

**Caracterización de la relación
precipitación-escorrentía en las microcuencas
El Guayabo y Los Anteojos**

Luis Alberto Vásquez Flores

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2015

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA EN AMBIENTE Y DESARROLLO

Caracterización de la relación precipitación-escorrentía en las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Luis Alberto Vásquez Flores

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2015

Caracterización de la relación precipitación-escorrentía en las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos

Presentado por:

Luis Alberto Vásquez Flores

Aprobado:

Erika Tenorio, M.Sc.
Asesora Principal

Laura Suazo, Ph.D.
Directora
Departamento de Ambiente y
Desarrollo

Alexandra Manueles M.Sc.
Asesora

Raúl Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

Caracterización de la relación precipitación-escorrentía en las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos

Luis Alberto Vásquez Flores

Resumen. El manejo de las cuencas hidrográficas es clave para asegurar la calidad y disponibilidad del agua. La microcuenca Santa Inés abastece de agua para consumo y riego a comunidades de la zona. El objetivo del estudio fue cuantificar y comparar la respuesta hidrológica de los tributarios ante eventos de precipitación. Se realizó la caracterización morfométrica de dos tributarios de la microcuenca Santa Inés: El Guayabo y Los Anteojos. Con base en estas características y la cobertura de la zona se modelaron cuatro eventos de lluvia con HEC-HMS (“Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System”) para ambos tributarios. La precipitación se midió con dos pluviómetros instalados en las comunidades de El Guayabo y Los Lirios. Los eventos de lluvia fueron seleccionados de los registros de Mayo a Septiembre del 2015. En cada quebrada se midió el caudal con intervalos de cinco minutos en vertederos equipados con traductores de presión. El comportamiento del caudal fue similar con un $R^2 = 0.88$ entre ambas microcuencas. El coeficiente de escurrimiento (k) fue menor en Los Anteojos con un mínimo de 0.018 y un máximo de 0.064. En El Guayabo el mínimo fue de 0.033 y el máximo de 0.064. Las modelaciones con HEC-HMS tuvieron diferencias con rangos de 31.95% a 386.54% en volumen y de -58.80% a 198.10% en caudal pico con respecto a lo observado. Las actividades de manejo de la microcuenca ameritan la misma importancia en ambos tributarios. Las modelaciones con HEC-HMS con la información actual no tienen resultados satisfactorios que reflejen los escenarios reales de respuesta ante eventos de precipitación.

Palabras clave: Coeficiente de escurrimiento, HEC-HMS, hidrometría, vertederos.

Abstract. Watershed management is key to ensuring the quality and availability of water. The Santa Inés watershed provides water for human consumption and agricultural irrigation to the communities of this region. The aim of the study was to quantify and compare the hydrological response to rainfall events in two tributaries in this region. A morphological characterization of two tributaries of the Santa Inés watershed was developed: El Guayabo and Los Anteojos. Modeling of four rainfall events was performed with HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System) for both tributaries. Precipitation was measured with two rain gauges installed in the El Guayabo and Los Lirios communities. Rainfall events were selected from records between May 2015 to September of 2015. Both streams are equipped with V-notch structures and a pressure transducer for flow measurement at intervals of five minutes. The results demonstrate flow behavior is similar for each of the streams with an $R^2 = 0.88$. The runoff coefficient was lower for the four events in Los Anteojos with a minimum $k = 0.019$ and a maximum $k = 0.048$. In El Guayabo the runoff coefficients (k) ranged from 0.033 to 0.064. The modeling with HEC-

HMS demonstrated a range of differences between 31.95% to 386.54% in volume, and between -58.80% to 198.10% for peak flow. Additional modeling with HEC-HMS is needed to better understand stream responses to rainfall events, and to facilitate improved management activities for this watershed.

Key words: HEC-HMS, Hydrometrics, Runoff coefficients, stream gauging

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	v
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	8
4. CONCLUSIONES.....	15
5. RECOMENDACIONES.....	16
6. LITERATURA CITADA.....	17
7. ANEXOS.....	20

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Caracterización morfométrica de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos.....	8
2. Aportaciones y coeficientes de escurrimiento para cuatro eventos de precipitación en las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos.....	11
3. Tiempos para alcanzar caudal pico en ambas microcuencas durante los eventos analizados.	12
4. Resumen de parámetro y valores utilizados para la calibración de los modelos en Los Anteojos	12
5. Resumen de parámetro y valores utilizados para la calibración de los modelos en El Guayabo.....	12
6. Caudal pico estimado y observado y porcentaje de diferencia en volumen y caudal pico respecto a lo observado, Quebrada El Guayabo, Honduras, 2015.	13
7. Caudal pico estimado y observado y porcentaje de diferencia en volumen y caudal pico respecto a lo observado, Quebrada Los Anteojos, Honduras, 2015.	14
Figuras	Página
1. Ubicación de las microcuencas Los Anteojos y El Guayabo en la microcuenca Santa Inés, Honduras.....	3
2. Mapa de red hidrometeorológica.....	5
3. Usos y Coberturas de suelos en el área de la microcuenca Santa Inés seleccionada para el estudio.	9
4. Relación entre las alturas de agua en los vertederos de los tributarios Los Anteojos y El Guayabo durante un evento de precipitación.	10
5. Hidrograma y hietograma de un evento de precipitación para ambos tributarios (4 de septiembre).....	10

Anexos	Página
1. Comparación de caudales simulado y observado.	20
2. Caudales y precipitación de El Guayabo y Los Antejos para los cuatro eventos. a) 06 junio del 2015 b) 07 de junio del 2015 c) 09 de julio del 2015 c) 04 de septiembre del 2015	21

1. INTRODUCCIÓN

Honduras es un país de vocación forestal en el que predominan las zonas montañosas. Gran parte de la producción de alimentos nacional proviene de agricultura de laderas. Como consecuencia, la agricultura tradicional en las zonas de recarga hídrica de las cuencas hidrográficas impulsa la sustitución de la cobertura boscosa por cultivos. Estos cambios en la cobertura tienen un impacto en el ciclo hidrológico.

El mal manejo de cuencas en la región evidencia en la falta de obras de conservación de suelos, y en la alta presión de la agricultura en las riberas de los ríos o el uso no controlado del recurso por parte de las comunidades, mientras que las autoridades no tienen mayor control sobre lo que las comunidades hacen en la cuenca. Aunado a esto, los patronatos y las juntas de agua no cuentan con las herramientas necesarias para tomar decisiones respecto al manejo del recurso.

La alteración de la cobertura boscosa modifica el comportamiento de las avenidas en los cuerpos de agua lo que resulta en mayores crecidas en los ríos y quebradas (Acevedo y Redfearn 2008). Sin embargo esto no garantiza mayor cantidad de agua durante todo el año sino gran cantidad de agua escurrida en periodos cortos de tiempo. Estas avenidas ponen en riesgo a los residentes de las zonas aledañas a los ríos; tanto sus casas como sus cultivos se ven en peligro durante cada temporada de lluvias (Lopez *et al.* 2010).

La temporada de lluvias en Honduras ocurre entre los meses de mayo a noviembre con un espacio de pocas lluvias entre los meses de julio y agosto conocido como canícula. Durante los últimos años los patrones climáticos no han tenido un comportamiento normal. La agricultura es uno de los rubros más afectados por los comportamientos climáticos lo cual resulta en graves repercusiones en los cultivos de los agricultores que no poseen sistemas de riego. No se puede asegurar cómo será el comportamiento de las épocas lluviosas en los siguientes años (MMO 2015), sin embargo si las cuencas no son manejadas correctamente, los habitantes y sus cultivos se vuelven más vulnerables ante eventos de sequías o lluvias extremas.

En la microcuenca Santa Inés existe ya un balance hídrico presentado por Huevo (2011). Acosta y Kucharsky (2012) realizaron una modelación hidrológica con el modelo SWAT. Asimismo se han desarrollado estudios similares sobre la generación de escorrentía y los usos y coberturas en El Paraíso, Honduras (Bonilla y Garay 2013) cuyos resultados contribuyen a orientar acciones de manejo y comprender el comportamiento hidrológico. La calidad y cantidad de agua disponible en la microcuenca Santa Inés depende de factores como la cobertura vegetal, el tipo de suelos, la pendiente y el manejo de los cultivos. La microcuenca, actualmente, es fuente de agua de consumo para comunidades de la zona, además es fuente de agua para riego en Zamorano y potencialmente para consumo humano.

