

Modelamiento hidrológico del comportamiento del río Las Ceibas ante eventos extremos como apoyo a la Rimac municipio de Neiva departamento del Huila (Colombia)

Jesús Ignacio Herrera López¹

RESUMEN

Las políticas ambientales y de gestión del riesgo en Colombia, han establecido pautas para ordenamiento del territorio y prevenir los efectos socioeconómicos y ambientales ante la ocurrencia de eventos naturales y antrópicos, así mismo, la normatividad de ordenación de cuencas hidrográficas, marco de referencia, para planificar el uso sostenible en la cuenca y ejecutar programas y proyectos dirigidos a restaurar, conservar, preservar, proteger y prevenir el deterioro ambiental territorial, considera necesario el evaluar las condiciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo que puedan afectar el recurso hídrico y la comunidad.

En desarrollo del Proyecto FAO-Cuenca Río Las Ceibas, se adelantaron estudios que contribuían a facilitar el monitoreo del río Las Ceibas y a fortalecer el Programa Red Integral de Monitoreo, Alerta y Alarma de la Cuenca del Río Las Ceibas-RIMAC, al ser este la fuente abastecedora de la ciudad de Neiva y ser potencial amenaza para las líneas vitales y la población asentada a lo largo del área de inundación; situación que demandó el levantamiento de información hidrometeorológica e hidrotopográfica georreferenciada necesaria para el modelamiento de la cuenca, mediante el uso de HEC-RAS, evaluando características que permitan inferir el grado de respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación extraordinarios.

Palabras clave: Modelamiento HEC-RAS, modelamiento hidrológico, inundación, caudales extraordinarios, gestión del riesgo

Fecha de recepción: Diciembre 3 de 2015. Fecha de aceptación: Enero 20 de 2016.

Modelo de citación:

HERRERA LÓPEZ, Jesús Ignacio. MODELAMIENTO HIDROLOGICO DEL COMPORTAMIENTO DEL RIO LAS CEIBAS ANTE EVENTOS EXTREMOS COMO APOYO A LA RIMAC MUNICIPIO DE NEIVA- DEPARTAMENTO DEL HUILA (COLOMBIA). Revista Asuntos Económicos y Administrativos No.30, primer semestre 2016. ISSN 0124-1133. Universidad de Manizales.

1 Estudiante de Doctorado en Desarrollo Sostenible Universidad de Manizales (Colombia). Msc. en Desarrollo Sustentable, Esp. Ingeniería Ambiental, Ing. Agrícola e Ing. Civil. Calle 68 No. 1B-46 Neiva, Huila, Colombia. Email: jesusignacioh@yahoo.com

Hydrological modeling behavior Ceibas river extreme events as to support the municipality of Neiva-Rimac Huila (Colombia)

ABSTRACT

Environmental and risk management in Colombia, policies have established guidelines for regional planning and prevent socioeconomic and environmental effects upon the occurrence of natural and man-made events, also, the regulations of watershed management, framework for plan for sustainable use in the basin and implementing programs and projects to restore, conserve, preserve, protect and prevent environmental degradation territorial considers necessary to assess the conditions of threat, vulnerability and risk that may affect water resources and community.

Developing the FAO-Basin Project Ceibas river, studies contributing to facilitate monitoring Ceibas river and strengthen the Comprehensive Network Monitoring, Warning and Alarm Program Basin Ceibas River-Rimac, being moved forward this the supply source and the city of Neiva be potential threat to the lifelines and the population settled along the floodplain; situation that demanded lifting hydrotopografica and hydrometeorological georeferenced information necessary for the modeling of the basin, using HEC-RAS, evaluating features to infer the degree of response of the basin before extraordinary precipitation events.

Keywords: HEC-RAS modeling, hydrological modeling, flood, extraordinary flows, risk management.

