

Influencia de coberturas vegetales arbóreas y no arbóreas en la atenuación de caudales máximos

Influência da cobertura vegetal arbórea e não arbórea na atenuação do pico de fluxo

Influence of tree and non-tree vegetation cover on peak flow attenuation

DOI: 10.34188/bjaerv8n1-084

Submetido: 02/12/2024

Aprovado: 15/01/2025

Camilo Andrés Rey Sanchez

Ingeniero forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Consultor independiente

Bogotá DC

camiloreysanchez@gmail.com

Juan Carlos Medina Avellaneda

Especialista en Geomática, Universidad Militar Nueva Granada

Consultor independiente

Bogotá DC

jcmolinaave@gmail.com

Carlos Francisco García Olmos

Doctor en Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Oviedo, Asturias, España

Profesor Titular Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá DC

cfcgarciao@udistrital.edu.co

RESUMEN

El objetivo principal fue determinar la influencia de los bosques plantados de ciprés (*cupressus lusitánica* mill.), eucalipto (*eucalyptus globulus* labill.) y el bosque natural en la atenuación de caudales máximos en la cuenca alta del río San Cristóbal., cerros orientales de la ciudad de Bogotá D.C. Para alcanzar este propósito se fijaron como objetivos específicos el realizar la caracterización morfométrica, hidrológica, de suelos y de vegetación de la cuenca alta del río San Cristóbal; hacer la modelación hidrológica para la predicción de inundaciones en la cuenca alta del río San Cristóbal y evaluar la influencia de las coberturas vegetales en el comportamiento de los caudales máximos en la cuenca alta del río San Cristóbal.

La cuenca alta del río San Cristóbal se encuentra al sur oriente de la ciudad de Bogotá DC, en una zona de reserva forestal de los cerros orientales que pertenece a la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá DC (DELSA, 1986). Se ubica en las coordenadas geográficas X= 74° 01' 41" de latitud norte; y Y=04° 30 ' 42" latitud oeste. En un rango altitudinal de los 2900 msnm a los 3600 msnm. Se realizó la caracterización de la cuenca con énfasis en las coberturas arbóreas. Con ella se definieron parámetros utilizados para generar modelos de lluvia-escorrentía bajo la plataforma del programa HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, Redlands, CA).

Adicionalmente, se creó un modelo geo-espacial con ayuda de los programas HEC-GeoHMS y ArcGIS 9.2 (ESRI, Redlands, CA) para evaluar en detalle las variaciones espaciales de la cuenca. La predicción de los hidrogramas se hizo para tres microcuencas en las cuales se distribuyó la cuenca, en las cuales hay coberturas de ciprés, eucalipto y bosque natural, además de coberturas no arbóreas en las tres microcuencas. Para obtener el mejor modelo se propusieron 6 opciones con base en combinaciones de los procesos de pérdida, transformación y tránsito. Según un proceso de optimización, calibración y evaluación se identificó el mejor modelo de acuerdo con dos funciones objetivo. Estas funciones se formularon valorando la precisión en la predicción del caudal máximo en donde tiene mayor valoración un caudal en exceso al real que uno por defecto; y la predicción del tiempo en alcanzar el caudal máximo en los hidrogramas generados, donde se valora mejor una predicción anticipada en el tiempo que una con un tiempo mayor al real. La mejor combinación fue la Curva Número con el hidrograma unitario de Snyder.

La influencia del bosque en la predicción de crecientes, se estudió con el método de la Curva Numero. Se propuso una ecuación para determinar el valor de la CN con base en datos físicos de suelos y de los tipos de bosques considerados. Se hizo un diseño experimental en el cual se plantearon situaciones en las cuales cada una de las coberturas boscosas se modeló en todas y cada una de las microcuencas conservando sus coberturas no boscosas. Se hallaron, a partir del modelo, los caudales máximos por microcuenca que cada arreglo de coberturas generó, encontrando la cobertura con mejor capacidad de atenuación de crecientes.

La predicción en inundaciones se hizo para dos tipos de coberturas contrastantes, la primera vegetación actual y la segunda en caso hipotético de que solo existan coberturas no arbóreas en las microcuencas. El hidrograma resultante es el obtenido en el punto de cierre denominado el Delirio y las predicciones se hicieron para eventos de lluvia extremos con periodos de retorno de 5, 15 y 25 años. La calibración se logró mediante ensayos de optimización. Un ensayo de optimización es una búsqueda programada por un algoritmo que define cambios en los parámetros identificados para de esta forma acercar el valor calculado al observado, hasta cumplir con los criterios de búsqueda.

Los resultados muestran que la diferencia del caudal máximo entre las situaciones de la cobertura de bosques actual y la situación hipotética de la cobertura total de la cuenca como no boscosa las diferencias son en promedio de $2.53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, donde los incrementos porcentuales se van reduciendo a mayores periodos de retorno y fueron en promedio 8.0 %. No hubo diferencias significativas estadísticamente entre los Bosques, ni tampoco entre estos y las coberturas no arbóreas, con variaciones de -0.5% cuando predominó la cobertura de bosque natural, de 0% con el eucalipto, 1% con el ciprés, y 8.0% en la cobertura no boscosa. Se concluye que los incrementos en el caudal máximo están más condicionados por las características de la cuenca y de la precipitación que por la cobertura cuando de eventos muy extremos se trata.

