

Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia:

RECURSO HÍDRICO

2015



DNP Departamento
Nacional
de Planeación



**TODOS POR UN
NUEVO PAÍS**
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN



IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA

RECURSO HIDRICO

Jeimar Tapasco, Marcela Quintero, Natalia Uribe,
Jefferson Valencia, Silvia Calderón, Germán Romero,
Daniel A. Ordóñez, Andrés Álvarez,
Leonardo Sánchez-Aragón, Carlos E. Ludeña.



DNP Departamento
Nacional
de Planeación





Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia

Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo

Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Recurso Hídrico / Jeimar Tapasco, Marcela Quintero, Natalia Uribe, Jefferson Valencia, Silvia Calderón, Germán Romero, Daniel A. Ordóñez, Andrés Álvarez, Leonardo Sánchez-Aragón, Carlos E. Ludeña.

p. cm. — (Monografía del BID; 258)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Economic impact analysis—Colombia. 2. Climatic changes—Colombia. 3. Water resources development—Case studies—Colombia. 4. Water-power—Colombia. I. Tapasco, Jeimar. II. Quintero, Marcela. III. Uribe, Natalia. IV. Valencia, Jefferson. V. Calderón, Silvia. VI. Romero, Germán. VII. Ordóñez, Daniel A.. VIII. Álvarez, Andrés. IX. Leonardo Sánchez-Aragón. X. Ludeña, Carlos E. XI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático y Sostenibilidad. XII. Series.

IDB-MG-258

Clasificación JEL: Q54, Q25, O54

Palabras clave: cambio climático, pago por servicios ambientales, regulación hídrica, hidroenergía, Colombia

Este documento es uno de los análisis sectoriales que conforman la serie "Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia" del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el marco del Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático (ERECC) en América Latina y el Caribe, coordinado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

El presente documento fue preparado por Jeimar Tapasco, Marcela Quintero, Natalia Uribe y Jefferson Valencia (Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT), bajo la coordinación de Silvia Calderón, Germán Romero, Daniel A. Ordóñez y Andrés Álvarez, Departamento Nacional de Planeación (DNP) y Carlos Ludeña y Leonardo Sánchez-Aragón (BID), y los aportes de Carlos de Miguel, Karina Martínez y Mauricio Pereira (CEPAL). Se agradece a Germán Romero y Paul Peters por el material fotográfico aportado.

Citar como:

Tapasco, J., M. Quintero, N. Uribe, J. Valencia, G. Romero, S. Calderón, D. A. Ordóñez, A. Álvarez, L. Sánchez-Aragón y C. E. Ludeña. 2015. *Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Recurso Hídrico*. Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 258, Washington D.C.

Copyright © 2015 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra está bajo una licencia Creative Commons IGO 3,0 Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (CC-IGO 3,0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3,0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

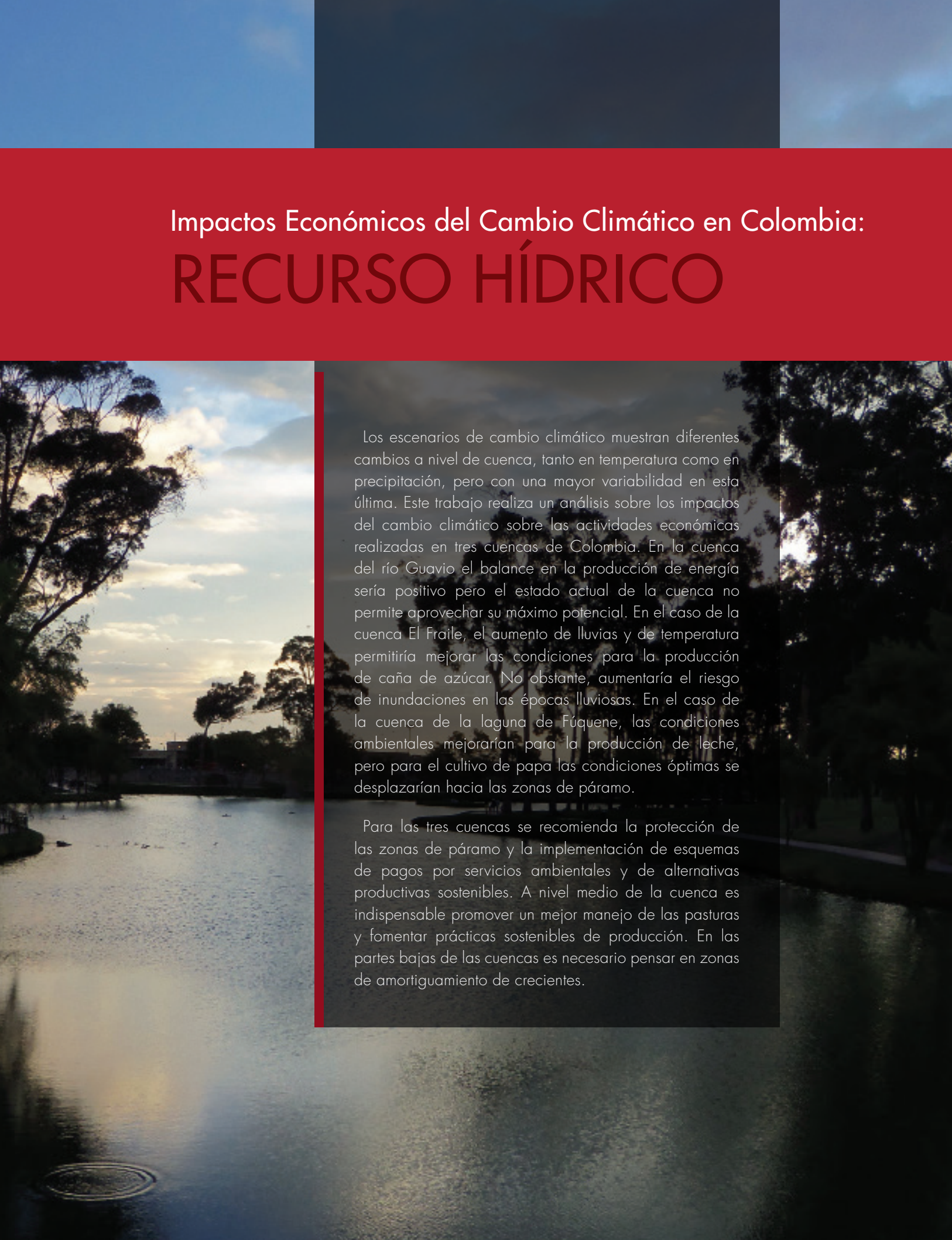
<http://www.iadb.org>



Contenido

IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA: RECURSO HÍDRICO

1.	INTRODUCCIÓN	6
2.	METODOLOGÍA	6
	2.1. Modelo hidrológico SWAT	7
3.	SELECCIÓN DE CUENCAS	10
	3.1. Descripción de las cuencas	10
	3.2. Escenarios de cambio climático	13
	3.3. Información requerida de las cuencas para el modelo SWAT	13
4.	RESULTADOS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL SECTOR	21
	4.1. Impactos del cambio climático en el recurso hídrico	21
	4.2. Impactos del cambio climático sobre los rendimientos	28
5.	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO	36
	5.1. Cuenca abastecedora del embalse del Guavio	36
	5.2. Cuenca del río Fraile	40
	5.3. Cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene	42
6.	RECOMENDACIONES DE POLÍTICA	43
7.	CONCLUSIONES	46
	BIBLIOGRAFÍA	47
	ANEXOS	48
	ANEXO I. Procedimiento metodológico de modelación con SWAT	48
	ANEXO II. Línea base de la cuenca del río Fraile	50
	ANEXO III. Línea base de la cuenca abastecedora del embalse del Guavio	52
	ANEXO IV. Línea base de la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene	54
	ANEXO V. Metodología para la estimación de los choques a la productividad en las cuencas del río Guavio y la laguna de Fúquene.	56



Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: RECURSO HÍDRICO

Los escenarios de cambio climático muestran diferentes cambios a nivel de cuenca, tanto en temperatura como en precipitación, pero con una mayor variabilidad en esta última. Este trabajo realiza un análisis sobre los impactos del cambio climático sobre las actividades económicas realizadas en tres cuencas de Colombia. En la cuenca del río Guavio el balance en la producción de energía sería positivo pero el estado actual de la cuenca no permite aprovechar su máximo potencial. En el caso de la cuenca El Fraile, el aumento de lluvias y de temperatura permitiría mejorar las condiciones para la producción de caña de azúcar. No obstante, aumentaría el riesgo de inundaciones en las épocas lluviosas. En el caso de la cuenca de la laguna de Fúquene, las condiciones ambientales mejorarían para la producción de leche, pero para el cultivo de papa las condiciones óptimas se desplazarían hacia las zonas de páramo.

Para las tres cuencas se recomienda la protección de las zonas de páramo y la implementación de esquemas de pagos por servicios ambientales y de alternativas productivas sostenibles. A nivel medio de la cuenca es indispensable promover un mejor manejo de las pasturas y fomentar prácticas sostenibles de producción. En las partes bajas de las cuencas es necesario pensar en zonas de amortiguamiento de crecientes.



1

Introducción

El aumento de la temperatura, la variación de la precipitación y los cambios en las probabilidades de eventos climáticos extremos, inciden en la probabilidad de ocurrencia de inundaciones, erosión del suelo, cambios en la oferta hídrica total y estacional, alteraciones en los caudales bases de los ríos, entre otros (Parry et al., 2007). Conocer la magnitud de dichos impactos es un paso importante para entender de qué forma el cambio climático afectará el estado de los recursos hídricos, y por lo tanto generar insumos técnicos que ayuden a comprender y discutir cómo debemos prepararnos para enfrentar dichos cambios (Acevedo-Aristizabal, 2009; Bekele y Knapp, 2010).

En este sentido, los modelos hidrológicos se constituyen en herramientas que permiten establecer y cuantificar los impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico, al comparar cambios climáticos con el rendimiento hídrico, a través de la simulación de procesos hidrológicos en cuencas (Ficklin et al., 2009). Es común la utilización de modelos hidrológicos combinados con escenarios de cambio climático generados con los modelos globales de clima (MGC) (por ejemplo, Chaplot, 2007; Schuol et al., 2008) o modelos regionales de clima (MRC). Sin embargo, es importante observar que los resultados de una modelación hidrológica proveen básicamente información sobre el nivel de sensibilidad del sistema hidrológico frente a posibles cambios en el clima (Arnell y Liu, 2001; Ficklin et al., 2009).

Para el presente estudio se seleccionaron tres cuencas donde se hace un uso diferente del recurso hídrico. El caso de la cuenca abastecedora del embalse del Guavio se tomó como ejemplo de la producción de energía eléctrica; la cuenca del río Fraile como ejemplo de uso de agua para irrigación; y la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene (que corresponde al río Ubaté) como ejemplo del impacto del cambio climático sobre la agricultura de secano a través de los cambios en el balance hídrico a nivel de cuenca. Las condiciones de línea base y la estimación de los posibles efectos de cambio climático en el recurso hídrico para estas cuencas, se simularon con el modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), el cual fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS) para predecir el impacto en el manejo del suelo y la vegetación en el rendimiento hídrico, la producción de sedimentos y la contaminación de agua con agroquímicos (Arnold y Williams, 1987).

El presente estudio tiene como objetivos evaluar los posibles impactos del cambio climático en el recurso hídrico en las tres cuencas anteriormente mencionadas, estimar los costos de estos impactos y evaluar posibles medidas de adaptación. Simultáneamente, este documento presenta la metodología y las fuentes de información empleadas, los resultados del impacto del cambio climático sobre las tres cuencas y sobre los diferentes usos del recurso hídrico. Finalmente se presentan algunas medidas de adaptación que se proponen para hacer frente al cambio climático, acompañadas de recomendaciones sobre las políticas que deben implementarse.

2

Modelo hidrológico SWAT

El modelo SWAT fue desarrollado para predecir el impacto del manejo del suelo y la vegetación sobre el rendimiento hídrico, la producción de sedimentos y la contaminación de agua con agroquímicos. Es un modelo semidistribuido y por tal razón es útil para modelar hidrológicamente cuencas con amplia variación de suelos, uso de suelo y condiciones de manejo (Arnold y Williams, 1987). Para esto, SWAT divide una cuenca en varias subcuencas, que a su vez están divididos en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). Las URH consisten en áreas homogéneas de uso de la tierra y características del suelo con un determinado balance hídrico. El balance hídrico es simulado para intervalos diarios durante un periodo continuo de tiempo.

El modelo está conformado por un conjunto de submodelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El modelo hidrológico está basado en la ecuación general de balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{qw} \quad (1)$$

Donde:

SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm);

SW_0 es el contenido de agua inicial en el día i (mm); t es el tiempo (día);

R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mm);

Q_{surf} es la escorrentía superficial en el día i (mm);

E_a es la evapotranspiración en el día i (mm);

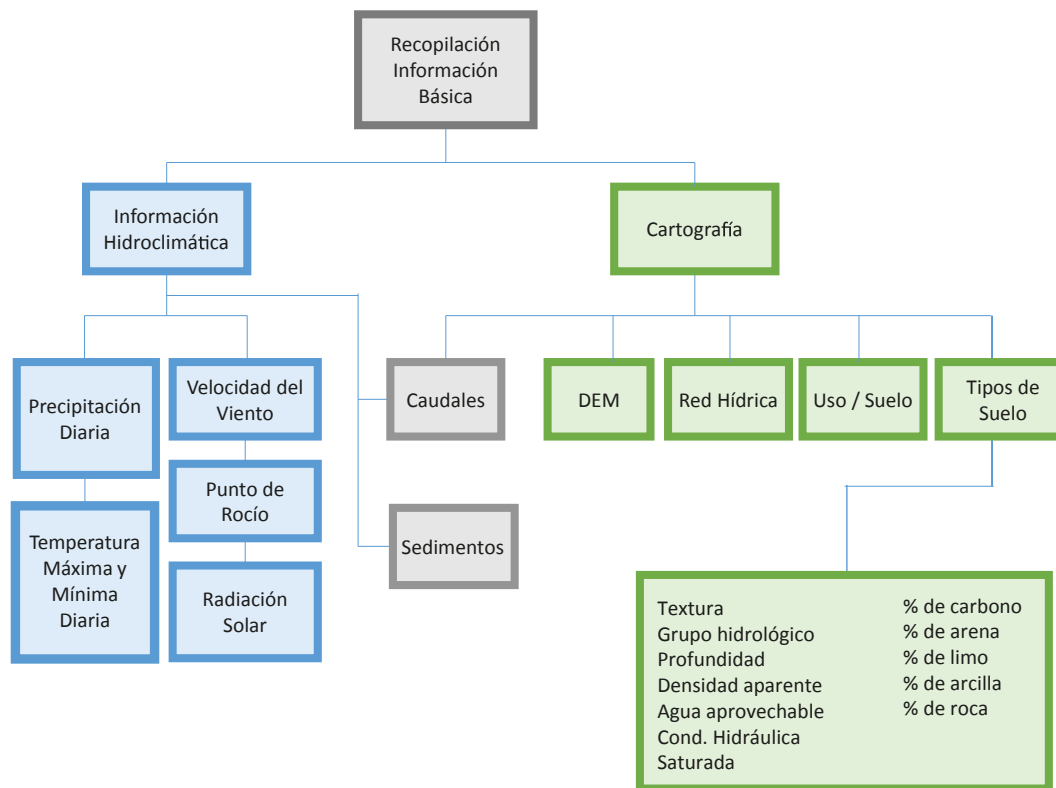
w_{seep} es la cantidad de agua que entra en la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mm);

Q_{qw} es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mm) (Arnold et al., 1998).

Dentro del modelo SWAT confluyen varios componentes que influyen en el balance hídrico de una cuenca. En cada componente se simulan varios procesos físicos a nivel del suelo, el clima, el crecimiento de cultivos, ciclo de nutrientes, dinámica de pesticidas y manejo de cultivos. Por lo tanto, demanda una amplia gama de datos de entrada, como información sobre clima (radiación, temperatura, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento), propiedades del suelo, vegetación y prácticas de manejo del suelo de la zona en estudio (figura 1).



■ **Figura 1.** Información base del modelo SWAT



Fuente: Elaboración propia

SWAT es un modelo ampliamente usado para simular la hidrología y calidad de agua en cuencas a lo largo de todo el mundo, así como para cuantificar los impactos de prácticas de manejo agrícola sobre la dinámica hidrológica. En Gassman et al. (2007) se encuentra una revisión sobre la historia de desarrollo de este modelo, sus diversas aplicaciones y nuevas actualizaciones reportadas¹.

Como cualquier modelo, sus simulaciones implican incertidumbres causadas principalmente por errores en las variables de entrada, por limitaciones propias del modelo para simular procesos físicos en ciertas condiciones ambientales y por la incertidumbre en la estimación de parámetros. Se debe tener presente que la mayor incertidumbre está asociada a los valores de los parámetros calibrados obtenidos con procesos de calibración automática (Tucci, 2005). Es por esta razón que la calibración y la validación son vitales en la aplicación del modelo SWAT, al igual que para cualquier otro modelo. Para estos procesos, SWAT cuenta con herramientas (por ejemplo, análisis de sensibilidad) y guías para realizar una calibración y validación adecuada del modelo. Esto último es de gran utilidad ya que al ser SWAT un modelo hidrológico semidistribuido, tiene potencialmente muchos parámetros a calibrar.

¹ Para consultar las especificidades del modelo el lector debe remitirse a Neitsch et al. (2011).

Adicionalmente a la utilidad de SWAT para simular efectos del cambio de uso/cobertura/manejo de la tierra sobre los caudales o la calidad del agua, SWAT también provee la posibilidad de simular los impactos del cambio climático en rendimiento hídrico, producción de sedimentos y carga de nutrientes en caudales (por ejemplo Ficklin et al., 2009; Franczyk y Chang, 2009; Jha et al., 2006; Lu et al., 2010; Marshall y Randhir, 2008; Mengistu y Sorteberg, 2012; Raj Koirala, 2012; Stone et al., 2001). SWAT puede simular el efecto de incrementos en la concentración de CO_2 en la atmósfera y de cambios en los parámetros de las variables climáticas sobre el crecimiento de las plantas (Gassman et al., 2007) y la hidrología de las cuencas.

Para simular escenarios de cambio climático dentro de modelos hidrológicos, es posible ajustar los datos de entrada al modelo basándose en proyecciones climáticas arrojadas por los modelos de circulación global (MCG) y modificadas a una escala más pequeña (*downscaling*) (Bekele y Knapp, 2010; Candela et al., 2012), o utilizando proyecciones de modelos regionales de cambio climático. Asumiendo que las simulaciones de los modelos climáticos son más confiables en cuanto a los cambios relativos que en sus valores absolutos, en SWAT es posible modificar los valores climáticos de entrada basándose en los deltas de los cambios climáticos o en otras palabras en los cambios porcentuales de las variables climáticas. Para esto es necesario determinar los cambios en el clima futuro usando los resultados de las proyecciones de los MGC o MRC y contrastarlos con los valores de clima actual (Bekele y Knapp, 2010).

En el momento de utilizar cualquier modelo siempre es importante tener presente las limitaciones y ventajas de éste. Una de las grandes limitaciones del modelo SWAT es que tiene un alto requerimiento de información en términos de cantidad y detalle. Además, es muy sensible a información de suelos y por lo tanto, si no se cuenta con dicha información se afecta sensiblemente la calidad de los resultados. El modelo requiere experiencia previa en su utilización y bastante tiempo para estructurar sus bases de datos; asimismo, el proceso de calibración requiere de un buen entendimiento de los procesos hidrológicos en una cuenca de tal manera que se pueda manipular el modelo de forma lógica. De no ser así, posiblemente se puedan tener buenos ajustes en la relación observado/simulado pero bajo parámetros no consistentes con la realidad.

Por otro lado, una de las grandes ventajas de este modelo es que ha demostrado, en muchos casos, una buena capacidad para simular bien los volúmenes de agua en una cuenca; por lo tanto, permite evaluar el potencial impacto de escenarios de uso de la tierra y cambio climático en términos absolutos. Aunque requiere bastante información para su componente de simulación de caudal, la información requerida es relativamente accesible. Además, al ser un modelo semidistribuido y al trabajar bajo el geoprocesador e interfaz de ArcGIS, permite diferenciar áreas en la cuenca por su contribución de agua al caudal. El modelo permite incluir prácticas de manejo de cultivo y cronograma de las mismas y cuando calcula el balance hídrico tiene en cuenta procesos que ocurren dentro del suelo (percolación, infiltración), en el cauce (pérdidas por infiltración y evaporación), captaciones por infraestructura hidráulica, etc. Por lo tanto, el caudal en el punto de salida refleja las pérdidas de agua adicionales a las ocasionadas por la evapotranspiración



3

Selección de cuencas

Para este estudio se seleccionaron cuencas que representan adecuadamente el impacto de los cambios de la disponibilidad del recurso hídrico sobre generación de energía (hidroeléctrica), agricultura de riego y agricultura de secano.

La cuenca del río Guavio, es de especial importancia, debido a que abastece al embalse del Guavio, el cual es parte del sistema de generación de energía hidroeléctrica de Emgesa (Empresa Generadora de Energía). Esta última de gran importancia en la generación hidroeléctrica para Bogotá. Asimismo, el impacto del cambio climático sobre las áreas que contribuyen con más agua al embalse, es crucial para determinar el grado de vulnerabilidad al que está expuesta la generación hidroeléctrica. La cuenca del río Fraile, es de alta importancia en la producción de agua para agricultura de riego, en especial para riego de caña de azúcar, uno de los principales cultivos que ejerce presión sobre el recurso hídrico en el país. Por último, la cuenca de la laguna de Fúquene (río Ubaté) es representativa de agricultura de secano en la región andina y corresponde a una zona con alta producción de papa y leche. Asimismo, el impacto que el cambio climático pueda tener sobre el agua que se produce en la cuenca (sobre todo en la parte alta) es fundamental para los usuarios de agua en la parte baja (ganadería, agricultura y consumo humano).

