

EFFECTO DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN BASADA EN ECOSISTEMAS SOBRE MÉTRICAS HIDROLÓGICAS CONSIDERANDO CAMBIO CLIMÁTICO: RÍO NECHÍ, COLOMBIA

EFFECTS OF ECOSYSTEM-BASED ADAPTATION APPROACHES FOR HYDROLOGICAL METRICS CONSIDERING CLIMATE CHANGE: NECHÍ RIVER, COLOMBIA

Ruiz Luis, Miguel⁽²⁾; Delgado, Juliana⁽¹⁾; Angarita, Héctor⁽¹⁾; Salas, Hernán D.⁽²⁾; Sánchez, Joany⁽²⁾; Cortés, Mónica⁽²⁾; y Rueda, Oscar A.⁽²⁾

Resumen

Se presenta un ejercicio de modelación hidrológica en WEAP, basada en escenarios bio-físicos en la cuenca hidrográfica del río Nechí, departamento de Antioquia (Colombia), con el objetivo de contribuir a la gestión integral de los recursos hídricos. Este trabajo incluye: (i) modelación hidrológica de alta montaña, (ii) modelación hidrológica de planicies inundables, (iii) validación del modelo con información de campo, (iv) simulación de escenarios de cambio climático (ECC), (v) análisis de cambio de coberturas vegetales, y (vi) análisis dinámico de cuerpos de agua a partir de interpretación de imágenes LANDSAT. Se usaron estrategias de Adaptación Basada en Ecosistemas (ABE) que mejoran coberturas de bosque en la zona, conectividad en las ciénagas y capacidad de almacenamiento del suelo, evaluando respuesta hidrológica en planicies inundables, mediante métricas que incluyen caudales con probabilidad de excedencia de 10%, 97.5%, y Volumen Medio de Inundación (VMI) en el periodo de simulación 1996-2070 para ECC de temperatura y precipitación. Adicionalmente, se analiza la respuesta hidrológica debida a cambios que generarían las ABE en combinación con los ECC antes mencionados. Los resultados sugieren: (i) aumento en caudales mínimos si aumenta la deforestación y pérdida de conectividad, (ii) aumento del caudal Q97.5 para ECC y aumento de deforestación hasta 40%, y (iii) aumento del VMI cuando se presentan pérdidas de coberturas y aumento de los caudales de aguas altas hacia aguas abajo de la región de estudio cuando se presenta pérdida de conectividad entre las ciénagas y el río.

Palabras clave: Modelación hidrológica, Medidas de Adaptación basadas en Ecosistemas, WEAP, Cambio climático.

ABSTRACT

We realize the hydrological modeling using WEAP based on scenarios and integrating bio-physical aspects Nechí river basin which is located in Antioquia (Colombia) to contribute to the integrated management of water resources. This work includes: (i) hydrological modeling for high mountains, (ii) hydrological modeling in flood plains, (iii) validation of the model with information in-situ, (iv) climate change scenarios (ECC), (v) analysis of vegetable covers, and (vi) analysis of the dynamic in flood plains using LANDSAT images. strategies Ecosystem-Based-Adaptation (ABE) was used, and analyzing the hydrologic response in Nechí flood plains using metrics such as probability of exceedance of the streamflows 10%, 97.5%, and average volume of flood (VMI) for the simulation period 1996-2070 for ECC with temperature and precipitation. In addition, we analyze the hydrologic response due changes in vegetation covers, swamps connectivity, and storage capacity of the soil in combination with the ECC aforementioned. The results suggest: (i) increase in flows compared with actual tendency assuming increasing deforestation and loss of connectivity, (ii) increase in the Q97.5% considering ECC and deforestation and, (iii) increase in VMI with loss of vegetation and increasing high water flows downstream of the study area when loss of connectivity between the swamps and the river is presented.

Key words: Hydrological modelling, Ecosystem-based Adaptation Approaches, WEAP, Climate Change

INTRODUCCIÓN

En Colombia, The Nature Conservancy (TNC), promueve una visión y manejo integral para la conservación de la naturaleza y los servicios ecosistémicos que benefician a cerca del 80% de los colombianos. La herramienta utilizada por TNC para generar conocimiento en torno al manejo integral del

recurso hídrico se basa en la implementación de un modelo de oferta y demanda hídrica que permite estimar las alteraciones acumulativas, implementado en el sistema WEAP (Water Evaluation and Planning) desarrollado por el Stockholm Environment Institute (SEI) (Yates et al., 2005a; Yates et al., 2005b).

¹ The Nature Conservancy
Tel.: 574-4482502
oscar.rueda@gottaingenieria.com

² GOTTA INGENIERIA SAS

En el marco de manejo integral de cuencas hidrográficas se realiza un ejercicio de modelación hidrológica de la cuenca del río Nechí con el fin de avanzar en la gestión sostenible de los recursos naturales, dada su importancia para el sector ambiental, social y económico. Además porque las entidades gubernamentales tienen el deber y la necesidad de desarrollar estrategias de gestión para el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales por parte de la comunidad, las entidades públicas y el sector privado.

Por tal razón, este estudio incluye el acoplamiento del modelo hidrológico para la cuenca del río Porce (afluente al río Nechí) y la incorporación de escenarios de cambio climático (ECC) para evaluar posibles impactos, medias de adaptación y vulnerabilidad de los ecosistemas en un entorno de cambio ambiental global, cuyos efectos son fundamentales para la adecuada gestión gubernamental y la previsión de los impactos sociales (IPCC-WGII-AR5, 2014).

En el numeral 3 se describe la información hidrológica, cartográfica y mediciones de campo, en el numeral 4 se describe la metodología considerando las características del modelo WEAP, el análisis de imágenes satelitales y los escenarios de modelación, en el numeral 5 se presentan los resultados y análisis. Finalmente, las conclusiones están consignadas en el numeral 6.

2. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica de los ríos Porce-Nechí, se encuentra geográficamente en el departamento

de Antioquia (Colombia), en el rango de Latitud 6.0°N-8.0°N; Longitud 75.8°W-74.5°W, con un área aproximada de 14.600 km², y rango altitudinal entre 30 y 3.300 m.s.n.m. La zona de estudio es de particular interés para el entendimiento de alteraciones hidrológicas en Colombia debido a que incluye factores que inducen variabilidad natural y componentes que contribuyen a la modificación en el régimen de caudales debido a actividades antrópicas, entre estos: (i) La variabilidad natural debido a fenómenos macro-climáticos sobre la hidroclimatología colombiana (Poveda, 2004), (ii) la influencia de las montañas de los Andes sobre la dinámica espacio-temporal de las variables hidrológicas en la región andina de Colombia (Poveda, 2011), (iii) las actividades antrópicas de alto impacto en el régimen natural de los caudales, y (iv) la dinámica hidrológica en planicies inundables.

La actividad que más presión ejerce sobre el uso de los recursos hídricos en la zona de estudio es la generación hidroeléctrica, aparte de actividades pecuarias, el uso doméstico y la minería que cada vez cobra mayor importancia. La parte alta y media-alta de la cuenca, recibe un impacto significativo de centros poblados del Valle de Aburrá, que incluye la ciudad de Medellín, la segunda en importancia en el país, mientras la zona media de la cuenca está afectada principalmente por la utilización del recurso hídrico para generación hidroeléctrica y la zona baja por las actividades de la minería (CORANTIOQUIA y TNC, 2014). La localización de la zona de estudio se puede apreciar en la Figura 1.