Por ello, el conocer el estado actual de los tributarios de la microcuenca Santa Inés en cuanto a la generación de escorrentía permite proyectar la cantidad de agua disponible bajo futuras condiciones.

Entender el funcionamiento de las microcuencas permite a Zamorano diseñar un mejor manejo de las áreas. Lo anterior sienta además las bases para nuevas investigaciones en esta misma microcuenca y sirve de referencia para estudios similares en otras microcuencas. Las decisiones que se pueden tomar a partir del conocimiento del funcionamiento de la microcuenca pueden mejorar las condiciones de los agricultores y su adaptación al cambio climático.

En este estudio se comparó entre dos tributarios de la microcuenca la generación de escorrentía a partir de cuatro eventos de precipitación ocurridos durante los meses de mayo a septiembre. Los objetivos del estudio fueron:

- Realizar una caracterización morfométrica y de cobertura de los tributarios El Guayabo y Los Anteojos para conocer los elementos fisiográficos que determinan la respuesta hidrológica de los mismos ante eventos de lluvia.
- Describir la respuesta hidrológica en generación de escorrentía superficial generada bajo cuatro eventos de precipitación en la microcuenca mediante la estimación de los coeficientes de escurrimiento para dichos eventos.
- Validar la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS para predecir la respuesta hidrológica de los tributarios ante eventos de precipitación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La microcuenca Santa Inés se encuentra localizada entre el Departamento de Francisco Morazán y El Paraíso y se forma por dos tributarios: El Guayabo se localiza en las coordenadas geográficas extremas UTM 509858 y 505897 longitud y 1541309 y 1543866 y Los Anteojos entre las coordenadas geográficas extremas UTM 508551 y 505045 longitud y 1540990 y 1543784. La microcuenca de El Guayabo se encuentra a una elevación de 1,148 a 1,080 metros sobre el nivel del mar, con un área de 707 ha; El Hondable tiene una elevación entre 1,146 y 1,116 metros sobre el nivel del mar con una área de 390 ha. (Figura 1).

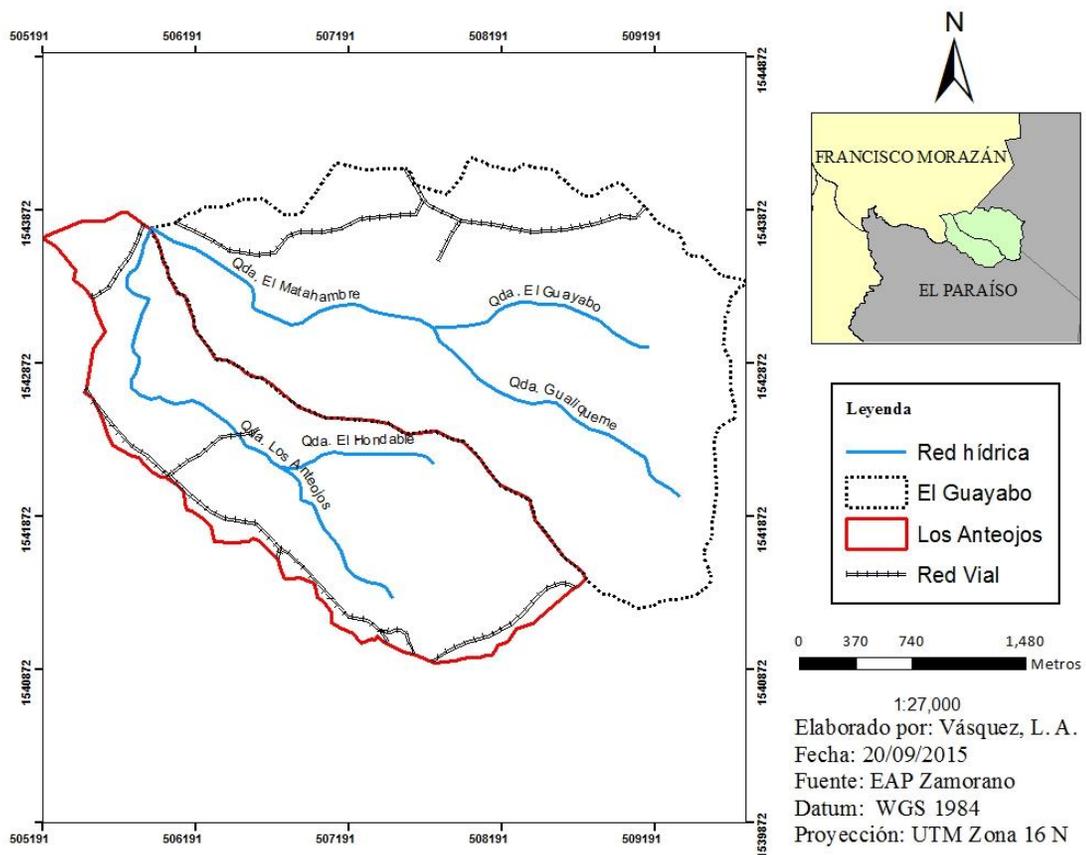


Figura 1. Ubicación de las microcuencas Los Anteojos y El Guayabo en la microcuenca Santa Inés, Honduras.

Delimitación de las microcuena. Se utilizaron las áreas de las microcuenas calculadas en la delimitación realizada en ArcGis 9.3, con curvas a nivel de veinte metros proporcionadas por la Unidad de SIG del departamento de Ambiente y Desarrollo. Ambas microcuenas fueron delimitadas hasta el punto de aforo.

Mapa de usos y la cobertura. Para elaborar el mapa del uso y la cobertura del suelo, se utilizó la información de Kucharsky y Acosta (2012). Se clasificó la cobertura en tres categorías: bosque latifoliado, bosque de pino y agricultura.

Caracterización morfométrica. Se calcularon los parámetros morfométricos de cada tributario: pendiente, largo, ancho, área, altura máxima y mínima además se calcularon los índices de forma y tiempo de concentración. Estos parámetros que contribuyen a explicar el comportamiento hidrológico de la microcuena y hacer comparaciones entre las microcuenas. Se utilizó Kirpich para el cálculo del tiempo de concentración (Ecuación 1). Para compara la forma de las microcuenas se calculó el índice de Gravelius (Ecuación 2), la densidad de drenaje se calculó con la ecuación 3 y el resto de parámetros se calcularon con las herramientas básicas del programa ArcGIS 9.3.

$$T_c = 3.97 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad [1]$$

$$k = 0.282 \times \left(\frac{P}{(A)^{0.5}} \right) \quad [2]$$

$$D_d = \frac{\sum c}{A} \quad [3]$$

Donde:

T_c = Tiempo de concentración en minutos

L = Longitud del cauce en kilómetros

S = Pendiente media (m/m)

k = Coeficiente de escorrentía

p = Perímetro de la cuenca

A = Área de la cuenca en km^2

D_d = Densidad de drenaje en km/km^2

$\sum c$ = Sumatoria de los cauces en km

Medición de Precipitación. La precipitación se midió durante los meses de mayo a septiembre. Para ello se instaló una estación meteorológica “addVANTAGE Pro 6.2” ubicada en la comunidad de El Guayabo (1397 msnm) dos pluviómetros “Hoboware Onset Tipping Bucket” ubicados en las Comunidades de El Guayabo (1397 msnm) y Los Lirios (1014 msnm). Las estaciones registran información cada 5 minutos. Los datos fueron descargados cada 15 días. De esta información se utilizó el pluviómetro más cercano al vertedero para cada tormenta (Figura 2).