Otra de las razones por las cuales se escogieron estas tres cuencas es que se contaba con la línea base de la corrida del modelo SWAT. La información de la línea base fue tomada de proyectos realizados para Patrimonio Natural en la cuenca del embalse del Guavio, para The Nature Conservancy (TNC) en la cuenca del río Fraile, y para la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) en la cuenca de la laguna de Fúquene. El anexo I presenta un resumen metodológico del proceso de simulación con SWAT y los anexos II, III y IV presentan los resultados para las tres cuencas.

3.1. Descripción de las cuencas

Cuenca abastecedora del embalse del Guavio

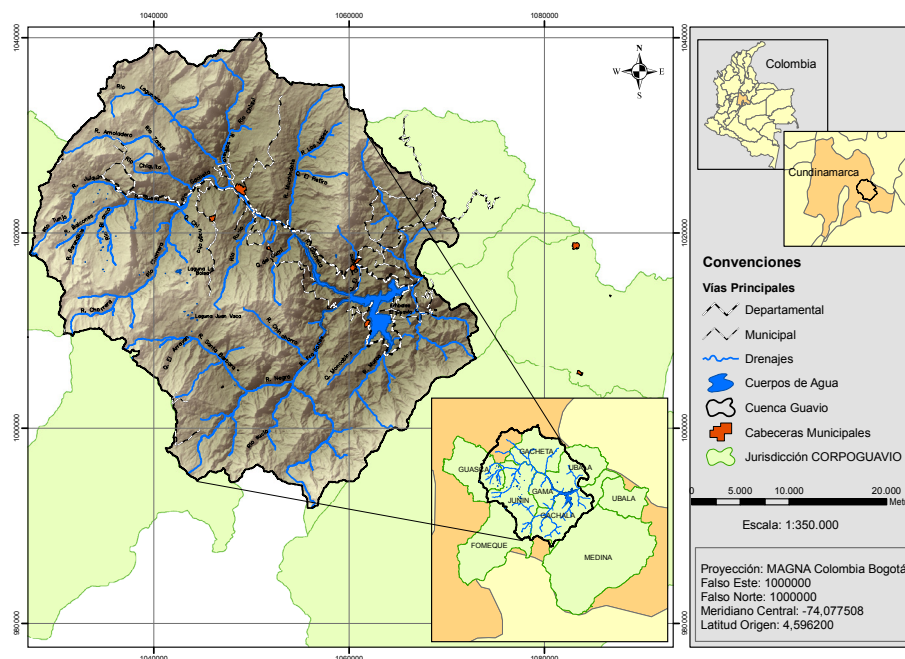
Esta cuenca se encuentra localizada en el departamento de Cundinamarca (figura 2). Limita al norte con los municipios de Guatavita, Machetá, Manta, Somondoco y Almeida del departamento de Boyacá, al oriente con el municipio de Paratebueno, al sur con el municipio de Medina del departamento de Cundinamarca y el municipio de San Juanito del departamento del Meta y al occidente con el municipio de Fómeque. Comprende doce municipios: Gachalá, Gachetá, Gama, Ubalá A, Ubalá B, Junín y Guasca, de la jurisdicción de Corpoguavio (Corporación Autónoma Regional de Guavio), parcialmente los municipios de Guayatá, Almeidas, Chivor y Santa María de la jurisdicción de Corpochivor (Corporación Autónoma Regional de Chivor) y parte del municipio de Guatavita de la jurisdicción de la CAR (Corpoguavio y Ecoforest Ltda., 2007).

La cuenca del río Guavio está comprendida por dieciséis áreas de drenaje: Aguas arriba del embalse se identifican las de Muchindote, Salinero, Zaque, Sueva, Farallones, Chorre-

ras, Rucio, El Curo, El Gusano y Murca, como las más importantes por su aporte hídrico, y aguas abajo del embalse se encuentran las de Negro Ubalá, Rucio Ubalá, Zaguea, Trompetas, Chivor y Batatas siendo estos dos últimos ríos empleados para hacer trasvase al embalse. El río Guavio es tributario del río Upía, que a su vez descarga sus aguas en el río Meta, pertenecientes a la gran cuenca del río Orinoco (Corpoguavio y Ecoforest Ltda., 2007). Geográficamente está ubicada entre las siguientes coordenadas (MAGNA Colombia Bogotá): 1°040.077 N a 1°901,568 N y 1°026.777 E a 1°009.562 E, con una extensión aproximada de 137.569 ha.

En el año 2012 el embalse del Guavio aportó al sistema de generación eléctrico colombiano 6.236 GWh correspondiente al 47% de la generación neta de Emgesa para el mismo año. Por su parte Emgesa ocupó para el mismo año el segundo puesto de importancia en la lista de proveedores de energía en el sistema eléctrico colombiano con una participación del 17%. La energía generada en el Guavio es empleada para suministrar energía en la zona centro del país, especialmente en Bogotá.

■ **Figura 2.** Localización de la cuenca abastecedora del embalse del Guavio



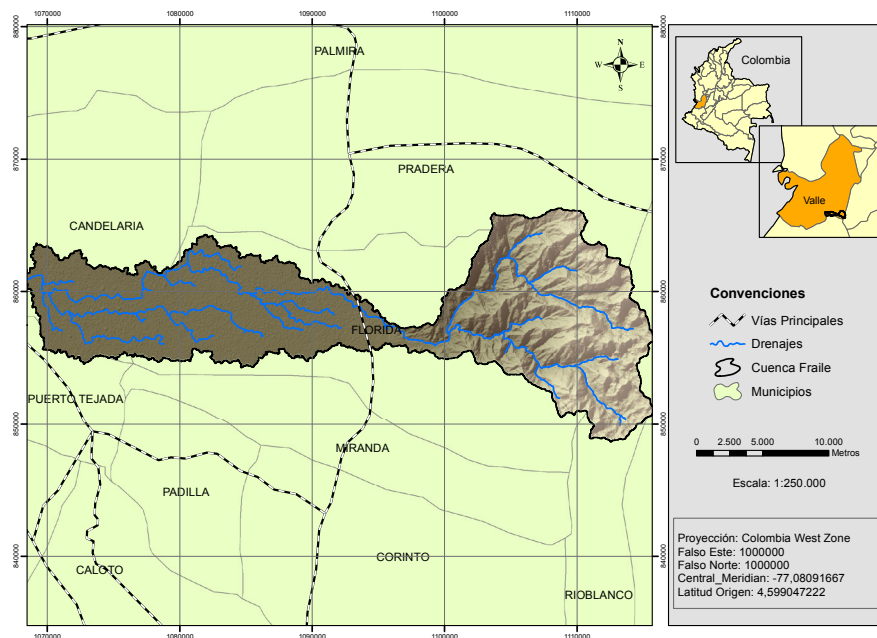
Fuente: Elaboración propia

Cuenca del río Fraile

La cuenca hidrográfica del río Fraile se encuentra ubicada al occidente de la Cordillera Central y al costado derecho del río Cauca (figura 3), en los municipios de Puerto Tejada y Miranda (departamento del Cauca) y Florida, Pradera, Cali y Candelaria (departamento del Valle del Cauca). Esta cuenca tiene una extensión aproximada de 47.500 ha, de las cuales el 65% está ubicada en la zona plana más baja de la cuenca, la cual es una zona consumidora de agua del río para riego para el cultivo de caña de azúcar. Es un área to-

talmente cultivada, en su mayor parte por caña de azúcar (77%), seguido por pastos (9%). A pesar de que el cultivo de caña demanda altos volúmenes de agua, los periodos en los cuales demanda una mayor cantidad de agua para riego proveniente del río Fraile es en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y diciembre.

■ **Figura 3. Localización de la cuenca del río Fraile**



Fuente: Elaboración propia

Cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene

La cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene administrativamente forma parte de los municipios de Sutatausa, Ubaté, Linguazaque, Carmen de Carupa, Guachetá, Cucunubá, Fúquene, Susa, Villapinzón, Tausa y Suesca pertenecientes al departamento de Cundinamarca (figura 4). Geográficamente, se encuentra entre los paralelos $5^{\circ}32'00''$ y $5^{\circ}08'00''$ de latitud norte y los meridianos $73^{\circ}34'00''$ y $74^{\circ}00'00''$ de longitud oeste. La cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene tiene una extensión aproximada de 78.379 ha. El área de estudio se caracteriza por grandes afloramientos rocosos y topografía mixta (zonas planas, semiplanas y quebradas) la cual varía entre 2.520 y 3.786 metros de altura.

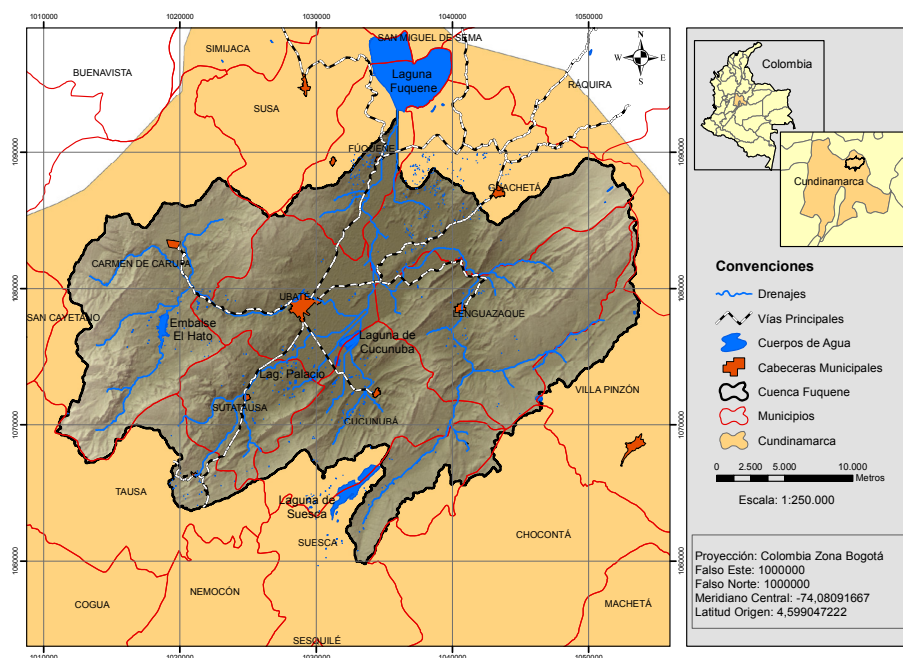
El sistema fluvial está compuesto por los ríos Ubaté alto que nace en las montañas situadas al sudoeste del Valle y tienen como afluentes a los ríos Hato y Carmen de Carupa, Suta, Cucunubá y Linguazaque, los cuales se unen aguas arriba de la compuerta de Cubio para llegar a la laguna de Fúquene y por tres cuerpos de agua importantes: embalse El Hato, laguna Palacio y laguna de Cucunubá.

La principal actividad agropecuaria dentro de la cuenca es la ganadería de leche. Se estima que en la cuenca existen cerca de 70 mil cabezas de ganado. En la parte baja de la cuenca, en la zona plana alrededor de la laguna, predominando la raza Holstein y

la capacidad de carga puede llegar hasta 5 cabezas por hectárea. Mientras que en las zonas de ladera, la capacidad de carga puede disminuir a 1,5 animales por hectárea, predominando el ganado criollo, el Normando y sus cruces. La agricultura ha ido decayendo enormemente en la cuenca. El cultivo de papa que para el año 2004 ocupaba una superficie de 17 mil hectáreas en la actualidad apenas supera las 7 mil hectáreas. Otros cultivos como arveja, maíz y trigo han disminuido su superficie sustancialmente, hasta llegar a valores no significativas. La mayoría de la agricultura dentro de la cuenca es de secano, sin embargo, se resalta que el valle Ubaté-Suárez emplea gran parte del agua para un sistema de riego que cubre algo más de 20 mil hectáreas. Este sistema de riego se encuentra regulado por la laguna de Fúquene.

Igualmente dentro de la cuenca existen una serie de problemas ambientales, que tienen que ver con la regulación hidrológica al interior de la cuenca y la calidad del agua. Por esta razón, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) formuló la estrategia para el manejo ambiental de la cuenca Ubaté – Suárez (documento CONPES 3451, aprobado por el Consejo de Política Económica y Social, CONPES).

■ **Figura 4.** Localización de la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene



3.2. Escenarios de cambio climático

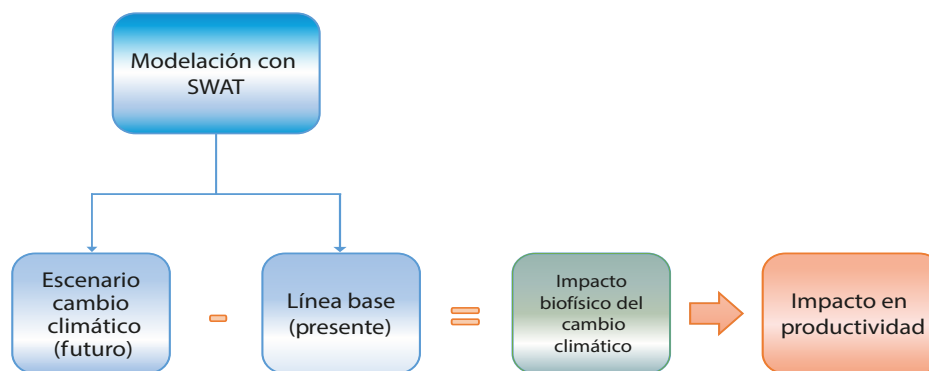
El análisis del impacto del cambio climático se realizó mediante la determinación de los cambios del rendimiento hídrico en las cuencas, comparando la línea base de cada cuenca frente a los escenarios de cambio climático. La línea base corresponde al promedio



histórico de las estaciones ubicadas dentro de cada cuenca. Para determinar los valores futuros del clima, se utilizaron los valores simulados por un modelo ensamble (promedio) de varios MCG para los escenarios SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) A1B, A2 y B1². Estos valores fueron calculados para las cuencas del río Fraile y de la laguna de Fúquene en los períodos 2030, 2070 y 2100. Para la cuenca abastecedora del embalse del Guavio se analizaron los periodos 2030, 2040 y 2050 cubriendo únicamente el período de vida útil del embalse (periodo entendido como un lapso de tiempo climatológico al rededor del año indicado). Se aplicó la metodología de reducción de escala “downscaling”³ a los datos de escenarios futuros, lo cual permite determinar los cambios en el clima a una resolución más detallada. Los escenarios de cambio climático son la suma de la línea base y las anomalías (precipitación en porcentaje y temperatura en grados centígrados) de los resultados del modelo ensamble.

Los resultados de rendimiento hídrico obtenidos con el modelo SWAT para los escenarios de cambio climático fueron comparados con los resultados del modelo SWAT con la información de la línea base climática. En la figura 5 se presenta un esquema metodológico general del estudio.

■ **Figura 5.** Esquema metodológico general



Fuente: Elaboración propia

Cuenca abastecedora del embalse del Guavio

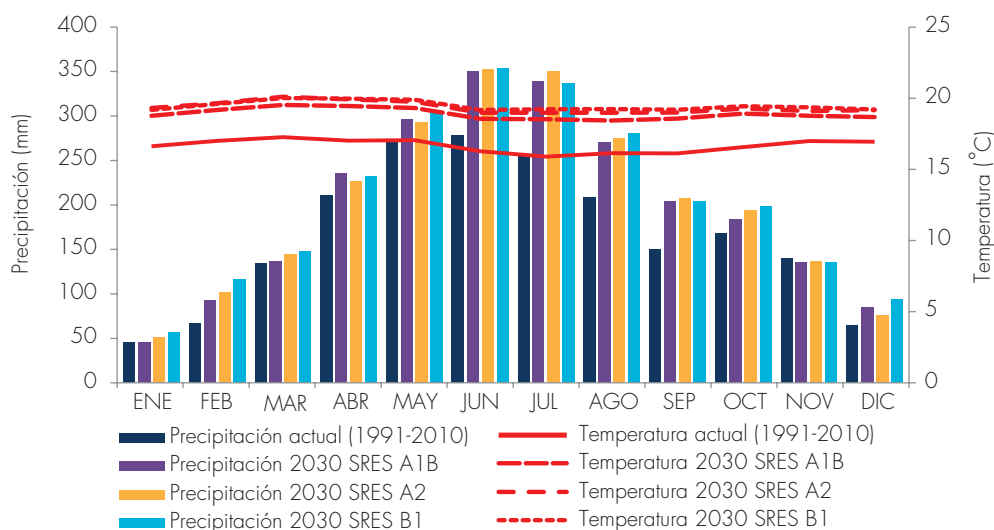
De acuerdo a los resultados obtenidos de los modelos de cambio climático para la cuenca abastecedora del embalse del Guavio, se espera que para el año 2030 la lluvia aumente de 2.078 mm/año a 2.132 mm/año en el escenario A1B, a 2.142 mm/año en el escenario A2 y a 2.163 mm/año para el escenario B1. Para el 2040 se espera que aumente a 2.183 mm/año en el escenario A1B, a 2.157 mm/año en el escenario A2 y a 2.231 mm/año para el escenario B1. Se espera que para el 2050 los valores de precipitación media anual sean de 2.241 mm/año en el escenario A1B, a 2.142 mm/año en el escenario A2 y a 2.231 mm/año para el escenario B1. Igualmente se observa que gran parte del aumento de las lluvias se daría en los meses más lluviosos del año (junio a septiembre).

2 Dado que CIAT no cuenta con la información del escenario B2 se optó por usar el escenario B1.

3 Este proceso de *downscaling* es descrito en Ramírez-Villegas y Jarvis, 2010.

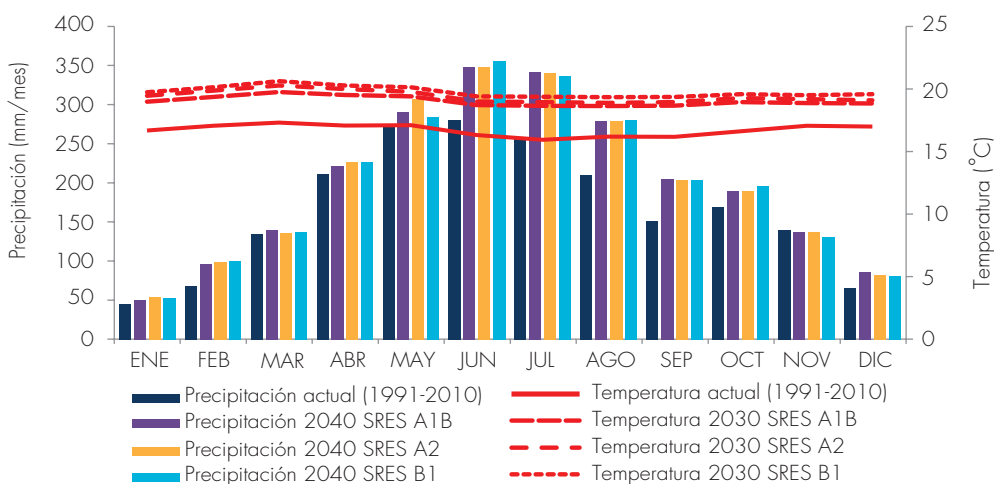
Respecto a la temperatura media también se espera que para el año 2030 se presente un aumento del promedio anual de 2,2 °C para el escenario A1B, 2,7 °C para el escenario A2 y un incremento de 2,8 °C para el escenario B1 (figura 6). Para el 2040 se espera que sea de 2,3 °C para el escenario A1B, 2,7 °C para el escenario A2 y de 3 °C para el escenario B1 (figura 7) Manteniendo la tendencia de incremento pero siendo un poco más leve, se espera que el incremento para el 2050 sea de 2 °C para el escenario A1B, 2,4 °C para el escenario A2 y de 2,5 °C para el escenario B1 (figura 8)

Figura 6. Comportamiento clima actual (1991-2010) vs. clima futuro (2030) para la cuenca del embalse del Guavio



Fuente: Elaboración propia

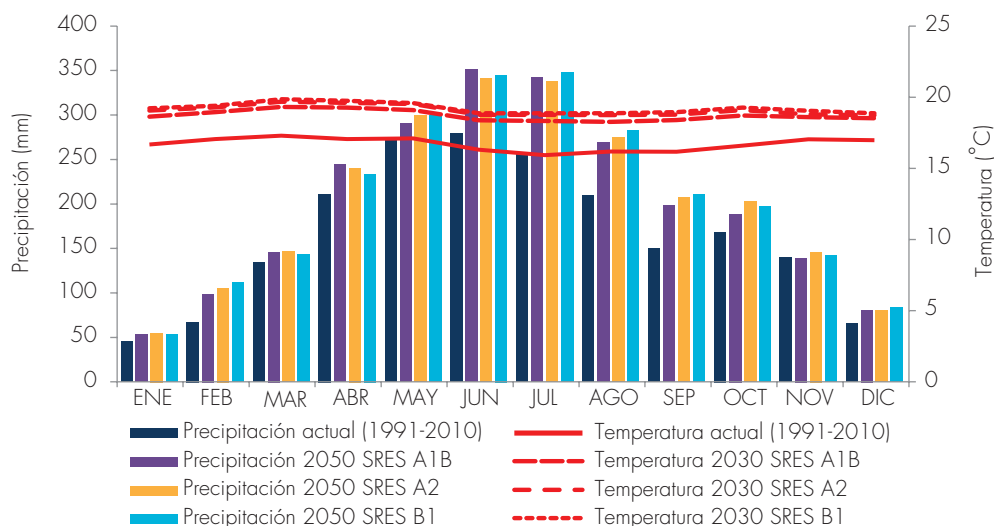
Figura 7. Comportamiento clima actual (1991-2010) vs. clima futuro (2040) para la cuenca del embalse del Guavio