Introducción

El Proyecto Modelamiento Hidrológico del Comportamiento del Río Las Ceibas ante Eventos Extremos como Apoyo a la RIMAC Municipio De Neiva- Departamento Del Huila (Colombia), fue desarrollado por el Grupo de Estudios e Investigaciones Socioculturales y Ambientales-GEISA y estudiantes pertenecientes al Semillero Estudios e Investigación para el Desarrollo de la Ingeniería-SEIDI adscritos a éste grupo, en desarrollo de la línea de investigación "Cuencas Hidrográficas", dentro del convenio de cooperación interinstitucional suscrito con la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO, organismo internacional que opera del Plan de Ordenamiento de Cuenca Río Las Ceibas dentro del proyecto FAO-UTF/COL/030/COL, con el fin de contribuir al fortalecimiento de la Red Integral de Monitoreo, Alerta y Alarma de la Cuenca del río Las Ceibas-RIMAC en sitios de importancia por el riesgo que presenta las líneas vitales (vía Neiva-balsillas y Bocatoma del acueducto municipal) en el sitio denominado Puente el Guayabo.

En respuesta a lo anterior, se efectuó un levantamiento hidrotopográficos georreferenciado en un tramo de 500 m aguas arriba y aguas abajo del sitio denominado Puente el Guayabo, para modelar a través del HEC-RAS 4.1, programa de modelamiento hidráulico elaborado por el Cuerpo de ingenieros del Departamento de Defensa del

Ejército de los EE.UU para la gestión de los ríos, puertos y otras obras públicas, el comportamiento del agua que fluye a través del cauce, identificando y calculando los perfiles de la superficie del agua, en la llanura de inundación aplicables en la gestión del riesgo ante las invasiones del cauce por eventos hidrológicos extraordinarios para diferentes periodos de retorno, igualmente, permite estimar la altura alcanzada ante caudales máximos estimados y definir la curva de gastos con el fin de contribuir a la calibración de sensor de monitoreo de alertas tempranas localizado sobre el Puente el Guayabo para de esta manera poder alertar a la población, mediante la activación del sistema de alertas tempranas instalado.

Revisión de literatura

Dentro de la formulación de la Política Ambiental Nacional y la Política de Prevención y Atención de Desastres, se han establecido pautas para ejecutar acciones que propendan por el mejoramiento ambiental del territorio y prevengan la ocurrencia de eventos naturales y antrópicos que conlleven a pérdidas socioeconómicas y ambientales en la región, así mismo, el Decreto 1729 de 2002, reglamentario del Decreto ley 2811 de 1974, sobre cuencas hidrográficas, que estableció que la ordenación de una cuenca hidrográfica se constituye en el marco de referencia para planificar su uso sostenible; para ello se deben considerar las condiciones de amenazas, vulnerabilidad y riesgos ambientales que puedan afectar la cuenca, en especial aquellas asociadas al recurso hídrico, requiriéndose el estudio de los regímenes hidroclimáticos .

La FAO, a través del desarrollo del Proyecto FAO-Cuenca Río Las Ceibas, dentro del Programa Red Integral de Monitoreo, Alerta y Alarma de la Cuenca del Río Las Ceibas-RIMAC, se propuso efectuar los estudios hidrotopográficos e hidrometeorológicos en la cuenca del río las Ceibas que contribuyan a monitorear la fuente hídrica, debido a la importancia que reviste esta fuente por abastecer la ciudad de Neiva y además ser una potencial amenaza para la población urbana asentada dentro del área de inundación del río.

La incipiente cultura de la prevención de desastres y los graves problemas surgidos y detectados dentro del diagnóstico situacional de la cuenca hidrográfica del Río Las Ceibas relacionados con la ocurrencia de emergencias, ha conllevado a que se incorpore el concepto de la gestión integral del riesgo en el proceso de planificación de la cuenca, arrojando como resultado el programa "Funcionamiento de la Red Integrada de Monitoreo Hidrometeorológico de Alerta y Alarma para la Cuenca Hidrográfica el Río Las Ceibas-RIMAC" (FAO, 2010), requiriendo para fortalecer su implementación contar con información base sobre las condiciones morfométricas e