Palabras clave: bosques, modelización, crecientes

RESUMO

O objetivo principal foi determinar a influência de florestas plantadas de cipreste (*Cupressus lusitânica* mill.), eucalipto (*Eucalyptus globulus* labill.) e floresta natural na atenuação de fluxos máximos na bacia superior do rio San Cristóbal, colinas orientais da cidade de Bogotá D.C. Para atingir esse propósito, os objetivos específicos foram realizar uma caracterização morfométrica, hidrológica, do solo e da vegetação da bacia superior do rio San Cristóbal; realizar modelagem hidrológica para a previsão de inundações na bacia superior do rio San Cristóbal e avaliar a influência da cobertura vegetal no comportamento dos fluxos máximos na bacia superior do rio San Cristóbal.

A bacia superior do rio San Cristóbal está localizada a sudeste da cidade de Bogotá DC, em uma área de reserva florestal das colinas orientais que pertence à empresa de aqueduto e esgoto de Bogotá DC (DELSA, 1986). Está localizada nas coordenadas geográficas $X = 74^\circ 01' 41''$ de latitude norte; e $Y = 04^\circ 30' 42''$ de latitude oeste. Em uma faixa altitudinal de 2900 m a 3600 m acima do nível do

mar. A caracterização da bacia foi realizada com ênfase na cobertura de árvores. Os parâmetros foram definidos e usados para gerar modelos de precipitação e escoamento sob a plataforma do software HEC-HMS (US Army Corps of Engineers, Redlands, CA). Além disso, foi criado um modelo geoespacial usando o HEC-GeoHMS e o ArcGIS 9.2 (ESRI, Redlands, CA) para avaliar as variações espaciais da bacia hidrográfica em detalhes.

A previsão dos hidrogramas foi feita para três microbacias hidrográficas em que a bacia foi distribuída, nas quais há cobertura de cipreste, eucalipto e floresta natural, além de cobertura não arbórea nas três microbacias. Para obter o melhor modelo, foram propostas 6 opções com base em combinações dos processos de perda, transformação e trânsito. De acordo com um processo de otimização, calibração e avaliação, o melhor modelo foi identificado segundo duas funções objetivas. Essas funções foram formuladas avaliando-se a precisão na previsão da vazão máxima, em que uma vazão superior à real é mais valorizada do que uma vazão padrão; e a previsão do tempo para atingir a vazão máxima nos hidrogramas gerados, em que uma previsão antecipada no tempo é mais valorizada do que uma com tempo superior ao real. A melhor combinação foi a Curva de Número com o hidrograma unitário de Snyder.

A influência da floresta na previsão de inundações foi estudada com o método da Curva Numérica. Foi proposta uma equação para determinar o valor da CN com base nos dados físicos dos solos e dos tipos de floresta considerados. Foi feito um projeto experimental no qual foram consideradas situações em que cada uma das coberturas florestais foi modelada em cada uma das microbacias hidrográficas, conservando suas coberturas não florestais. Os fluxos máximos por microbacia gerados por cada arranjo de cobertura foram encontrados a partir do modelo, e a cobertura com a melhor capacidade de atenuação de enchentes foi encontrada.

A previsão de inundação foi feita para dois tipos de cobertura contrastantes, o primeiro para a vegetação atual e o segundo no caso hipotético em que apenas a cobertura não arbórea existe nas microbacias hidrográficas. O hidrograma resultante é o obtido no ponto de fechamento chamado Delirio e as previsões foram feitas para eventos extremos de precipitação com períodos de retorno de 5, 15 e 25 anos. A calibração foi obtida por meio de testes de otimização. Um teste de otimização é uma pesquisa programada por um algoritmo que define alterações nos parâmetros identificados para aproximar o valor calculado do valor observado, até que os critérios de pesquisa sejam atendidos.

Os resultados mostram que a diferença da vazão máxima entre as situações da cobertura florestal atual e a situação hipotética da cobertura total da bacia como não florestal, as diferenças são em média de 2,53 m³.s⁻¹, onde os aumentos percentuais são reduzidos com períodos de retorno mais longos e foram em média de 8,0%. Não houve diferenças estatisticamente significativas entre as florestas, nem entre as florestas e a cobertura não florestal, com variações de -0,5% quando predominou a cobertura florestal natural, 0% com eucalipto, 1% com cipreste e 8,0% na cobertura não florestal. Pode-se concluir que os aumentos na vazão máxima são mais condicionados pelas características da bacia e pela precipitação do que pela cobertura no caso de eventos muito extremos.

Palavras-chave: florestas, modelagem, inundações

ABSTRACT

The main objective was to determine the influence of planted forests of cypress (*Cupressus lusitánica* mill.), eucalyptus (*Eucalyptus globulus* Labill.) and natural forest in the attenuation of maximum flows in the upper basin of the San Cristóbal river, eastern hills of the city of Bogotá D.C. In order to achieve this purpose, the specific objectives were to carry out a morphometric, hydrological, soil and vegetation characterization of the upper basin of the San Cristóbal river; to carry out hydrological modeling for flood prediction in the upper basin of the San Cristóbal river and to evaluate the influence of vegetation cover on the behavior of peak flows in the upper basin of the San Cristóbal river.

The upper basin of the San Cristóbal River is located southeast of the city of Bogotá DC, in a forest reserve area of the eastern hills that belongs to the aqueduct and sewerage company of Bogotá DC (DELSA, 1986). It is located at the geographic coordinates $X = 74^{\circ} 01' 41''$ north latitude; and $Y = 04^{\circ} 30' 42''$ west latitude. The altitudinal range is from 2900 masl to 3600 masl. The characterization of the basin was carried out with emphasis on tree cover. Parameters were defined and used to generate rainfall-runoff models under the HEC-HMS program platform (US Army Corps of Engineers, Redlands, CA). Additionally, a geospatial model was created using HEC-GeoHMS and ArcGIS 9.2 (ESRI, Redlands, CA) to evaluate in detail the spatial variations of the watershed.