Fuente: Elaboración propia



■ **Figura 8.** Comportamiento clima actual (1991-2010) vs. clima futuro (2050) para la cuenca del embalse del Guavio

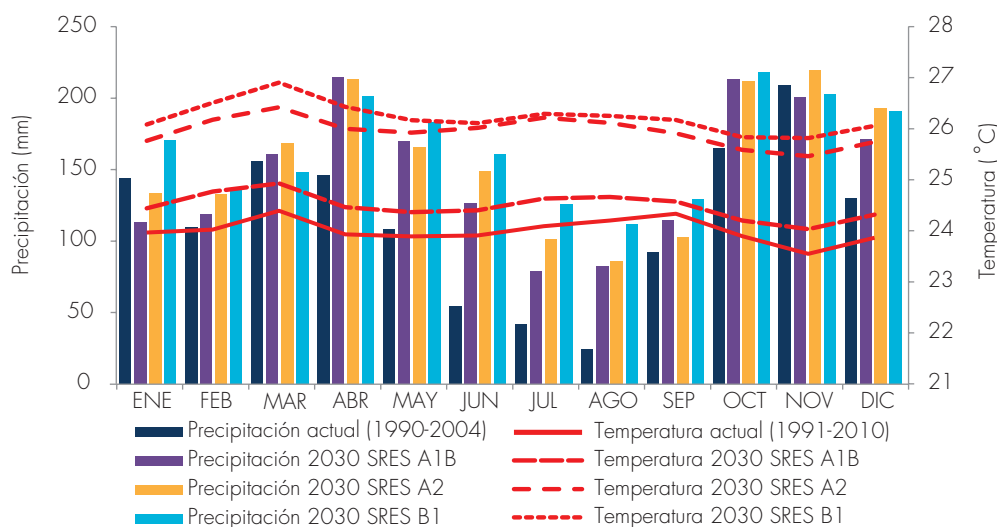


Fuente: Elaboración propia

Cuenca del río Fraile

En las figuras 9, 10 y 11 se presentan los resultados del comportamiento del clima actual frente a los escenarios futuros. La precipitación de la línea base para la cuenca del río Fraile es de 1.297 mm/año, y el escenario A1B estima que pasaría a 1.698 mm/año para el año 2030, 1.786 mm/año para el 2070 y a 1.882 mm/año para el 2100. Para el escenario A2 estima que pasaría a 1.731 mm/año para el 2030, 1.810 mm/año para el 2070 y a 1.940 mm/año para el 2100; y el escenario B1 presenta un valor de 1.752 mm/año para

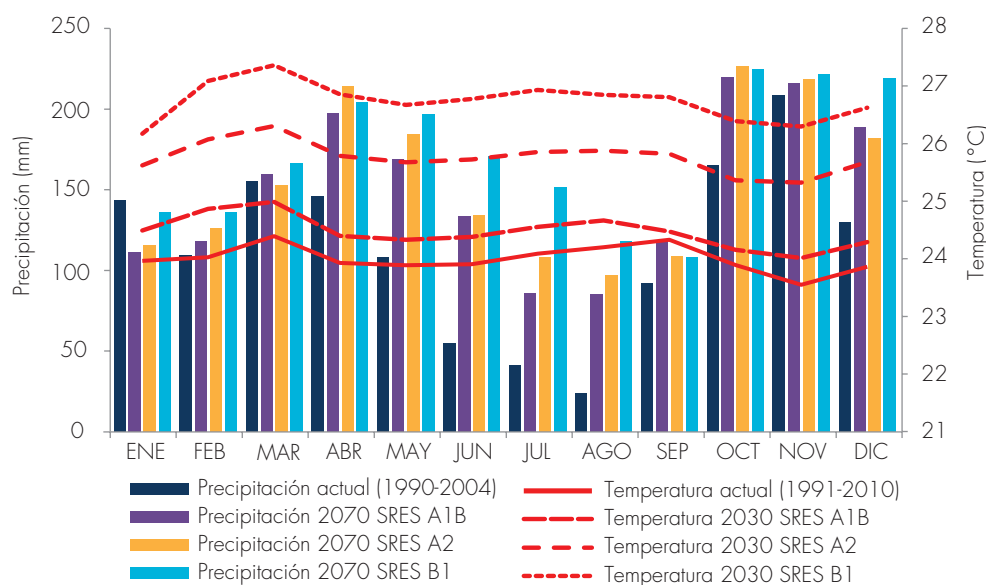
■ **Figura 9.** Comportamiento clima actual (1990-2010) vs. clima futuro (2030) para la cuenca del río Fraile



Fuente: Elaboración propia

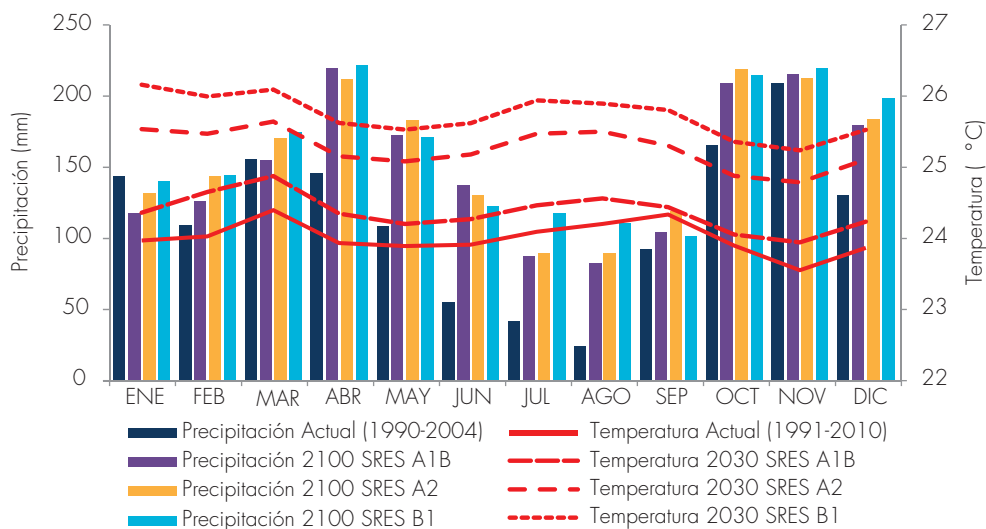
el 2030, 1.847 mm/año para el 2070 y de 1.874 mm/año para el 2100. Se estima que la precipitación incrementará en todos los meses del año a excepción de los meses de enero y noviembre, y que los mayores incrementos de precipitación ocurrirán entre los meses de junio y agosto, que son actualmente los meses más secos del año (figuras 9 a 11). Para estos meses, los aumentos de precipitación podrían ser hasta de 73 mm/mes, 83 mm/mes y 112 mm/mes para los años 2030, 2070 y 2100, respectivamente.

Figura 10. Comportamiento clima actual (1990-2010) vs. clima futuro (2070) para la cuenca del río Fraile



Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Comportamiento clima actual (1990-2010) vs. clima futuro (2100) para la cuenca del río Fraile



Fuente: Elaboración propia

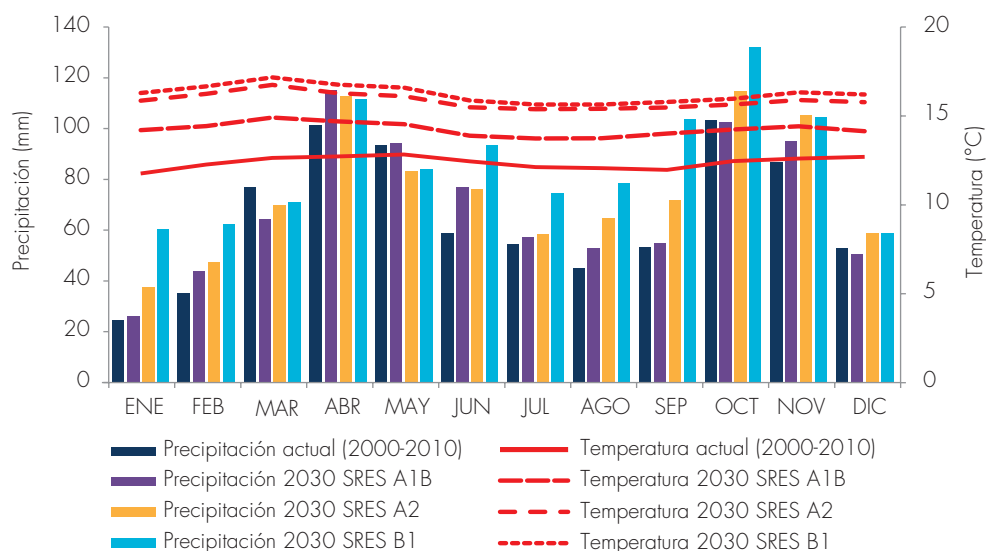


La temperatura también presenta un incremento respecto al escenario base para todos los meses, siendo este mayor en los escenarios A2 y B1 con incrementos promedios anuales de 2,1 °C para el 2030, 2,2 °C para el 2070 y 1,5 °C para el 2100, y por último el escenario A1B con incrementos promedios anuales de 0,5 °C para los años 2030 y 2070 y de 0,4 °C para el 2100.

Cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene

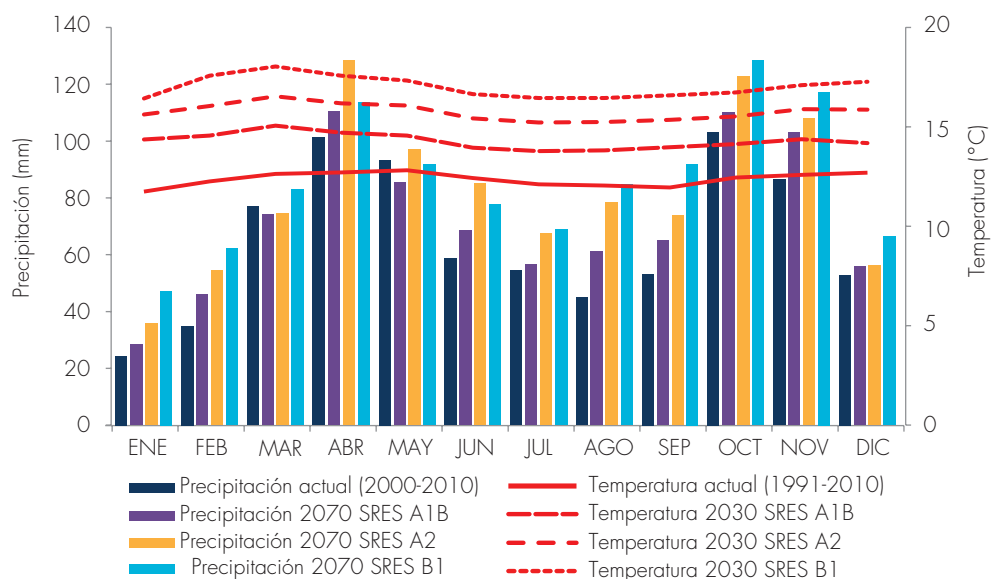
En la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene se estima que la lluvia aumente en todos los meses excepto para el mes de marzo. El aumento de la lluvia sería mayor en los meses de abril, junio, agosto y septiembre (figuras 12 a 14). La precipitación promedio anual para la cuenca está alrededor de 778 mm/año, y de acuerdo al escenario A1B para el año 2030 podría subir a 787 mm/año, a 837 mm/año en el escenario A2, y a 844 mm/año para el escenario B1. Para el 2070 podría pasar a 863 mm/año para el escenario A1B, a 939 mm/año para el escenario A2, y a 869 mm/año para el escenario B1, por último para el 2100 se podría tener 989 mm/año para el escenario A1B, 995 mm/año para el escenario y 914 mm/año para el escenario B1. En general se observan aumentos en la precipitación para toda la cuenca para los meses de enero, febrero, agosto y septiembre, que en la actualidad son meses con bajos niveles de precipitación. Por su parte, el aumento promedio anual de temperatura podría alcanzar 3,7 °C en el año 2030, 4,0 °C en el 2070 y 3,0 °C en el 2100 para los escenarios A2 y B1, mientras que para el escenario A1B podría llegar a 1,9 °C para el 2030 y 2070, y 1,6 °C para el 2100.

■ **Figura 12.** Comportamiento clima actual (1991-2010) vs. clima futuro (2030) para la cuenca de la laguna de Fúquene



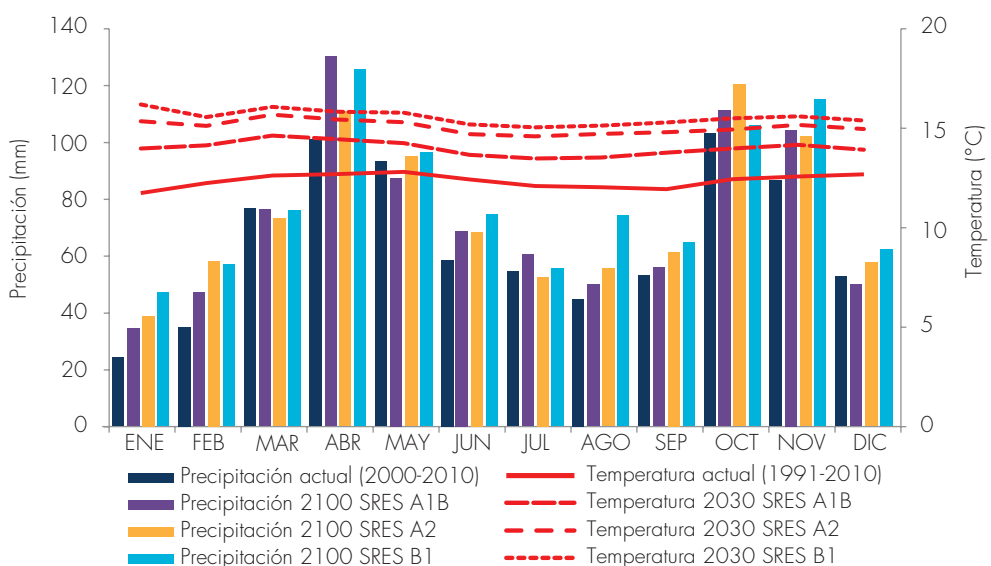
Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Comportamiento clima actual (1991-2010) vs. clima futuro (2070) para la cuenca de la laguna de Fúquene



Fuente: Elaboración propia

Figura 14. Comportamiento clima actual (1991-2010) vs. clima futuro (2100) para la cuenca de la laguna de Fúquene



Fuente: Elaboración propia

3.3. Información requerida de las cuencas para el modelo SWAT

En las tres cuencas se empleó información sobre tipos de suelos, cobertura/uso del suelo, modelos digitales de elevación o en su defecto curvas de nivel, cartografía base y datos



hidrometeorológicos. En la tabla 1 se observa el resumen de la información empleada y la fuente de la información.

Los mapas de cobertura terrestre y suelos fueron obtenidos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y de la Corporación Autónoma del Valle del Cauca (CVC). Los mapas de topografía del terreno y cartografía base se obtuvieron del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Corpoguavio, CAR y CVC. Los datos climatológicos se obtuvieron del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), CAR y CVC. Los MCG fueron descargados directamente del portal del Earth System Grid Federation del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR, 2013). Se realizó un proceso de reducción de escala para estos datos (CCFAS, 2013).

La información de los resultados de la línea base fueron tomadas de proyectos realizados para Patrimonio Natural en la cuenca del Guavio, para TNC en la cuenca del río Fraile, y para la CAR en la cuenca de la laguna de Fúquene. Los resúmenes de dichos informes son presentados en los anexos II, III y IV.

La información sobre registros mensuales de niveles del embalse del Guavio fueron tomados del Sistema de Información Minero Energético Colombiano (SIEN) y específicamente del Sistema de Información Eléctrico Colombiano (SIEL).

Tabla 1. Información de suelos topografía y clima empleada por cuenca

Nombre	Cuenca	Descripción	Fuente
Mapa de cobertura	Fúquene y Guavio	Levantamiento Semidetallado de las Coberturas Terrestres para el Departamento de Cundinamarca, 2007 a escala 1:25.000.	IGAC
	El Fraile	Coberturas Corine Land Cover (CLC) a escala 1:100.000. 2007.	IGAC
Mapa de suelos	Fúquene y Guavio	Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras para el Departamento de Cundinamarca. 2007 a escala 1:100.000.	IGAC
	El Fraile	Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Valle del Cauca año 2004 a escala 1:50.000.	IGAC y CVC
Topografía	Fúquene	Modelo Digital del Terreno (MDT) de la Misión Topográfica por Radar (SRTM) de la NASA, resolución de 30 m, 2001.	CIAT
	Guavio	Generado a partir de curvas de nivel con equidistancia de 20 m, a escala 1:20.000 con resolución espacial de 10 m	Corpoguavio
	El Fraile	Modelo Digital del Terreno (MDT) de la Misión Topográfica por Radar (SRTM) de la NASA, resolución de 30 m, 2001.	CVC
Cartografía base	Fúquene	Drenajes, Centros Poblados, División Político Administrativa, Cuerpos de Agua etc.	CAR
	Guavio	Drenajes, Corregimientos, División Político Administrativa, embalses, etc.	Corpoguavio
	El Fraile	Drenajes, Corregimientos, División Político Administrativa, embalses, etc.	CVC

Tabla 1 (continuación). Información de suelos topografía y clima empleada por cuenca

Nombre	Cuenca	Descripción	Fuente
Datos climatológicos	Fúquene	Registros de Estaciones Hidrometeorológicas (Humedad Relativa, Precipitación, Temperatura Máximas y Mínimas, Radiación Solar, Velocidad del Viento y Aforos de Caudal). CAR.	IDEAM y CAR
	Guavio	Estaciones Hidrometeorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).	IDEAM
	El Fraile	Estaciones Hidrometeorológicas del Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC).	IDEAM y CVC

Fuente: Elaboración propia

Información faltante

Se contó con buena información básica para utilizar el modelo SWAT y evaluar posibles efectos del cambio climático en el recurso hídrico. Sin embargo, sería conveniente poder acceder a información más actualizada de las estaciones climatológicas para la cuenca del río Fraile (actualmente sólo se cuenta con los registros hasta el 2004). Por otro lado, contar con unos mapas de coberturas/uso de la tierra más detallados en estas cuencas o debidamente verificados en campo, podría ayudar a mejorar los resultados del modelo.

Respecto a la información de proyecciones climáticas, se podría utilizar los datos de las proyecciones de los modelos de cambio climático PRECIS 25KM, que usa el IDEAM para las diferentes variables climáticas (en especial de precipitación y temperatura). Con esta información se calcularía el porcentaje de cambio mensual en precipitación y temperatura proyectado para los próximos años. En BID-CEPAL-DNP (2014) se utiliza la información de escenarios SRES del IDEAM a nivel de estación para realizar análisis de cambio climático en diversos sectores que dependen del recurso hídrico; allí se identifica también la necesidad de contar con información completa, detallada, georreferenciada y de fácil acceso.

4

Resultados del impacto del cambio climático en el sector

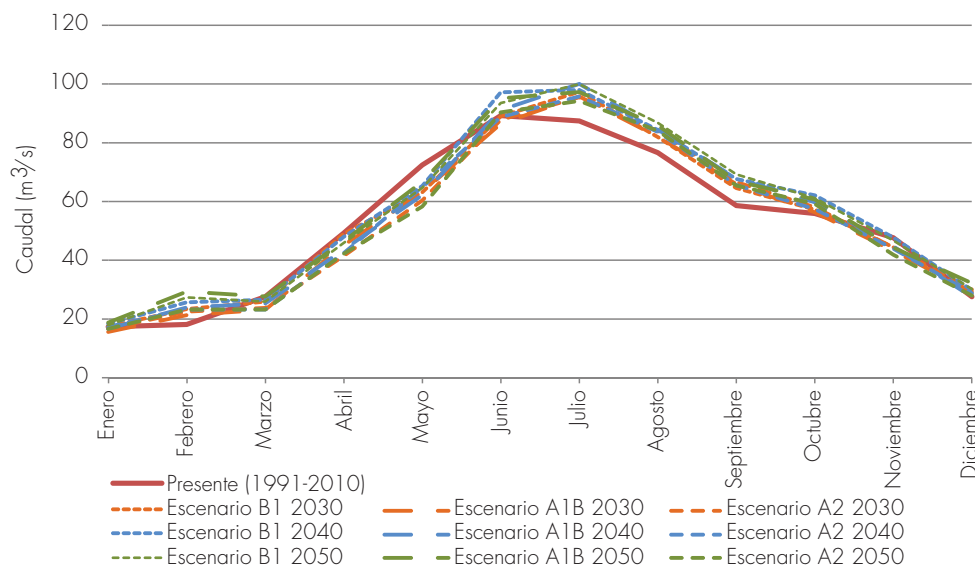
4.1. Impactos del cambio climático en el recurso hídrico

Cuenca abastecedora del embalse del Guavio

En la figura 1.5 se presentan los valores de caudal para la línea base y para los tres escenarios A2, A1B y B1. Los resultados del modelo muestran que el caudal del río aumentaría en gran parte del año, especialmente en los periodos donde el caudal es generalmente alto (junio a agosto), alcanzando incrementos de caudal hasta de 13 m³/s para el 2040, mientras que entre los meses de marzo a mayo, el caudal del río podría disminuir hasta 14 m³/s para el 2050.