hidráulicas del río para modelar el comportamiento hidráulico de la fuente hídrica y poder determinar la zona expuesta a inundación y poder fortalecer la operación oportuna de los instrumentos de alerta y alarma temprana instalados en la cuenca. Evaluaciones realizadas por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena-CAM, han permitido inventariar en la cuenca del río Las Ceibas más de 338 fenómenos de remoción en masa clasificados como deslizamientos planares de poca profundidad, activos y con tendencia a ser retrogresivos, flujos y socavación lateral; de ellos, 16 se clasifican como de magnitud grande, 8 medianos y los 314 deslizamientos restantes son pequeños, que afectan el cauce de la fuente hídrica al cambiar su perfil transversal y longitudinal poniendo en riesgo la infraestructura y las comunidades asentadas a lo largo del río (CAM, 2007, p.92).

En la cuenca el programa RIMAC, ha contemplado el establecimiento de una red de alerta para prevención de desastres, compuestos por equipos electrónicos y software para generación de señales de alerta ante el comportamiento inesperado de variables ambientales y/o amenazas naturales, que sirven para alertar a entidades como: Oficinas de Prevención y Atención de Desastres, Cuerpos de Bomberos, Defensa Civil, Cruz Roja, Policía y activar planes de emergencia y contingencia.

Un dato importante para la operación de las redes de alerta temprana son los aforos históricos de las corrientes hídricas, los cuales permiten elaborar la curva de gastos, la cual es una expresión gráfica de la relación existente entre los niveles de agua y los caudales de la corriente hídrica; relación que permite transformar los niveles medios registrados diariamente o registrados continuamente en un limnigrafo en caudales correspondientes, sin que sea necesario aforar todos los días. Para disponer de la posibilidad de verificar y extrapolar las curvas de gastos, estas curvas se deben acompañarse con las curvas de Niveles-Velocidades Medias (H-Vm) y Niveles-Sección mojada (H-S). El objetivo de aforar una corriente, durante varias épocas en el año en una sección determinada, es determinar lo que se conoce como curva de calibración de la sección, la cual permite transformar niveles de agua, leídos con una mira, en caudales. Las curvas se construyen a partir de los aforos hechos durante un período largo de tiempo, de tal manera que se tengan niveles bajos y altos del río. Por medio de esta curva se obtienen los hidrogramas o gráficas de las variaciones del caudal contra el tiempo en una sección determinada, sin embargo, el uso del HEC-RAS 4.1 permite elaborar estas curvas requeridas con información de campo actual e histórica. Para la gestión del riesgo de inundación, es necesario familiarizarse con algunos términos:

Caudal medio diario Qmd: Es el caudal de un año de registros y es la base para la estimación del caudal máximo diario y del máximo horario.

Caudal medio mensual Q_m : Es la media aritmética de los caudales medios diarios correspondientes al mes en cuestión (González Sarmiento, 2013, p.102).

Caudal promedio mensual interanual: Es la media de los caudales medios mensuales para un mes dado, durante un período de n años (Rojo Hernández, 2012, p.13).

Caudal medio anual: Es la media aritmética de los caudales medios mensuales de un determinado año (González Sarmiento, 2013, p.103).

Caudal máximo instantáneo anual: Es el máximo caudal que se presenta en un año determinado. Para su determinación es necesario que la estación de aforo tenga limnógrafo. Si no es así, se habla de caudal máximo promedio anual el cual es menor que el máximo instantáneo anual (Rojo Hernández, 2012, p.13)

Caudal mínimo anual: Es el menor caudal que se presenta durante un año determinado (Rojo Hernández, 2012, p.13).