The hydrographs were predicted for three micro-watersheds in which the basin was distributed, in which there are cypress, eucalyptus and natural forest covers, in addition to non-tree covers in the three micro-watersheds. To obtain the best model, 6 options were proposed based on combinations of loss, transformation and transit processes. According to a process of optimization, calibration and evaluation, the best model was identified based on two objective functions. These functions were formulated by evaluating the accuracy in the prediction of the maximum flow, where a flow in excess of the actual flow is more highly valued than a default one; and the prediction of the time to reach the maximum flow in the hydrographs generated, where a prediction anticipated in time is more highly valued than one with a time greater than the actual one. The best combination was the Number Curve with the Snyder unit hydrograph.

The influence of the forest on flood prediction was studied with the Number Curve method. An equation was proposed to determine the value of the NC based on physical data of soils and forest types considered. An experimental design was made in which situations were proposed in which each of the forest covers were modeled in each and every one of the micro-watersheds, conserving their non-forest covers. Based on the model, the maximum flows per micro-watershed generated by each cover arrangement were found, and the cover with the best flood attenuation capacity was found.

The flood prediction was made for two contrasting cover types, the first for current vegetation and the second in the hypothetical case that only non-tree cover exists in the micro-watersheds. The resulting hydrograph is the one obtained at the closure point called the Delirio and the predictions were made for extreme rainfall events with return periods of 5, 15 and 25 years. Calibration was achieved through optimization tests. An optimization test is a search programmed by an algorithm that defines changes in the identified parameters to bring the calculated value closer to the observed value, until the search criteria are met.

The results show that the difference in the maximum flow between the situations of the current forest cover and the hypothetical situation of the total cover of the basin as non-forested, the differences are on average 2.53 m³.s⁻¹, where the percentage increases are reduced with longer return periods and were on average 8.0 %. There were no statistically significant differences between forests, nor between forests and non-forest cover, with variations of -0.5% when natural forest cover predominated, 0% with eucalyptus, 1% with cypress, and 8.0% in non-forest cover. It can be concluded that the increases in the maximum flow are more conditioned by the characteristics of the watershed and precipitation than by the cover when very extreme events are involved.

Keywords: forests, modeling, floods

1 INTRODUCCIÓN

Las crecientes en cuencas de alta montaña son fenómenos naturales que han llegado a causar grandes problemas a escala nacional, con fuertes pérdidas materiales y de vidas humanas (DNP, 2006). Para hacer frente a esta problemática, la modelación hidrológica ha sido una herramienta

usada por la comunidad científica en las últimas décadas (Feldman, 2000). Esta tiene como objetivo la planeación y evaluación de obras hidráulicas, el manejo de aguas, y la predicción de avenidas, entre otras.

Se ha atribuido a los bosques un papel positivo en la protección y regulación de flujos hídricos. Algunos autores afirman que las coberturas vegetales actúan como un agente regulador de inundaciones que absorbe las precipitaciones fuertes y ayuda, además de evitar la erosión, a atenuar el caudal de salida ante un evento extremo. (Bruijnzeel, 1990, De La Torre, 2004). Estas afirmaciones no son totalmente aceptadas y aun existen hipótesis por comprobar (FAO, 2008), no obstante, el conocimiento común indica que los bosques son fundamentales, por una parte, en el control de inundaciones cuando las lluvias son altas, y, por otro lado, en el abastecimiento continuo del recurso cuando haga falta de ellas.

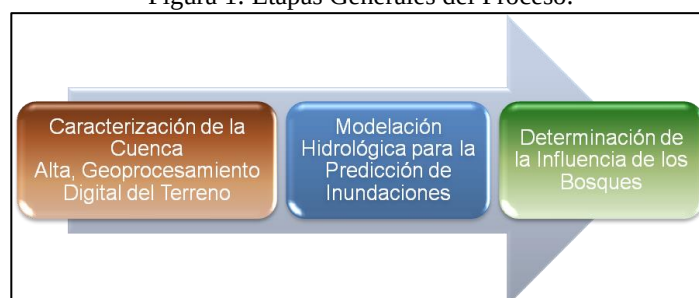
Sin embargo no todas las coberturas vegetales se comportan de la misma manera ante las precipitaciones (Sellers & Lockwood, 1981), esto es debido a factores propios de las plantas y de los suelos (Radersma *et al.* 2006), que generan que los procesos del ciclo hidrológico tales como el escurrimiento superficial, evaporación infiltración e interceptación varíen con el tiempo, todo esto determina la magnitud de aguas gravitacionales que alimentan las subterráneas, y que van a significar la regulación y la sostenibilidad de los caudales. (De Las Salas & García, 2000).

Los bosques cumplen un rol fundamental en la atenuación de crecientes. No obstante, el conocimiento del papel de diferentes coberturas en la regulación de este fenómeno es incierto y aun existe el debate entre la conveniencia de las coberturas naturales y las plantaciones de especies foráneas de rápido crecimiento en la regulación del ciclo hidrológico. En este estudio se determinó la influencia de 3 tipos de coberturas forestales (nativas e introducidas) y no forestales, en el control de crecientes mediante las herramientas de la modelación hidrológica.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La Figura 1 señala las etapas que siguió este proyecto, y la Figura 2 las ilustra en forma específica.

Figura 1: Etapas Generales del Proceso.