■ **Figura 15.** Caudal para las condiciones de línea base (1991-2010) y escenarios de clima futuro (2030-2050) en la cuenca abastecedora del embalse del Guavio



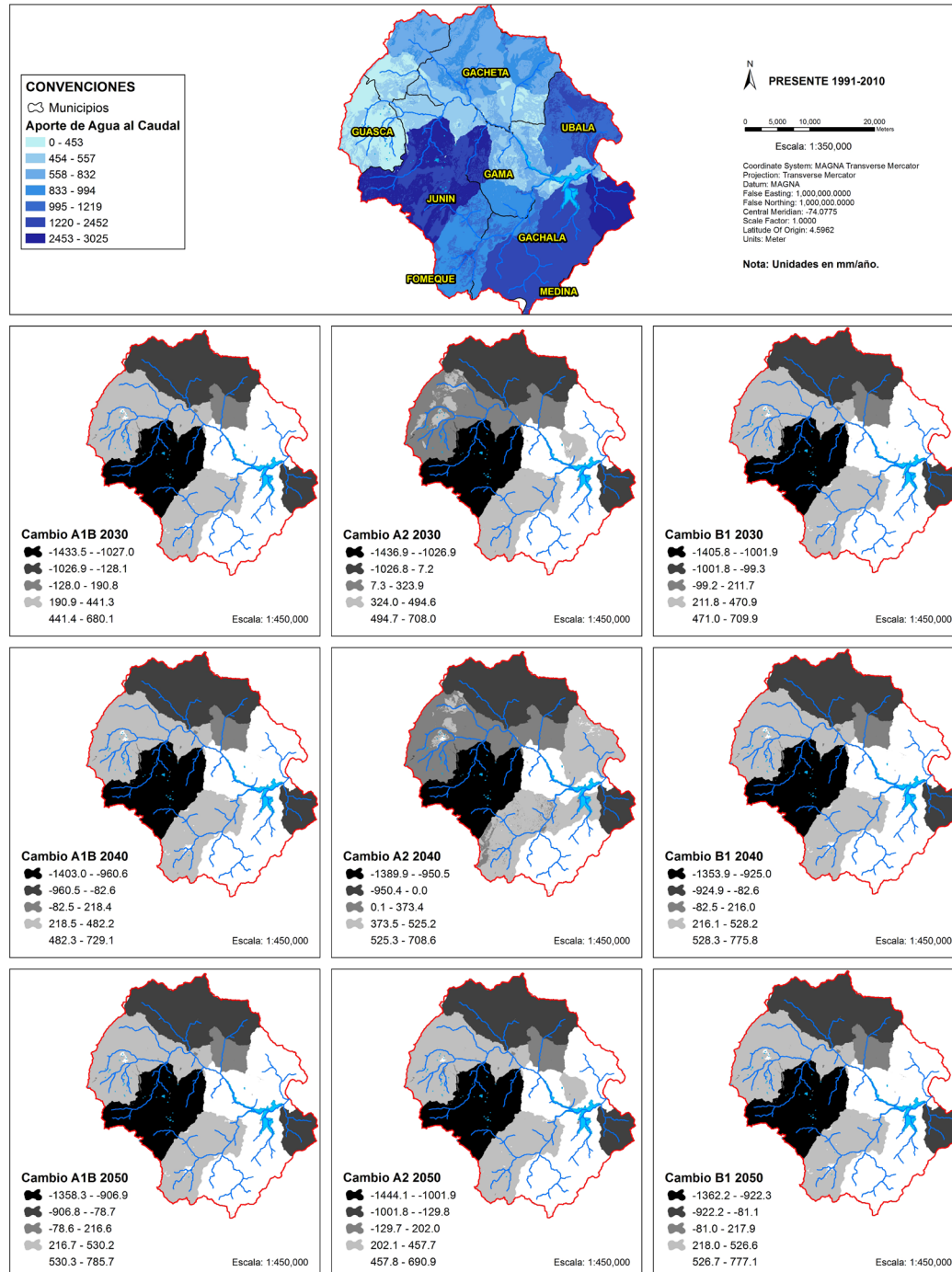
Fuente: Elaboración propia

En la figura 16 se presentan los resultados de los cambios en el aporte de agua al caudal de las diferentes zonas de la cuenca. Se puede observar que las zonas con mayor reducción en el rendimiento hídrico (respecto a la línea base) corresponden a las subcuencas de los ríos Chorreras, Rucio, Alto Farallones (en tono negro) y Salinero y Alto Muchindote (en tono gris oscuro). Precisamente, estas zonas son las que mayores aportes de agua realizan al caudal en las condiciones actuales. Esto último quiere decir que los impactos del cambio climático serían mayores en las zonas más importantes para el abastecimiento de agua para el embalse.

Por su parte, las subcuencas que se encuentran alrededor del embalse correspondiente al río Chivor, quebrada Gusano, quebrada El Curo y parte baja del río Farallones son las que presentan el mayor incremento del rendimiento hídrico (en tono blanco). En la actualidad, estas zonas se caracterizan por ser las zonas con el menor rendimiento hídrico para la línea base. Lo anterior quiere decir, que los mayores aumentos en precipitación podrían ocurrir en las zonas donde actualmente el balance hídrico es más desfavorable (en términos de aporte de agua al caudal).

De acuerdo con los resultados del modelo, los impactos del cambio climático estarán geográficamente y estacionalmente diferenciados. Geográficamente, porque los impactos variarían dependiendo de la ubicación al interior de la cuenca. Estacionalmente, porque sus impactos también variarían dependiendo del mes. En términos generales se puede afirmar que para los meses de junio a agosto se podrían presentar aumentos de precipitación hasta de 48 mm/mes, mientras que para los meses de marzo a mayo la precipitación podría disminuir hasta 33 mm/mes.

Figura 16. Impacto posible del cambio climático dentro de la cuenca abastecedora del embalse del Guavio, 2030-2100



Fuente: Elaboración propia

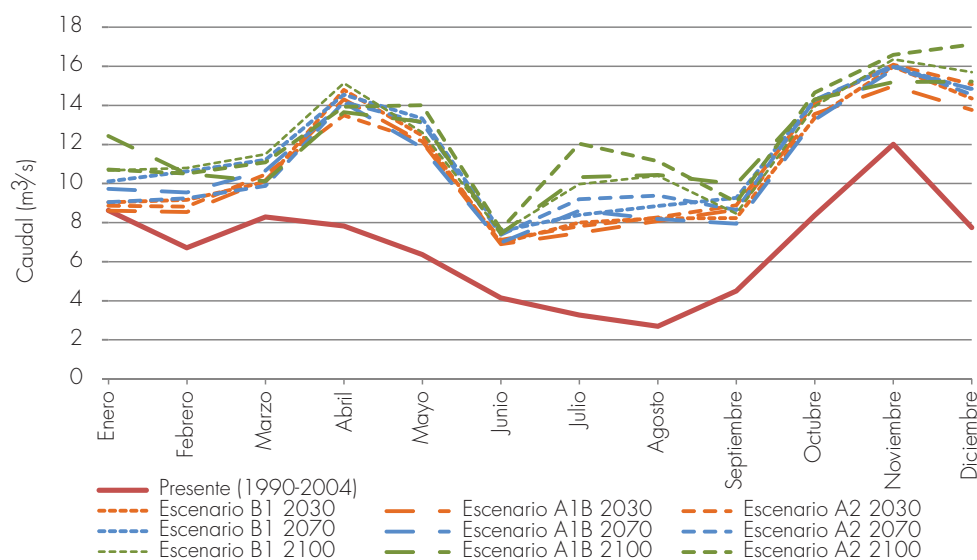


Cuenca del río Fraile

Se evaluó la vulnerabilidad al cambio climático del recurso hídrico en la cuenca de estudio, mediante el análisis del impacto potencial del cambio climático sobre el caudal simulado en el punto de cierre de toda la cuenca⁴ (figura 17).

En general, se estiman aumentos del caudal que pueden alcanzar 7,3 m³/s para el 2030, 7,1 m³/s para el 2070 y 9,4 m³/s para el 2100 (figura 17). La magnitud de los posibles impactos del cambio climático en el caudal varía de una zona a otra en la cuenca del río Fraile. En la figura 18 se puede observar que en la zona media alta de la cuenca es el área que tendrá mayor cambio en el rendimiento hídrico. Los cambios que se podrían presentar en la cuenca representan aumentos en el rendimiento hídrico hasta de 837 mm/año para el 2030, de 877 mm/año para el 2070 y de 1.019 mm/año para el 2100.

■ **Figura 17.** Caudal para las condiciones de línea base (1991-2010) y escenarios de clima futuro (2030-2100) en la cuenca del río Fraile

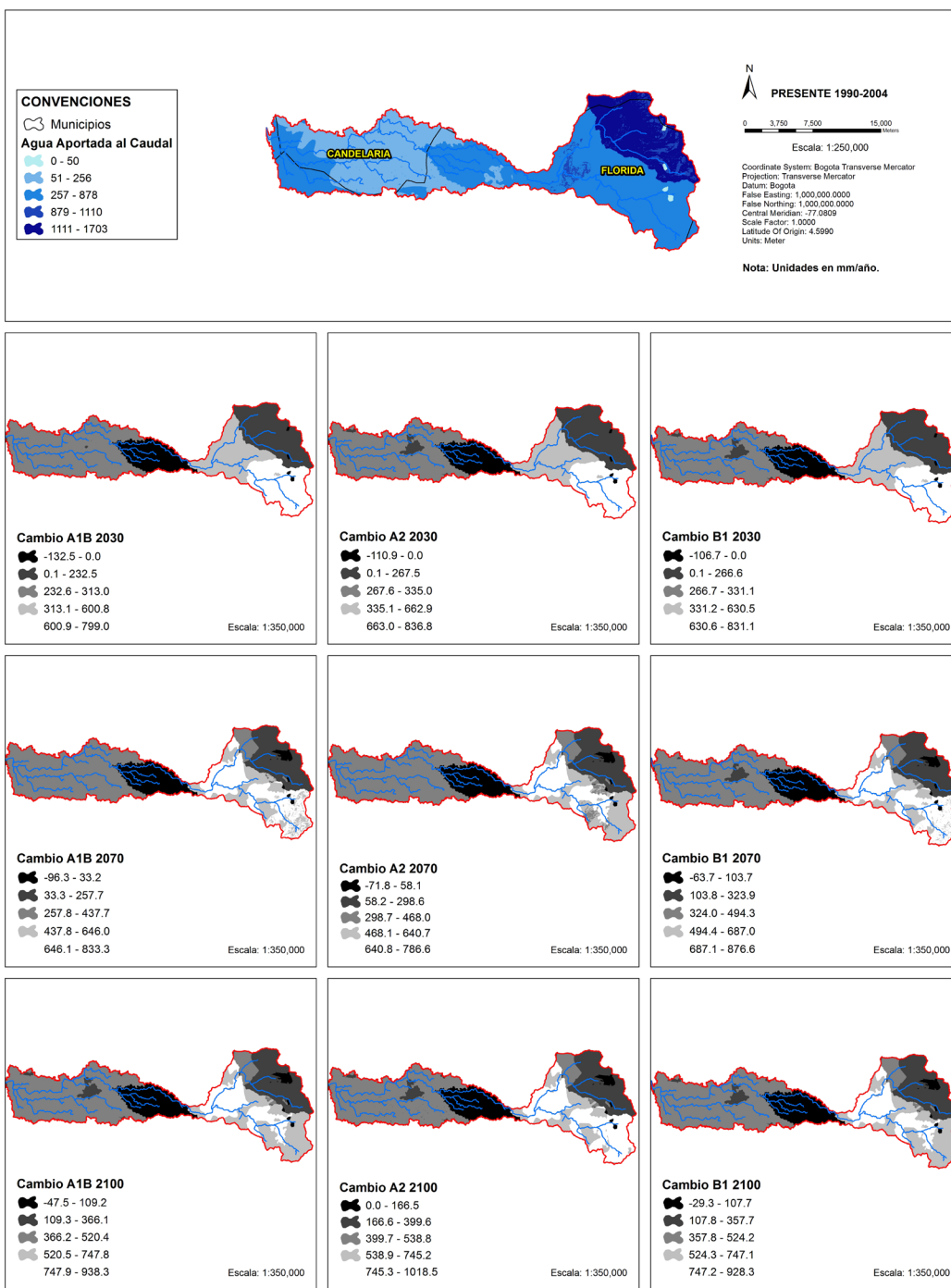


Fuente: Elaboración propia

Las zonas más bajas donde se siembra el cultivo de caña tendrán una mayor demanda por agua especialmente en la época seca debido a los aumentos en la temperatura. Por su parte, la parte alta de la cuenca, que actualmente realiza una importante contribución de agua al caudal del río, aumentaría sus aportes en el futuro. A pesar de que este contraste podría terminar siendo favorable para el cultivo de caña, también pueden aumentar los riesgos por inundación en la época de lluvias. Esta zona de la cuenca del río Fraile fue una de las más afectadas por desbordamientos de este río en los años 2010 y 2011.

4 El punto de cierre se refiere al punto más bajo dentro de la cuenca donde se cierra el límite de ésta.

Figura 18. Impacto posible del cambio climático dentro de la cuenca del río Fraile, 2030-2100

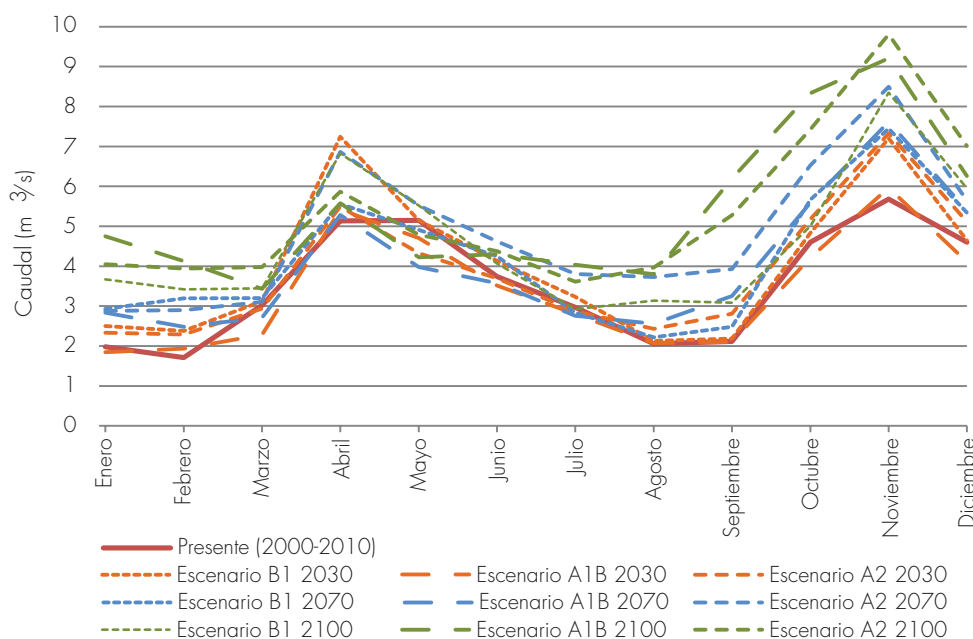


Fuente: Elaboración propia

Cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene

Se evaluó la vulnerabilidad al cambio climático del recurso hídrico en la cuenca de estudio, mediante el análisis del impacto potencial del cambio climático sobre el caudal simulado en el punto de cierre de toda la cuenca (figura 19). Por su parte, la figura 20 muestra cómo varían los posibles impactos del cambio climático sobre los rendimientos hídricos en diferentes zonas de la cuenca.

Figura 19. Caudal para las condiciones de línea base (1991-2010) y escenarios de clima futuro (2030-2100) en la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene

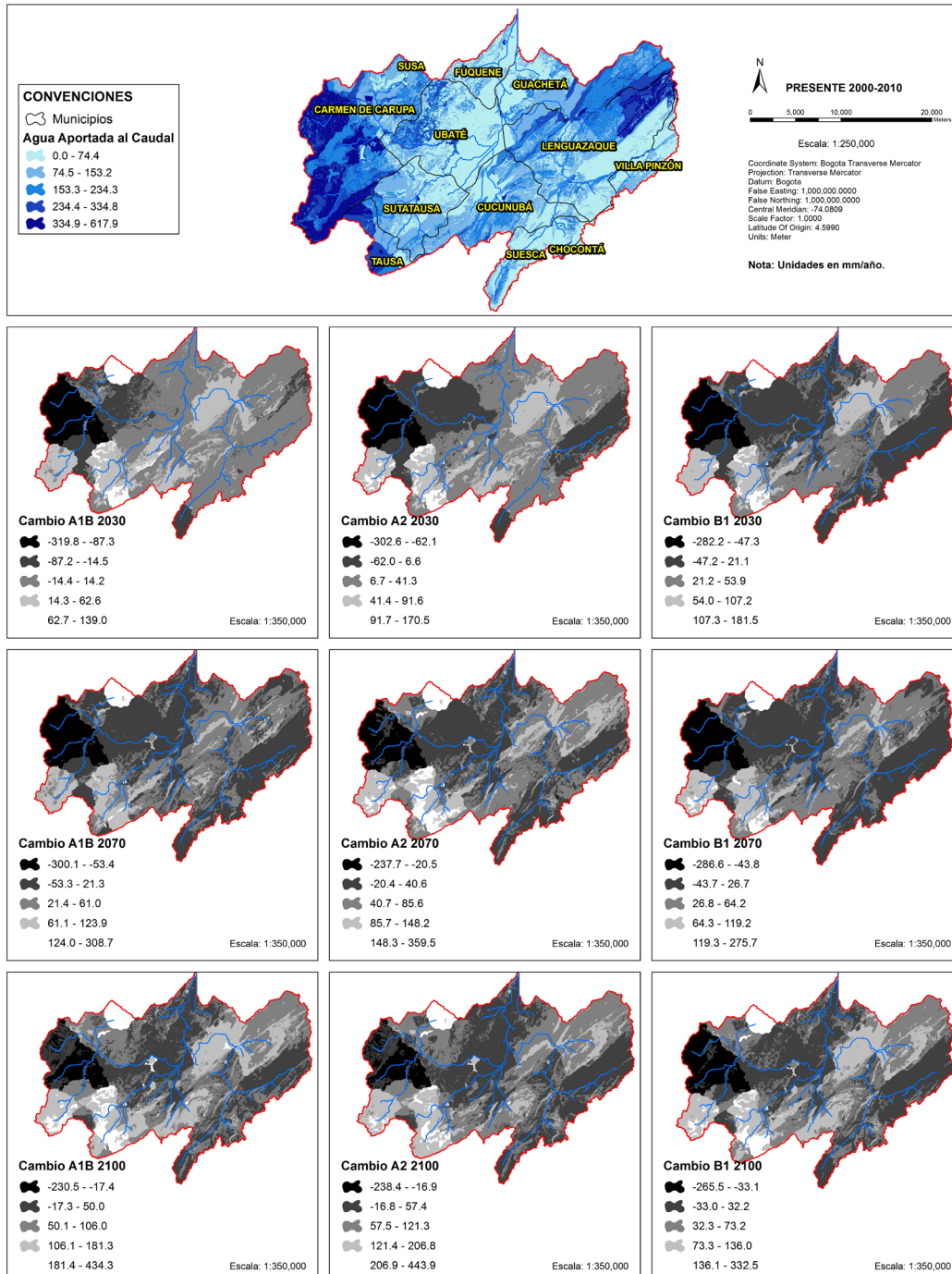


Fuente: Elaboración propia

Las proyecciones muestran un aumento del caudal en todos los meses del año a excepción de marzo y mayo. El aumento del caudal podría llegar ser hasta de 2,1 m³/s para el 2030, 2,8 m³/s para el 2070 y 4,1 m³/s para el 2100. Estos aumentos en el nivel del caudal del río representan un incremento en el riesgo de inundaciones de la parte baja de la cuenca en inmediaciones de la laguna de Fúquene.

La magnitud del impacto del cambio climático varía espacialmente al interior de la cuenca. En la figura 20 se observa que, a pesar de que existe un aumento generalizado de la precipitación, el rendimiento hídrico puede llegar a disminuir en algunos sectores, como por ejemplo en la parte alta de la cuenca. Los mayores aumentos en el rendimiento hídrico ocurren en la parte media y baja de la cuenca (subcuenca del río Lenguaque parte alta, río Suta parte alta y laguna de Cucunubá). Los aumentos en el rendimiento hídrico podrían llegar a 182 mm/año para el 2030, de 360 mm/año para el 2070 y de 444 mm/año para el 2100.