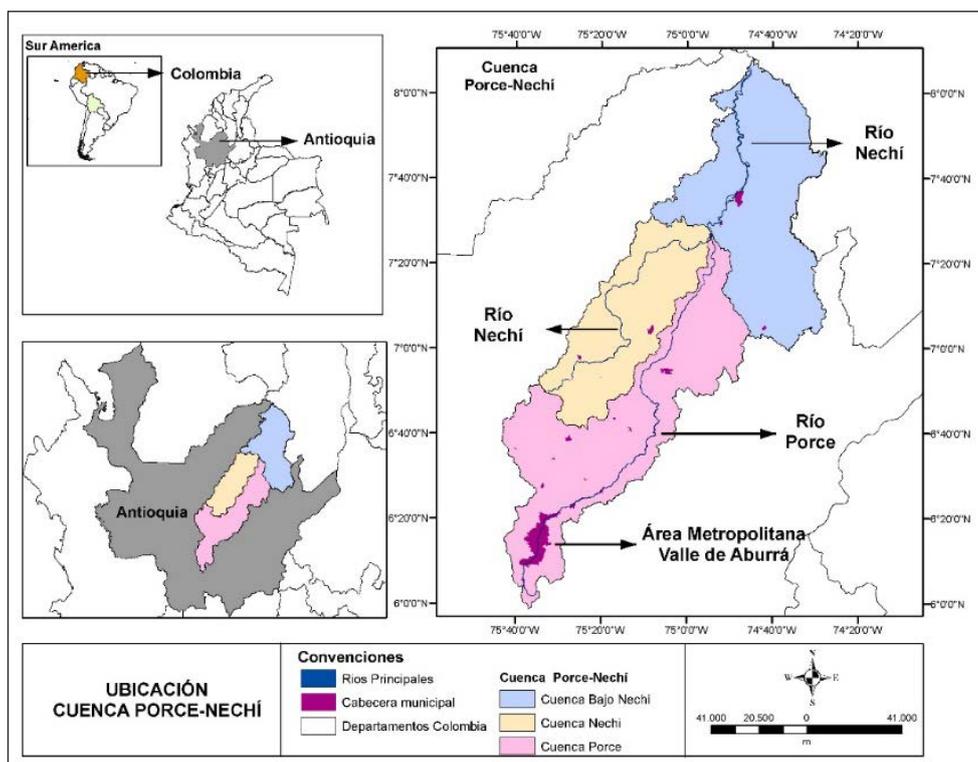


Figura 1.- Localización de la zona de estudio a diferentes escalas espaciales. (a) Continental, (b) Regional, y (c) Local.

3. DATOS

En este numeral se mencionan las diferentes fuentes de información utilizadas en este trabajo. Los registros de variables hidroclimáticas y mediciones de campo están disponibles dentro de la zona de estudio. Por su parte, la información cartográfica incluye productos oficiales de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) además de productos de libre acceso en internet.

3.1 Información hidroclimática

La información de registros históricos de variables hidro-climáticas pertenece al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y a las Empresas Públicas de Medellín (EPM). La información presenta resolución diaria, contiene registros en una ventana temporal variable en el periodo de 1980-2014, y consiste en un paquete con 90 estaciones de precipitación (79 estaciones de IDEAM, 11 estaciones de EPM), 12 estaciones con información de humedad relativa, 24 estaciones de registros de temperatura superficial, y 6 estaciones de registros de caudal (4 estaciones de IDEAM, 2 estaciones de EPM).

3.2 Información cartográfica

La información cartográfica incluye mapas de la red hídrica, mapa de cuencas hidrográficas, coberturas de tierra, embalses y centros poblados, el modelo de elevación digital SRTM de 1 segundo de arco que equivale a aproximadamente 30 metros, obtenido del USGS, además del modelo de elevación digital ASTER de 30 metros. Se trabajó también con información de tres tipos de sensores que actualmente están activos (Landsat 7 TM, Landsat 7 ETM + y Landsat 8) que fue utilizada para el análisis de coberturas vegetales y cuerpos de agua.

3.3 Información de campo

Se realizó una campaña de campo en la zona de la ciénaga El Sapo y el complejo Corrales, ubicados en la parte baja del río Nechí, para recolectar información suficiente y realizar verificaciones sobre las consideraciones de modelación hidrológica en WEAP. Esta campaña se ejecutó en mayo de 2015. En ella se realizaron levantamientos topográficos que permitieron identificar secciones de banca llena en el cauce del río Nechí; además de aforos de caudal en el mismo. Adicionalmente, se hizo un levantamiento batimétrico aproximado en los sectores navegables de las ciénagas para identificar su estructura geométrica aproximada, establecer una elevación media y por último, se tomaron fotografías aéreas para identificar las interconexiones de la ciénaga y la conexión ciénaga - río.

La información batimétrica y de aforos que se realizó en la zona de la ciénaga El Sapo y el complejo

Corrales sobre el río Nechí, se ubica en las unidades hidrológicas C23 y C24 que se presentan en la Figura 3, donde además, se realizaron fotografías aéreas con el fin de determinar puntos y caños de conectividad entre estas dos ciénagas y el canal principal del río.

4. MÉTODOS

Este numeral contiene la descripción general de la metodología del estudio realizado. En algunos casos se mencionan resultados de procesamiento que son utilizados como insumo para la modelación. Esta sección está organizada de la siguiente manera: En el numeral 4.1., se describen aspectos generales de la modelación hidrológica en WEAP, en el numeral 4.2., se describe el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales (identificación de cuerpos de agua y áreas de coberturas vegetales), en el numeral 4.3., se describen los escenarios de modelación incluyendo cambio climático y medidas ABE. Finalmente, se presentan aspectos de calibración y validación del modelo WEAP.

4.1 Modelación hidrológica en WEAP

El modelo WEAP, consta de módulos interconectados, tanto para la hidrología como para el balance de masa en cada paso de tiempo del modelo; este modelo se ha descrito en detalle previamente (Sieber et al., 2002; Yates et al., 2005a, 2005b, 2009; Young et al., 2009). El balance hidrológico y físico en WEAP consta de componentes diseñados para representar la variabilidad en las suposiciones claves en la escala espacio-temporal; cuenta con funciones empíricas que describen la evapotranspiración, la escorrentía superficial, el escurrimiento sub-superficial, la percolación profunda (Kiparsky et al., 2014) y en este caso, la conectividad entre sistemas de llanuras inundables.

El modelo WEAP, permite dentro de cada unidad hidrológica denominada *catchment*, calcular balances de agua de acuerdo a las características de dicha unidad. Para el cálculo de la evapotranspiración se usa la ecuación de *Penman – Montith*. La escorrentía superficial se representa a partir de parámetros de resistencia al flujo, inclinación, porosidad, entre otras; a partir de ecuaciones empíricas. El flujo vertical entre diferentes capas de suelo se ajusta usando un parámetro de conductividad, y parámetro de ajuste que permite estimar que fracción pertenece a flujo horizontal. Los embalses se simulan en función de sus características físicas, así como los parámetros de operación que reflejan las decisiones basadas en el equilibrio de control de inundaciones, suministro de agua, y el almacenamiento remanente y su operatividad se incluye como condición de entrada para las simulaciones.

La versión actual de WEAP, incluye un modelo conceptual de almacenamiento de humedales y

llanuras de inundación, con interacciones laterales entre el río y las planicies adyacentes. Incluyendo un nuevo tanque de almacenamiento como se observa en la Figura 2 es posible representar la inundación de una llanura por la creciente en el caudal de un río a través de factores de conectividad lateral y parámetros que indican el flujo de intercambio entre la llanura de inundación y el canal del río. En la Figura

3, se presentan los 24 catchments que representan la zona baja de la cuenca del río Nechí, de los cuales 10 están relacionados con zonas inundables. Los factores de conectividad fueron calibrados para los *catchment* C23 y C24, en los cuales se realizó una campaña de campo para determinar la conectividad entre el río y las planicies ubicadas en estos *catchments*.

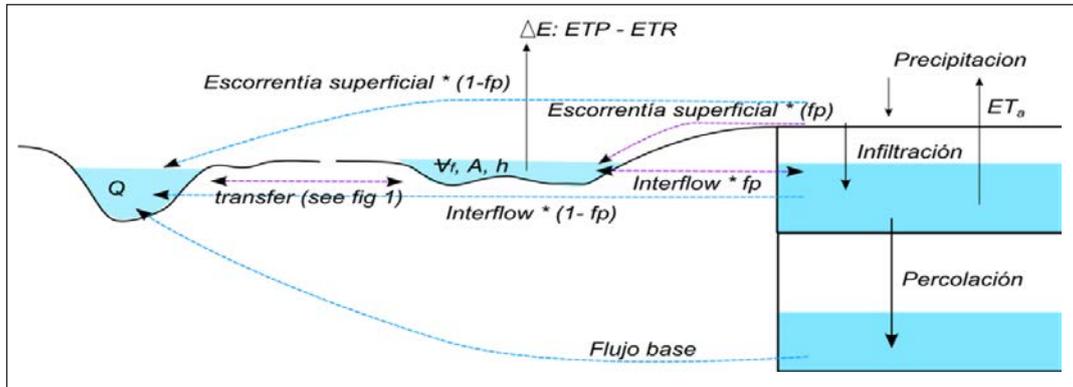


Figura 2.- Modelo esquemático de humedad en el suelo que incluye componente de entradas y salidas para el almacenamiento superficial (Angarita et. al, 2015).