Área de Estudio

La cuenca alta del río San Cristóbal se encuentra al sur oriente de la ciudad de Bogotá DC, en una zona de reserva forestal de los cerros orientales que pertenece a la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá DC (DELSA, 1986). Se ubica en las coordenadas geográficas $X= 74^{\circ} 01' 41''$ de latitud norte; y $Y=04^{\circ} 30' 42''$ latitud oeste. En un rango altitudinal de los 2900 msnm a los 3600 msnm. De acuerdo a los registros de las estaciones climatológicas de la empresa de acueducto de Bogotá la precipitación tiene un régimen monomodal con un promedio anual de 1225 mm, con los valores más altos a mediados del año. La temperatura media anual es de 13°C sobre la cota de los 3000 m.s.n.m. La humedad relativa presenta un régimen casi uniforme a lo largo del año, entre el 75 y el 80 %.

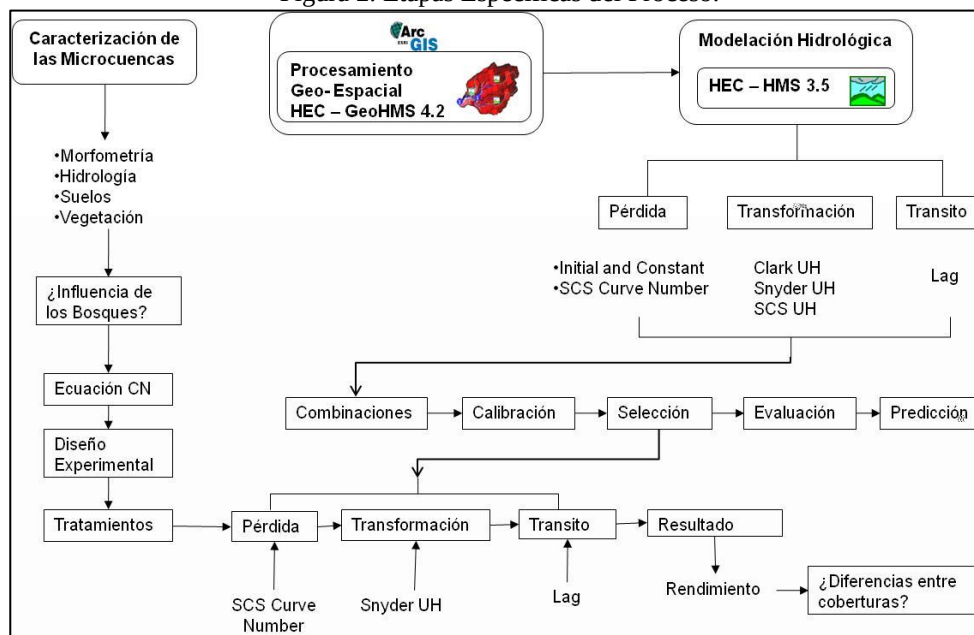
Caracterización de las Microcuencas

Se tuvo en cuenta, como características más representativas, las morfométricas, las de la cobertura vegetal, las relacionadas con los suelos y las hidrológicas. Estas variables se determinaron de forma separada para la microcuencas de Paloblanco, la Osa y La Upata, a partir de un sistema de información geográfica con ayuda del programa ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, 2010)

Instrumentación

En cada microcuenca se instalaron dos máxímetros que se ubicaron en el punto de cierre, y con los que se tomó información durante un año. De la misma forma, en cada una de las microcuencas se instaló un pluviómetro.

Figura 2. Etapas Específicas del Proceso.



Recopilación de la Información de Lluvias y Caudales Históricos

Se recogieron dos tipos de información: la primera relacionada con los datos históricos registrados por la estación Limnigráfica el Delirio de propiedad de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Para ello, se revisaron los niveles del río (limnigramas) de la estación y se identificaron eventos aislados de crecimiento del caudal. El segundo tipo de información fue la propiamente obtenida durante el año de la investigación. La toma de los datos se hizo diariamente.

Generación de Modelos

Se seleccionaron varios métodos para cada proceso, con los cuales se hizo el máximo número de combinaciones posibles.

Métodos de pérdida utilizados

Initial and Constant

Los datos de este método son el: Porcentaje de Área permeable de la cuenca, Tasa de infiltración del suelo y pérdida inicial. La tasa de infiltración del suelo, se estimó de acuerdo con los valores registrados por la tabla de grupos de Suelos del SCS y de tasas de Infiltración y la pérdida inicial fue un valor obtenido vía calibración.

La clasificación de los suelos en cada uno de los grupos del SCS y sus Tasas de Infiltración se obtuvieron del mapa de estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca (IGAC, 2000). Las unidades identificadas fueron asignadas de un valor de infiltración en mm/h. Posteriormente con ayuda del SIG se calcularon las áreas de cada unidad dentro de cada microcuenca, esto permitió calcular un valor de infiltración ponderado de acuerdo con los valores de infiltración de cada unidad.

Curva Numero

El valor de la CN se obtuvo a partir de las tablas del SCS (SCS, 1972, 1986). Teniendo en cuenta la presencia de diferentes coberturas vegetales en cada una de las microcuencas, se realizó un análisis cualitativo con base en las visitas de campo y los muestreos realizados para determinar el valor de CN inicial. Después se elaboró un valor de CN compuesto en el cual de cada cobertura obtuvo una ponderación de acuerdo con el porcentaje de área en la cuenca, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$CN_{COMPUESTA} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

Donde A_i , es el área de la i-esima cobertura y CN_i , es el valor de la CN de la i-esima cobertura.

Métodos de escurrimiento

Según los hidrogramas unitarios “HU”:

HU de Clark

Para los datos de entrada, el tiempo de concentración se halló de acuerdo con la caracterización morfométrica de las microcuencas. El coeficiente de Clark se encontró por calibración del modelo.