Figura 20. Impacto posible del cambio climático dentro de la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene, 2030-2050



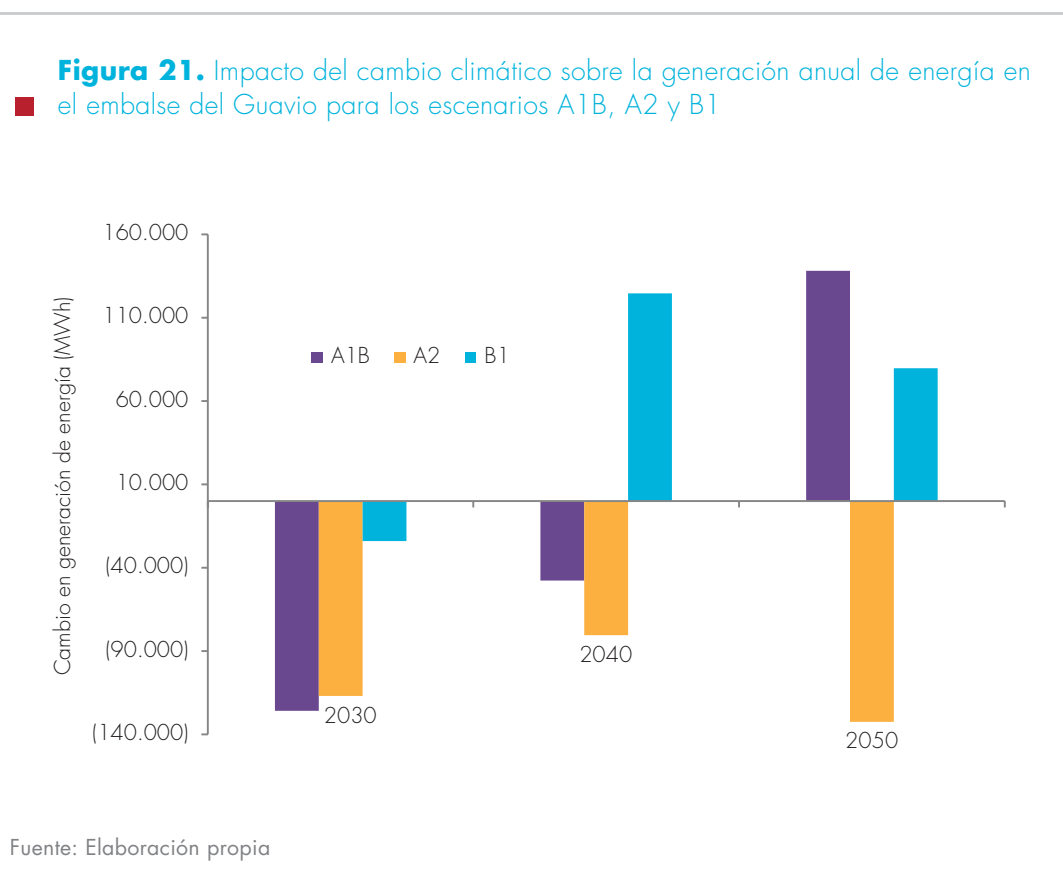
Fuente: Elaboración propia



4.2. Impactos del cambio climático sobre los rendimientos

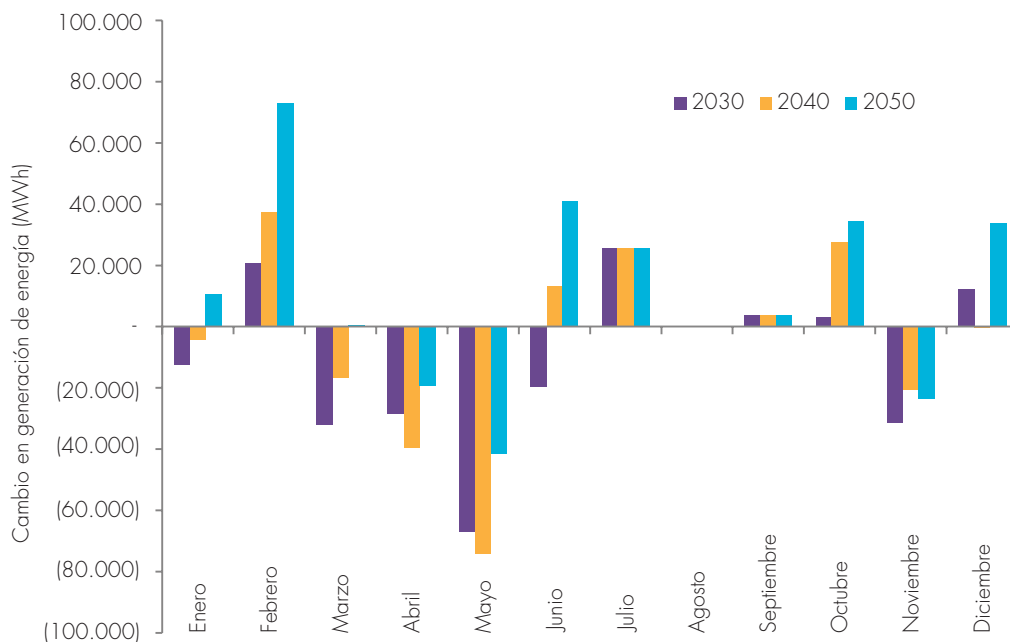
Cuenca abastecedora del embalse del Guavio

La figura 21 muestra que el escenario más desfavorable para la producción de energía es el A2, ya que las pérdidas en los tres periodos analizados (2030, 2040 y 2050) la producción anual de energía se reduciría debido a la reducción de los caudales del río a la entrada del embalse. En el caso del escenario A1B, se observa una reducción en los niveles de generación de energía para los periodos 2030 y 2040, mientras que la generación anual de energía podría incrementarse para el periodo 2050. El escenario B1 es el más optimista, ya que los resultados muestran que se podría incrementar la generación de energía para los periodos 2040 y 2050.



A continuación se presentan los cambios en la generación de energía mensual para los tres escenarios de cambio climático (A1B, A2 y B1) y para los tres periodos evaluados (2030, 2040 y 2050). En la figura 22 se muestra cómo para el escenario A1B los meses de marzo, abril y mayo, donde actualmente el embalse presenta los niveles más bajos, se reduciría aún más la generación de energía. Sin embargo, en los meses como febrero, junio y octubre la generación de energía podría incrementarse. En las figuras 23 y 24 se presentan los cambios en generación de energía para los escenarios A2 y B1 respectivamente.

Figura 22. Cambios en la generación de energía mensual para el escenario A1B, 2030-2050



Fuente: Elaboración propia

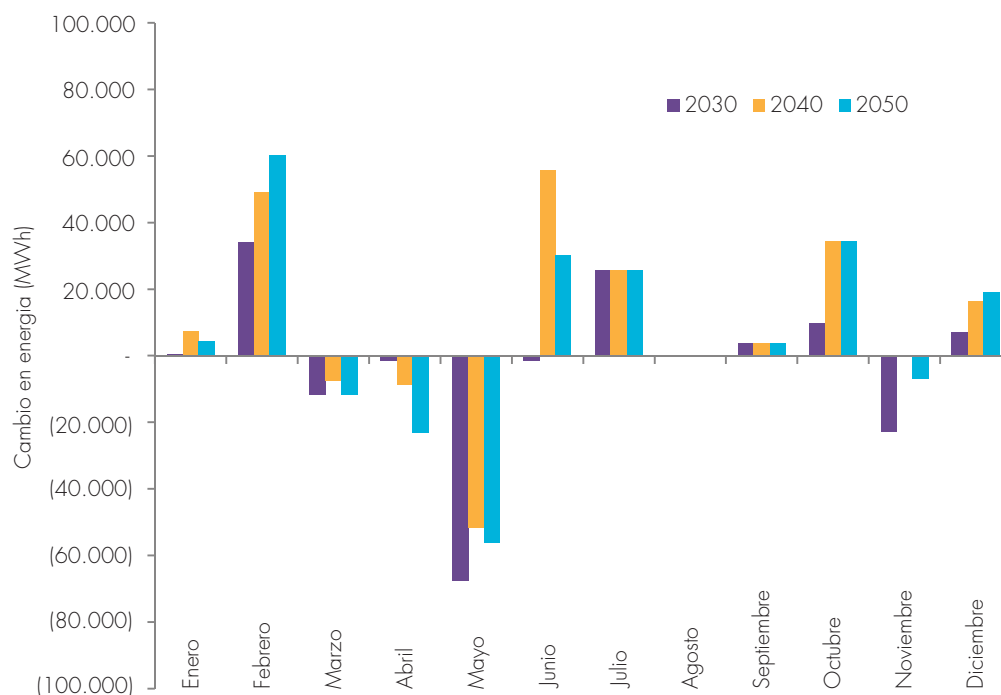
Figura 23. Cambios en la generación de energía mensual para el escenario A2, 2030-2050



Fuente: Elaboración propia



Figura 24. Cambios en la generación de energía mensual para el escenario B1, 2030-2050



Fuente: Elaboración propia

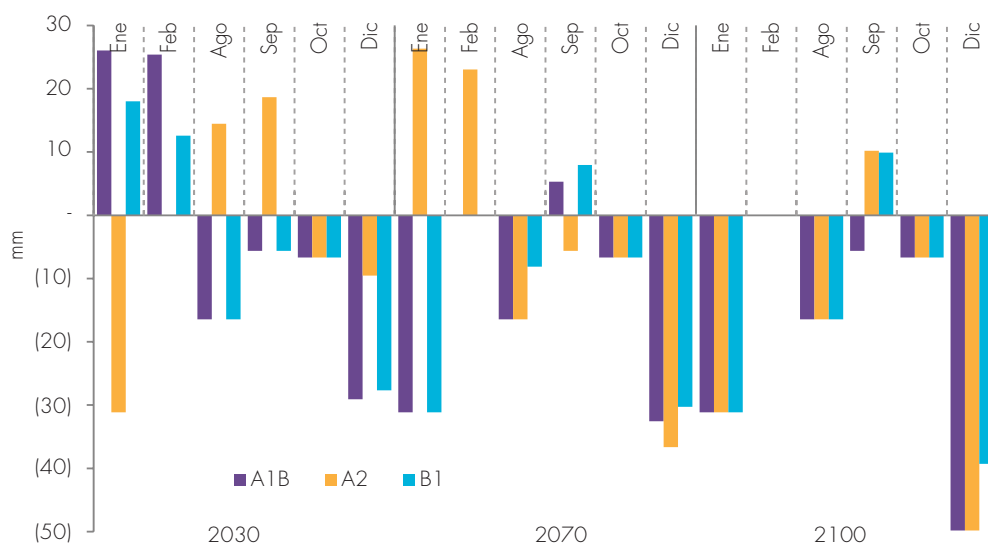
El escenario B1 presenta un comportamiento muy similar al escenario A1B. No obstante, el escenario A2 es diferente, en la medida que la reducción de generación de energía para los meses marzo, abril y mayo es más drástica, y en los meses de febrero, junio y octubre los incrementos de generación de energía son menores.

Cuenca del río Fraile

Los cultivadores de caña son los principales usuarios del recurso hídrico en esta cuenca, por esta razón se estimó el impacto del cambio climático sobre los requerimientos de riego, y por tal razón se realizaron simulaciones con el modelo CROPWAT para el área sembrada en caña en la parte baja de la cuenca usando la información de clima futuro de los escenarios A1B, A2 y B1 para el año 2100. Los cambios en el requerimiento de riego de la caña de azúcar se presentan en la figura 25.

Los resultados muestran que en la mayoría de los casos los requerimientos hídricos se reducen. Aunque la temperatura se incrementa, la precipitación también aumentan, lo que conlleva a que la mayor demanda evapotranspirativa sea compensada por los incrementos en la lluvia, y que alcance para cubrir parte de la demanda de agua que en el presente no puede ser cubierta con los niveles de precipitación actual. No obstante, en algunos casos la demanda por riego puede crecer, por ejemplo, en los casos de agosto y septiembre en el periodo 2030 y enero y febrero para el periodo 2070 para el escenario A2.

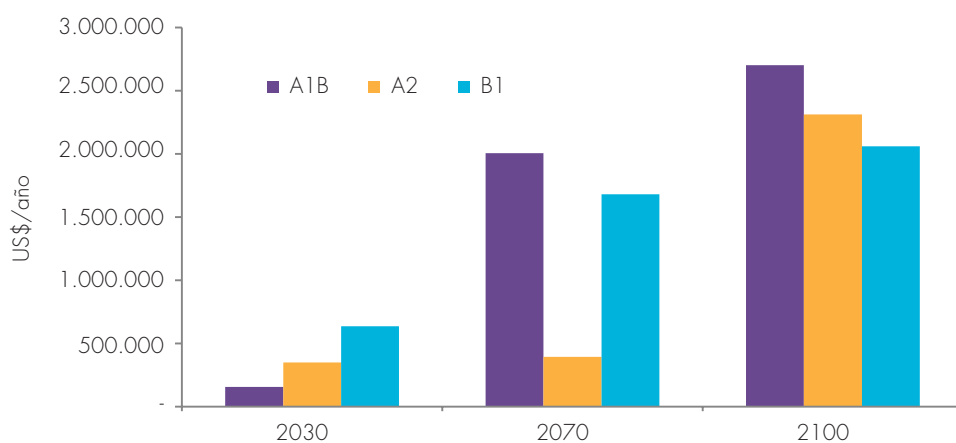
Figura 25. Cambio en los requerimientos de riego de la caña de azúcar para los escenarios A2, B1 y A1B, 2030-2050



Fuente: Elaboración propia

En la figura 26 se observa el valor en dólares del ahorro potencial por reducción de los niveles de riego gracias al aumento de la precipitación⁵. El escenario A1B presenta el mayor ahorro alcanzando, un valor anual de 2,7 millones de dólares para la zona cañera sembrada en la cuenca el Fraile. En el caso del escenario A2 los ahorros son bajos hasta 2070 pero un ahorro de hasta 2,3 millones de dólares anuales a 2100.

Figura 26. Ahorro anual por disminución de la demanda de riego en caña de azúcar bajo los escenarios A1B, A2 y B1 para la cuenca del río Fraile, 2030-2050



Fuente: Elaboración propia

⁵ Este valor es calculado asumiendo que 50% del riego de la caña de azúcar en la cuenca el Fraile proviene de fuente superficial y 50% de fuente subterránea, un valor promedio del costo del metro cúbico de agua de \$195 <http://www.procana.org/portal/index.php>, y una tasa de cambio de \$1.900 por dólar.



Cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene

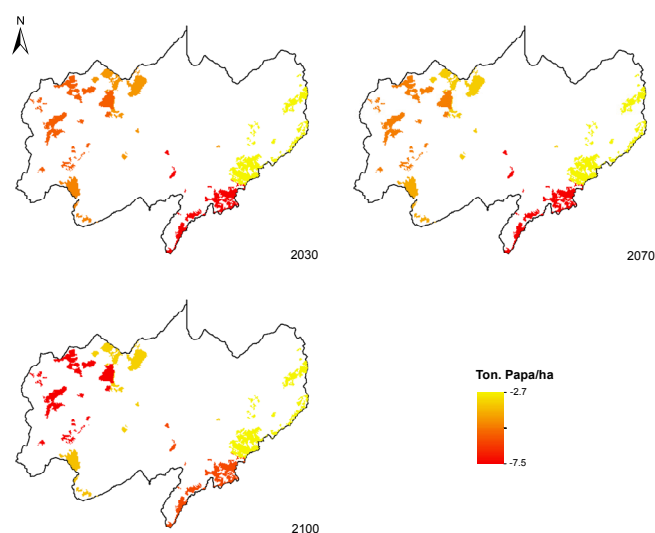
El área actual sembrada en papa en la cuenca es 7.736 ha, la cual corresponde a 9,8% del área total sembrado. Los tres escenarios muestran un balance negativo para la producción de papa en la cuenca de la laguna de Fúquene. Los escenarios A1B y A2 son los que presentan los mayores niveles de pérdida de productividad, alcanzando valores por encima de 30% de la productividad actual (tabla 2). Las figuras 27 a 29 muestran la distribución de los impactos del cambio climático sobre el cultivo de papa en la cuenca.

Tabla 2. Valores promedio y totales de pérdida de productividad del cultivo de la papa en la cuenca de la laguna de Fúquene para los escenarios A1B, A2 y B1, 2030-2100

Variable	Escenario A1B			Escenario A2			Escenario B1		
	2030	2070	2100	2030	2070	2100	2030	2070	2100
Pérdida promedio (kg/ha)	2.174	3.419	4.886	2.805	3.566	4.703	2.129	2.550	2.129
Pérdida total estimada para la cuenca (Ton)	16.818	26.449	37.798	21.699	27.587	36.382	16.470	19.727	16.470
Pérdida económica (millones de dólares/año)	3,2	5,0	7,2	4,1	5,2	6,9	3,1	3,7	3,1
Pérdida con respecto a la línea base	15%	23%	33%	19%	24%	32%	15%	17%	15%

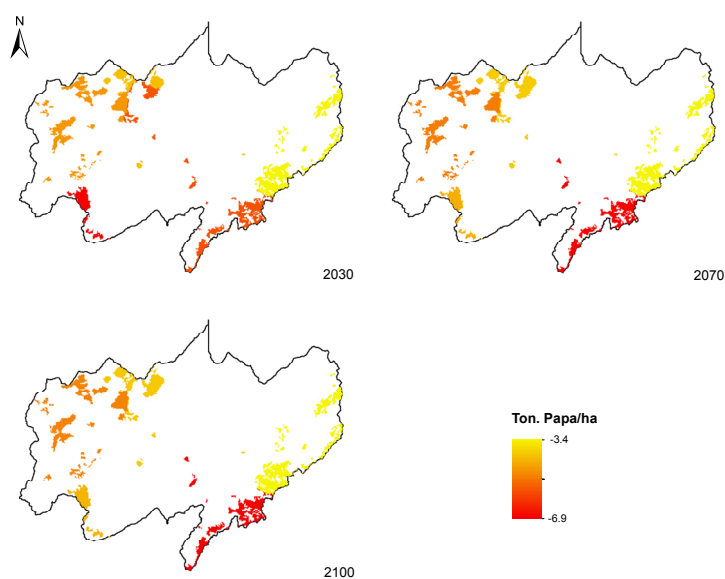
Fuente: Elaboración propia

■ **Figura 27.** Cambio en la productividad de la papa debido al cambio climático bajo el escenario A1B, 2030-2100



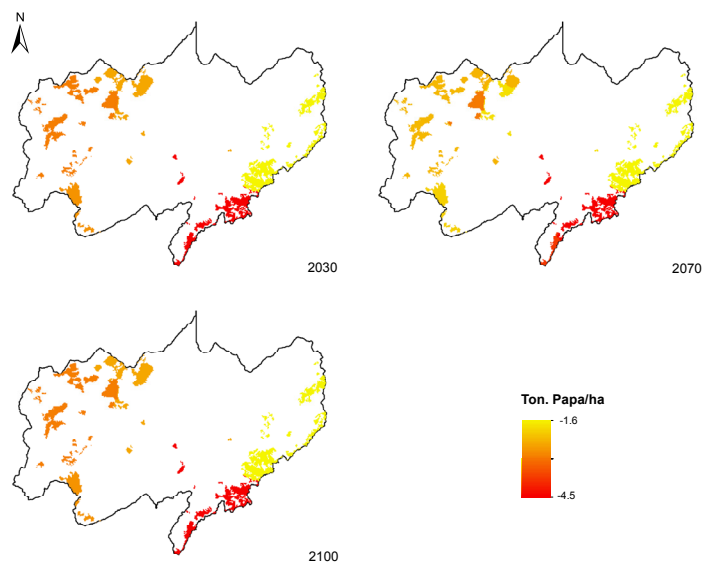
Fuente: Elaboración propia

■ **Figura 28.** Cambio en la productividad de la papa debido al cambio climático bajo el escenario A2, 2030-2100



Fuente: Elaboración propia

■ **Figura 29.** Cambio en la productividad de la papa debido al cambio climático bajo el escenario B1, 2030-2100



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la producción de leche, en términos generales los tres escenarios muestran condiciones favorables para obtener mayores niveles de producción. No obstante, llama la atención el caso del periodo 2030 para el escenario A2, ya que presenta pérdidas



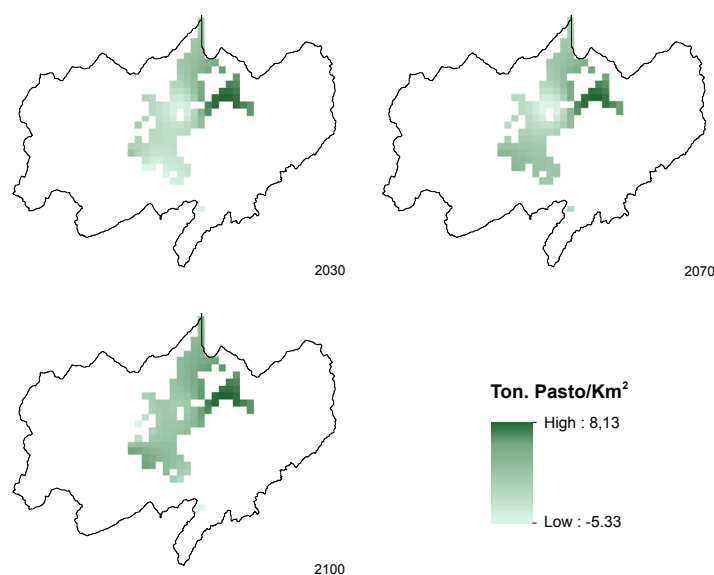
de hasta 14% (tabla 3). Las ganancias en producción podrían alcanzar valores cercanos al 10% con respecto a la producción actual como es el caso del periodo 2100 para los escenarios A2 y B1. En las figuras 30 a 32 se presenta la distribución espacial del impacto del cambio climático sobre la producción de biomasa de las pasturas.