Uno de los principales problemas derivado del estudio de los eventos extremos, es la medición de la frecuencia que se produce en este tipo de siniestralidad. En la estadística clásica, el recuento o frecuencia de las observaciones se modela a través de distribuciones discretas como la distribución Binomial, de Poisson, Geométrica o Hipergeométrica, sin embargo, en el campo de los valores extremos, asumiendo la hipótesis de independencia entre las observaciones, la estadística que mide su frecuencia es la no paramétrica o de distribución libre. Existen varios métodos para determinar la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos, como lo son las máximas crecidas esperadas de una fuente hídrica y que podría generar inundación en una cuenca hidrográfica, dentro de estos métodos se tienen: la distribución Gumbel y la distribución Weibull, entre otros.

El método de los excedentes de Gumbel, permite a partir de la ordenación de variables aleatorias, obtener de forma relativamente sencilla, información analítica acerca de los datos de siniestralidad estudiados. La distribución Gumbel se ha utilizado con buenos resultados para el cálculo de valores extremos de variables meteorológicas, entre ellas precipitaciones y caudales máximos. La aplicación de este método da respuesta a cuestiones fundamentales tales como el número de valores que, de entre las observaciones futuras, excederán una determinada posición en la jerarquía de los datos históricos. El valor máximo que se quiere determinar para un determinado período de retorno se determina por medio de la expresión:

$$X = X_m + k \cdot S_{n-1}$$

X : valor máximo (caudal o precipitación) para un período de retorno T .

X_m : media de la serie dada de valores máximos

k: factor de frecuencia, que indica el número de veces de desviación típica en que el valor extremo considerado excede a la media de la serie.

S_{n-1} : desviación estándar o desviación típica de los valores extremos.

Materiales y métodos

El sitio de estudio se localiza a 11.0 Km de la ciudad de Neiva sobre la vía Neiva-San Antonio sobre el río Las Ceibas a 200 m aguas abajo del sitio de captación de agua para el sistema de suministro del acueducto municipal de Neiva, lugar donde se capta aproximadamente 476 l/s para ser tratada en la planta El Recreo (CAM, 2007, p.35)

La metodología utilizada para la estimación de los parámetros morfométricos e hidráulicos asociados al levantamiento hidrotopográfico georreferenciado requerida para la modelación hidráulica del río Las Ceibas a través del HECRAS 4.1 fue la siguiente:

- **Etapa I. Reconocimiento del área de estudio.** Se realizó un reconocimiento del área de estudio para la localización geográfica georreferenciada de líneas vitales en los diferentes sitios de interés, tales como: infraestructura del sistema de acueducto, vías, viviendas, puentes y sistemas de alarmas y alertas tempranas.

- **Etapa II. Colocación de mojones como puntos geodésicos georreferenciados.** Se localizaron dos mojones en concreto como Puntos de Referencia (PR) en sitios estratégicos dentro del tramo de estudio de la fuente hídrica a analizar, los cuales fueron materializados, determinándose sus coordenadas por medio de un GPS Garmin 62 CSx bajo el sistema de MAGNA -SIRGAS, elipsoide WGS84.

- **Etapa III. Levantamiento topográfico:** Se realizó el levantamiento hidrotopográficos con una estación total Topcon Gowin TKS 202, vinculando los puntos directamente a la red geodésica, así como la localización de: viviendas, la infraestructura de servicios (vías y Bocatoma), el curso del río y talweg, los perfiles transversales y longitudinales de las secciones del río. Los perfiles de las secciones transversales al río fueron tomados dentro de un tramo con longitud de 250 metros aguas arriba y 250 aguas abajo del sitio de localización de los sensores de alerta temprana (puente del Guayabo), con una separación entre secciones transversales de 25 metros. Sobre cada sección transversal se realizó la toma de la información planimetría y altimétrica requerida para la determinación de la sección hidráulica del río, el talweg y cota de la lámina de agua.