HU de SCS

El único dato que requiere este modelo es la identificación del lag o, tiempo de retardo. Este lag se halló bajo la siguiente relación con el tiempo de concentración (T_c):

$$\text{Lag} = 0.6 T_c$$

HU de Snyder

Este método requiere como datos de entrada, el lag y el coeficiente del pico. El Lag se halló de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$t_p = C C_t (L L_c)^{0.3} \quad (2)$$

Donde t_p es el Lag, C_t es el coeficiente de la cuenca, L es la longitud de la corriente principal, L_c es la longitud de la corriente principal hasta el centroide de la cuenca y C es la constante de conversión de 0.75 para SI

El coeficiente de la cuenca (C_t), se halló con base en las pendientes de la cuenca. El coeficiente del pico, el cual es el otro dato de entrada, se asoció con las características morfométricas de la cuenca, principalmente la pendiente. No obstante, estos valores fueron sometidos a proceso de calibración.

Métodos de tránsito

Dado que los tránsitos en este modelo, son relativamente cortos, se determinó utilizar el método del Lag. Para las dos secciones en donde se va a transitar el hidrograma, se determinó el tiempo de traslación a partir de la medida de la longitud de la sección, la pendiente y la rugosidad.

Combinaciones

Se realizaron 6 combinaciones que se muestran en la Tabla 1. Para cada combinación se simularon un total de 15 eventos. Los datos de entrada de cada método, fueron los hallados en los numerales anteriores, aquellos que pudieron ser medidos directamente, fueron estimados vía calibración.

Tabla 1. Combinaciones Utilizadas en la Modelación

Combinación	Pérdida	Escorrentía	Transito
1	Initial and Constant	Clark UH	Lag
2	SCS CN	Clark UH	Lag
3	SCS CN	SCS	Lag
4	Initial and Constant	SCS	Lag
5	Initial and Constant	Snyder	Lag
6	SCS CN	Snyder	Lag

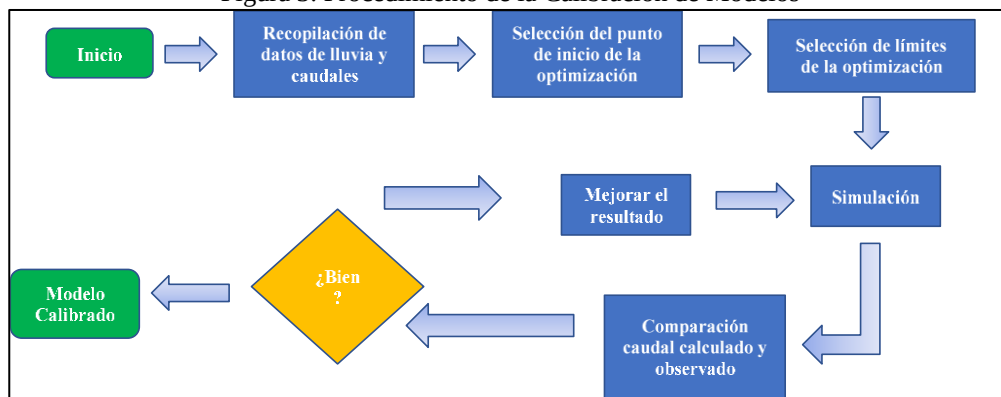
Calibración

Una vez determinadas las variables que iban a alimentar el modelo, se procedió a correr simulaciones con los valores hallados. Después de esto se realizó una calibración para todos los eventos de una misma combinación. Esta calibración consiguió identificar el hidrograma calculado que mejor se ajustaba al hidrograma observado. Figura 3.

La calibración se logró mediante ensayos de optimización. Un ensayo de optimización es una búsqueda programada por un algoritmo que define cambios en los parámetros identificados para de esta forma acercar el valor calculado al observado, hasta cumplir con los criterios de búsqueda.

El cálculo de que tan bien se está acercando el valor calculado al observado se hace mediante la utilización de una función objetivo. Esta función es un algoritmo que evalúa las diferencias entre el caudal observado y el calculado, dándole valores grandes a aquellas simulaciones que no se acercan y valores bajos a los mejores resultados, siendo de esta forma el cero el valor obtenido cuando el ajuste es perfecto.

Figura 3. Procedimiento de la Calibración de Modelos



Selección de Modelos

Los aspectos tenidos en cuenta para la predicción de crecientes fueron la predicción de los caudales máximos, y de los tiempos de caudal máximo. Para medir el comportamiento de los modelos propuestos se definió una función matemática, que identificó el modelo que mejor representó los hidrogramas de las crecientes máximas.

Evaluación de Modelos

Una vez identificado el mejor modelo con la función objetivo, se procedió a evaluar el mismo con otros eventos que no fueron utilizados en la calibración. Este procedimiento se hizo de manera tal, que no solo se comprobara en el punto de cierre de la cuenca alta, es decir la Estación LM El Delirio, sino que también se hizo la evaluación en cada una de las tres microcuencas.

Predicción de crecientes

Para la predicción de crecientes se utilizó el concepto del caudal asociado a un posible riesgo de inundación, mas no se consideró un análisis del área inundable dado que el riesgo asociado a estas crecientes se encuentra en la parte media y baja, en donde la topografía es plana y existen urbanizaciones en las cuales el rio se encuentra canalizado.

Por esta razón se hizo un análisis de la probabilidad de las lluvias, en donde se predijo las lluvias que ocurrirían con un periodo de retorno de 5, 15 y 25 años. Este análisis se hizo a partir de los registros históricos de lluvia máxima diaria de la estación pluviográfica del Delirio la cual contó con datos del año 1931 hasta el 2010. El análisis de probabilidad de las lluvias se hizo por el método de Gumbel.