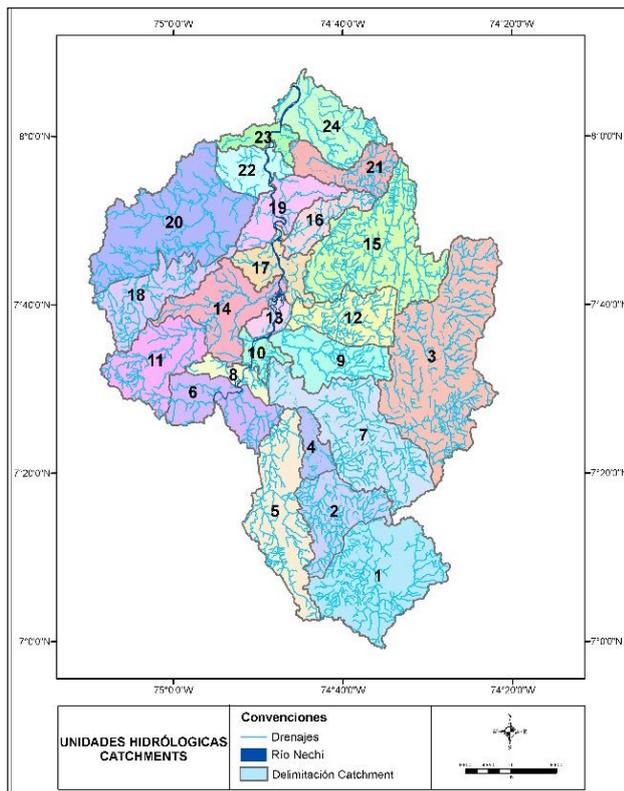


Figura 3.- Esquema del área de estudio en WEAP con las 24 unidades hidrológicas (catchments).

4.2 Interpretación de imágenes satelitales

La interpretación y análisis de imágenes satelitales, es un procedimiento fundamental para la adecuada construcción del modelo hidrológico en WEAP, por tal razón, se realizó una clasificación supervisada de 28 imágenes Landsat para el periodo comprendido entre

1996-2015. En cada una de las imágenes se identifica el río principal, los cuerpos de agua asociados, lo cual permitió identificar áreas inundables en diferentes períodos climáticos y bajo la influencia de diferentes fenómenos macroclimáticos como el ENSO. Para los años 1999, 2006 y 2012, se realiza la clasificación las coberturas vegetales de la zona mediante la interpretación de imágenes Landsat, siguiendo la metodología *Corine Land Cover*. Esta metodología utiliza niveles de jerarquía según el grado de detalle, siendo su objetivo el de unificar criterios, conceptos y métodos de las coberturas de un territorio (IDEAM, 2010).

4.2.1 Interpretación de cuerpos de agua

La dinámica de los cuerpos de agua a partir de las imágenes Landsat, para una muestra de 4 imágenes distribuidas a lo largo del periodo estudiado, se puede apreciar en la Figura 4. Es posible observar el cambio en los espejos de agua del río principal y las ciénagas. En las imágenes, es posible apreciar la influencia del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en sus dos fases en la zona de estudio. Como se aprecia en la Figura 4, en octubre del año 2010 el área de estudio se encontraba completamente anegada a causa de la ocurrencia del fenómeno de La Niña, del mismo modo la influencia del fenómeno de El Niño muestra una disminución importante en las áreas de las ciénagas en diferentes períodos de tiempo (ver Figura 4, junio de 2004 y enero de 2015). En la Tabla 1, se muestran diferentes períodos de tiempos, de acuerdo a la fase del ENSO en la que se encuentran, así como las áreas de los cuerpos de agua en estos períodos.

Tabla 1.- Área de los cuerpos de agua en la zona de estudio para diferentes fases del ENSO

Catchment	07/1996	05/1998	02/2003	10/2010	08/2012	01/2015
	Neutro	Neutro en transición	El Niño	La Niña	Neutro	El Niño
Área (km ²)						
6	1,48	0,96	5,79	13,73	4,04	2,14
8	1,29	0,79	2,57	5,23	2,15	1,23
10	2,26	1,33	4,45	9,69	4,04	2,38
13	4,20	2,42	5,49	17,37	6,88	3,61
14	2,06	0,74	7,65	34,34	9,55	2,97
17	6,77	4,15	8,67	37,82	11,68	4,91
19	4,10	2,84	9,56	42,55	8,26	5,51
22	6,42	3,22	20,55	51,03	20,77	6,06
23	3,51	1,69	7,31	31,48	9,79	2,59
24	8,96	2,90	17,56	113,31	14,40	8,42

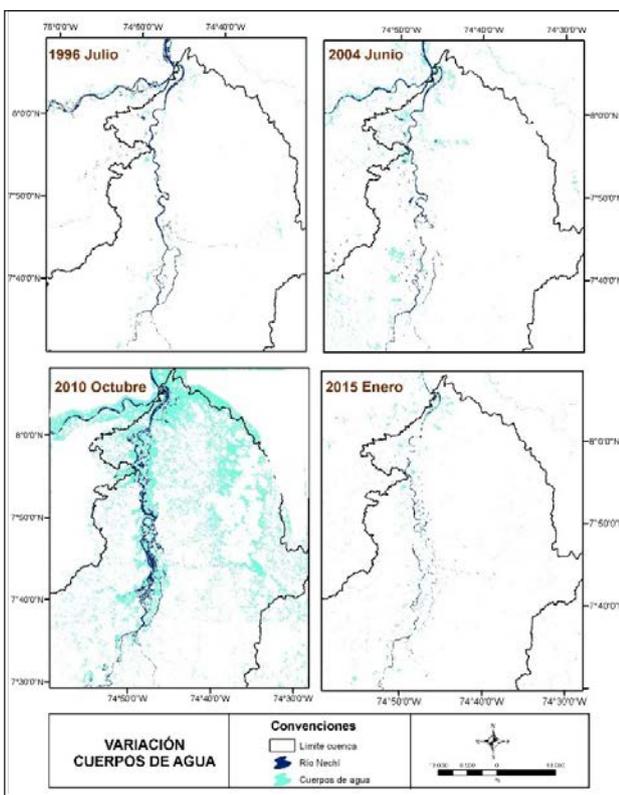


Figura 4.- Interpretación de los cuerpos de agua para varias imágenes Landsat en el periodo 1996-2015.

4.2.3 Interpretación de coberturas de la tierra

Se realiza un análisis espacio-temporal de coberturas de tierra en la zona de estudio para los años 1999, 2006 y 2012 (ver Figura 5). En la Tabla 2, se presenta el cambio de coberturas de tierra entre los años 1999 y 2012, se puede observar que las principales coberturas vegetales identificadas en la cuenca hidrográfica son vegetación herbácea, bosques y los pastos, respectivamente. La vegetación herbácea hace referencia a rastrojos en sus diferentes estados sucesionales, producto de la regeneración natural del bosque debido a potreros abandonados o en

descanso. Esta cobertura se encuentra distribuida en toda la zona de estudio, pero principalmente hacia la parte baja de la cuenca en los costados Noroeste y Noreste. Los análisis muestran un aumento porcentual de 86.1 % para este tipo de coberturas en el periodo 1999-2012. Por su parte, los bosques también son una cobertura importante en la zona, siendo la segunda con mayor proporción de área, con una gran franja en el sector Este de la cuenca, especialmente en las divisorias. Este tipo de cobertura presenta una fuerte reducción porcentual en el área de 37% entre 1999-2012. Finalmente, los pastos muestran una reducción en área del 22% para el año 2012 con respecto al año 1999.