Tabla 3. Cambio en la productividad de materia seca de forraje y de producción de leche en la cuenca de la laguna de Fúquene debido al cambio climático para el año 2100

Escenario	Periodo	Cambio en la productividad de leche (l/ha-año)	Cambio en la producción de leche a nivel de cuenca (l)	Valor económico del cambio para toda la cuenca (\$/año)	Cambio en la producción
A1B	2030	46	512.762	399.954.360	0,17%
	2070	-716	-7.981.252	-6.225.376.560	-2,63%
	2100	1.278	14.245.866	11.111.775.480	4,69%
A2	2030	-3.853	-42.949.391	-33.500.524.980	-14,14%
	2070	923	10.288.681	8.025.171.180	3,39%
	2100	2.877	32.069.919	25.014.536.820	10,56%
B1	2030	203	2.262.841	1.765.015.980	0,74%
	2070	815	9.084.805	7.086.147.900	2,99%
	2100	2.658	29.628.726	23.110.406.280	9,75%

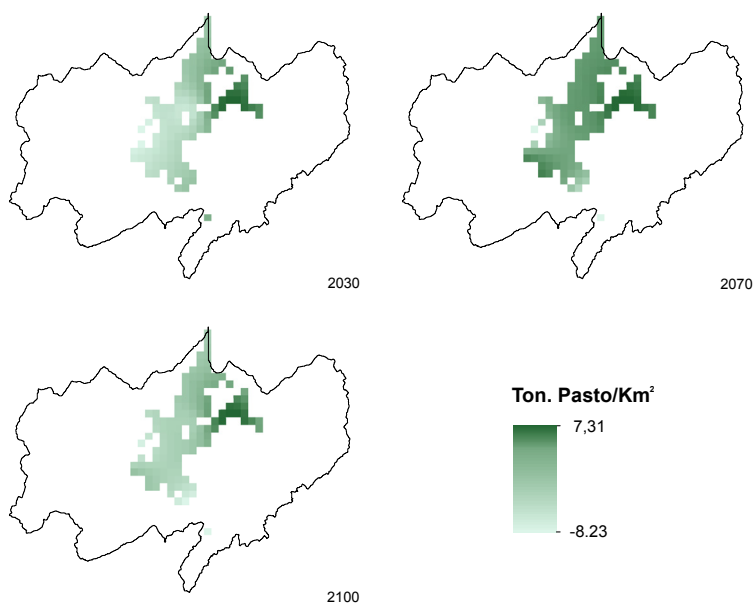
Fuente: Elaboración propia

■ **Figura 30.** Cambios en la producción de biomasa en pastos mejorados (*Lolium* spp.) para la cuenca de la laguna de Fúquene bajo el escenario A1B, 2030-2100



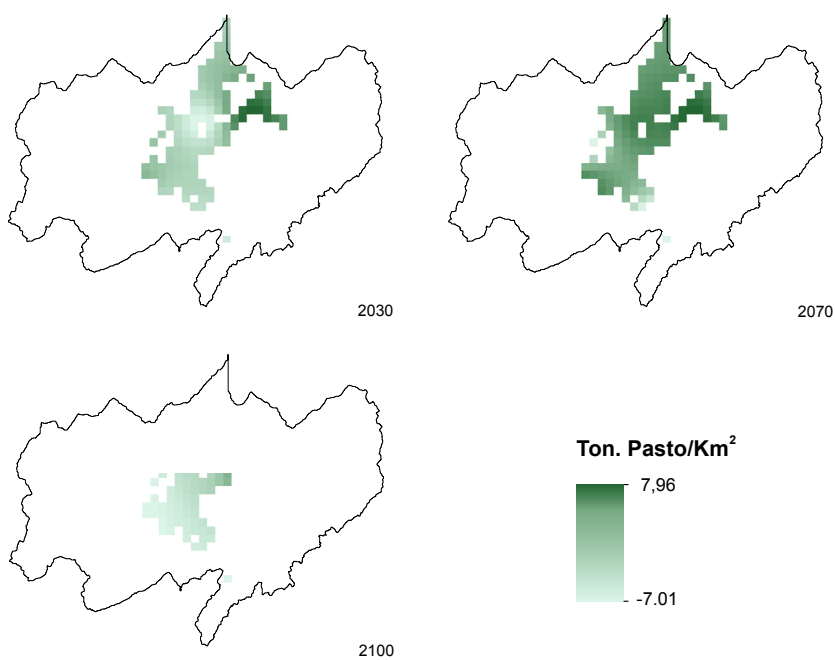
Fuente: Elaboración propia

■ **Figura 31.** Cambios en la producción de biomasa en pastos mejorados (*Lolium* spp.) para la cuenca de la laguna de Fúquene bajo el escenario A2, 2030-2100



Fuente: Elaboración propia

■ **Figura 32.** Cambios en la producción de biomasa en pastos mejorados (*Lolium* spp.) para la cuenca de la laguna de Fúquene bajo el escenario B1, 2030-2100



Fuente: Elaboración propia



5

Medidas de adaptación de cambio climático

5.1. Cuenca abastecedora del embalse del Guavio

La parte alta del costado occidental de la cuenca es una zona de alta importancia en rendimiento hídrico y en regulación hídrica. Actualmente, se encuentran coberturas de pajonales y matorrales de páramo, bosques naturales altoandinos y las áreas con rastrojos localizadas en las partes altas de las cuencas del río Batatas (aproximadamente 3.000 ha), Chorreras (aproximadamente 7.500 ha), Rucio (aproximadamente 1.500 ha) y Farallones (aproximadamente 10.000 ha). Muchos de estos predios son propiedad privada y por lo tanto sus dueños ejercen el dominio de estos predios y cierto grado de actividad productiva, lo que de alguna forma es una amenaza potencial para el servicio hidrológico en el largo plazo. Con relación al cambio climático, los análisis muestran una disminución del rendimiento hídrico y cambios en la temperatura que podrían favorecer la aptitud climática para cultivos de clima frío.

Otra amenaza importante en esta zona que podría exacerbarse con el cambio climático es la ocurrencia y severidad de los incendios forestales. En este sentido, la medida propuesta es el fortalecimiento de la gestión ambiental en esta zona, a través de la coordinación y fortalecimiento del Plan de Manejo Ambiental del Parque Nacional Natural (PNN) Chingaza. Esta medida por lo tanto debe considerar acciones de compra de predios, esquemas de pagos por servicios ambientales y fortalecimiento de las brigadas contra incendios.

Puede resultar útil considerar la compra de predios estratégicos que ya han sido identificados por Corpoguavio y la Unidad del PNN Chingaza con el fin de consolidar un sistema regional de áreas protegidas (SIRAP). El aporte para la compra y gestión y manejo de dichos predios puede provenir de Corpoguavio, Alcaldías, la Gobernación de Cundinamarca y Emgesa.

No obstante, es recomendable que la compra de predios esté acompañada de otro tipo de estrategias que involucren a las comunidades que habitan en estas zonas. Por ejemplo, la estructuración de esquemas de pago por servicios ambientales o la consolidación de un sistema de guardabosques locales. En este sentido, es importante considerar la participación de instituciones como el Humboldt, quienes tienen experiencia en propuestas de involucramiento de la comunidad en la gestión de áreas páramos. Es importante, asegurarse que en el proyecto sobre delimitación de páramos que adelanta el Instituto Humboldt con recursos del Fondo de Adaptación considere la problemática particular de esta zona.

En cuanto a la opción de esquemas de pagos por servicios ambientales, la estrategia consiste en compensar a algunos propietarios por el buen manejo (consciente o inconsciente) de los predios en la parte alta y buscar garantizar que dicho manejo se mantenga con el tiempo. Una segunda estrategia apunta a la reconversión de algunos predios que son sujeto de uso en ganadería o para pequeñas parcelas que se queman en época de verano para sembrar cultivos de pancoger. Posiblemente, algunos predios con pasturas mal manejadas se pueden intervenir y dejarlos en regeneración natural (aproximadamente

5.000 ha). A pesar de que la rentabilidad privada de estas actividades es muy baja, el daño ambiental es muy alto; involucrar a los propietarios de los predios resulta efectivo. No obstante un problema que generalmente surge de este tipo de instrumentos es poder garantizar los pagos en el largo plazo, o garantizar al propietario que puede volver a usar sus predios una vez se terminen los recursos de los pagos sin trámites administrativos ante las autoridades ambientales⁶. Esta acción podría ser implementada por los municipios del área, la Gobernación, Corpoguvio y Emgesa.

Una tercera acción de esta primera medida es el fortalecimiento de la brigada contra incendios que ya opera en el PNN Chingaza. Aquí deberían estar involucrados más activamente Corpoguvio, los municipios, la Gobernación de Cundinamarca y Emgesa.

La implementación de la medida consiste en alinear las voluntades políticas de la diferentes instituciones y citar a una mesa de trabajo a la Unidad del PNN Chingaza y a la Empresa de Acueducto de Bogotá para coordinar acciones de trabajo y fortalecimiento del Plan de Manejo Ambiental del PNN Chingaza, y garantizar los recursos necesarios para su implementación. La mayoría de estos recursos provendrían de Emgesa. Por una parte, Emgesa es la beneficiaria directa de dicha medida, y por otra parte, porque los recursos de los municipios, Gobernación y Corpoguvio para estas actividades son escasos, y muchos ya tienen destinación específica que no necesariamente coinciden con las áreas priorizadas en esta medida.

Por ejemplo, el artículo 111 de la ley 99 de 1993, modificado por el artículo 210 de la ley 1450 de 2011 y reglamentado por el decreto 953 del 17 de mayo del 2013 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), dispone que los departamentos y municipios deben dedicar un porcentaje no inferior al 1% de sus ingresos corrientes para la adquisición y mantenimiento de las áreas de importancia estratégica para la conservación de recursos hídricos, pero en zonas que surten de agua a los acueductos municipales, distritales y regionales, o para financiar esquemas de pago por servicios ambientales en dichas áreas. En el caso del Guavio, estas zonas no coinciden con la zona estratégica identificada en esta medida. Por otra parte, el Artículo 45 de la Ley 99 de 1993 plantea que las empresas generadoras de energía hidroeléctrica cuya potencia nominal instalada total supere los 10.000 kilovatios, transferirán el 6% de las ventas brutas de energía por generación propia. El 3% de estos recursos va a las corporaciones autónomas regionales que tengan jurisdicción en el área donde se encuentra localizada la cuenca hidrográfica y el embalse. En el caso del Guavio, cerca del 90% de los recursos del presupuesto de Corpoguvio provienen de las transferencias de Emgesa. El otro 3% se distribuye entre los municipios de la cuenca hidrográfica que surte el embalse (1,5%), y los municipios donde se encuentra el embalse (1,5%).

Sin embargo, estos recursos deben ser destinados exclusivamente a la protección del medio ambiente y a la defensa de la cuenca hidrográfica y del área de influencia del proyecto, y específicamente en ejecución de obras de acueductos urbanos y rurales, alcantarillados, tratamientos de aguas y manejo y disposición de desechos líquidos y sólidos. Estos recursos sólo podrán ser utilizados por los municipios en obras previstas en el plan de desarrollo municipal.

⁶ Esto último difícilmente se puede garantizar dada la legislación actual.



Por lo tanto, las acciones aquí delimitadas no coinciden con las acciones identificadas en la medida de adaptación en cuestión. Sin embargo, algunas de estas acciones son consideradas en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Guavio, lo que habilita el uso de algunos recursos por parte de Corpoguavio, las Alcaldías y la Gobernación en dichas acciones, pero como se mencionó anteriormente de una forma muy limitada.

El caso de la brigada contra incendios es diferente, Corpoguavio, las Alcaldías y la Gobernación tienen el deber de atender adecuadamente esta necesidad, por lo tanto no deberían existir limitaciones legales para la implementación inmediata de esta acción más allá de la voluntad política.

La participación de Emgesa en la implementación de la medida es fundamental, incluso, es una medida que podría ser considerada como inversión de esta empresa debido a que apunta a mantener el capital natural que le permite conservar los niveles de regulación hídrica en la cuenca. Otra institución involucrada es Corpoguavio, quien es la institución responsable del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Guavio. Por lo tanto, la voluntad política de estas dos instituciones es fundamental para dinamizar el fortalecimiento de la gestión ambiental en la parte alta de la cuenca, pero desafortunadamente en la mayoría de las ocasiones esta dinámica sólo se alcanza después de muchos años de trabajos impulsados por organizaciones sociales locales o por ONG con presencia en la zona. Así que sería importante considerar el apoyo algunas de estas organizaciones para promover la discusión sobre la necesidad de fortalecer la gestión ambiental de la parte alta de la cuenca.

Una segunda medida de adaptación en esta cuenca es el fomento de alternativas de producción agropecuaria sostenibles en la parte media y baja de la cuenca. En la parte media-baja es necesario mejorar el manejo de las pasturas (aproximadamente 35.000 ha). A pesar de que actualmente en la región la ganadería no es intensiva, las altas pendientes, suelos jóvenes, altas precipitaciones y un inadecuado manejo de las pasturas convierten a estas zonas en altamente susceptibles a procesos erosivos; limitaciones muy severas en el área del río Batatas la hacen inadecuadas para cultivos y restringen su uso agropecuario enormemente. No obstante los pobladores tienen pasturas que en su generalidad son mal manejadas. Igualmente se observan cultivos de caña panelera, yuca y frijol que son considerados uso inapropiado del suelo. El área de drenaje del río Rucio presenta una condición similar a la cuenca del río Baratas.

Para las áreas de drenaje ya mencionadas, se plantean programas con un adecuado manejo de éstas a través de rotación adecuada, uso de especies más resistentes al pisoteo, mezclas con leguminosas que aumenten la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, y algunas prácticas para el manejo del agua al interior de los predios. Estas acciones ayudarían a disminuir la erosión laminar en surcos, cárcavas y movimientos de remoción en masa, aumentar la capacidad de retención de agua en el suelo. Estas medidas también se deberían aplicar para las subcuencas farallones (25.000 ha), y a lo largo de la cuenca de Murca (aproximadamente 2.000 ha) y Chivor (aproximadamente 10.000 ha), donde la ganadería cobra mayor importancia.

Por otro lado, específicamente el área de drenaje del río Chorreras puede ser utilizada para cultivos agronómicos, pastos, lotes de árboles y pastoreo extensivo, ya que presenta pocas limitaciones. Hay actividad agrícola exclusivamente de subsistencia (papa y maíz), y sistema ganadero semi intensivo en un núcleo pequeño de fincas, y extensivo en el resto de la zona. A pesar de que es una zona más apta para cultivos y ganadería, se deben tener buenas prácticas ambientales y un buen manejo de pasturas.

Con respecto a las partes media y baja de las subcuencas Salinero y Muchindote, es necesario pensar en un plan de manejo adecuado de pasturas (aproximadamente 14.000 ha), que incluya rotación adecuada, mezclas con leguminosas, y prácticas para el manejo del agua al interior de los predios. No obstante, en las partes altas de las cuencas deben considerarse planes de manejo de predios bajo regeneración natural.

Para toda la cuenca, y en términos de actividad agropecuaria, el Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca (POMCA) propone el fomento de algunas actividades productivas agropecuarias sostenibles. En esta vía, Emgesa, Corpoguavio y Patrimonio Natural aunaron sus esfuerzos para fomentar procesos productivos sostenibles en ganadería, caña y café en la cuenca que contribuir a la protección del agua y la biodiversidad en las cuencas de los ríos Chorreras, Salinero y la quebrada Murca en la zona de ronda del embalse del Guavio, y consolidar alianzas entre el sector público, privado y organizaciones de la comunidad para el desarrollo empresarial comunitario.

Con esta iniciativa se pretenden implementar en el largo plazo prácticas agroecológicas y sostenibles en el manejo de praderas, tales como: mejoramiento de pastos, rotación y alternativas no convencionales de alimentación en la región como el ensilaje, la henificación y los bloques nutricionales elaborados por los mismos productores, mediante la implementación de diferentes herramientas de manejo del paisaje (silvopastoriles, agroforestales y cercas vivas), para reducir la presión sobre las rondas de los principales cuerpos de agua aportantes al embalse y en la ronda misma, en áreas identificadas como prioritarias para la conservación y provisión de bienes y servicios ambientales, y simultáneamente disminuir los niveles de sedimentación del embalse por factores antrópicos.

También argumentan que para la producción, como sanidad y medidas zoonos sanitarias, inseminación y mejoramiento genético, deberán ser abordados por otras instituciones de manera coordinada y complementaria. Por otro lado, mediante el establecimiento de sistemas agroforestales, se pretende fortalecer la producción de café de alta calidad en el corredor cafetero del embalse del Guavio, disminuyendo simultáneamente el aporte de sedimentos al embalse y consolidando una alternativa productiva para los caficultores. Corpoguavio y el Comité de Cafeteros de Cundinamarca, adelantan una primera fase del proceso. Se plantea igualmente el uso más eficiente de fuentes de energía en el proceso de elaboración de la panela.

No obstante, consideramos necesario complementar estas actividades de fomento con ensayos de dichas alternativas a nivel de fincas piloto de forma participativa con la comunidad.

Esta medida debe seguir siendo liderada por Emgesa y Corpoguavio pero se necesita una participación más activa de las Alcaldía y de la Gobernación. Estas últimas instituciones no tienen las barreras que se presentan en la primera medida para invertir parte de sus



recursos en el fomento de este tipo de prácticas que incluso ya son consideradas en los planes de desarrollo municipal y departamental. En el caso de Emgesa, los recursos podrían provenir del su programa de responsabilidad social.

Una tercera medida para esta cuenca es la consolidación de un plan de conservación para las cuencas el Gusano y Zaque. A pesar de su tamaño (aproximadamente 4.800 ha), estas cuencas hacen un aporte considerable de agua al caudal del río. Existen grandes limitaciones para la producción agropecuaria en estas cuencas. En estos dos casos, Corpoguavio propone desarrollar simultáneamente programas de educación y sensibilización ambiental y de capacitación tecnológica a la comunidad asentada en el área de interés, permitiendo cambios en patrones culturales, así como la protección y conservación de los recursos naturales. En el POMCA se propone específicamente para esta zona proyectos de saneamiento básico y manejo integrado de residuos sólidos, plantación de especies protectoras y productoras, manejo y conservación de suelos con vocación forestal. También se plantean la recuperación y conservación de corredores biológicos y de ecosistemas; la normatividad para el manejo, protección y conservación de las áreas de protección con prácticas de reforestación y regeneración natural (protección, regulación de suelos y protección de nichos ecológicos) y la implementación de obras geotécnicas para la mitigación, control y recuperación de las áreas degradadas. No obstante, no se observa una estrategia clara que permita a los pobladores locales beneficiarse económicamente de dichas acciones. Por lo tanto, la recomendación para la aplicación de esta medida de adaptación es la consideración de acciones de compra de predios, esquemas por pagos por servicios ambientales, sistemas locales de guardabosques y el fomento del turismo como una actividad sostenible para los pobladores locales en el caso específico de la cuenca el Gusano.

Las instituciones que deben liderar esta medida son Corpoguavio y Emgesa con una actividad limitada de las Alcaldías y la Gobernación de Cundinamarca.

Una cuarta medida es el fortalecimiento de los procesos de seguimiento y control a la actividad minera en las áreas de drenaje de Chivor y Murca. Actualmente existen explotaciones de hierro y cuarzo. En Chivor se encuentra desde la pequeña minería, hasta la minería en escala mayor con explotaciones a cielo abierto y también por túneles. Por lo tanto, es necesario aplicar todos los instrumentos legales para que la actividad minera acate la legislación ambiental vigente. Esta es una actividad que debe ser liderada y desarrollada por Corpoguavio.

5.2. Cuenca del río Fraile

La situación más preocupante de los escenarios climáticos proyectados en esta cuenca es el aumento de la precipitación y de los caudales del río en la época lluviosa, debido a que la topografía plana es altamente susceptible a inundaciones. Incluso los niveles actuales de los jarillones ya son muy elevados. A pesar de que durante los años 2010 y 2011 fue una época extraordinariamente lluviosa, los cultivos de caña de azúcar de la parte plana de la cuenca y contiguo al cauce del río sufrieron serias inundaciones.

Dada esta problemática, una primera medida es regulación hídrica en la parte media de la cuenca (aproximadamente 5.600 ha). En la parte media de la cuenca, donde la preci-

pitación aumentará, la capacidad de regulación hídrica es baja dada la presencia de pasturas para ganadería, lo que finalmente afectará los niveles del caudal del río durante las lluvias, llevando así a un aumento del riesgo de inundación de la parte plana de la cuenca. En este caso se puede pensar en regulación horaria y en regulación de flujos laterales, los cuales consisten en acciones tendientes a aumentar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y el tiempo de retención. En la parte media de la cuenca el manejo de suelos es primordial, por lo tanto es necesario considerar un programa de incorporación de materia orgánica al suelo, mínimas labores de remoción de suelo y coberturas de suelo permanentes. Esta medida debería ser liderada por la CVC con apoyo de las Alcaldías, la Gobernación del Valle del Cauca y el sector azucarero (ingenios y productores de caña de azúcar de la zona). Esta medida debe llegar en forma de programas y proyectos (públicos y privados) que incentiven a los productores rurales a tomar la decisión de cambiar las prácticas de uso del suelo.

Una segunda medida debe apuntar a la regulación de flujos de retorno, dado que la zona media-baja es la zona de recarga de los acuíferos subterráneos de la cuenca. En la parte media-baja de la cuenca es necesario pensar en un programa de reforestación con especies arbóreas y sistemas agroforestales de raíces profundas y propiciar el incremento de la macroporosidad del suelo. Esto último con el fin de favorecer la percolación hacia acuíferos de la zona. Esta medida debería ser liderada por la CVC con apoyo del sector azucarero.

Una tercera medida es el fortalecimiento de la gestión ambiental de la parte alta de la cuenca. Como la mayor parte de la composición de la parte alta en la cuenca es bosque sub andino, alto andino y páramo, es importante su conservación ya que existe una amenaza por la explotación maderera y siembra de cultivos. Una gran porción de la parte media-alta de la cuenca (aproximadamente 4.000 ha) está en pajonales y pasturas naturales que son utilizadas para pastoreo de animales, por esto, estas áreas debería destinarse a regeneración natural con el fin de consolidar la conservación de la parte alta. Por lo tanto, la compra de predios o esquemas de compensación serán necesarios para poder propiciar el cambio de uso del suelo. En este sentido, es importante fortalecer el proceso de implementación del plan manejo del Parque Natural Las Hermosas que limita con la parte alta de la cuenca, adoptado mediante resolución 039 del 26 enero de 2007 de la Unidad Administrativa de Parques Nacionales Naturales. Actualmente existe un proyecto vial que atraviesa el páramo de Las Hermosas la cual se constituye en una amenaza a las labores de conservación de la parte alta de la cuenca. La CVC y el sector azucarero deberían buscar acercamientos a la Unidad del Parque Nacional Natural Las Hermosas con el fin de fortalecer la gestión de la zona de amortiguamiento del Parque que está dentro de la cuenca el Fraile.