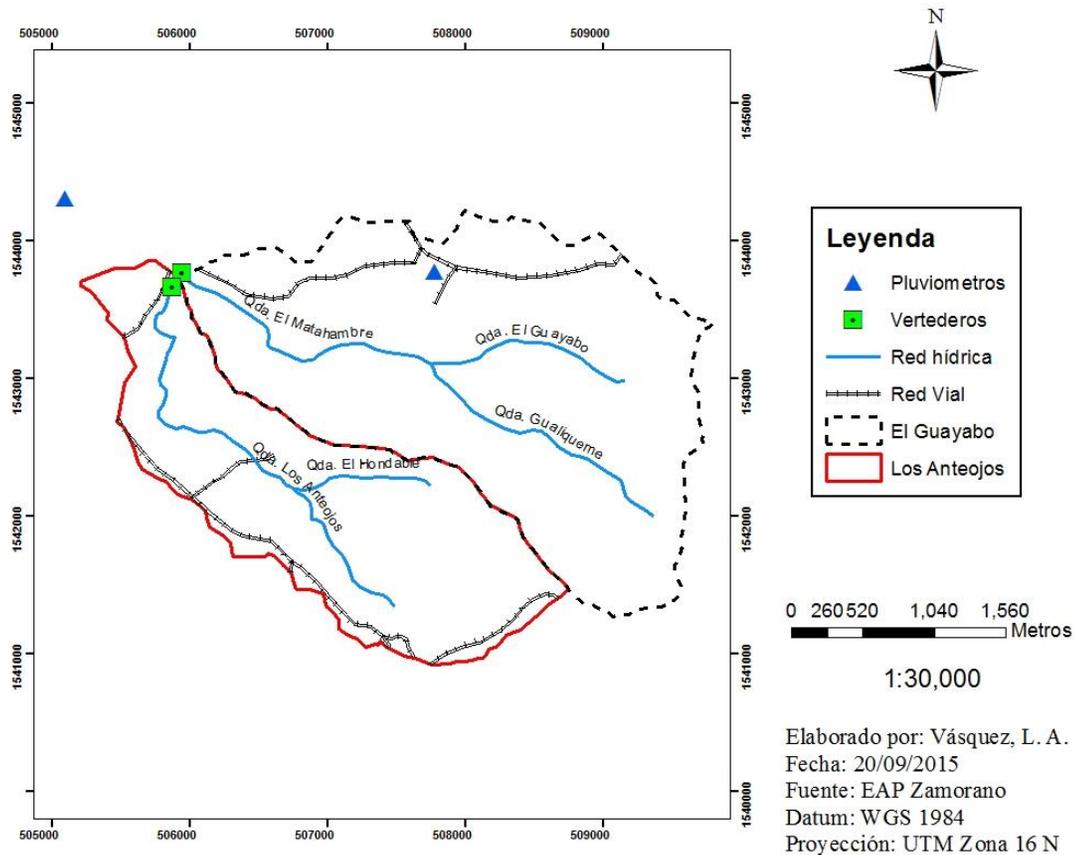


Figura 2. Mapa de red hidrometeorológica.

Cuantificación del caudal y la escorrentía producida por los cuatro eventos de lluvia.

Ambas microcuencas experimentales están equipadas con vertederos. La microcuenca El Guayabo cuenta con un vertedero rectangular con contracciones y la quebrada Los Anteos con un vertedero tipo V-notch, con un ángulo en de 60° que permite medir los caudales bajos y obtener mayor precisión en los datos. En cada vertedero se instaló un sensor de presión de agua, el cual registra cada cinco minutos el nivel de agua que pasa por el vertedero. La información es almacenada en una memoria de un traductor de presión “Global Water” (WL16) ®, que después de descargarla es utilizada para calcular caudal en m^3/s por medio de las ecuaciones 4 y 5 para el vertedero rectangular con contracciones y el vertedero tipo V-notch 60° respectivamente (Grant 2001).

$$Q = C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad [4]$$

$$Q = C_d h_2^5 + C_d(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad [5]$$

Donde

Q = Caudal que fluye por el vertedero en m^3/s
 C_d = Coeficiente de descarga

L = Longitud de la cresta del vertedero en metros
H = Altura de la cresta en metros
n = Número de contracciones

Selección de eventos. La modelación requiere de eventos de lluvia con una cantidad de lluvia que permita ver una respuesta en el caudal. De la base de datos de lluvia de mayo a septiembre se seleccionaron cuatro eventos mayores de 30 milímetros y con duración mayor a dos horas para realizar la modelación. La falta de eventos con estas características fue una limitante por la que no se realizaron más modelaciones.

Regresión lineal. Para el llenado de datos faltantes se graficaron las alturas de las crestas de ambos vertederos para un evento de 33.37 mm y una duración de 5 horas, con el objetivo de obtener una ecuación que relacione el caudal de ambos tributarios y poder completar datos faltantes en uno de los vertederos.

Separación del flujo base. Se separó el flujo base por el método lineal. Para la estimación del coeficiente de escorrentía. Este método conecta el punto donde inicia el incremento del caudal con el punto en el que el caudal vuelve al punto de inicio (Chow *et al.* 1994).

Coefficiente de escorrentía. Este coeficiente representa el porcentaje de escorrentía que se genera a partir de un evento de lluvia. Es calculado por el cociente de la lámina escurrida y la lámina de precipitación.

Numero de curva. Es un parámetro empírico utilizado para predecir la escorrentía directa como resultado de la precipitación efectiva o precipitación en exceso (NRCS). Para las simulaciones iniciales se utilizó como número de curva, NC= 56 estimado por estudios anteriores en la microcuenca (Castejón 2014).

Modelación con HEC-HMS

HEC-HMS 3.5 es un programa de acceso libre diseñado por El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos para simular el proceso de precipitación-escorrentía en cuencas. Con base en una simulación de la respuesta de la microcuenca a un evento de precipitación se obtuvo un hidrograma. Los resultados se compararon con los datos de precipitación y caudal para la calibración del modelo "Hydrologic Engineering Center". Se corrió una modelación por cada microcuenca para cuatro eventos de precipitación. El programa requiere los componentes de modelo de cuenca, modelo meteorológico, especificaciones de control y los datos de la serie de tiempo, los cuales se describen a continuación:

- **Modelo de la cuenca**

El modelo de la cuenca representa la cuenca física, incluye el área de la cuenca y es el elemento base para poder configurar los parámetros para la modelación (Ali *et al* 2011).

- **Modelo meteorológico**

El modelo meteorológico procesa la información de precipitación que se introduce (Ali *et al* 2011). Se configuró con un hidrograma, unidades del sistema métrico y sin considerar evapotranspiración. Se utilizó un modelo meteorológico por cada evento de precipitación.

- **Especificaciones de control**

Este parámetro especifica el día y hora de inicio y final de la modelación. Se configuró una especificación de control para cada evento con intervalos de 5 minutos.

- **Datos de serie de tiempo**

Se utilizaron datos del pluviómetro cercano disponible para cada evento. Con entrada de datos manuales y unidades de milímetros incrementales e intervalos de 15 minutos.

- **Calibración del modelo.**

Luego de hacer la modelación, debido a la diferencia entre los valores estimados y los valores observados en caudal, se calibraron los modelos con el método “Peak-weighted root mean square error”. Este método calibra la modelación y además proporciona valores de error respecto a lo observado del volumen exportado y el caudal pico (Ecuación 6). Para su desarrollo utiliza la ecuación 6, con base en los resultados obtenidos por la modelación y los caudales observados (Feldman 2000).

$$Z = \left\{ \frac{1}{NQ} \left[\sum_{i=1}^{NQ} (q_o(i) - q_s(i))^2 \left(\frac{q_o(i) + q_o(mean)}{2q_o(mean)} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad [6]$$

Donde:

Z = función objetivo

NQ = número de hidrogramas computarizados

q_o = caudales observados

$q_s(t)$ = caudales calculados, computarizados con ciertos parámetros

$q_o(mean)$ = media de los caudales observados

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio se realizó bajo condiciones de un episodio fuerte y maduro del fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENSO), lo cual representó sequías para la zona. Este episodio es considerado el más fuerte desde 1997/1998 según la MMO (2015). Por lo tanto, se evaluaron condiciones atípicas del comportamiento de precipitación en la región.

Las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos son similares en los principales parámetros morfométricos que influyen en el comportamiento hidrológico, con excepción del área (Cuadro 1). Los Anteojos con 3.90 km² representa el 55% del área de El Guayabo de 7.07 km². El índice de compacidad de Gravelius el cual compara la longitud del perímetro con la circunferencia de un círculo con igual superficie que la cuenca (González 2004), este influye en el tiempo a caudal pico, pues de la forma depende el movimiento del agua hasta el punto de aforo.