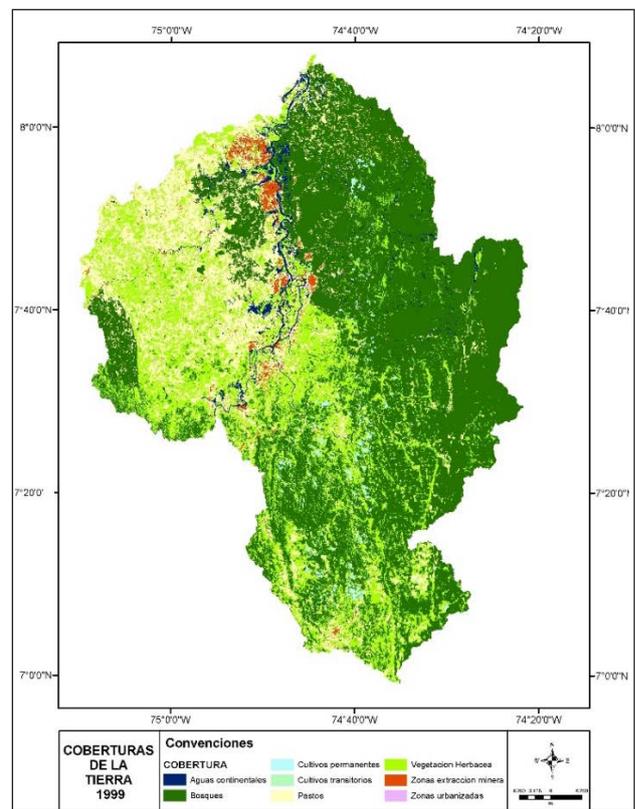


Figura 5.- Coberturas vegetales para la zona de estudio del año 1999.

Tabla 2.- Participación en área de cada cobertura para los tres años analizados

Cobertura	Área (km ²)		
	1999	2006	2012
Aguas continentales	165,74	81,41	141,40
Bosques	3.255,41	3.167,65	2.054,70
Cultivos permanentes	62,80	63,14	63,14
Cultivos transitorios	3,54	3,56	3,56
Pastos	1.227,19	820,66	958,72
Vegetación Herbácea	1.573,21	2.056,12	2.927,06
Zonas extracción minera	87,21	182,56	226,54
Zonas urbanizadas	3,19	3,19	3,19
TOTAL	6.378,30	6.378,30	6.378,30

4.3 Descripción de los Escenarios de modelación

Para la simulación de escenarios, se tuvo en cuenta los cambios en las condiciones del suelo y las dinámicas entre las ciénagas y el río Nechí, teniendo en cuenta los procesos identificados del análisis de imágenes Landsat, incluyendo pérdidas de conectividad y escenarios de cambio climático para Colombia hacia el año 2070. Se realizaron 960 simulaciones, evaluándose la respuesta con las siguientes métricas: *i)* evapotranspiración real promedio en mm, *ii)* evapotranspiración potencial promedio en mm, *iii)* Caudal máximo de la serie promedio diaria en m³/s, *iv)* caudal mínimo de la serie promedio diaria m³/s, *v)* caudal medio de largo plazo en m³/s, *vi)* caudal del 10% de excedencia (Q10%) en m³/s, *vii)* Caudal del 97.5% de excedencia (Q97.5%) en m³/s, *viii)* volumen media de inundación en C23 (Sapo) en Mm³, *ix)* Volumen máximo de inundación en C23 (Sapo) en Mm³, *x)* volumen media de inundación en C24 (Corrales) en Mm³, y *xi)* volumen máximo de inundación en C24 (Corrales) en Mm³.

Las consideraciones generales de simulación de escenarios se mencionan a continuación:

- En el cambio de bosque se simula tanto su disminución como su aumento en cada uno de los catchments, de acuerdo con la tendencia de transformación de los últimos 15 años a través de la interpretación de las imágenes Landsat; esta conversión se limita a un rango (-40% hasta 30%).
- El cambio en las condiciones de capacidad de almacenamiento superficial, simulado mediante la realización de cambios del 15% en cada escenario y su rango va desde -30% hasta 30%, que se convierte en un indicador del cambio del uso del suelo hacia coberturas de mayor desgaste a la capa superficial, tales como minería y suelo agrícola.
- El cambio en las condiciones de conectividad entre las ciénagas y el río va desde -30%

hasta 30% en los factores de conexión como son el *Floodreturn* y el *Floodfraction* los cuales representan el porcentaje de transferencia que va de la planicie al río y viceversa, respectivamente. Adicionalmente, se analiza una condición extrema de pérdida de la conectividad del 90 %, considerando intervención antrópica.

- Para cambio climático, se consideran escenarios tendenciales de precipitación y temperatura, teniendo en cuenta el informe de Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 (IDEAM, et al., 2015). En la Tabla 3, se plantean cuatro (4) escenarios de posible cambio en la tendencia de las variables hidroclimáticas mencionadas. El estudio mencionado pronostica un aumento en la temperatura media cercana a los 2.5°C en el período de simulación, por lo cual se considera una tendencia creciente hasta los 2.5°C en el año 2070 (E1, E2 y E3). Por otra parte, la precipitación presenta un grado de incertidumbre mayor. El mismo informe indica que la precipitación, hacia el periodo 2071-2100 puede crecer o decrecer en un rango de 10% por lo que se hace esta consideración en los escenarios E1 y E3, asumiendo los valores extremos del rango como escenarios de simulación.

Tabla 3.- Escenarios de cambio climático simulados al año 2070

Escenario	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
E0	Tendencia actual	Tendencia actual
E1	Disminución del 10%	Aumento gradual hasta 2.5°C mas
E2	Sin cambio en precipitación	Aumento gradual hasta 2.5°C mas
E3	Aumento del 10%	Aumento gradual hasta 2.5°C mas

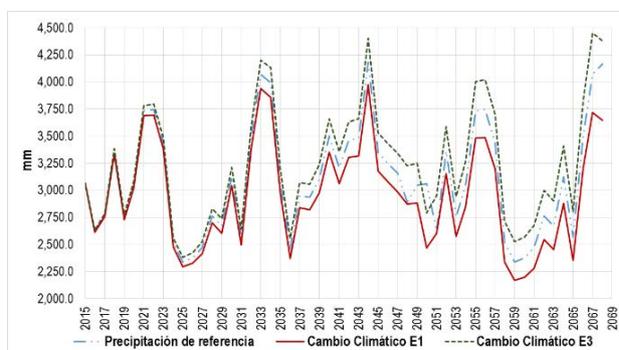
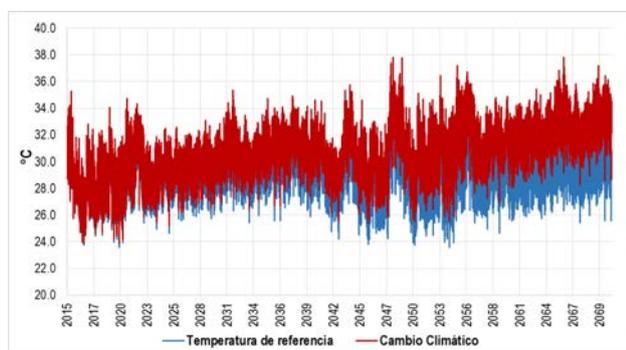


Figura 6.- Comportamiento de las series proyectadas para cambio climático de precipitación y temperatura para el *catchment* C23. (izquierda) Comportamiento de la temperatura proyectada. (Derecha) Comportamiento de la precipitación proyectada.

La simulación de los escenarios antes mencionados se hizo a partir de crecimientos progresivos y homogéneos anuales durante el periodo de simulación (2015-2070). En la Figura 6, se muestran las series de temperatura y precipitación proyectadas, las cuales se construyeron replicando el comportamiento histórico afectándolo por factores de crecimiento y decrecimiento graduales hasta alcanzar los niveles proyectados para Colombia 2011-2100 (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLERÍA, 2015).

4.3.1 Simulación de escenarios 1996-2070

El análisis de la simulación de escenarios se fundamentó en métricas de las variables para identificar dinámicas asociadas al cambio de las variables simuladas. Como métricas fundamentales se utilizaron el caudal del 10% de la curva de duración, Q10%, el caudal del 97.5% de la curva de duración, Q97.5 de la curva de duración, y el volumen medio de inundación, como se describe a continuación, dada la importancia de estas variables. Así, el caudal Q 10%, representa el orden de magnitud del caudal a partir del cual el río se desborda hacia las ciénagas (de acuerdo a lo observado en las campañas de campo), por lo que tiene importantes implicaciones ecológicas, económicas y sociales, y puede servir como criterio de toma de decisiones en temas como planificación económica, social y ambiental en la zona de estudio.

El caudal Q97.5%, se encuentra en medio del rango Q95-Q99 y en general ha sido asociado a caudales mínimos con períodos de retorno de 2.33 años, aportando un valor significativo por su relación con la dinámica de los ecosistemas acuáticos, su biodiversidad y servicios ecosistémicos en condiciones de estrés hídrico.