- **Etapa IV. Procesamiento y análisis de información.** Se realizó el modelo digital de elevación (MDE) utilizando el software AutoCAD Civil 3D 2012, definiendo el alineamiento principal del

río (Talweg) y las orillas. Para el análisis de caudales se empleó los registros históricos de caudales del IDEAM y se aplicó la fórmula de Gumbel para caudales extremos a la serie histórica de caudales máximos, estimándose los caudales máximos para tiempos de retorno de: 2, 5, 10, 25, 50, 100, 250 y 500 años; información que fue introducida al programa HEC-RAS para su modelamiento. Se graficaron los caudales medios, máximos y mínimos registrados para el periodo y los niveles medios para el periodo con el fin de determinar los meses críticos de invierno y estiaje.

Resultados y discusión

El tramo analizado, se caracteriza por tener una zona encañonada con pendientes casi verticales sobre la margen izquierda y sobre la derecha una pendiente suave con cultivos de cacao en los primeros tramos que lindan con la vía y por la margen izquierda talud pronunciados casi verticales en cercanías al puente El Guayabo, para posteriormente disminuir su talud y conformar una zona más plana. Los datos procesados arrojaron los siguientes resultados: La pendiente del río en el tramo alcanzó los 0,023 m/m (2.3%), considerada una pendiente alta y que hace que el río sea bastante erosivo en este punto.

La Figura 1 muestra el levantamiento topográfico y batimétrico del cauce y sus orillas analizadas y la morfología obtenida en el modelo digital de elevación MDE en el sitio de estudio.

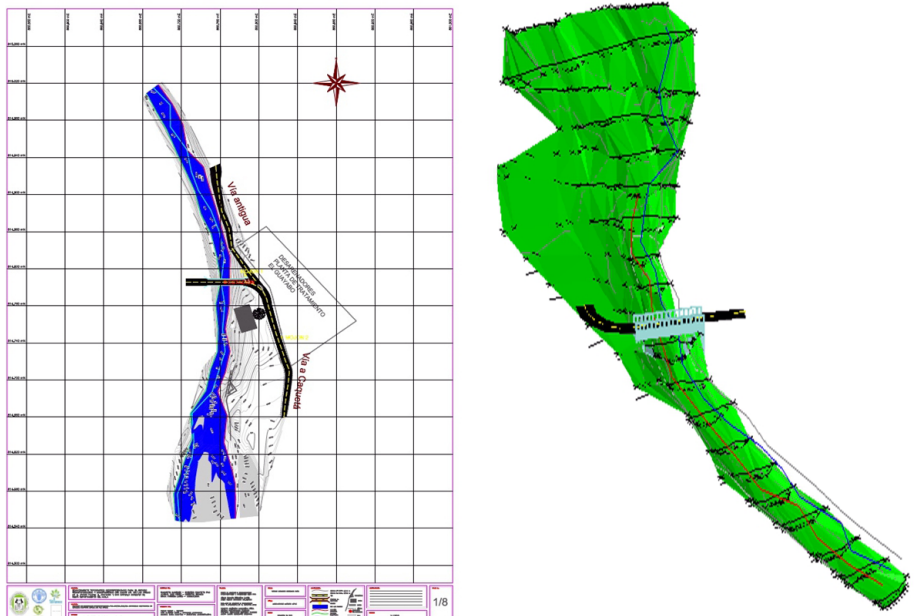
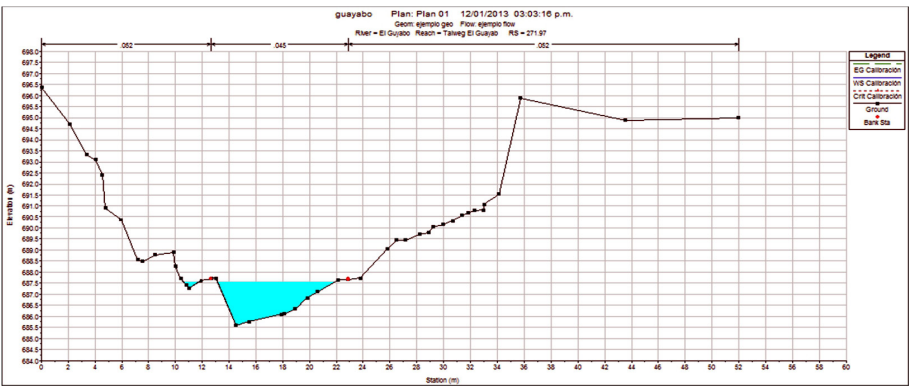


Figura 1. Levantamiento topo batimétrico del Río las Ceibas en el sector del Guayabo vereda Platanillal.