Cuadro 1. Caracterización morfométrica de las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos

Parámetro morfométrico	Unidad	El Guayabo	Los Anteojos
Área	km ²	7.07	3.91
Perímetro	km	11.83	10.40
Longitud	km	3.76	3.44
Ancho	km	0.60	0.38
Suma de longitud de cauces	km	5.50	4.32
Altura máxima del cauce	msnm	1628	1447
Altura mínima del cauce	msnm	1133	1117
Pendiente de la cuenca	%	18.09	16.77
Pendiente del cauce	%	12	10
Tiempo de concentración	min	27	24
Índice de Gravelius	K	1.25	1.48
Densidad de drenaje	km/km ²	0.78	1.11

Los usos del suelo en ambas microcuencas son: agricultura, bosque de coníferas y bosque latifoliado. La principal diferencia en los usos el porcentaje de agricultura. La presión por agricultura en El Guayabo es menor con el 6% comparado con el 46% de Los Anteojos. En el periodo del cuatro de mayo al cuatro de septiembre las microcuencas aportaron 1.08 y 0.28 hectómetros cúbicos de agua respectivamente (Figura 3).

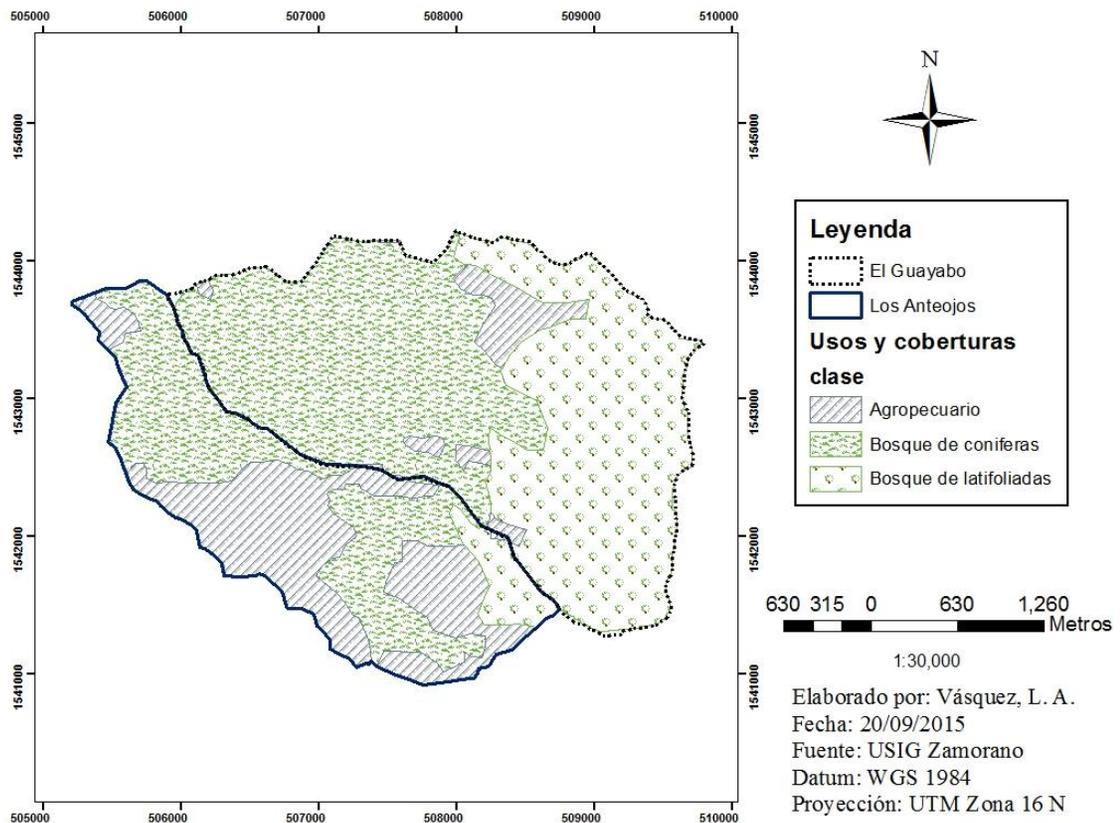


Figura 3. Usos y Coberturas de suelos en el área de la microcuenca Santa Inés seleccionada para el estudio.

El caudal máximo observado durante los cuatro eventos fue de 2.10 m³/s para la quebrada El Guayabo y 0.90 m³/s para la quebrada Los Anteojos. El promedio del caudal de Los Anteojos es aproximadamente el 44.83 % del caudal de El Guayabo. La diferencia en caudal está relacionada con la diferencia de área contribuyente de ambas microcuencas.

Con base en los datos de caudal de ambas quebradas durante el evento del cuatro de septiembre se calculó una regresión lineal con un R² de 0.88; para comparar la respuesta hidrológica ante eventos de precipitación (Figura 4). Esta correlación significa una respuesta similar de ambas quebradas ante los eventos de precipitación aun cuando tiene variaciones en caudal tienen la misma forma de respuesta como se puede observar en la figura 5. El tipo de respuesta está relacionado con la forma de las microcuencas, siendo ovalada para ambas según el índice de Gravelius.

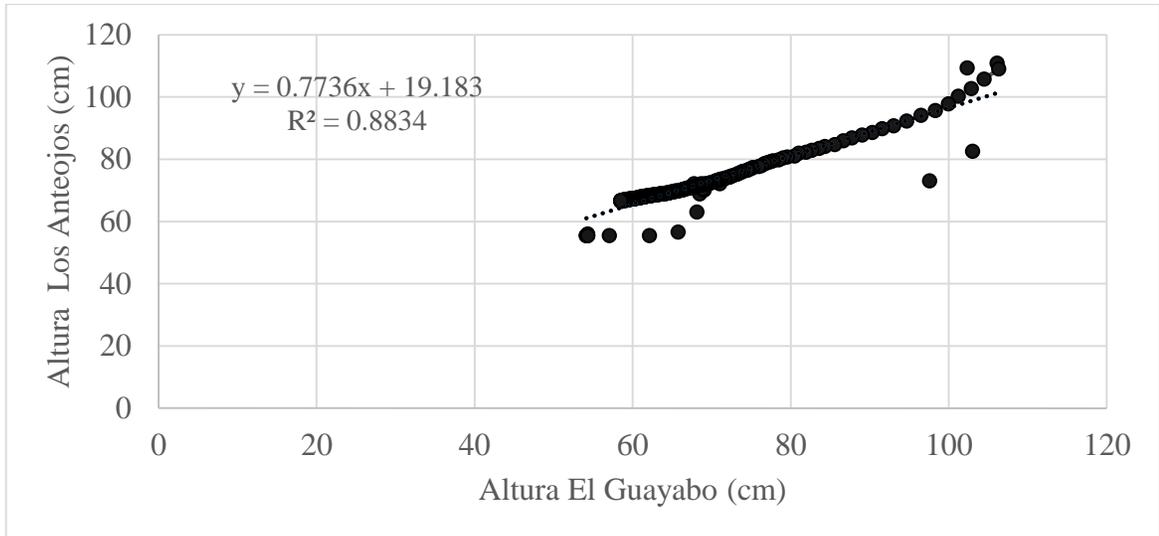


Figura 4. Relación entre las alturas de agua en los vertederos de los tributarios Los Anteojos y El Guayabo durante un evento de precipitación.

Durante el evento registrado el 4 de septiembre, el cual tuvo una precipitación total de 37 mm se observa el mismo patrón de respuesta de ambas microcuencas con relación a la curva de ascenso y de recesión del hidrograma. El Guayabo alcanza su caudal pico antes que Los Anteojos pero su tiempo de retorno a las condiciones iniciales es muy similar (Figura 5).