Por su parte, el volumen medio de inundación es un indicador sensible respecto a la conectividad de la ciénaga y poco sensible a los cambios de coberturas. Éste muestra la capacidad de amortiguación de las ciénagas, no solo ante caudales de aguas altas, sino también ante eventos de caudales mínimos, lo cual es importante dado que estos sistemas sirven de hábitat para diferentes especies en distintas condiciones de disponibilidad hídrica.

4.4 Criterios de calibración y validación del modelo

La calibración del modelo WEAP fue evaluada a través de diferentes métricas estadísticas de desempeño: el índice de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970), el BIAS (Moriasi, et al., 2007) y el coeficiente de determinación (R^2) de Pearson. Finalmente, a partir de la información obtenida en campo de la dinámica de las ciénagas El Sapo y Chibolo, se cuantifica el ajuste más cercano a los datos obtenidos en campo a través de los estimadores obteniendo los mejores ajustes posibles con los diferentes juegos de

parámetros obtenidos (Porreta-Brandyk, et al., 2011; McCuen, et al., 2006) en las simulaciones.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Calibración y validación del modelo

Para cada uno los *catchments* (C8, C10, C13, C14, C17, C19, C21, C22, C23 y C24) mostrados en la Figura 3, relacionados con zonas inundables, se seleccionaron los 3 primeros parámetros para la calibración que se muestran en la Tabla 4, realizando alrededor de 500 simulaciones de Monte Carlo (Ortega, 2008), hasta seleccionar los parámetros que exhiben el mejor desempeño y ajuste según los criterios mencionados en el numeral 4.4. Los *catchment* 14, 23 y 24, cuentan con condiciones que pudieron ser estudiadas de acuerdo a la visita de campo para refinar su calibración ajustada y por eso cuentan con parámetros propios, los demás *catchments* inundables mencionados fueron agrupados en un mismo conjunto, con el fin de restringir los grados de libertad del modelo. Los parámetros del modelo generados a partir de simulaciones de Monte Carlo se presentan en la Tabla 4. En la Tabla 5, se presentan parámetros (Kc) que entran al modelo como datos y fueron determinados a partir de estudios previos (CORANTIOQUIA y TNC, 2014; SEI, 2014; SEI, 2015).

Los números superiores en los *catchments*, representan los puntos más bajos en la zona de estudio y en la dirección de flujo del río Nechí. Las ciénagas monitoreadas en campo son El Sapo (C23) y Corrales (C24). Para la construcción del modelo, se consideraron los resultados obtenidos en la salida de campo. Adicionalmente, se hizo una compilación de las demás llanuras inundables alimentadas por el río Nechí, las cuales se agruparon en un solo conjunto de parámetros a simular.

En la Figura 7, se presenta el gráfico normalizado de la sensibilidad de los parámetros, teniendo en cuenta la información de campo de la ciénaga El Sapo (C23) y Corrales (C24). Se muestra que algunos parámetros presentan mayor sensibilidad que otros. El modelo WEAP permiten una adecuada representación de la física del sistema de acuerdo a la información obtenida en la salida de campo y la demás información disponible lo que permite lograr resultados robustos y confiables desde el punto de vista físico y estadístico.

Algunos parámetros representativos de la dinámica en planicies inundables presentan mayor sensibilidad como son *C24\Threshold*, *C23\Threshold*, *GENERAL\Threshold*, *GENERAL\Floodreturn*. Este resultado es producto de restringir los rangos de variación a partir de la información obtenida en campo. Por su parte, los valores asociados a *GENERAL\Threshold* y *GENERAL\Floodreturn*, son producto de la combinación de la información de campo y valores encontrados en el proceso de simulación tipo

Montecarlo. En la Tabla 6 y Figura 8, se muestran los parámetros de eficiencia en la calibración y validación del modelo descrito para la zona observándose valores del coeficiente de Nash adecuados, tanto para la calibración como para la validación (Moriasi, et al., 2007).

Tabla 4.- Parámetros para el modelo WEAP calibrado y validado.

Parámetro	Valor	Descripción	Unidades
Kd	0.80	Conductividad profunda (Kd)	mm/día
Ks	3.54	Conductividad zona de raíces (Ks)	mm/día
f	0.31	Dirección de flujo (f)	adimensional
Sw	669.40	Capacidad de almacenamiento superficial (Sw)	mm
Dw	311.80	Capacidad de almacenamiento profunda (Dw)	mm
Z1	72.00	Almacenamiento inicial Z1 (%)	Porcentaje
Z2	59.10	Almacenamiento inicial Z2 (%)	Porcentaje
Albedo	0.06	Albedo	adimensional
RRF_Bajo	14.74	RRF Bajo	adimensional
RRF_Medio	13.60	RRF Medio	adimensional
RRF_Alto	11.95	RRF Alto	adimensional
GENERAL\Floodreturn	6.00	Flujo de retorno GENERAL%	Porcentaje
GENERAL\Floodfraction	10.20	Porcentaje de flujo hacia GENERAL desde Nechí	Porcentaje
GENERAL\Threshold	334.70	Umbral de flujo hacia GENERAL desde Nechí	m³/s
C14\Floodreturn_Cuturi	19.90	Flujo de retorno de C14 %	Porcentaje
C14\Floodfraction_Cuturi	21.90	Porcentaje de flujo hacia C14 desde Cuturí	Porcentaje
C14\Threshold_Cuturi	107.60	Umbral de flujo hacia C14 desde Cuturí	m³/s
C23\Floodreturn	1.40	Flujo de retorno de C23 %	Porcentaje
C23\Floodfraction	8.40	Porcentaje de flujo hacia C23 desde Nechí	Porcentaje
C23\Threshold	682.80	Umbral de flujo hacia C23 desde Nechí	m³/s
C24\Floodreturn	14.40	Flujo de retorno de C24 %	Porcentaje
C24\Floodfraction	9.70	Porcentaje de flujo hacia C24 desde Nechí	Porcentaje
C24\Threshold	1274.61	Umbral de flujo hacia C24 desde Nechí	m³/s

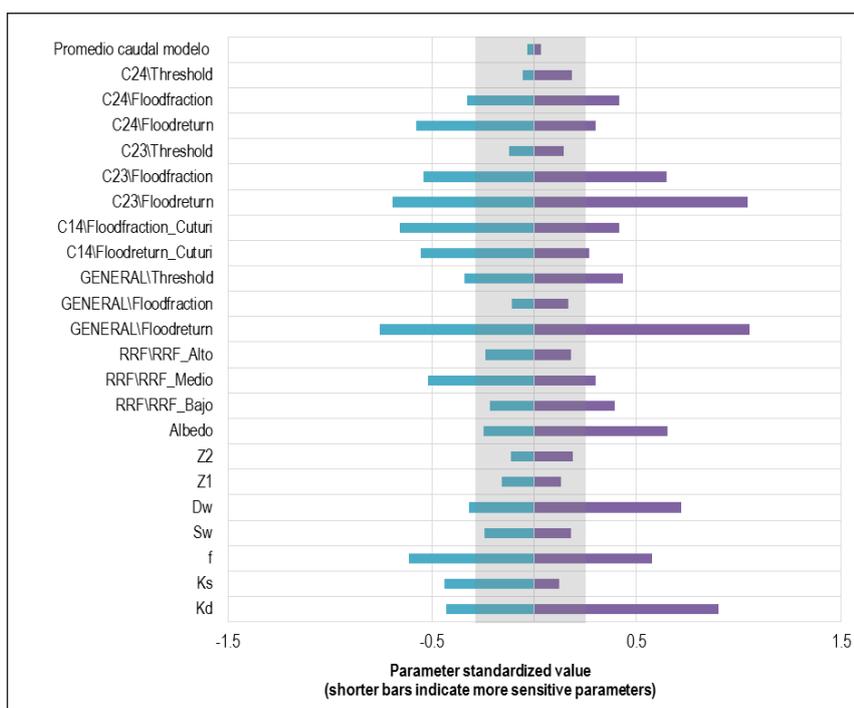


Figura 7.- Sensibilidad de los parámetros del modelo WEAP

Tabla 5.- Coeficientes de cultivo (Kc) en el modelo. Fuente CORANTIOQUIA y TNC (2014), SEI (2014) y SEI (2015)

Cobertura	Kc
Zonas urbanizadas	0.4
Zonas de extracción minera y escombreras	0.5
Cultivos transitorios	1.0
Cultivos permanentes	1.0
Pastos	1.0
Bosques	1.1
Áreas con vegetación herbácea y arbustiva	1.0
Aguas continentales	1.2