El Gráfico 1 muestra el perfil de la sección transversal de la abscisa K0+271,97, generada a través del HEC-RAS 4.1, sitio donde se localiza el Puente el Guayabo, lugar donde se encuentra el sensor de registros de datos hidroclimatológicos de la RIMAC.

**Gráfico 1. Perfil de la sección transversal puente el guayabo
localización sensor RIMAC abscisa K0+271.97**



La estimación de caudales máximos para diferentes periodos de retorno se realizó aplicando el método de Gumbel para los valores de caudales máximos mensuales registrados en la estación Puente El Guayabo, operada por el IDEAM, datos presentados en el cuadro 1 .

CUADRO 1. Caudales Máximos Estimados Por Método de Gumbel para Diferentes Periodo de Retorno(m3/s)

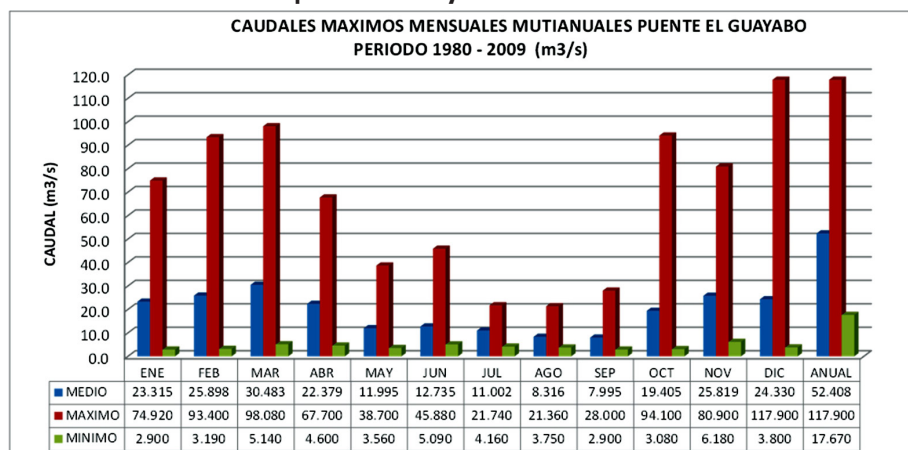
METODO	PERIODO DE RETORNO TR (años)							
	2	5	10	25	50	100	250	500
GUMBEL	48.523	75.318	93.059	115.475	132.104	148.610	170.342	186.754

Fuente: Autores

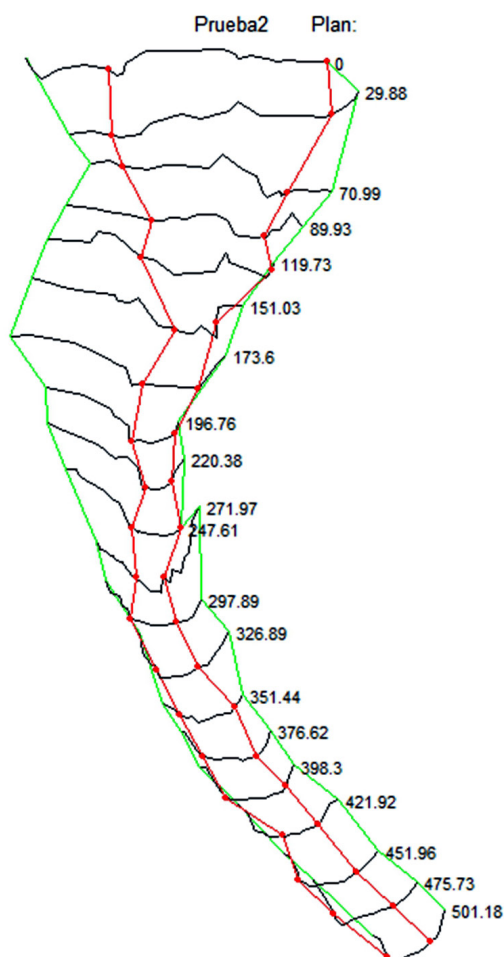
El gráfico 2 presenta el comportamiento de los caudales máximos ocurridos en el río Las Ceibas durante el periodo 1980-2009 en el sitio de estudio, en ellos se observa que existe un comportamiento bimodal, presentándose una época de estiaje entre los meses de julio a septiembre y dos épocas de altos caudales con picos máximos en los meses de diciembre y marzo.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con la modelación usando HEC-RAS 4.1. considerando las condiciones de flujo uniformemente distribuido y los valores definidos de propiedades del lecho del río Las Ceibas apoyado con datos obtenido con el software AutoCAD Civil 3D versión 2012, para el área de inundación con diferentes periodos de retorno y la respectiva curva de gastos generada.