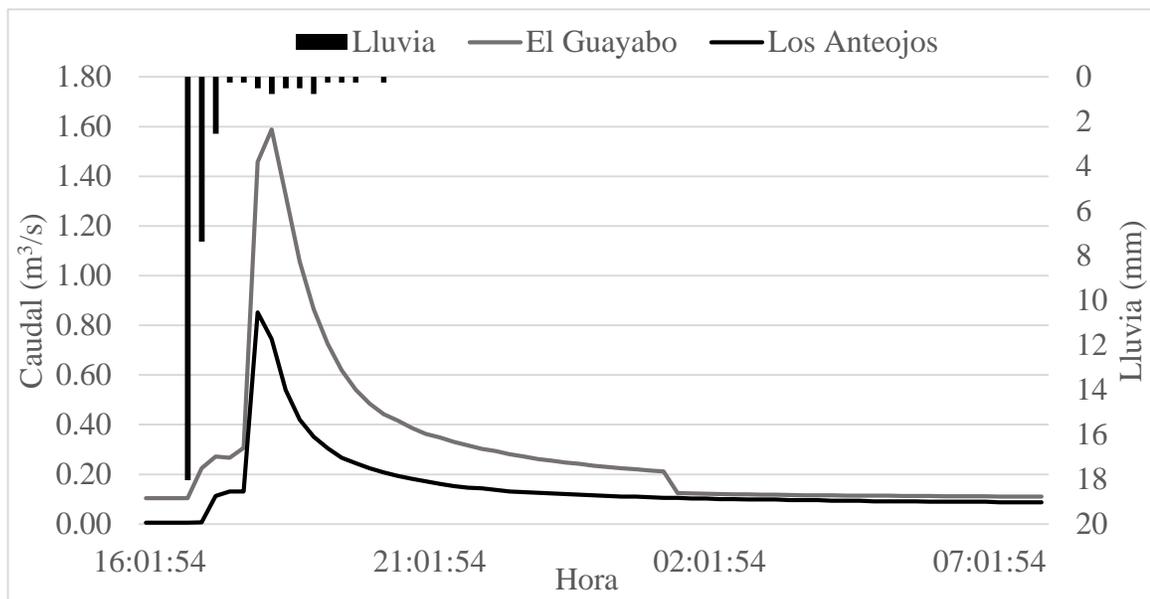


Figura 5. Hidrograma y hietograma de un evento de precipitación para ambos tributarios (4 de septiembre).

El coeficiente de escurrimiento fue menor en El Guayabo para tres de los cuatro eventos. La diferencia entre ambas microcuencas no supera el 1.46%. Estos indicadores reflejan que El Guayabo tiene una mayor infiltración y una menor aportación (Cuadro 2). Camas *et al* (2012) encontraron diferencias en los coeficientes de escurrimientos para diferentes manejos con valores de k más bajos en sistemas agroforestales (Camas *et al* 2012). Los coeficientes pueden ser muy variables aun con condiciones de cobertura similares (Perez *et al.* 2005) encontraron valores desde 0.008 hasta 0.14 todos en sistemas agroforestales, por lo que ellos sugieren que los coeficientes también pueden estar relacionado con la cantidad de lluvia.

El valor k, también encontrado en la literatura como C_R o C (Chow *et al.* 1994) basados en eventos pueden variar mucho a los calculados anualmente (Blume *et al.* 2007). Para tomar la comprensión de la relación precipitación-escorrentía los cálculos basados en tiempos cortos de tiempo son más adecuados (Pektas y Cigizoglu 2013). Blume *et al.* (2007) encontraron para eventos de lluvia en el rango de 13 a 58 mm valores de k de 0.020 a 0.057 similares a los valores de El Guayabo y Los Anteojos donde en eventos de 33.27 a 59 mm los valores de k oscilan entre 0.018 a 0.064.

Cuadro 2. Aportaciones y coeficientes de escurrimiento para cuatro eventos de precipitación en las microcuencas El Guayabo y Los Anteojos.

Evento	Lluvia (mm)	Aportación (mm)	Aportación (10^3m^3)	k	Aportación (mm)	Aportación $1000(m^3)$	k
		El Guayabo			Los Anteojos		
1	37.20	1.45	10.27	0.039	1.63	6.36	0.044
2	57.00	1.28	9.04	0.022	1.04	4.05	0.018
3	59.00	2.65	18.75	0.045	2.68	10.48	0.045
4	33.27	1.65	11.64	0.049	2.13	8.33	0.064

El tiempo para alcanzar el caudal pico entre ambas microcuencas es similar, la mayor diferencia registrada en tiempo a caudal fue de 5 minutos. Los tiempos a caudal pico van desde 1:48 horas hasta 3:15 horas con excepción de la segunda tormenta, la cual tiene 10:25 y 10:30 para Los Anteojos y El Guayabo respectivamente, debido a la baja intensidad y larga duración del evento, la cual inicio a las 03:40:00 am y finalizo a las 4:25:00 pm. El tiempo para alcanzar el caudal pico está relacionado con la forma ovalada de ambas microcuencas de acuerdo con el índice de compacidad de Gravelius.

Cuadro 3. Tiempos para alcanzar caudal pico en ambas microcuencas durante los eventos analizados.

Tormenta	<u>El Guayabo</u> Hora inicio	Hora a caudal pico	Tiempo a caudal pico	<u>Los Anteojos</u> Hora inicio	Hora a caudal pico	Tiempo a caudal pico
1	21:15	00:30	03:15	21:15	00:30	03:15
2	21:58	23:50	01:52	21:58	23:45	01:48
3	03:40	14:10	10:30	03:45	14:10	10:25
4	16:15	18:10	01:55	16:15	18:05	01:50

En la calibración de los modelos el parámetro de ajuste que dio los mejores resultados no fue el mismo para ambas microcuencas ni el mismo para todos los eventos de una misma microcuenca. Sin embargo predominó para El Guayabo el parámetro de número de curva para de tres de las cuatro tormentas. Para Los Anteojos en las cuatro tormentas los mejores resultados se obtuvieron al modificar el parámetro de abstracción inicial (Cuadro 4 y 5).

Cuadro 4. Resumen de parámetro y valores utilizados para la calibración de los modelos en Los Anteojos

Evento	Parámetro de ajuste	Valor original (mm)	Valor ajustado	Objetivo función
1	Abstracción inicial	6.64	6.64	0.00
2	Abstracción inicial	6.40	6.56	-0.22
3	Abstracción inicial	32.00	32.00	0.00
4	Abstracción inicial	6.64	6.64	0.00

La calibración no mejoró al modificar más de un parámetro de ajuste. La calibración más acertada es el parámetro o combinación de parámetros que den como resultado la función objetivo más cercano a cero. La calibración es una limitante para las modelaciones hidrológicas (Bustamante 2008). Aun cuando la calibración tenga condiciones ideales, no Significa que lo observado y lo estimado será igual (Feldman 2000). El objetivo función si alcanzó el valor de 0.00 en seis de las ocho modelaciones y valores muy cercanos en las restantes (Cuadros 4 y 5).

Cuadro 5. Resumen de parámetro y valores utilizados para la calibración de los modelos en El Guayabo.

Evento	Parámetro de ajuste	Valor original (mm)	Valor ajustado	Objetivo función
1	Abstracción inicial	6.64	6.64	0.00
2	Número de curva	6.40	6.56	-0.22
3	Número de curva	56.00	32.00	0.00
4	Número de curva	6.64	6.64	0.00

El número de curva es un parámetro empírico, esto es una limitante para la modelación (López 2001; Ponce *et al.* 1996). Parámetros basados en características físicas como la infiltración podrían incrementar la exactitud en los resultados (Knebl *et al.* 2004). Conocer las tasas de infiltración es determinante para la calidad de las modelaciones hidrológicas (Craig *et al.* 2010).

La modelación con HEC-HMS sobreestimó los valores de caudal en las cuatro tormentas y para las dos microcuencas. Luego de la calibración del modelo, los nuevos valores observados fueron mayores para tres de las cuatro tormentas en El Guayabo la mayor diferencia es de 1.30 m³/s en caudal pico. En Los Anteojos durante las cuatro tormentas lo observado fue mayor a lo estimado. La mayor diferencia es de 0.40 m³/s en caudal pico. (Cuadro 5). La cantidad de datos de avenidas es una limitante para la modelación estudios como los de Estrada *et al.* (2012) realizaron 896 modelaciones de las cuales 11 fueron admisibles.

De acuerdo a la prueba “Peak-weighted root mean square error” la modelación calibrada sobreestimó los volúmenes totales para los cuatro eventos en ambas quebradas. Los caudales pico fueron sobreestimados en dos eventos y subestimados en dos eventos para ambas quebradas (Cuadros 6 y 7).

Cuadro 6. Caudal pico estimado y observado y porcentaje de diferencia en volumen y caudal pico respecto a lo observado, Quebrada El Guayabo, Honduras, 2015.