Tabla 6.- Métricas de calibración y validación del modelo WEAP

Métrica	Periodo de calibración (1997-2001)	Periodo de validación (2002-2004)
Eficiencia Nash-Sufcliffe	0.69	0.75
Sesgo relativo (BIAS)	4.83%	3.30%
Coefficiente de determinación (R ²)	0.66	0.66

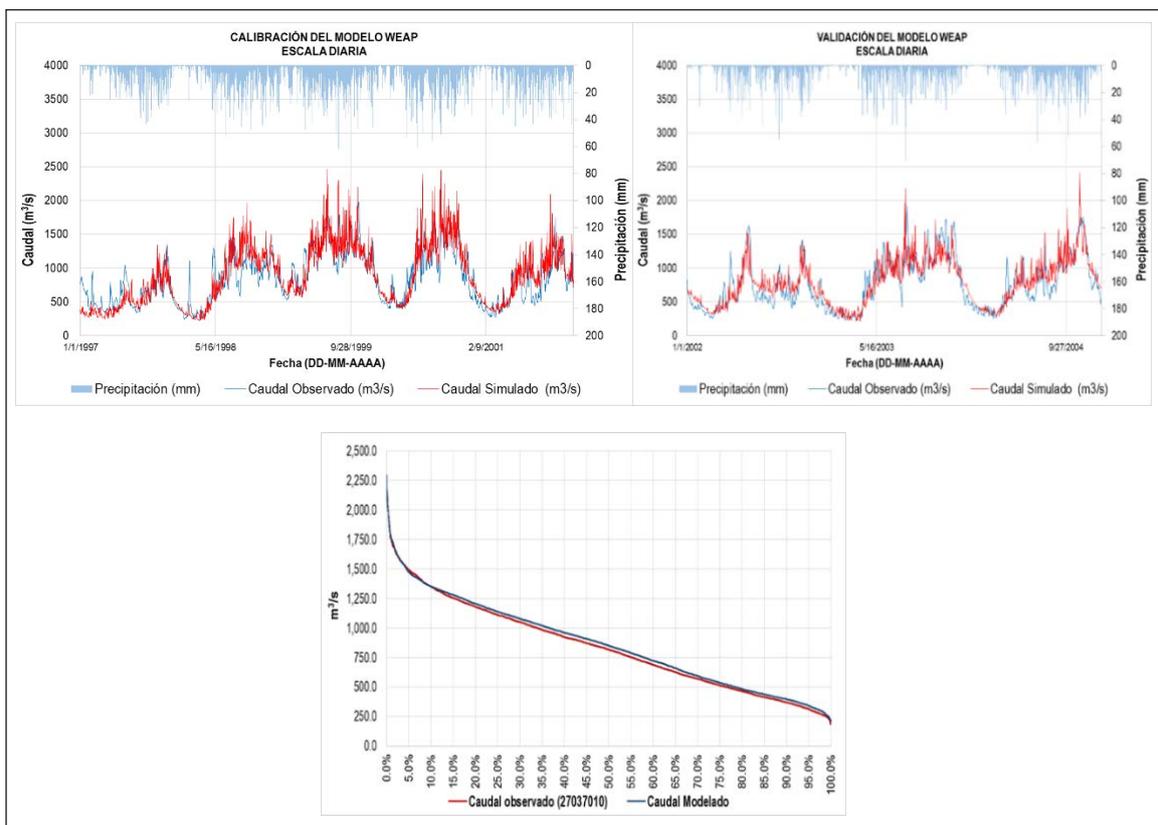


Figura 8.- Resultados de calibración y validación del modelo WEAP para las zonas de planicies inundables del río Nechí. (izquierda) Series de caudales simulados y observados para el periodo de calibración 1997-2001. (Derecha) Series de caudales simulados y observados para el periodo de validación 2002-2004. (inferior) Curva de duración de caudales observados y simulados.

5.1.1. Resultados para el caudal Q10%

En lo relacionado con el caudal Q10% (ver Figura 9), el resultado más importante es el aumento del caudal con la disminución de áreas de bosques y la pérdida de conectividad. Las simulaciones al año 2070 sugieren un aumento superior al 15.0% del caudal Q10%, con respecto al escenario que simula una tendencia similar a la actual, para el mismo periodo de simulación. Los resultados indican que mantener las coberturas del escenario de referencia pero disminuir la conectividad también conduce a un

aumento significativo del caudal Q10% implicando un aumento superior al 10% para una pérdida de conectividad del 90.0%. Se estima un aumento del caudal Q10% del mismo orden manteniendo la conectividad sin cambios pero asumiendo una pérdida de coberturas del orden del 40.0%.

Los resultados obtenidos concuerdan con diversos estudios sobre el efecto de la deforestación en los caudales máximos en las cuencas, los cuales evidencian la importancia de los ecosistemas y su vegetación asociada en el ciclo hidrológico a diferentes escalas, afirmando que la deforestación generalmente aumenta la productividad de agua y el

flujo base en los ríos y la reforestación reduce las cantidades de estas dos variables para la mayoría de las cuencas estudiadas. (Wilm, 1957; Salemi et al., 2012; Feng et al., 2012; Hewlett y Hibbert, 1961; Nagy y Lockaby, 2012; Iroume, 2010; Eamus, 2009; Sun et al., 2006 y Andreassian, 2004).

Para la cuenca del río Nechí, los caudales de aguas altas se encuentran asociados a inundaciones, especialmente, en el área de influencia de su desembocadura al río Cauca. Las simulaciones muestran como el aumento de vegetación boscosa

permite regular los caudales de aguas altas, disminuyendo la ocurrencia de inundaciones a futuro, esto debido a que influye en el aumento de la capacidad de campo y el almacenamiento capilar. Por tal razón, la recuperación de cobertura boscosa en toda la cuenca, especialmente en sus zonas media y alta, constituye parte de una estrategia de adaptación al cambio climático frente a la intensificación de eventos extremos. Es necesario reconocer que queda camino por recorrer en cuantificar la magnitud de la intervención adecuada con el fin de establecer la mejor estrategia de adaptación.

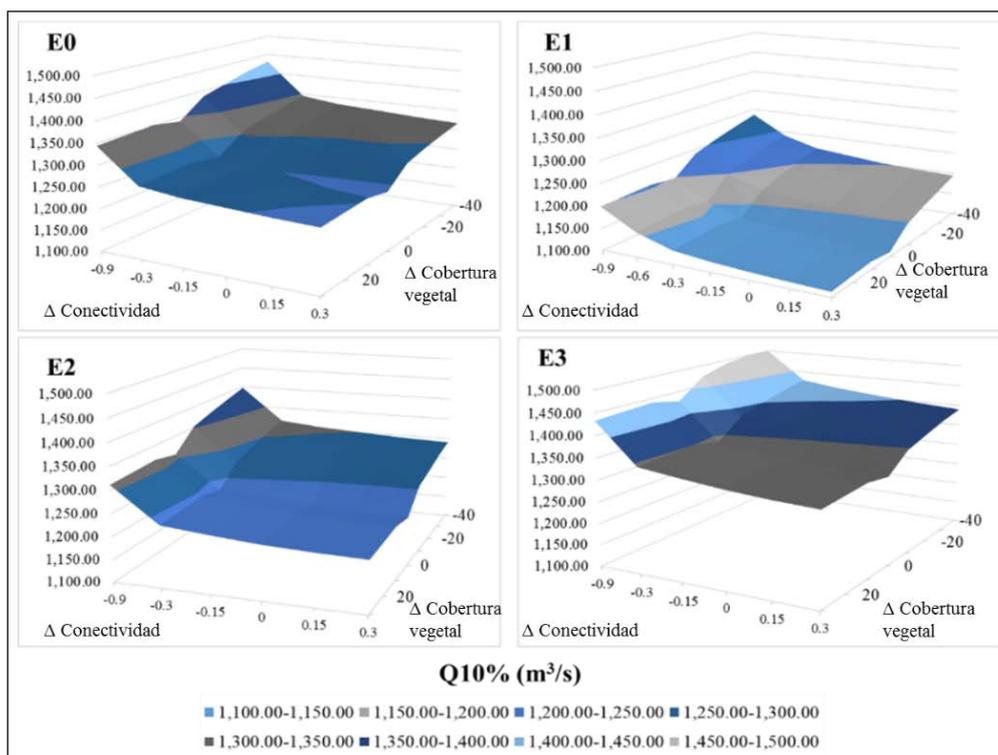


Figura 9.- Resultados de Q10% para los diferentes escenarios, los escenarios E0, E1, E2 y E3 se describen en la Tabla 3; los resultados incluyen una ventana temporal de paso de tiempo diario y periodo de simulación entre los años 1996 y 2070.