**Gráfico 2. Caudales máximos mensuales multianuales
puente el Guayabo 1980 -2009**



Fuente : Autores



**Figura 2. Zona de inundación
según modelamiento HEC-RAS®
versión 4.1**

En el cuadro 2 y grafica 4 se presentan los resultados obtenidos con la modelación hidráulica para el tramo analizado en cada una de las secciones modeladas, observándose un área de inundación transversal de cerca de 10 m, sin que corra riesgo el puente el Guayabo por traspasar su cota de la superestructura.

Cuadro 2. Resultados Modelamiento Río Ceibas Estación Puente El Guayabo para Diferentes Tiempos de Retorno TR

River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
		(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
501.18	Calibra	35.50	684.69	685.61	685.64	686.01	0.023007	2.82	13.20	19.95	1.03
501.18	TR 2	48.52	684.69	685.76	685.82	686.25	0.023013	3.17	16.25	20.90	1.06
501.18	TR 10	93.06	684.69	686.16	686.29	686.94	0.023024	4.04	25.00	22.31	1.12
501.18	TR 50	132.10	684.69	686.45	686.63	687.44	0.023030	4.61	31.46	23.08	1.16
501.18	TR 100	148.61	684.69	686.56	686.76	687.64	0.023031	4.81	33.99	23.38	1.17
501.18	TR 500	186.75	684.69	686.79	687.05	688.06	0.023035	5.24	39.52	24.01	1.20
271.97	TR 2	48.52	685.60	687.93	687.93	688.51	0.018970	3.42	14.95	13.86	0.94
271.97	TR 10	93.06	685.60	688.58	688.58	689.41	0.016776	4.18	24.45	15.89	0.94
271.97	TR 50	132.10	685.60	689.14	689.14	690.05	0.013824	4.47	34.31	19.19	0.89
271.97	TR 100	148.61	685.60	689.29	689.29	690.28	0.013796	4.65	37.40	19.56	0.90
271.97	TR 500	186.75	685.60	689.66	689.66	690.76	0.013385	4.98	44.94	21.66	0.91
0	TR 2	48.52	696.00	696.77	696.77	696.99	0.027409	2.20	23.91	54.22	1.03
0	TR 10	93.06	696.00	697.02	697.02	697.34	0.024711	2.65	37.53	57.70	1.04
0	TR 50	132.10	696.00	697.19	697.19	697.59	0.023914	2.93	47.56	59.93	1.05
0	TR 100	148.61	696.00	697.26	697.26	697.68	0.023001	3.01	52.00	60.88	1.04
0	TR 500	186.75	696.00	697.40	697.40	697.89	0.022939	3.24	60.41	62.65	1.06