Evento	Precipitación (mm)	Caudal pico Estimado (m ³ /s)	Caudal pico observado (m ³ /s)	Diferencia volumen (%)	Diferencia caudal pico (%)
1	37.2	0.80	1.51	31.95	-44.70
2	57.2	0.80	2.10	53.34	-58.80
3	59.0	0.60	1.26	307.71	198.10
4	33.2	1.70	1.70	166.91	5.50

Las diferencias en volumen total producido por los eventos de lluvia en Los Anteojos van desde 52.95% hasta 386.54% mayores y las diferencias en caudal pico tienen un rango de -18% hasta 13.9% (Cuadro 5). En El Guayabo los valores de volumen resultantes de la modelación van desde 31.95% hasta 307.71% respecto a lo observado. Los caudales picos tienen un rango de -58.80 a 198% (Cuadros 6 y 7)).

Cuadro 7. Caudal pico estimado y observado y porcentaje de diferencia en volumen y caudal pico respecto a lo observado, Quebrada Los Anteojos, Honduras, 2015.

Evento	Precipitación (mm)	Caudal pico Estimado (m ³ /s)	Caudal pico observado (m ³ /s)	Diferencia volumen (%)	Diferencia caudal pico (%)
1	37.2	0.40	0.54	64.14	-18.10
2	57.2	0.80	0.70	386.54	13.90
3	59	0.50	0.46	74.70	2.60
4	33.2	0.50	0.90	52.95	-43.10

4. CONCLUSIONES

- Al realizar la caracterización morfométrica de ambas microcuencas se encontró que la principal diferencias entre ambas es el área de drenaje. Parámetros como forma y topografía son similares. Se encontraron diferencias de 1.32% de diferencia en pendiente de la cuenca, un 2% de diferencia en pendiente del cauce y 3 minutos de diferencia en el tiempo de concentración. Lo anterior permite que el escenario sea válido para la comparación de generación de escorrentía por dinámicas de usos y coberturas de suelo.
- Los coeficientes de escorrentía promedio fueron menores para El Guayabo. El rango de los coeficientes es de 0.018 a 0.064, por lo que con base en eventos únicos de precipitación las diferencias en cantidad de área de agricultura entre las microcuencas no se ve reflejado en los coeficientes de escorrentía.
- El rango de coeficientes de escorrentía resultantes de las cuatro tormentas para ambas microcuencas va desde 1.82% hasta 6.41% todos son indicadores de buena infiltración en ambas microcuencas y una gran capacidad de recarga de acuíferos en esta zona.
- Ante eventos de precipitación mayores a 30 mm y con duración mayor a dos horas la respuesta hidrológica es similar en ambas microcuencas tanto en la forma del hidrograma como el tiempo a caudal pico.
- No se obtuvo un modelo de precipitación-escorrentía que prediga volúmenes de descarga, caudal pico y tiempos a caudal pico debido a que la modelación con HEC-HMS subestimó respecto a lo observado, tres de las cuatro tormentas computadas en El Guayabo y las cuatro tormentas en Los Anteojos.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar una modelación con un programa que se base en sistemas de información geográfica, para tomar en cuenta otros parámetros relevantes en la modelación como las pendientes de la cuenca de los cauces del río, usos coberturas y clasificación de los suelos.
- Actualizar continuamente las bases de datos de usos y coberturas de los suelos, para que las modelaciones respondan a escenarios actuales y puedan compararse los efectos de los usos y coberturas de suelos.
- Estimar coeficientes de escurrimiento anuales con base en los registros permanentes de esorrentía y precipitación en los tributarios estudiados.
- Realizar estudios que incluyan la cuantificación de los sedimentos y nutrientes exportados.
- Realizar talleres en la microcuenca sobre la importancia de las buenas prácticas agrícolas, con el objetivo de reducir el impacto de la agricultura de ladera en la erosión de los suelos y la pérdida de cobertura.

6. LITERATURA CITADA

- Acosta Velásquez, A. y O. Kucharsky. 2012. Estudio edafológico y de cobertura para la modelación de hidrológica con el modelo SWAT de la microcuenca Santa Inés, Honduras. Tesis Ing. Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, El Zamorano, Escuela Agrícola Panamericana. 35 p.
- Acevedo, M. F., Redfearn, H. 2008. Modelación de los cambios de cobertura del territorio y sus consecuencias hidrológicas. *Environmental Management*. Vol. 72, N° 2, p. 94-103.
- Ali, M., Khan, S., Aslam, I., Khan, Z. 2011. Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 102, p. 271-279.
- BID, 2014. Agricultura y Clima Futuro en América Latina y el Caribe: Impactos Sistémicos y Posibles Respuestas [en línea]. División de Cambio Climático y Sostenibilidad. Consultado: 20/05/2015. Disponible en:
http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocu_ment.aspx?docnum=38585011
- Bonilla Portillo, M.H. y Garay Ellington, N. Relación precipitación-escorrentía concentración de los sedimentos suspendidos en las microcuencas Capiro y Zapotillo, Güinope, El Paraíso, Honduras. Tesis Ing. Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, El Zamorano, Escuela Agrícola Panamericana. 21 p.
- Blume, T., Zehe, E. y Bronstert, A. 2007. Rainfall–runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrological Science Journal*. Vol. 5, N° 5. p. 843-862.
- Bustamante Ortega, R. S. 2008. Calibración y validación del modelo HEC-HMS, en la cuenca de Huechún, región metropolitana. Memoria Ing. Forestal, Universidad de Talca, Chile. 95 p.
- Camas Gómez, R., A. Turrent Fernández., J. I. Cortes Flores., M. Livera Muñoz., A. González Estrada., B. Villar Sánchez., J. López Martínez., N. Espinoza Paz., y P. Cadena Iñiguez. 2012. Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferentes sistemas de manejo en Chiapas, México. Vol.3, N°2. p. 231-243.
- Castejón, J. 2014. Water, Climate and Development Training Program. The USAID Climate Change Resilient Development (CCRD) Project implemented by International Resources Group (IRG), a wholly-owned subsidiary of Engility Corporation. Departamento de Ambiente y Desarrollo, Escuela Agrícola Panamericana. 15 p.