5.1.2 Resultados para el caudal Q97.5%

Los resultados muestran un aumento progresivo del caudal Q97.5% para los escenarios E1, E2, y E3 con variaciones del orden del 10% (ver Figura 10). Estos resultados podrían vincularse de manera similar a la hipótesis para pesquerías y migraciones ascendentes según la cual "el aumento de magnitud en los caudales bajos puede provocar el descenso en la abundancia de especies que prefieren corrientes lentas y hábitats someros, mientras que las especies especialistas fluviales o reofilicos obligados cambiarían su distribución o disminuirán su riqueza y abundancia si la magnitud de los caudales bajos fuera reducida, modificando así las potenciales pesquerías en la zona" (CORANTIOQUIA y TNC, 2014). Los valores más altos del Q97.5%, simulados se encuentran entre del 2.0% al 8.0% respecto al escenario de tendencia E0. En cuanto a los escenarios climáticos

se observa que para una pérdida de conectividad de 30% se presenta el valor más alto de Q97.5% sin afectación por el cambio de cobertura vegetal. Por otra parte, una pérdida de conectividad mayor a este umbral, genera disminución de caudales mínimos.

Para la cuenca del río Nechí, los resultados indican que las coberturas vegetales tienen un efecto regulador de los caudales mínimos. Sin embargo, se tiene incertidumbre frente al efecto de la deforestación. En este sentido, es importante realizar análisis diferentes enfocados en la simulación de series que permitan un análisis de rachas que indiquen tiempos de permanencia de caudales para aguas altas y bajas sobre ciertos umbrales de importancia, simulando variabilidad en coberturas vegetales, así como otro tipo de estudios para determinar la validez de una hipótesis de regulación hídrica por parte de ciertas coberturas vegetales en la cuenca del río Nechí.

5.1.3 Resultados para el volumen medio de inundación en el catchment 23 (Ciénaga del Sapo)

En la Figura 11, se presentan los resultados encontrados para los volúmenes de inundación de la ciénaga de El Sapo para diferentes escenarios, pues constituye un área de amortiguación de gran importancia para el río Nechí, presentando un único canal de conexión directa entre ambos sistemas hídricos (río-ciénaga). Los resultados de las simulaciones sugieren que el aumento en el volumen medio de inundación (en millones de m³) está

relacionado fundamentalmente con la pérdida de conectividad en la ciénaga, con menor sensibilidad frente a los cambios de coberturas vegetales. Por su parte, el cambio de la conectividad entre -30% y 30%, implica volúmenes medios de inundación al 2070 en el rango 1.0 - 5.0 Mm³, mientras que una pérdida de conectividad del 90% implica volúmenes medios de inundación entre 25 y 30 Mm³ indicando que la pérdida casi total de la conectividad podría generar volúmenes de inundación 7 veces mayores que los generados con una pérdida de conectividad en el rango -30% al 30%, lo cual conlleva graves implicaciones ecológicas, sociales y económicas.

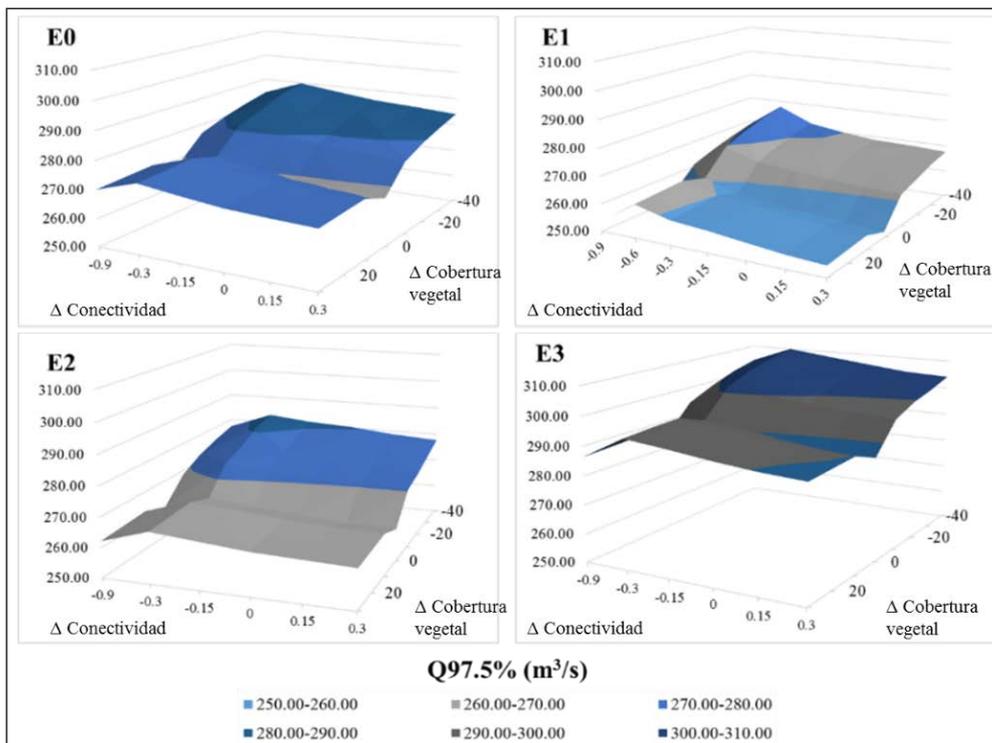


Figura 10.- Resultados de Q97.5% para los diferentes escenarios, los escenarios E0, E1, E2 y E3 se describen en la Tabla 3; los resultados incluyen una ventana temporal de paso de tiempo diario y periodo de simulación entre los años 1996 y 2070.

Los resultados exhiben mayor sensibilidad del volumen medio de inundación a los cambios de coberturas con un aumento de 3 Mm³ a 6 Mm³ con cambios de coberturas entre 0.0% y -40.0% (pérdidas de coberturas). Es importante notar que las simulaciones indican que el aumento de coberturas no implica disminución en el volumen medio de inundación mientras la pérdida de coberturas si implica un aumento en este atributo de las áreas inundables.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo, se han realizado simulaciones de caudales medios diarios en la cuenca baja del río Nechí, tanto para condiciones actuales, así como teniendo en cuenta escenarios tendenciales de cambio de coberturas de tierra como de escenarios

de cambio climático, tales como variación de temperatura como de precipitación en el área de estudio. Los resultados obtenidos y los más relevantes de este estudio muestran que mantener las coberturas, pero disminuir la conectividad conduce a un aumento significativo del caudal Q10% (Caudal de aguas altas) implicando un aumento del orden de 100 m³/s para una pérdida de conectividad del 90.0%, entre las ciénagas. Se estima un aumento del caudal Q10% del mismo orden manteniendo la conectividad sin cambios pero asumiendo una pérdida de coberturas del orden del 40.0%. En general, el caudal Q10% aumenta para todos los escenarios cuando la conectividad disminuye por debajo de un 30.0%, tal como se muestra en la Figura 11.

