pp. 155-161.