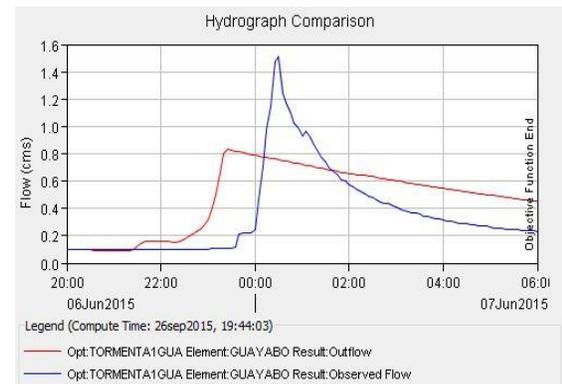
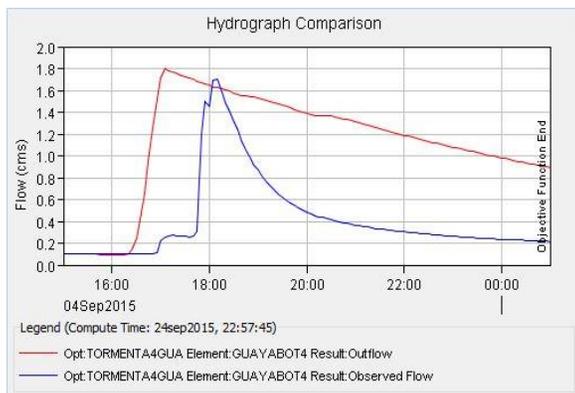
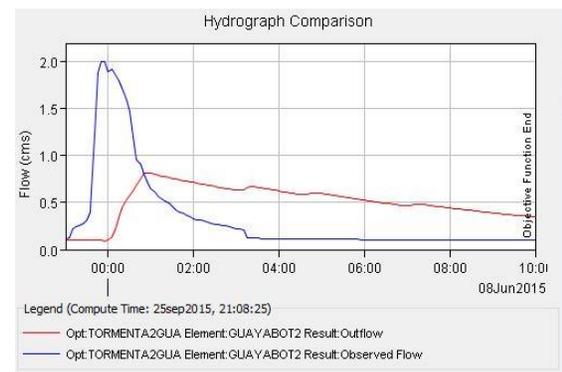
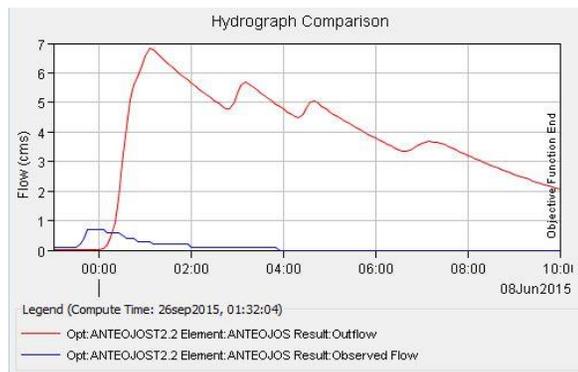
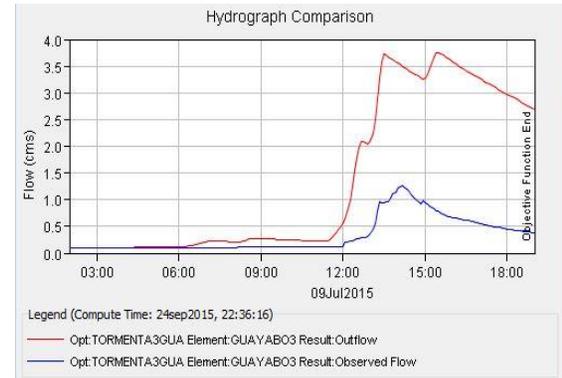
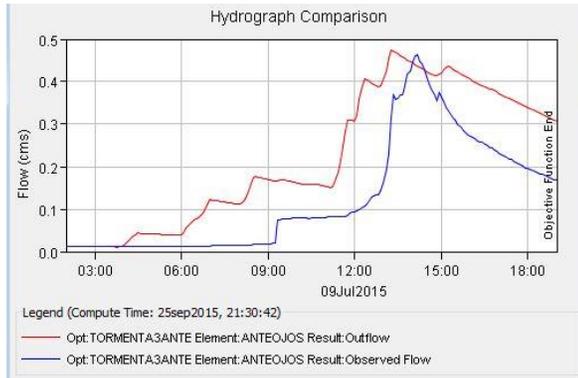
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. 1994. Hidrología aplicada. Trad. Juan Saldarriaga y Germán Santos. Colombia, Editorial Nomos S.A. 582 p.
- Craig, J. R., Liu, G. y Soulis, E. D. 2010. Runoff- infiltration partitioning using an upscaled Green- Ampt solution. Wiley InterScience. 7 p
- Estrada Sifontes, V. y Pacheco Moya, R. M. 2012. Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Vol. 33 N°.1 p. 94-105.
- Feldman, A. D. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers. 145 p.
- Gonzales, A. I. 2004. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Boletín de la A.G.E. N°38. p 311-329.
- Grant, D., y Dawson, D. 2001. Isco Open Channel Flow Measurement Handbook. ISCO inc. Lincoln, Nebraska. 5ª ed. p. 193, 260.
- Huezo, L. 2011. Caracterización hidrológica y balance hídrico de la microcuenca Santa Inés, Honduras., Honduras. Tesis Ing. Desarrollo Socioeconómico y Ambiente, El Zamorano, Escuela Agrícola Panamericana. 25 p.
- Knebl, M.R., Yang, Z.-L. y Maidment, D.R. 2004. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. Journal of Environmental Management Vol.75 p. 325-336.
- López, R., 2001. Consideraciones acerca de los límites de aplicación del método del número de curva de soil conservation service. Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Lérida. Ciencia y Técnica. N° 66. p. 92-97.
- López, Y. R., León, N. M. y Urrutia, G. L., 2010. Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Reno. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. La Habana, Cuba. Vol. 19 No.2. p 31-37.
- Organización Meteorológica Mundial. 2015. El Niño será el más intenso desde 1997-1998, según las previsiones. Consultado 20 de septiembre de 2015. Disponible en <https://www.wmo.int/media/es/content/el-ni%C3%B1o-ser%C3%A1-el-m%C3%A1s-intenso-desde-1997-1998-seg%C3%BAAn-las-previsiones>
- Pektas, O. A., Cigizoglu, K. H. 2013. ANN hybrid model versus ARIMA and ARIMAX models of runoff coefficient. Journal of hydrology Vol. 500 N°.1 p. 21-36.

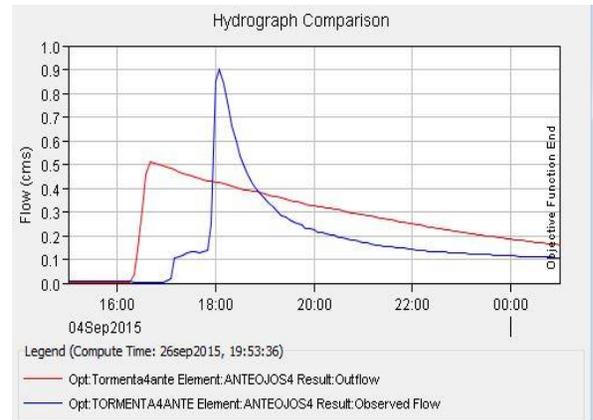
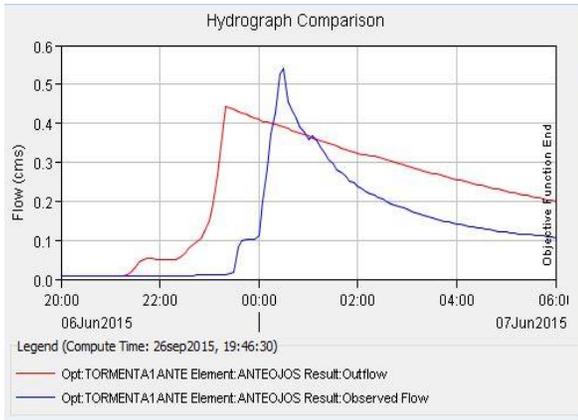
Pérez, J., Velarde, E. V. y Chaparro, V. M. 2012. Cobertura vegetal y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Terra Latinoamericana*. Vol. 30, p. 249-259.

Ponce, V. M., Hawkins, R. H., Members, ASCE. 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*. p. 11-19.