Determinación de la Influencia de los Bosques

Para determinar la influencia de los bosques en la modelación, se definieron valores de curva número, de acuerdo con una ecuación propuesta que tuvo en cuenta: parámetros físicos, representados por el análisis de suelos y parámetros empíricos, representado por las tablas de curva número del servicio de conservación de suelos (SCS) de los Estados Unidos.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la predicción en inundaciones se hicieron para dos tipos de coberturas contrastantes, la primera vegetación actual y la segunda en caso hipotético de que solo existan coberturas no arbóreas en las microcuencas.

El hidrograma resultante es el obtenido en el punto de cierre denominado el Delirio y como se observa en la Figura 4, las predicciones se hicieron para eventos de lluvia extremos con periodos de retorno de 5, 15 y 25 años.

Figura 4. Predicción de Hidrogramas en la Estación El Delirio

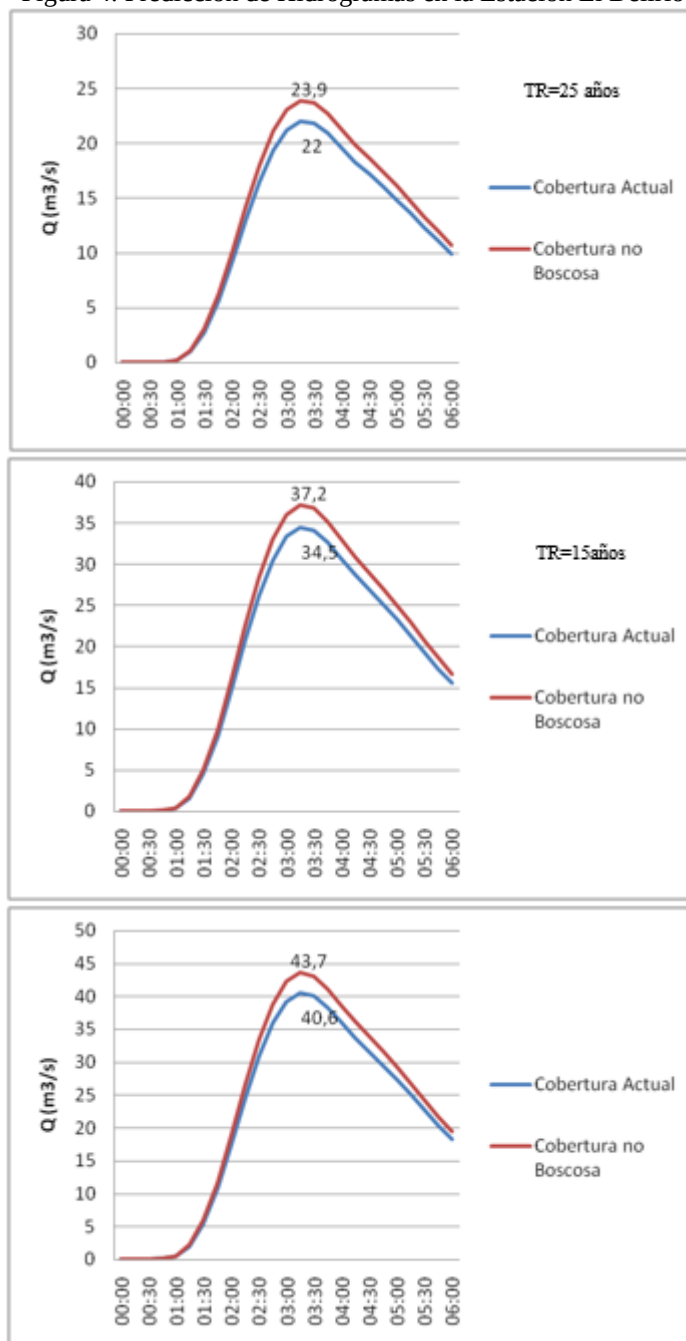


Tabla 1. Diferencias en los Caudales por Cambio de Cobertura Boscosa para Diferentes Periodos de Retorno.

Evento	Diferencia Caudal Pico (m ³ .s ⁻¹)	Incremento
TR= 5 años	2	8.63 %
TR=15 años	2,5	7.82 %
TR=25 años	3,1	7.63 %
Promedio	2.53	8.03 %

En la Tabla 2 se observa la diferencia del caudal pico en dos situaciones: la cobertura de bosques actual y la situación hipotética de la cobertura no boscosa. Se puede apreciar que las diferencias son menores y presentan un promedio de 2.53 m³.s⁻¹. Los incrementos porcentuales, fueron en promedio 8.03 %

Tabla 2. Diferencias en los Caudales pico por Cambio de Cobertura para los Eventos Máximos Registrados

Evento	Diferencia Caudal Pico (m ³ /s-1)	Incremento
08-Jun-02	0,5	10,20 %
29-May-02	1,4	8,48 %
29-Oct-02	1,3	7,60 %
25-Jul-03	0,8	7,14 %
29-Oct-99	2.6	7.01 %
Promedio	1.32	8.08 %

En cuanto a las diferencias presentadas en los eventos de lluvia máxima, las diferencias fueron menores en términos absolutos pero mayores en términos porcentuales, presentado un promedio de 1.32 m³.s⁻¹ y 8.08 %, respectivamente. Tabla 3.

De acuerdo con el ANAVA utilizado en la evaluación de diferencias entre los tratamientos planteados: el real y el hipotético, se asevera que no existen diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confiabilidad del 99.5 %. Tabla 4.