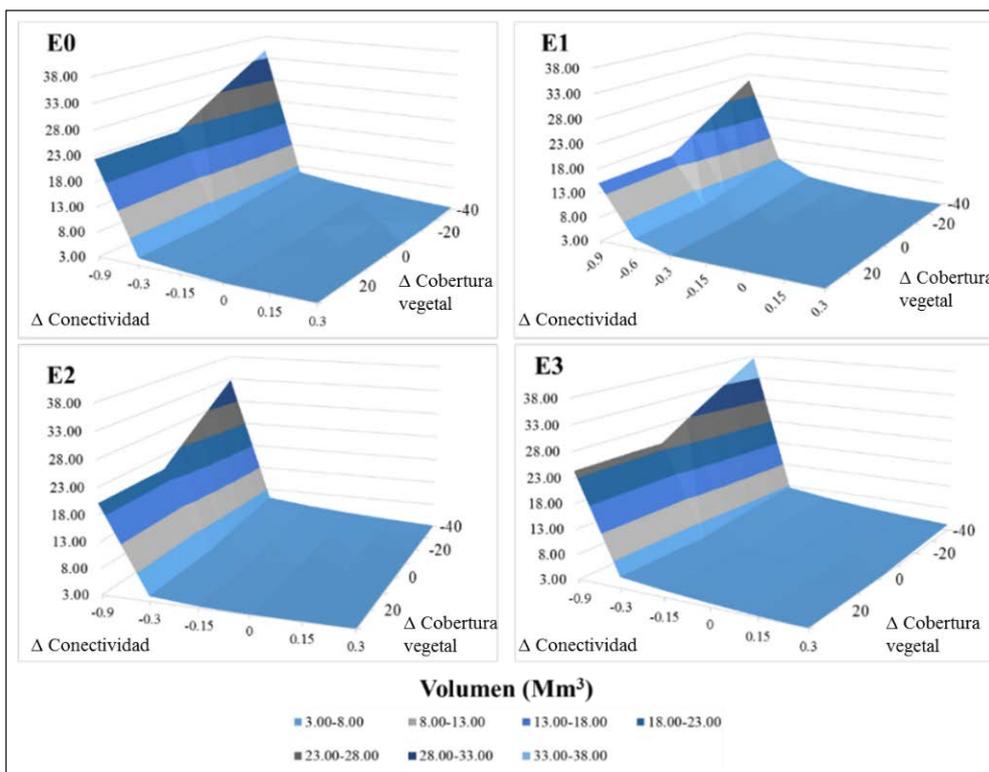


Figura 11.- Resultados del volumen medio de inundación en la ciénaga El Sapo para los diferentes escenarios, los escenarios E0, E1, E2 y E3 se describen en la Tabla 3.

Los valores más altos del caudal Q97.5% simulados, se encuentran entre del 2.0% al 8.0% respecto al escenario de tendencia E0. En cuanto a los escenarios climáticos se observa que para una pérdida de conectividad de 30% se presenta el valor más alto de Q97.5% sin afectación por el cambio de cobertura vegetal. Los valores más altos del Q97.5% corresponden a la mayor pérdida de coberturas vegetales (-40%) y a un cambio de capacidad de almacenamiento del 30%. En este caso, el Q97.5% al 2070 podría presentar aumento en el caudal del orden de 8%, 6% y 3% para los escenarios E1, E2, y E3, respectivamente, respecto al escenario E0.

El volumen medio de inundación presenta mayor sensibilidad a los cambios de coberturas aumentando de 3 Mm³ a 6 Mm³ para cambios de coberturas entre 0.0% y -40.0%. Las simulaciones indican que el aumento de bosque no implica disminución en el volumen medio de inundación mientras la pérdida de coberturas si implica un aumento en este atributo de las áreas inundables.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros agradecimientos a las diferentes entidades que facilitaron la información: U.S Geological Survey (USGS) por las imágenes satelitales LANDSAT y los modelos digitales de elevación SRTM; a la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) por la información cartográfica; al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de

Colombia (IDEAM) y Empresas Públicas de Medellín (EPM) por la información hidroclimática; al Stockholm Environmental Institute (SEI) por la licencia WEAP. Finalmente, agradecemos a los revisores por sus valiosos aportes para fortalecer este documento.

BIBLIOGRAFÍA

- Andréassian, Vazken. 2004. "Waters and Forests: From Historical Controversy to Scientific Debate." *Journal of Hydrology* 291(1-2):1-27.
- Angarita, H., J. Delgado, Escobar, M, and Wickel, B. 2015. Biodiversity, wetland ecosystems and flood risks: Implications of hydropower expansion on the Magdalena River. *SEI - U.S. Davis Office*
- Angarita, H., J. Delgado, Escobar, M., and T. Walschburger. 2013. "Escenarios de Alteración Regional Del Régimen Hidrológico En La Cuenca Magdalena-Cauca Por Intensificación de La Demanda Para Hidroenergía. Seminario Internacional: Manejo Del Riesgo En El Ciclo Del Agua."
- CORANTIOQUIA y TNC. 2014. "Convenio de Asociación No. 953 de 2013."
- Eamus, D. 2009. "Impacts on Plantation Age, Fire and Disturbance on Catchment Water Yield." *Land & Water Australia*.
- Feng, X. M. et al. 2012. "Regional Effects of Vegetation Restoration on Water Yield across the Loess Plateau, China." *Hydrology and Earth System Sciences* 16(8):2617-28.

- Hewlett, J. D. and A. R. Hibbert. 1961. "Increases in Water Yield after Several Types of Forest Cutting." *Quart. Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.* 3:5–17.
- IDEAM. 2010. "Leyenda Nacional de Coberturas de La Tierra. Metodología CORINE Land Cover Adaptada Para Colombia, Escala 1:100.000." P. 16 in *Area*, vol. TH-62-04-1.
- IDEAM. 2015. *Nuevos Escenarios de Cambio Climático Para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas Para La Toma de Decisiones – Enfoque Nacional - Regional*. Bogotá.
- IPCC-WGII-AR5. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. New York: Cambridge University Press, Cambridge
- Iroume, A., H. Palacios, J. Bathurst, and A. Huber-Lee. 2010. "Escorrentías Y Caudales Máximos Luego de La Cosecha a Tala Rasa Y Del Establecimiento de Una Nueva Plantación En Una Cuenca Experimental Del Sur de Chile." *Bosque* 31(2):117–28.
- Kiparsky, M., B. Joyce, D. Purkey, and C. Young. 2014. "Potential Impacts of Climate Warming on Water Supply Reliability in the Tuolumne and Merced River Basins, California." *PLoS one* 9(1):16. Retrieved (<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3896353&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>).
- McCuen, Richard H., Zachary Knight, and A. Gillian Cutter. 2006. "Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index." *Journal of Hydrologic Engineering* 11(6):597–602.
- Moriasi, D. N., Arnold, J.G. 2007. "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations." *Transactions of the ASABE*, 50(3):885–900.
- Nagy, R. C. and B. G. Lockaby. 2012. "Hydrologic Connectivity of Landscapes and Implications for Forest Restoration." in *Forest Landscape Restoration. Integrating Natural and Social Sciences*. Alabama.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. "River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I — A Discussion of Principles." *Journal of Hydrology* 10(3):282–90.
- Ortega, F. 2008. "Núcleo de Monte Carlo Y Camino Aleatorio En Ambientes de Alto Desempeño." Instituto Politécnico Nacional.
- Porretta-Brandyk, L., Chormański, J., Ignar, S., Okruszko, T., Brandyk, A., Szymczak, T., Krężałek, K. 2010. "Evaluation and Verification of the WetSpa Model Based on Selected Rural Catchments in Poland." *Journal of Water and Land Development* 14(1):115–33.
- Poveda, G. 2011. "Mixed memory, (non) Hurst effect, and maximum entropy of rainfall in the Tropical Andes, Adv. Water Resour., 34(2), 243-256.
- Poveda, G. 2004. "La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria". *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 28 (107), 201-222, ISSN: 0370-3908.
- Salemi, Luiz Felipe et al. 2012. "Riparian Vegetation and Water Yield: A Synthesis." *Journal of Hydrology* 454-455:195–202.
- Sieber, J., A. Huber-Lee, and P. Raskin. 2002. "WEAP: Water Evaluation And Planning System User Guide (for WEAP 21)." *Stockholm Environmental Institute—Boston, and Tellus Institute, User Guide for WEAP 21, Boston, MA*.
- Sun, Ge et al. 2006. "Potential Water Yield Reduction due to Forestation across China." *Journal of Hydrology* 328(3-4):548–58.
- TNC. 2014. "Ecosystem Based Adaptation in the Magdalena Basin."
- Wilm, H. G. 1957. "The Influence of Forest Vegetation on Water and Soil." *Unasylva* 11(4).
- Yates, D. et al. 2009. "Climate Driven Water Resources Model of the Sacramento Basin, California." *Journal of Water Resources Planning and Management* 135:303–13.
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber-Lee. 2005a. "WEAP a Demand, Priority, and Preference Driven Water Planning Model: Part 1, Model Characteristics." *Water International* 30(4):487–500.
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber-Lee. 2005b. "WEAP21 – A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Part 2: Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation". *Water International*, 30(4), pp. 501-512.
- Young, C. et al. 2009. "Modeling the Hydrology of Climate Change in California's Sierra Nevada for Subwatershed Scale Adaptation." *Journal of the American Water Resources Association* 45(6):1409–23.