Una cuarta medida es la definición e implementación de zonas de amortiguamiento de inundaciones en la zona baja (aproximadamente 1.000 ha). Aunque esta última alternativa puede ser muy costosa puede resultar necesaria dado que los cambios en la parte media y alta de la cuenca posiblemente no resulten suficientes para evitar inundaciones de la zona baja en los periodos más lluviosos. Esta medida debería ser liderada por la CVC con apoyo del sector azucarero.

Una quinta medida es impulsar la formulación del POMCA. Si se formula el POMCA para esta cuenca entonces se facilitaría la inversión de la CVC, las Alcaldías y la Gobernación



del Valle del Cauca en proyectos que apunten a la conservación de la parte alta y al mejoramiento del manejo de cultivos en la parte media de la cuenca. El POMCA es una tarea liderada por la CVC pero es necesario que organizaciones sociales locales presionen por la celeridad de la formulación del POMCA. En este sentido, resulta importante apoyar a organizaciones locales para que cumplan con dicha tarea.

No obstante, es necesario señalar que actualmente existe una iniciativa liderada por la CVC y el sector azucarero para fomentar la conservación de la cuenca. Los ingenios azucareros han creado el fondo del agua y la sostenibilidad con aportes anuales de 6 mil millones de pesos para el apoyo y la ejecución de proyectos de conservación, educación y gestión ambiental para la conservación hídrica de la cuenca del río Fraile, estos proyectos constan de dos componentes: Recuperación del suelo y Fortalecimiento institucional y de la cultura ambiental. El primero se logra a través de procesos de reforestación, conservación y aislamiento de nacimientos de agua. El segundo fortalece la cultura ambiental a través del fortalecimiento de organizaciones comunitarias y el establecimiento de proyectos productivos ambientalmente sostenibles que propendan por la seguridad alimentaria.

5.3. Cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene

En términos generales, en cuanto a la distribución temporal, los resultados muestran un aumento de precipitación a través de todo el año pero en especial en las épocas más lluviosas. En cuanto a la distribución geográfica se observa una disminución del rendimiento hídrico en las partes más altas, donde está el páramo y el subpáramo, y un aumento en la parte media y baja de la cuenca. Esto conllevaría a que la situación de regulación hídrica de la cuenca sea más crítica en el futuro, ya que la lluvia se concentraría en los meses con mayor precipitación y en los lugares con la menor capacidad de regulación del agua. En este contexto, la propuesta del CONPES 3451 sobre optimización de la función de regulación hídrica del sistema lagunar (mejorar la operación de los embalses actuales y construcción de nuevos embalses) podría contribuir a mitigar este problema. Sin embargo, existe un comité cívico que se opone a dicha opción pues consideran que esto iría en detrimento del estado ecológico de la laguna⁷. Es importante que la CAR defina zonas de amortiguamiento de inundación en zonas colindantes a la laguna, verificando las escrituras de los predios comprometidos para aclarar las dudas que la comunidad ha expresado al respecto y para poder considerar la compra de terreno. Si no se construyen nuevos embalses en la parte alta-media de la cuenca, esta última medida pueda resultar necesaria para incrementar la capacidad de almacenamiento de agua, aumentando así la aptitud regulatoria que tiene la laguna.

Por lo tanto, una primera medida es hacer seguimiento y evaluación a la implementación del CONPES 3451 con el fin de determinar el cumplimiento de las acciones allí planteadas, y en especial a la referida con la optimización de la función de regulación hídrica del sistema lagunar (mejorar la operación de los embalses actuales y construcción de nuevos embalses) en las etapas I y II. Esta medida debe ser liderada por el DNP y replantear una estrategia que permita dinamizar el desarrollo de dichas medidas.

⁷ Comité cívico para la defensa de la laguna de Fúquene y su entorno geográfico, carta abierta a la Contraloría General de la Nación.

Una segunda medida es fomentar prácticas de rotación de cultivos con uso de abonos verdes, labranza mínima y siembra directa, acompañado de inclusión de especies de leguminosas que aumenten la fijación de nitrógeno al suelo, y una adecuada rotación del ganado. Esta medida tendrá igualmente un impacto sobre la reducción la erosión y por lo tanto en la cantidad de sedimentos que llega a la laguna. Se recomienda estudiar posibles alternativas productivas sostenibles y compatibles con la vocación de uso del suelo. Por esta razón, es necesario tener en cuenta las prácticas recomendadas por el proyecto Checua – PROCAS, que fue en sus inicios financiado por la entonces Agencia de Cooperación Alemana (GTZ) y que ahora es impulsado por la CAR en diferentes zonas de Cundinamarca. El fomento de dichas prácticas debe ser liderado por la CAR con el apoyo de las Alcaldías y de la Gobernación de Cundinamarca.

Una tercera medida es ofrecer alternativas productivas sostenibles a los dueños de los predios ubicados en el distrito de manejo Integrado Juaitoque en el municipio de Cucunubá. La CAR ha intentado regular el uso del suelo en la parte alta de Cucunubá con el Acuerdo 22 del 2009⁸, sin embargo, el nivel de aplicación de la medida ha sido bajo y los pobladores han protestado contra dicha medida. Por lo tanto, actualmente la aplicación de esta medida es casi nula, ya que los pobladores no han recibido alternativas productivas a los sistemas implementados hasta ese momento. Esta medida debería ser liderada por la CAR con el apoyo de Fedepapa, Alcaldías, Gobernación y buscando apoyo de cooperación internacional.

6

Recomendaciones de Política

Asegurar que los pobladores locales de zonas de amortiguación de áreas protegidas reciban parte de los beneficios de la conservación

Los planes de manejo ambiental de las áreas protegidas parecen estar bien formulados ya que identifican claramente las metas propuestas y las zonas estratégicas para lograr dichas metas. No obstante, la gestión de las zonas de amortiguamiento es insuficiente debido a los conflictos permanentes entre pobladores locales y autoridades ambientales. Esto último se debe a que la política de manejo sobre las áreas protegidas y las áreas de amortiguamiento está basada en mecanismos de comando y control y poco involucran a los pobladores locales, quienes asumen los costos de la conservación mientras que los beneficios son recibidos por otros usuarios. En este sentido, se necesitan instrumentos de política que involucren más a los pobladores locales y que les ofrezcan oportunidades de beneficiarse de la conservación mediante esquemas de pagos por servicios ambientales, sistemas de guardabosques locales o participación más activa en proyectos turísticos. Al mismo tiempo, estos instrumentos de política deben considerar a los beneficiarios de dicha

8 Para mayor información visitar la página web: <http://www.car.gov.co/?idcategoria=1535>.



conservación, quienes deberían asumir parte del costo de la conservación. Los ejemplos exitosos de involucramiento de población en la gestión de las áreas protegidas son pocos; es necesario que la sociedad en su conjunto asuma los costos, en los casos donde no existan beneficiarios directos o los beneficios sean bajos. El Decreto 953 de 2013 del MADS, considera la opción de pagos por servicios ambientales, pero exclusivamente para áreas de importancia estratégica para la conservación de recursos hídricos que surten de agua a los acueductos municipales, distritales y regionales. Por tal motivo es necesario discutir la conveniencia de que dicho decreto permita considerar otras áreas estratégicas diferentes a las mencionadas.

Generar alternativas productivas sostenibles

Es necesario generar mayor información sobre opciones productivas sostenibles a nivel de diferentes contextos ambientales y socioeconómicos. En este sentido, deberían destinarse mayores recursos desde el Gobierno central a la investigación sobre alternativas agropecuarias sostenibles, a través de Corpoica, universidades y centros de la investigación. Igualmente, es importante la validación de alternativas. En este sentido, es importante que muchas alternativas que han sido generadas en centros experimentales o en ciertas regiones sean validadas en diferentes contextos. Es importante destinar una mayor cantidad de recursos desde el Gobierno central a Corpoica, universidades, centros de investigación y ONG para adelantar procesos participativos de validación de alternativas productivas sostenibles.

Fomento de alternativas productivas sostenibles

Existen alternativas productivas sostenibles ya validadas en diferentes regiones pero no existen una política de fomento para dichas alternativas. En este caso es necesario que Finagro incorpore dentro de sus líneas de crédito dichas alternativas con tasas de interés más favorables para aquellas alternativas que favorezcan el cuidado de los recursos naturales.

Definir e implementar zonas de amortiguamiento de inundaciones

Las áreas de producción agropecuaria han llegado a zonas naturales de inundación, y por esto el riesgo de pérdidas de cultivo es más alto, sumado a la pérdida de regulación hídrica natural de la cuenca. Por esto es necesario delimitar áreas de amortiguación de inundaciones y tomar acciones para recuperar parte de esas áreas naturales de inundación. Aquí es importante asegurar recursos para la inversión en la recuperación de las zonas estratégicas identificadas dentro del convenio entre el Instituto Humboldt y el Fondo de Adaptación para la generación de insumos técnicos. Asimismo, se deben acatar las recomendaciones para la delimitación de páramos y humedales ubicados en las cuencas hidrográficas afectadas por el Fenómeno de la Niña 2010-2011. Para esto, se requieren que las áreas delimitadas se declaren como zonas de humedales o de protección especial por parte de las corporaciones autónomas regionales, se consideren zonas de alto riesgo de inundación y, posteriormente, se incluyan en los planes de ordenamiento territorial y planes de gestión de riesgo para que se restrinja su ocupación y uso.

Uso eficiente del agua

A pesar de que la Ley 373 de 1997 propende por un uso eficiente y ahorro del agua, la verdad es que todavía existe una problemática enorme frente al agua. En el caso agropecuario, el uso ineficiente del recurso sigue siendo una constante; los productores no están haciendo sus aplicaciones de riego teniendo en cuenta los requerimientos de agua de los cultivos.

En términos generales, Colombia tiene un marco de políticas adecuado para el manejo de recursos naturales. En el caso del agua se cuenta con la Ley 373 de 1997 que propende por un uso eficiente y ahorro del agua, y con la política nacional para la gestión integral del recurso hídrico (MADS, 2010). Esta última cuenta con un objetivo sobre caracterización, cuantificación y optimización de la demanda de agua en el país. Una estrategia de este objetivo es el uso eficiente y sostenible del agua y se orienta a fortalecer la implementación de procesos y tecnologías de ahorro, uso eficiente y sostenible entre los principales consumidores de agua en el país. La estrategia también busca promover el cambio de hábitos no sostenibles de uso del recurso hídrico entre los usuarios comunes del recurso hídrico.

Para lograr dicha estrategia se plantearon las siguientes líneas de acción:

- i) incrementar la utilización de tecnologías ahorradoras y de uso eficiente del agua;
- ii) adoptar programas de reducción de pérdidas de agua y de mejoramiento de la infraestructura obsoleta existente en los sistemas de abastecimiento de agua para cualquier uso;
- iii) incrementar la implementación de los programas de uso eficiente y ahorro de agua, en empresas de acueducto y alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios, priorizados en el Plan Hídrico Nacional; y
- iv) desarrollar e implementar mecanismos que promuevan cambios en hábitos de consumo no sostenibles en los usuarios del agua.

Sin embargo, a pesar de este marco normativo su implementación deja mucho que desear, ya que no se observa un mejoramiento de la infraestructura ni cambios en manejo más eficiente del agua en los distritos de riego. En este sentido, es necesaria una destinación de mayores recursos por parte del Gobierno central en la implementación de las políticas. Igualmente se requiere que la gestión de las corporaciones autónomas regionales sea más efectiva y más concertada con la población local.



7

Conclusiones

En el caso de las tres cuencas analizadas se cuenta con la información básica para realizar modelaciones hidrológicas, sin embargo, sería importante generar información más actualizada y con un mayor grado de detalle que permita mejorar aún más la calibración de los modelos y su desempeño. Para esto es necesario realizar trabajos de levantamiento de coberturas, tipos de suelo, caudales y niveles de sedimentación con mayor frecuencia y a una escala de resolución menor a la actual.

El impacto del cambio climático es diferenciado para cada cuenca y su impacto sobre la productividad depende, en gran medida, de la distribución espacial y temporal de las anomalías de temperatura, precipitación y de las características de la demanda de agua en la parte baja de la cuenca. Por ejemplo, la cuenca del río Fraile presenta un aumento de precipitación en la época de mayor demanda de riego del cultivo de caña de azúcar, mientras que en la cuenca del río Guavio, la precipitación disminuye en la época más seca, cuando existe un mayor déficit hídrico para la generación de energía.

La existencia de anomalías de precipitación intra e interanual realzarán la importancia de la regulación hídrica de las cuencas hidrográficas. Los usuarios del agua podrían verse más afectados por inviernos y veranos más pronunciados. En este sentido, la protección de las cuencas hidrográficas es una medida muy relevante como estrategia para recuperar la capacidad de regulación natural. Por lo tanto, las partes altas y medias de las cuencas que cumplen una función fundamental en la regulación hídrica deberían ser sujetas de manejos especiales. En el caso de las tres cuencas bajo análisis, las partes altas han sido declaradas áreas de protección especial, no obstante, es necesario que las medidas de los planes de manejo de dichas áreas se implementen en el terreno, ya que muchas de las actividades que actualmente se desarrollan en estas áreas son inapropiadas desde el punto de vista de la regulación hídrica y la generación de sedimentos.

En el caso de las cuencas de la laguna de Fúquene y el río Fraile, se tienen problemas de inundaciones en las partes bajas y, a pesar de que se tomen medidas de protección de la cuenca en la parte alta y media de la cuenca, será necesario contar con áreas de amortiguación de crecidas de los ríos en las partes bajas. Para esto se requieren estudios que definan y delimiten zonas de amortiguamiento, declaren zonas de alto riesgo por inundación y, posteriormente, sean incluidos en los planes de ordenamiento territorial y en los planes de gestión de riesgo para restringir su ocupación y uso.

A pesar de que las partes medias de las cuencas son de gran importancia para la regulación hídrica, una buena parte de estas áreas están bajo producción agropecuaria. En este sentido, el costo de restaurar estas áreas hacia ecosistemas naturales sería demasiado alto. Por lo tanto, es más recomendable promover sistemas agropecuarios sostenibles que permitan mantener los niveles de ingresos actuales y al mismo tiempo recuperar el estado de los suelos. La investigación, validación y fomento de alternativas agropecuarias sostenibles para las partes medias de las cuencas es todavía incipiente y, por lo tanto, es necesario promover políticas, programas y proyectos que fortalezcan estos procesos.

Bibliografía

- Acevedo-Aristizabal, L.A., 2009. Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Arnell, N.W., Liu, C., 2001. Hydrology and water resources, in: McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., White, K.S. (Eds.), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 191–233.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34, 73–89. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- Arnold, J.G., Williams, J.R., 1987. Validation of SWRRB—Simulator for Water Resources in Rural Basins. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 113, 243–256. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1987)113:2(243)
- Bekele, E.G., Knapp, H.V., 2010. Watershed Modeling to Assessing Impacts of Potential Climate Change on Water Supply Availability. *Water Resour. Manag.* 24, 3299–3320. doi:10.1007/s11269-010-9607-y
- BID-CEPAL-DNP. 2014. Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia - Síntesis. S. Calderón, G. Romero, A. Ordóñez, A. Álvarez, C. Ludeña, L. Sánchez, C. de Miguel, K. Martínez y M. Pereira (editores). Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 221 y Naciones Unidas, LC/L.3851, Washington D.C.
- Candela, L., Tamoh, K., Olivares, G., Gomez, M., 2012. Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. Application to the Siurana catchment (NE Spain). *Sci. Total Environ.* 440, 253–60. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.06.062
- CCFAS. 2013. Spatial Downscaling Methods: CCAFS-Climate Data Portal. Disponible en: <https://ccafs.cgiar.org/spatial-downscaling-methods>
- Chaplot, V., 2007. Water and soil resources response to rising levels of atmospheric CO₂ concentration and to changes in precipitation and air temperature. *J. Hydrol.* 337, 159–171. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.01.026
- Corporación Autónoma Regional de Guavio (CORPOGUAVIO) y Ecoforest Ltda., 2007. Diagnóstico y plan de ordenamiento y manejo de la cuenca aportante del río Guavio, fases diagnóstico, prospectiva y formulación – resumen ejecutivo.
- Ficklin, D.L., Luo, Y., Luedeling, E., Zhang, M., 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *J. Hydrol.* 374, 16–29. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.05.016
- Franczyk, J., Chang, H., 2009. The effects of climate change y urbanization on the runoff of the Rock Creek basin in the Portland metropolitan area, Oregon, USA. *Hydrol. Process.* 23, 805–815. doi:10.1002/hyp.7176
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G., 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions (No. 443), 07-WP. Ames, USA.
- Jha, M., Arnold, J.G., Gassman, P.W., Giorgi, F., Gu, R.R., 2006. Climate Change Sensitivity Assessment on Upper Mississippi River Basin Streamflows Using Swat. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 42, 997–1015. doi:10.1111/j.1752-1688.2006.tb04510.x
- Lu, E., Takle, E.S., Manoj, J., 2010. The Relationships between Climatic and Hydrological Changes in the Upper Mississippi River Basin: A SWAT and Multi-GCM Study. *J. Hydrometeorol.* 11, 437–451.
- Marshall, E., Randhir, T., 2008. Effect of climate change on watershed system: a regional analysis. *Clim. Change* 89, 263–280. doi:10.1007/s10584-007-9389-2
- Mengistu, D.T., Sorteberg, A., 2012. Sensitivity of SWAT simulated streamflow to climatic changes within the Eastern Nile River basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 391–407.
- NCAR. 2013. Modelos Climáticos Globales. National Center for Atmospheric Research (NCAR). Disponible en: <https://www.earthsystemgrid.org/home.htm>
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. College Station, USA.
- Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Raj Koirala, S., 2012. SWAT and Wavelet Analysis for Understanding the Climate Change Impact on Hydrologic Response. *Open J. Mod. Hydrol.* 02, 41–48. doi:10.4236/ojmh.2012.22006
- Ramirez-Villegas, J., Jarvis, A., 2010. Downscaling global circulation model outputs: the delta method (No. 1). Cali, Colombia.
- Schuol, J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R., Yang, H., 2008. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *J. Hydrol.* 352, 30–49. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.12.025
- Stone, M.C., Hotchkiss, R.H., Hubbard, C.M., Fontaine, T.A., Mearns, L.O., Arnold, J.G., 2001. Impacts of Climate Change on Missouri River Basin Water Yield. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37, 1119–1129. doi:10.1111/j.1752-1688.2001.tb03626.x
- Tucci, C.E.M., 2005. Modelos hidrológicos, 2nd ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, Brazil.



Anexos

Anexo I. Procedimiento metodológico de modelación con SWAT

- **Corrección del Modelo Digital de Elevación (MDE):** Se practica una corrección por llenado de sumideros puesto que es necesario encontrar las zonas donde no es posible que el agua drene hacia alguna de las direcciones, pues la dirección del flujo determina el sentido y orientación en que fluye el agua, de esta forma se puede observar cómo se acumula el flujo. Todas estas trayectorias de drenaje de agua se generan en función de las condiciones topográficas.
- **Delimitación de la cuenca:** A partir del MDE ya corregido se generan los límites de las cuencas, las subcuencas y sus respectivos drenajes.
- **Adaptación de la información requerida:** A las coberturas del suelo presentes en las cuencas se les realiza la relación de los códigos de las coberturas de la base de datos de SWAT y se modifican los valores del número de curva para cada uno de éstas, de acuerdo a la experiencia obtenida en el comportamiento de las coberturas en la Región de los Andes. Además, se organiza la información del estudio físico químico y en caso de que carezca de algunas variables necesarias para el modelo; se determinan sus valores utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool" (Saxton, 1986). Asimismo, estos valores son ajustados con base a estudios de suelos en regiones similares al área de estudio. Esto es necesario puesto que la herramienta de Saxton (1986) funciona mejor para suelos minerales con bajo contenido de materia orgánica (máximo 8%) y alta densidad aparente.
- Por otro lado, la información referente a las estaciones climatológicas se revisa para ver la posibilidad de generar datos faltantes sin que se crearan grandes distorsiones en los valores. Además, se seleccionan las estaciones que cuenten con la mejor información y que representen de la mejor manera el clima de las zonas de estudio. En general, este proceso es para seleccionar, depurar y adaptar la información básica requerida por la herramienta SWAT para realizar la modelación hidrológica.
- **Determinar las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH):** Para cada URH en la cuenca se obtiene el valor de los parámetros que determinan el balance hídrico: precipitación diaria, escorrentía, percolación, retención de agua en el suelo, evapotranspiración real y potencial y producción de agua al caudal. Estos parámetros son el resultado de la interacción uso / cobertura – tipo de suelo – pendiente – clima.
- **Calibración/Validación del modelo:** Los procesos de calibración y validación se realizan en forma mensual para un periodo de simulación, contando también para este periodo con datos de caudales aforados. Según lo propuesto en el manual de Calibración/Validación de SWAT es necesario dividir el rango de datos disponibles en dos grupos sin tener en cuenta el primer año, dado que dentro de la modelación se debe tener un tiempo para que la recarga de acuíferos se lleve a cabo. La calibración

de los parámetros más sensibles en los procesos modelados se realiza para el primer grupo y para la validación o evaluación de la capacidad del modelo se toma el rango correspondiente al segundo grupo.