Tabla 3. ANAVA para las Diferencias dadas por los Cambios de Cobertura Boscosa en el Punto El Delirio

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	
				C	T
Tratamientos	1	12,78	12,78	0,0702	16,24
E.E.	14	2548,28	182,02		
Total	15	2561,06			

Los resultados obtenidos por otros autores con respecto a las variaciones del caudal pico dados por cambios en la cobertura vegetal de la cuenca son variables. Por un lado, autores como Guillemette *et al.* (2004), encontraron que después del aprovechamiento forestal a tala rasa del 85% de los bosques de pino (*Abies balsamea*) en una cuenca de 122 Has localizada en Montmorency Forest (Quebec, Canada), los cambios en el flujo fueron representados por reducciones en el tiempo de retardo (lag), y en el tiempo base. Así mismo, los incrementos en el caudal pico alcanzaron un valor máximo de 57%. Luego al comparar los datos de estudios hechos en 50 cuencas, se obtuvo que existió un promedio de 49% de aumento en el caudal pico cuando se remueve entre el 70 y el

100% de la cobertura forestal. Sin embargo otras cuencas tuvieron variaciones similares a las de este estudio, cercanas al 10 %.

Tremblay *et al.* (2008), determinaron que la hipótesis de que para que el incremento en los caudales pico no sobrepase el 50%, el area intervenida en aprovechamiento debería ser menor al 50%. Ellos concluyen que en cuencas pequeñas (>50 Has), estos incrementos en caudal picos son menores y que estas respuestas son potenciadas por fenómenos climatológicos como los ocurridos durante el huracán Katrina. Además, encontraron que pese a lo que se cree, los incrementos en el caudal pico no fueron mayores cuando las areas aprovechadas correspondían a áreas cercanas a los drenajes.

Hay que considerar que los datos anteriores corresponden a bosques en su mayoría boreales y no a bosques tropicales. Estos bosques boreales presentan características de fisiográficas, climáticas de manejo forestal y de especies diferentes, además se comparan las condiciones iniciales y las condiciones después del aprovechamiento, las cuales son por lo general presentan cambios más marcados al principio hasta que después se establece la nueva cobertura, ya sea pastos, arbustos o bosque natural sucesional.

En ecosistemas europeos, Robinson *et al* (2003) encontraron que las coníferas, generalmente plantadas en suelos pobremente drenados y los eucaliptos del sureste de Europa son las situaciones en las que pueden presentar las mayores variaciones en caudal pico. Por último concluyen que cambios de otro tipo de coberturas a escala regional producen leves cambios tanto en los caudales pico como en los caudales bajos.

4 CONSIDERACIONES FINALES

Los bosques no influyen significativamente en eventos de precipitación extrema. No obstante, algunas diferencias son observables cuando se comparan con vegetación no boscosa. La respuesta del hidrograma, específicamente el caudal pico alcanzado por este, depende primordialmente de la intensidad de la precipitación y de las características morfométricas de la cuenca hidrográfica.

La influencia de los bosques en la regulación de eventos extremos, es trascendente si se compara con las coberturas no boscosas, como vegetación de paramo, arbustos y pastos, esto es debido al incremento porcentual en el caudal pico cuando se contrastan estas coberturas, lo que no ocurrió al analizar diferencias significativas entre bosques. Además, se evidencio que entre mayor el tiempo de retorno, mayor la diferencia entre regulación de caudal pico de las cobertura boscosa y no boscosa.

La morfometría influye de manera significativa en el tamaño del caudal pico. Esto se evidencia, a partir de la observación de los caudales picos de La Osa que pese a ser más pequeña que la microcuenca Paloblanco, presenta hidrogramas más agudos y por consiguiente niveles más altos. Concluyendo que no existe una relación lineal entre área de la microcuenca y los caudales pico generados, relación que si existe cuando se habla en términos de volumen.

A nivel del balance hídrico, dentro de los bosques estudiados, se infiere que las pérdidas por interceptación, evaporación y demás, son mínimas con relación a la infiltración y posterior escorrentía. Esto se debe a que en un evento de pocas horas donde caen varios centímetros de lluvia, algunos procesos como la evapotranspiración, evaporación del agua del suelo y de las copas, se presentan en una escala temporal mayor y son menores en cantidad de agua en movimiento.

Las microcuencas no se pueden considerar muestras dentro del diseño ya que estas presentan características únicas que no permiten que sean comparables entre si, por ejemplo la microcuenca de La Osa se observa que los valores de rendimiento, en términos de caudal pico, son mucho mayores que en las otras dos microcuencas, debido a ser una cuenca torrencial, con pendientes fuertes y bajo tiempo de concentración

A pesar de que en el suelo del bosque no se observe escorrentía superficial directa, si puede haber un movimiento de agua a nivel del suelo, en el denominado flujo sub-superficial que va a alimentar el drenaje más cercano. No obstante los movimientos del agua bajo el suelo son diferentes, así que futuras investigaciones relacionadas con la modelación de la escorrentía bajo el bosque deberán tener en cuenta diferentes tiempos de concentración que suceden en este complejo sistema.

Los incrementos porcentuales fueron mayores en los eventos de lluvia reales, que en los eventos con un periodo de retorno determinado, pese a que la magnitud de la lluvia fue mayor en los últimos. Esto indica que la respuesta del hidrograma también está condicionada por las características del hietograma (*i.e.* la intensidad de la lluvia efectiva en cada uno de los intervalos de tiempo)

AGRADECIMIENTOS

A los profesores, Miguel Cadena, Robert Leal y Germán Hurtado del Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C.

A los Ingenieros de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá Carlos Bello, Ricardo Rosero y Gustavo Herrán.

A los guardabosques de la Empresa de acueducto, Reynaldo Vanegas y Jairo.

A los integrantes del semillero de investigación en Hidrología Forestal, SHIF Alexander Castillo y Alfonso Triana.

A los estudiantes de Mediciones Forestales de 2010-I, y en especial al Monitor Fabián Herrera y a María Catalina Becerra.

A nuestros amigos, María Fernanda Garrido, Nataly Andrea García, Lady Carolina Parra, Daniel León (Mono), Iván Camilo Rodríguez y José Luis Vergara.

REFERENCIAS

- Bruijnzeel, L.A. 1990. Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: a State of Knowledge Review. Humid Tropics Programme, IHP-UNESCO, Paris, and Vrije Universiteit, Amsterdam, 224 p.
- Cantú, I. & Takenobu, O. 1996. Throughfall, stemflow and interception loss in a mixed white oak forest (*Quercus serrata* Thunb.) Journal of Forest Research: 1(3): 123- 129
- Crockford, R. & Richardson, D. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. Hydrol. Process. 14, 2903-2920.
- De la Torre, E. 2004. Hidrología de Superficie. Editorial Fondo de Publicaciones del la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Apuntes de Clase. Colombia. Bogotá DC. 198 pg.
- De las Salas, G. & García, C. 2000. “Balance hídrico bajo tres coberturas contrastantes en la cuenca del río San Cristóbal”. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Separata, Volumen XXIV, NÚMERO 91, <http://www.accefyn.org.co/Publicad/rev/rev.htm/> Fondo FEN, Bogotá.
- DELSA Ltda. 1986. Plan de Aprovechamiento de las plantaciones de Ciprés y Eucalipto de la cuenca hidrográfica del río San Cristóbal. Bogotá, 2 volúmenes.
- Departamento Nacional de Planeación, DNP. 2006. Plan Nacional De Desarrollo 2006 - 2010. URL: <http://www.dnp.gov.co/PortalWeb/tabid/54/Default.aspx>. (F consulta: 2008 02 14).
- FAO, 2008. Forests and water. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. Rome, 78 p.
- Feldman, A. 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center Davis. California. Estados Unidos. 149p.
- Guillemette, F. Plamondon, A. Prévost M. & Lévesque, D. 2004. Rainfall generated stormflow response to clearcutting a boreal forest: peak flow comparison with 50 world-wide basin studies. Journal of Hydrology. Volume 302. Pg 137- 153
- Hamilton, L.S. & King, P.N. 1983. Tropical forested watersheds: hydrologic and soils response to major uses or conversions. Boulder, Colorado, USA, Westview Press.
- Hawkins, R.H. 1984. A comparison of predicted and observed runoff curve numbers. In: Proceedings of the Special Conference, held in Flagstaff, Arizona, Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, New York.
- Hewlett, J.D. & Helvey, J.D. 1970. Effects of forest clear-felling on the storm hydrograph. Water Resources Research. 6(3): 768-782.
- Hornbeck, J.W. 1973. Storm flow from hardwood-forested and cleared watersheds in New Hampshire. Water Resources Research. 9(2): 346-354.
- Huber, A. Barriga, P. Trecaman, R. 1998. Efecto de la Densidad de Plantaciones de *Eucalyptus nitens* Sobre el Balance Hídrico en la Ona e Collipulli IX Region (Chile). Bosque 19(1): 61-69.
- Hydrologic Engineering Center. 1990. HEC-I Flood Hydrograph Package User's Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, California. EU.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. 2000. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca. Bogotá DC

Ives, J.D. & Messerli, B. 1989. The Himalayan dilemma: reconciling development and conservation. United Nations University. London and New York, Routledge.

Levia, D.F. Bollinger, W.C. and Hrabik, R.A. 2005. Evaporation of intercepted precipitation from fruit litter of *Liquidambar styraciflua* L. (sweetgum) in a clearing as a function of meteorological conditions. *International Journal of Biometeorology* 49 (5): 325-331.

Liu, L & Liu, J. 2008. A rainfall interception model for inhomogeneous forest canopy. *Frontiers or forestry in China*, 3(1): 50 – 57.

Radersma, S. Ong, C.K. & Coe, R. 2006. Water Use of Tree Lines: Importance of Leaf Area and Micrometeorology in Sub-Humid Kenya. *Agroforestry Systems*: 66 (3): 179- 189

Robinson, M. Cognard-Plancq, A. C. Cosandey, J. David, P. Durand, H. -W. Führer, R. Hall, M. O. Hendriques, V. Marc, R. McCarthy, M. McDonnell, C. Martin, T. Nisbet, P. O’Dea, M. Rodgers, Zollner, A. 2003. Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective *Forest Ecology and Management*, Volume 186, Issues 1-3, 5, Pages 85-97

Scharffenberg, W. & Fleming, M. 2009. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User’s Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center Davis. California. Estados Unidos. 298p.

Sellers, P.J & Lockwood, J. G. 1981. A numerical simulation of the effects of changing vegetation type on surface hydroclimatology. *Climatic Change*: 3 (2): 121- 136

Silva, G. 1986. Hidrología Básica. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C.

Smart, J. 1972. Channel networks. *Adv Hydrosoci* 8:305–346

Soil Conservation Service, SCS. 1972 National engineering handbook, sec. 4: hydrology, soil conservation service (SCS). USDA, Washington, D.C.

Soil Conservation Service, SCS. (1986) National engineering handbook, sec. 4: hydrology

Tremblay, Y. Alain N. Rousseau, André P. Plamondon, Denis Lévesque, Sylvain Jutras 2008. Rainfall peak flow response to clearcutting 50% of three small watersheds in a boreal forest, Montmorency Forest, Québec *Journal of Hydrology*, Volume 352, Issues 1-2, 30 April 2008, Pages 67-76.

Van der Hammen, T. & Gonzales, E. 1963. Historia de Clima y la Vegetación del Pleistoceno Superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá. *Boletín Geológico* V. XI (1-3)

Woolhiser, D, A. Smith R E and Goodrich D, C. 1990. KINEROS, Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. USDA-ARS, ARS 77, Washington D.C., USA