Fuente: Autores

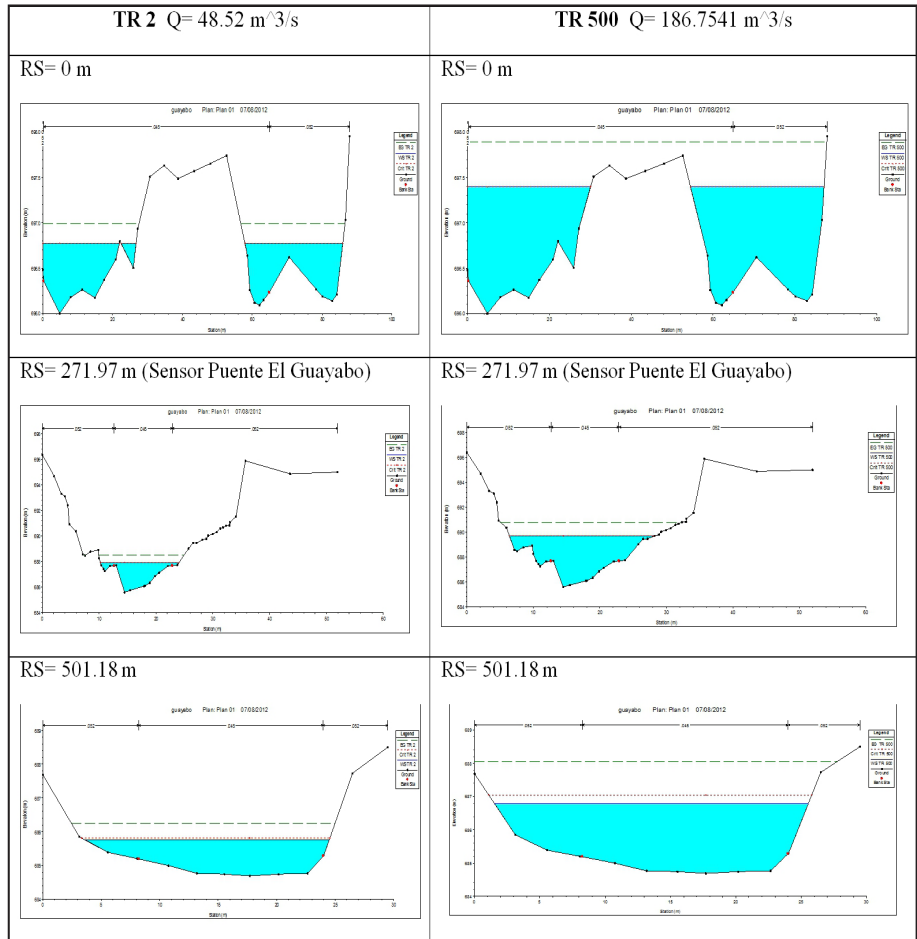
Conclusiones y recomendaciones

Los registros históricos de caudal para el Puente el Guayabo, permitieron estimar por el método de valores extremos de Gumbel, para un periodo de retorno de 500 años, un caudal extraordinario de 186.75 m3/s, que comparado con el caudal máximo para un periodo de retorno de 2 años de 48.523 m3/s, resulta ser cuatro veces mayor y por ende de mucha importancia para planificar las zonas de exclusión por inundación

El río Las Ceibas presenta comportamiento bimodal presentándose una época de estiaje entre los meses de julio a septiembre y dos épocas de altos caudales con picos máximos en los meses de diciembre y marzo, tornándose de cuidado la ocurrencia de inundaciones en la parte baja de la cuenca

Los registros de niveles medios han oscilado entre 81 y 88 cm, mientras que los niveles medios máximos han alcanzado entre 118 y 134 cm y con niveles medios mínimos entre 6 y 12 cm. Los niveles máximos registrados en la estación Puente El Guayabo registra máximos medios que oscilan entre 105 y 400 cm.

GRAFICA 3 . Modelamiento hidráulico en HEC-RAS para periodos de retorno $tr=2$ y $tr=500$ años



GRAFICA 4. Modelamiento hidráulico en HEC-RAS Curva de Gastos para el Puente el Guayabo