El desempeño del modelo calibrado para simular el sistema hidrológico se evalúa a través del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe ampliamente utilizado para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos. Este índice varía desde $-\infty$ hasta 1, donde una eficiencia de 1 ($NS=1$) corresponde a un perfecto ajuste entre los datos del modelo y los observados. Una eficiencia de 0 ($NS=0$) indica que las predicciones del modelo son tan precisos como la media de los datos observados, mientras que una eficiencia menor que cero ($NS<0$) ocurre cuando la varianza residual (numerador de la expresión), es mayor que la varianza de los datos (denominador de la ecuación). Básicamente, cuanto más cercano a 1, más exactos son los resultados. Este índice se calcula con la siguiente ecuación:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (2)$$

Dónde:

Q_{sim_i} Caudal simulado en el periodo i

Q_{obs_i} Caudal observado en el periodo i

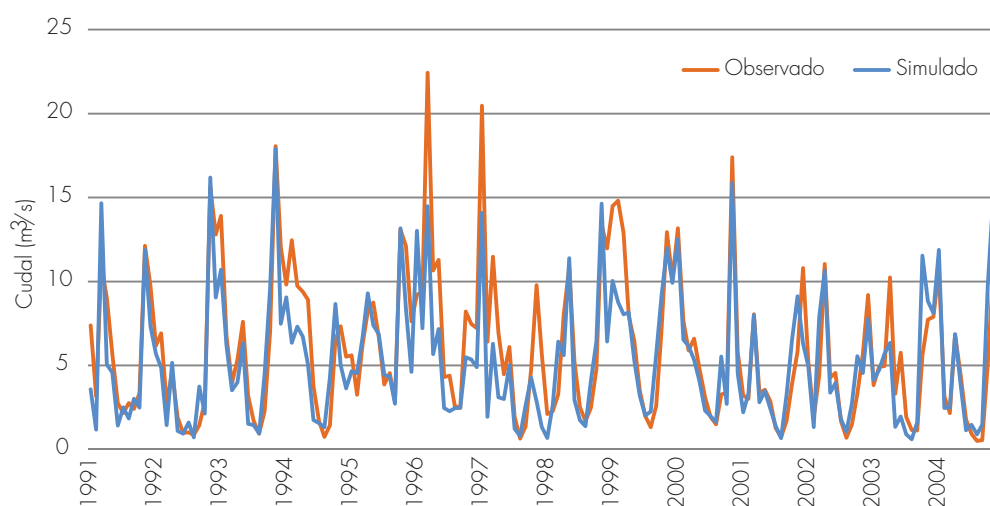
$\overline{Q_{obs}}$ Promedio de caudales observados en el periodo de análisis.

Para priorizar las URH de acuerdo a su impacto actual y potencial sobre el caudal, se realiza la priorización en producción de agua, logrando obtener una herramienta que permitirá definir las zonas posibles de intervención en las cuales sea posible hacer cambios en el uso del suelo de acuerdo a las prácticas que se estén llevando a cabo en las zonas y que influyencien sobre la producción de agua.

Anexo II. Línea base de la cuenca del río Fraile

El modelo hidrológico SWAT mostró una buena capacidad para simular la dinámica hidrológica de la cuenca. En general, los valores mensuales de caudal simulados y observados están altamente correlacionados y de acuerdo al índice de Nash-Sutcliffe las modelaciones son satisfactorias (teniendo en cuenta los rangos de evaluación de los resultados de este índice propuestos por Moriasi et al., 2007). En la figura 33 se comparan los caudales simulados versus observados; y en la tabla 4, se muestran los valores del índice de Nash-Sutcliffe y del caudal simulado para el sitio de El Líbano en la cuenca del río Fraile. Un valor del índice igual a 1 corresponde a un ajuste perfecto del caudal simulado con el observado.

Figura 33. Promedio mensual del caudal simulado vs. el observado en la cuenca del río Fraile, 1991-2004



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Grado de ajuste del modelo SWAT para el flujo mensual en la cuenca del río Fraile

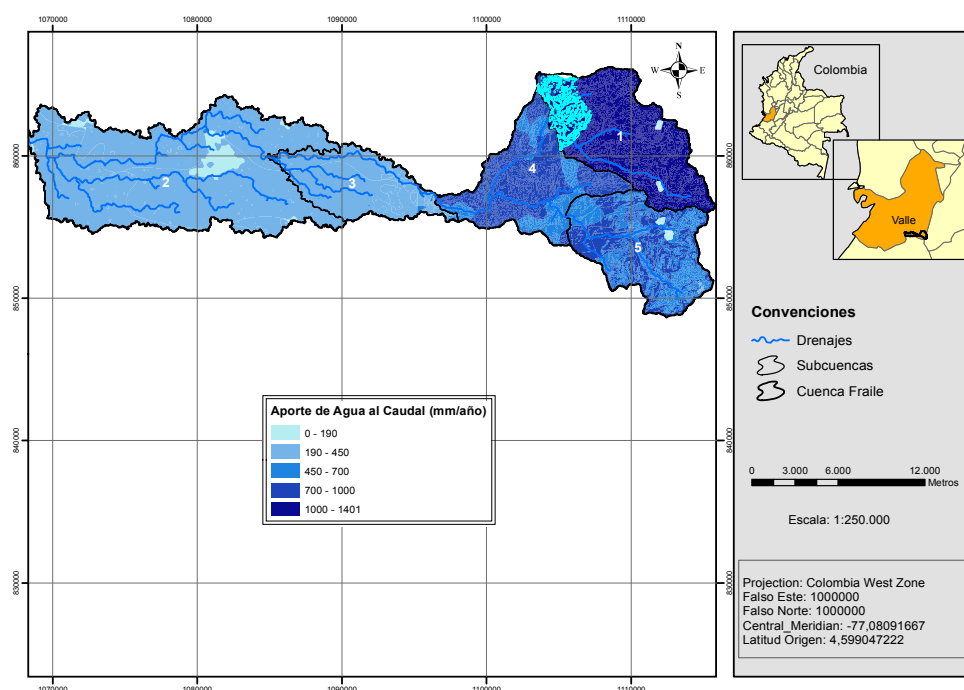
Coeficientes	Estación de aforo
	El Líbano
Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS)	0,70
Correlación (R)	0,85

Valores iguales a 1 indicarían un ajuste perfecto del caudal simulado con el observado.

Por otro lado, con los resultados del modelo por unidades de respuesta hidrológica (URH), se identificó la variación en términos de contribución de agua al caudal (mm) a través de la cuenca (figura 34). Con base en esta información se priorizaron las áreas con mayor

contribución de agua al caudal bajo las condiciones de línea base. En general, se puede apreciar que en la cuenca del río Fraile presenta la mayor producción de agua para el período simulado (1991-2004) en la parte alta y media de la cuenca. Dentro de estas áreas se identificaron coberturas de mosaico de cultivos y espacios naturales, pastos limpios de zona alta, vegetación de páramo y subpáramo y arbustos y matorrales. Estas URH identificadas espacialmente por ser “actualmente” importantes en la contribución de agua en la cuenca, son un elemento fundamental a la hora de priorizar y concretar medidas de adaptación a posibles cambios climáticos.

Figura 34. Producción anual promedio de agua por cada URH en la cuenca del río Fraile. 1991-2004



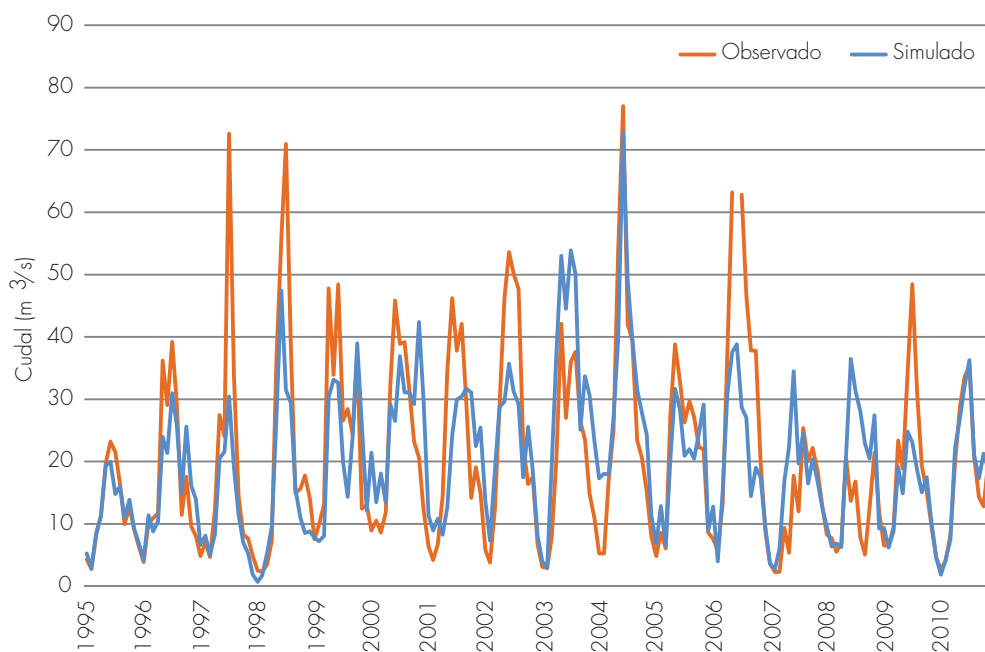
Fuente: Elaboración propia



Anexo III. Línea base de la cuenca abastecedora del embalse del Guavio

El modelo hidrológico SWAT mostró una buena capacidad para simular la dinámica hidrológica de la cuenca. En general los caudales simulados se ajustan bien a los caudales aforados en cada una de las estaciones, obteniendo ajustes razonables. La mayor diferencia se presenta en los caudales máximos para ciertos eventos de crecientes del río. En la figura 35 se comparan los caudales simulados vs. observados para el periodo de modelación (1995-2010) para la estación de aforo Puente Holguín en el río Guavio antes de llegar al embalse; y en la tabla 5 se muestran los valores del índice de Nash-Sutcliffe y del caudal simulado para varias estaciones.

■ **Figura 35.** Promedio mensual del caudal simulado vs. el observado en estaciones de la cuenca abastecedora del embalse del Guavio, 1995-2010



Fuente: Elaboración propia

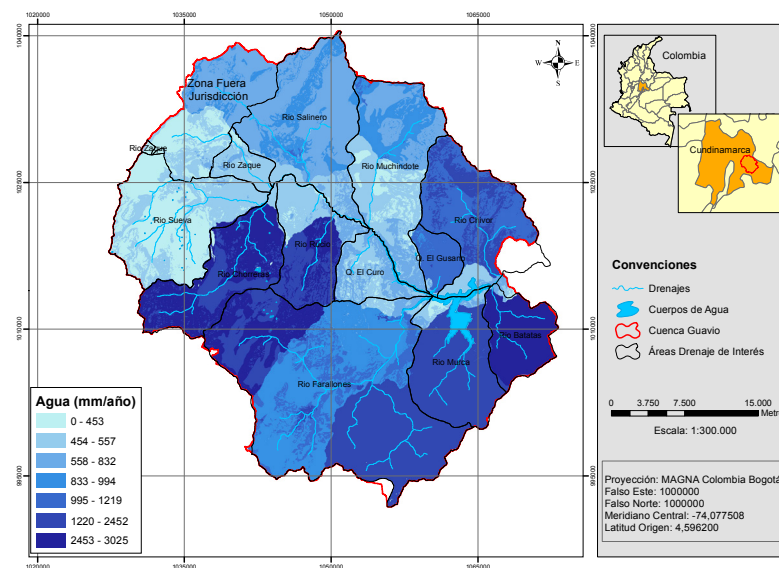
Tabla 5. Grado de ajuste del modelo SWAT para el flujo mensual en la cuenca abastecedora del embalse del Guavio

Coeficientes	Estación de aforo				
	Puente Holguín	Puente Miraflores	Puente Murca	La Boca	Puente Ubalá
Coefficiente de Nash-Sutcliffe (NS)	0,56	0,49	0,75	0,68	0,69
Correlación (R)	0,75	0,87	0,90	0,85	0,78

Valores iguales a 1 indicarían un ajuste perfecto del caudal simulado con el observado.

Con los resultados de la modelación hidrológica se identificó la contribución de agua al caudal por parte de cada una de las URH durante el período simulado (1991-2010). Con base en estos resultados hidrológicos se realizaron comparaciones entre las URH presentes en la cuenca identificando la variación en términos de contribución de agua al caudal (mm) a través de la cuenca (figura 36). Con base en esta información se han priorizado las áreas con mayor contribución de agua al caudal bajo las condiciones de línea base. Las coberturas con la más alta producción de agua (mm) para el período simulado corresponden a la vegetación de páramo, pastos enmalezados o enrastrados, bosque natural fragmentado, rastrojos y arbustales, pastos arbolados, entre otras.

■ **Figura 36.** Producción anual promedio de agua por cada URH en la cuenca abastecedora del embalse del Guavio, 1991-2010

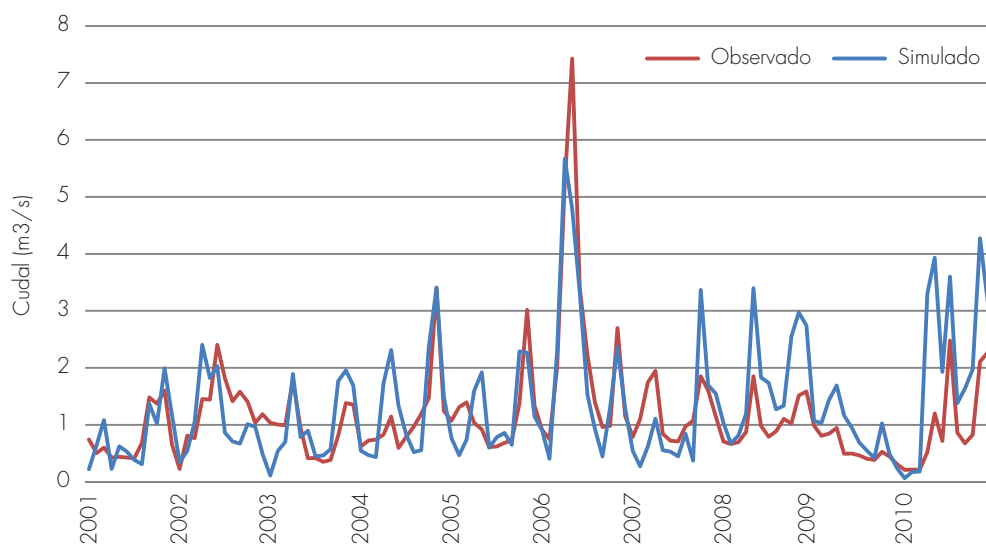


Fuente: Elaboración propia

Anexo IV. Línea base de la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene

El modelo hidrológico SWAT mostró una buena capacidad para simular la dinámica hidrológica de la cuenca y en general, los valores mensuales de caudal simulados y observados están altamente correlacionados y de acuerdo al índice de Nash-Sutcliffe las modelaciones son satisfactorias teniendo en cuenta que se presentan muchos vacíos de información en los registros de caudales para algunas de las estaciones seleccionadas en la calibración. En la figura 37 se presenta a manera de ejemplo la comparación de los caudales simulados vs. observados, y en la tabla 6, se muestran los valores del índice de Nash-Sutcliffe y del caudal simulado para todas las estaciones analizadas en la cuenca.

Figura 37. Promedio mensual del caudal simulado vs. el observado en estaciones de la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene, 2001-2010



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Grado de ajuste del modelo SWAT para el flujo mensual en la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene

Coeficientes	Estación de aforo				
	La Malilla	La Boyera	El Pino	Puente Colorado	Puente Balsa
Coefficiente de Nash-Sutcliffe (NS)	0,48	0,33	0,18	0,21	0,24
Correlación (R)	0,70	0,72	0,75	0,61	0,67

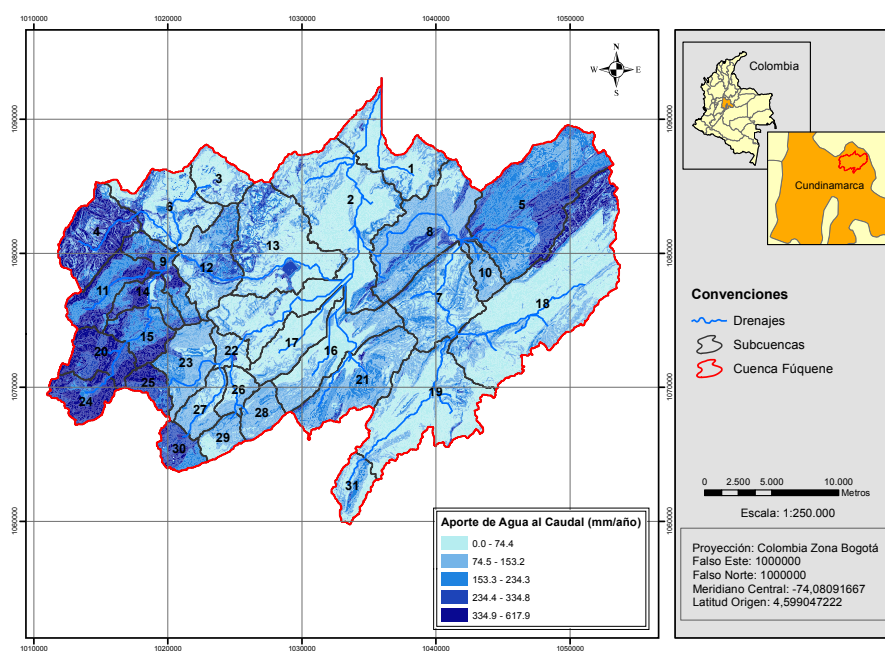
Valores iguales a 1 indicarían un ajuste perfecto del caudal simulado con el observado.

Por otro lado, con los resultados del modelo por URH, se identificó la variación en términos de contribución de agua al caudal (mm) a través de la cuenca como se ilustra en

la figura 38. Con base en esta información se han priorizado las áreas con mayor contribución de agua al caudal bajo las condiciones de línea. Es necesario aclarar que en la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene se encuentran un sistema de embalses que regulan el ciclo hidrológico, a través de la recolección y liberación por compuertas del agua. Dentro de este sistema se encuentran el embalse el Hato, laguna Palacio y laguna Cucunubá, entre otras y para la modelación realizada con SWAT no fue contemplado este sistema por falta de información que permitiese la configuración del mismo y por ende en ciertas subcuencas el ajuste del modelo no es bueno.

Con los resultados obtenidos, se puede apreciar que las zonas con la mayor producción de agua (mm) para el período simulado (2001-2010) corresponde por un lado a la parte alta del río Ubaté que nace en las montañas situadas al sudoeste del Valle, donde se encuentran sus dos afluentes principales: río Hato y Carmen de Carupa. En el otro extremo de la cuenca se encuentra otra área de un gran aporte de agua y es la del río Lenguazaque en la parte alta, el cual se une al río Ubaté desde el oriente en la parte baja de la cuenca antes de llegar a la laguna. Estas zonas se caracterizan por ser las áreas más alta de la cuenca, donde se presenta vegetación de páramo y donde la producción de caudal se encuentra muy ligada a la precipitación.

■ **Figura 38.** Producción anual promedio de agua por cada URH en la cuenca abastecedora de la laguna de Fúquene, 2001-2010



Fuente: Elaboración propia



Anexo V. Metodología para la estimación de los choques a la productividad en las cuencas del río Guavio y la laguna de Fúquene.

Guavio

Para estimar el impacto del cambio climático sobre la generación de energía, se empleó la siguiente formula:

$$\Delta GE = \sum_{m=1}^{12} \min(CPA_m, \Delta VA_m) \times FECE \quad (3)$$

Dónde:

CPAm: capacidad potencial de almacenamiento habitualmente no utilizada en el mes m, y se calcula a partir de la diferencia entre la capacidad máxima de almacenamiento del embalse y el valor promedio de almacenamiento para el mes m.

ΔVAm: cambio en el volumen de agua que ingresa en el embalse en el mes m debido al cambio climático.

FECE: factor de eficiencia de conversión de agua a energía. En este caso empleamos un factor de 370, que significa que se requieren 370 m³ de agua para generar un MWh.

Papa en Fúquene

En cuanto a papa, se estimó el impacto del cambio climático sobre la producción de papa a través del modelo AQUACROP. Se modeló la productividad de la papa para la línea base y para el año 2100 para los escenarios A1B, A2 y B1. Posteriormente se estimaron los cambios en productividad esperados para los escenarios de cambio climático con respecto a la línea base.

Leche en Fúquene

En cuanto a papa, se estimó el impacto del cambio climático sobre la producción de pasto a través del modelo APSIM. En cuanto a la estimación de la producción de leche, se utilizó la ecuación de Maff, 1975:

$$CMS = 0,025Pv + 0,1PLCG4 \quad (4)$$

Dónde:

CMS: consumo de materia seca

Pv: peso vivo del animal

PLCG4: producción de leche por animal con una corrección de 4% de grasa



IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA

RECURSO HÍDRICO

Publicaciones relacionadas:

- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Síntesis
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Transporte
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Ganadero
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Pesquero
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Forestal
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Especies Nativas y Biocomercio
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Costos Económicos de los Eventos Extremos
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Análisis Costo-Beneficio de Medidas de Adaptación



DNP

Departamento
Nacional
de Planeación



**TODOS POR UN
NUEVO PAÍS**
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN