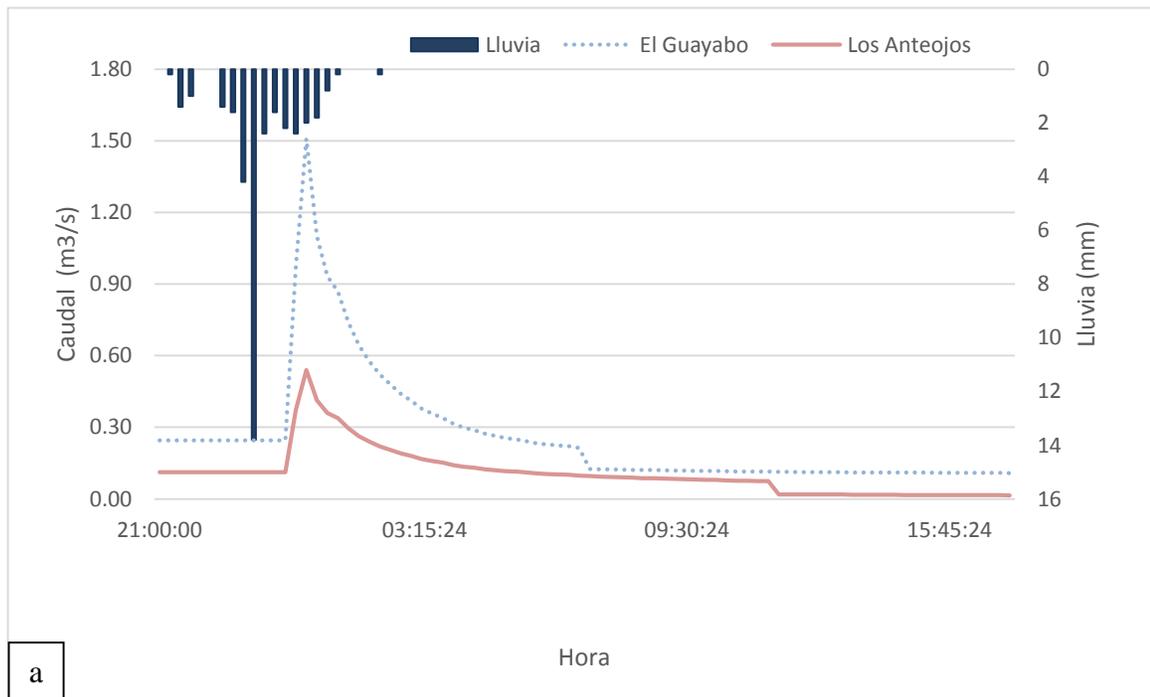
7. ANEXOS

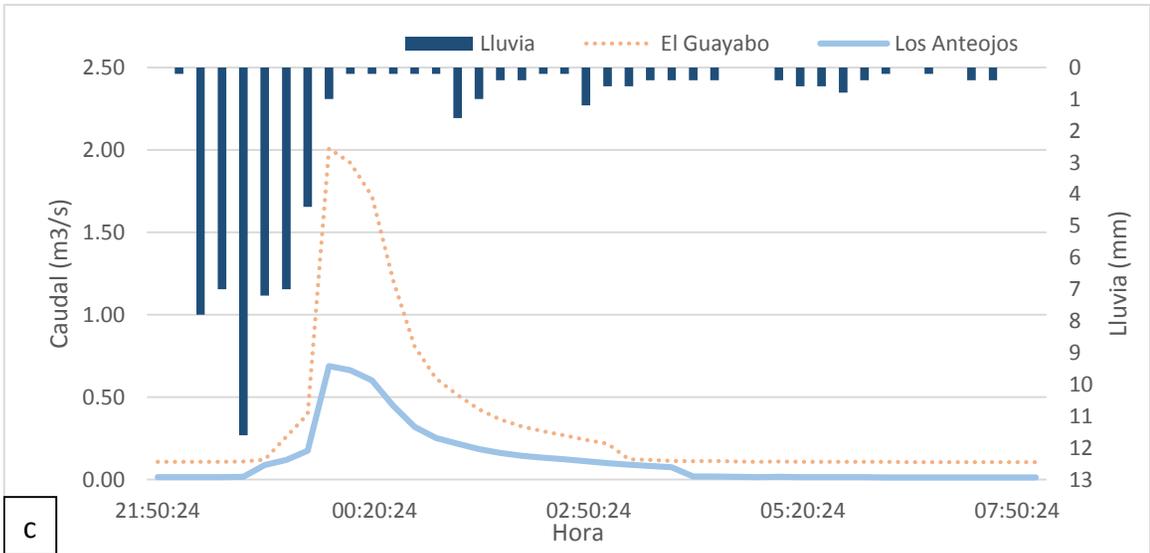
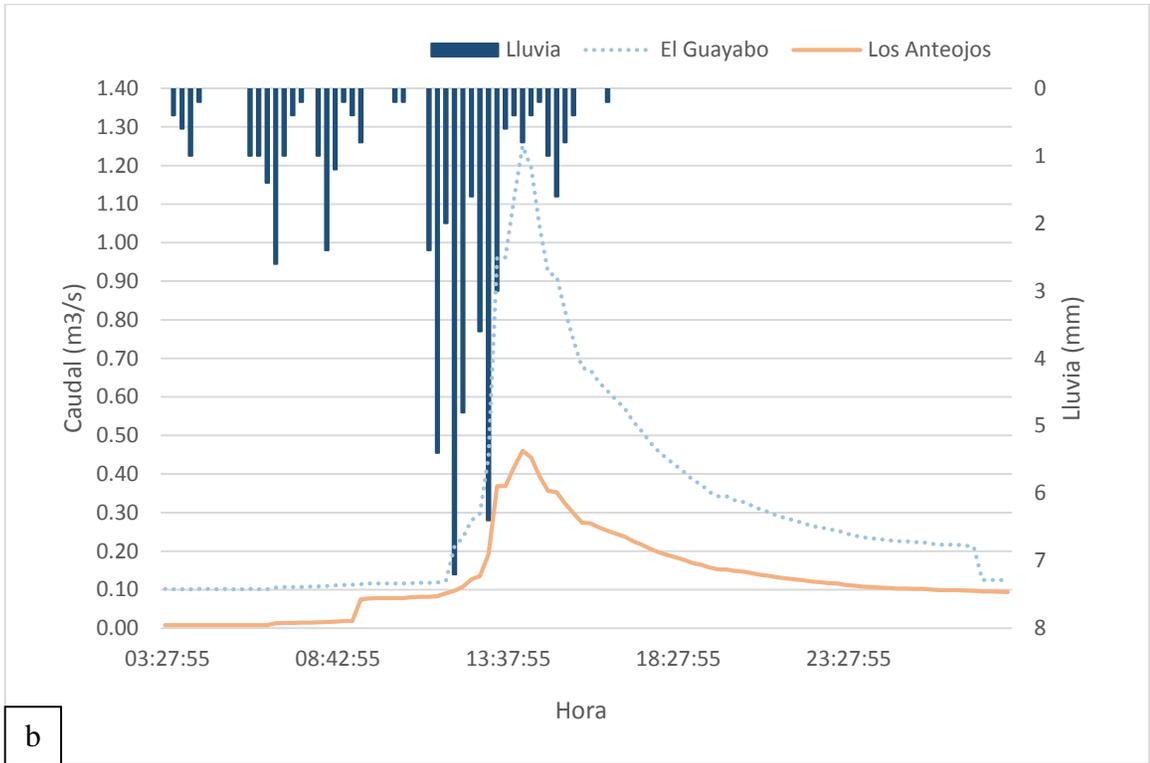
Anexo 1. Comparación de caudales simulado y observado mediante el modelo HEC-HMS

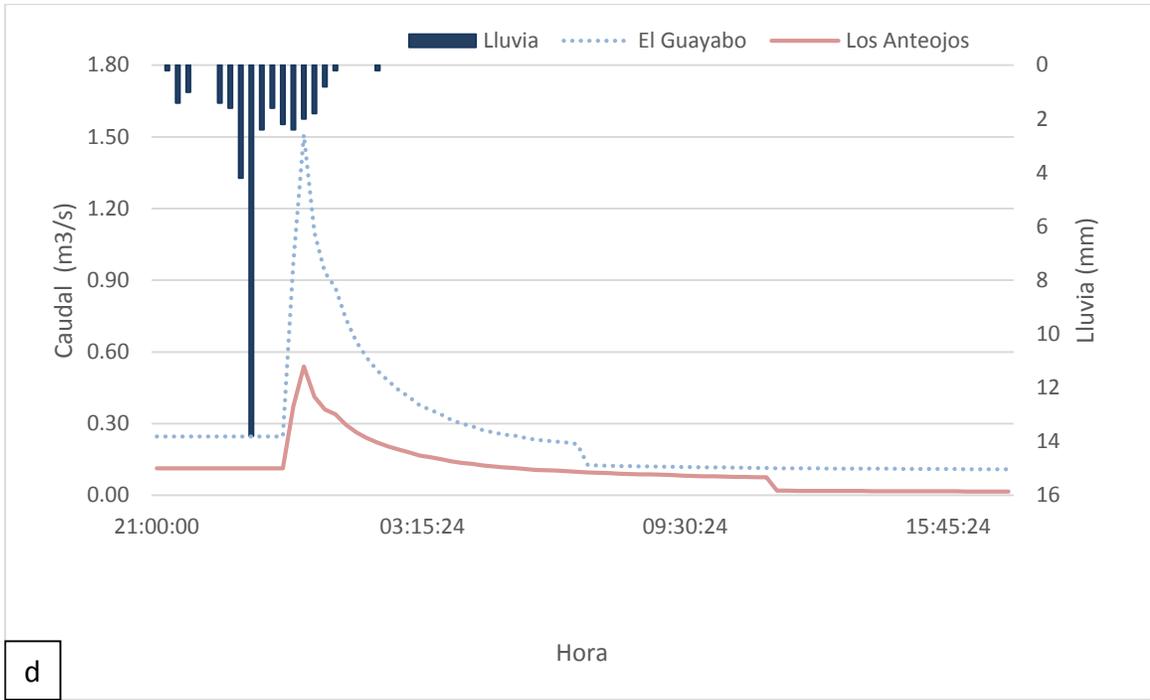




Anexo 2. Caudales y precipitación de El Guayabo y Los Anteojos para los cuatro eventos.
 a) 06 junio del 2015 b) 07 de junio del 2015 c) 09 de julio del 2015 d) 04 de septiembre del 2015







d