

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO EN EL PÁRAMO
SUMAPAZ Y PREDICCIÓN ANTE ESCENARIOS CLIMÁTICOS**

YULIETE MILENA LIZARAZO RINCÓN

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

BOGOTA D.C.

2018

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TUNJUELO EN EL PÁRAMO
SUMAPAZ Y PREDICCIÓN ANTE ESCENARIOS CLIMÁTICOS**

YULIETE MILENA LIZARAZO RINCÓN

Ingeniera Industrial

Trabajo presentado como requisito para optar al título de

Magister en Ciencias Ambientales

Director:

DAVID SANTIAGO PEÑA GARCÍA

Ing. Sanitario, M.Ing. Ambiental

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

BOGOTA D.C.

2018

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Pregunta de investigación.....	3
1.2. Hipótesis	3
2. ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Conceptualización del Modelo Numérico Hidrológico.....	4
2.2. Escenarios de cambio climático	7
2.2.1. Escenario E1 (CAR).....	7
2.2.2. Escenario E2 (IDEAM).....	8
2.2.3. Escenario E3 (OPTIMISTA)	9
3. OBJETIVOS	9
4. METODOLOGÍA.....	10
4.1. Área de estudio.....	10
4.2. Información de entrada del modelo.....	12
4.2.1. Precipitación.....	12
4.2.2. Temperatura	13
4.2.3. Evapotranspiración Potencial.....	14
4.3. Calibración y validación del modelo.....	14
4.4. Simulación de escenarios tendenciales de cambio climático y efecto sobre la respuesta hídrica de la cuenca	16
5. RESULTADOS	17
5.1. Hidrología de la cuenca.....	17
5.2. Calibración y Validación.....	19
5.3. Simulación de escenarios tendenciales de cambio climático	20
6. DISCUSIÓN	25
7. CONCLUSIONES.....	29
8. BIBLIOGRAFÍA	30
9. ANEXOS	35
9.1. Anexo 1. Formulación del modelo	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores entre los que oscilarán los cambios de las variables climatológicas en la región de Sumapaz de acuerdo a la CAR en los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con respecto al periodo de referencia.....	7
Tabla 2. Valores entre los que oscilarán los cambios de las variables climatológicas en el departamento de Cundinamarca de acuerdo al IDEAM en los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con respecto al periodo de referencia.	8
Tabla 3. Valores optimistas entre los que oscilarán los cambios de las variables climatológicas en el Páramo de Sumapaz en los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con respecto al periodo de referencia, basados en la elaboración propia.....	9
Tabla 4. Información sobre las estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio.....	13
Tabla 5. Información sobre las estaciones climatológicas en el estudio.....	13
Tabla 6. Valores entre los que oscilarán los cambios de las variables climatológicas de los cuatro escenarios en los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con respecto al periodo de referencia.....	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo interacción de las variables de entrada y salida del modelo.	5
Figura 2. Localización general y específica del área de estudio. Fuente base: Elaboración propia.	11
Figura 3. Estaciones de precipitación utilizadas para el estudio. Elaboración propia.	12
Figura 4. Estaciones de temperatura utilizadas para el estudio. Elaboración propia.	14
Figura 5. Ciclo anual de precipitación (mm) y temperatura °C promedio de las estaciones Bocagrande y La Regadera.	18
Figura 6. Valores promedio anual de las variables climatológicas en el periodo de referencia 1991-2014 de la cuenca alta del río Tunjuelo.	18
Figura 7. Correlación proceso de calibración del modelo Caudal observado real (Qr) vs Caudal estimado (Qe) para el periodo 2007-2012.	19
Figura 8. Correlación proceso de validación del modelo Caudal observado real (Qr) vs Caudal estimado (Qe) para el periodo 2013-2014.	20
Figura 9. Temperatura media anual proyectada bajo los escenarios E1, E2 y E3 del periodo 2017-2100.	21
Figura 10. Precipitación media anual proyectada bajo los escenarios E1, E2 y E3 del periodo 2017-2100.	21
Figura 11. Evapotranspiración real media anual proyectada bajo los escenarios E1, E2 y E3 del periodo 2017-2100.	23
Figura 12. Escorrentía media anual proyectada bajo los escenarios E1, E2 y E3 del periodo 2017-2100.	24

RESUMEN

Los páramos de Los Andes tropicales serían severamente afectados por las consecuencias del cambio climático, pues a medida que incrementa la reducción del área del páramo por el aumento de la temperatura, posiblemente hayan cambios significativos en la estacionalidad, la perturbación del flujo de la corriente y la precipitación, tendiendo un impacto directo en la cantidad y el tiempo de descarga, dependiendo del almacenamiento hidrológico de las cuencas de páramo (Buytaert *et al.*, 2006).

El páramo Sumapaz abarca aproximadamente el 43% del complejo de páramos más grande del mundo, el complejo de Cruz Verde – Sumapaz (Morales *et al.*, 2007). Una de las funciones principales es la regulación hídrica de las cuencas altas de los ríos Tunjuelo, Sumapaz, Blanco, Ariari, Guape, Duda y Cabrera como oferentes de servicios ecosistémicos para el Distrito Capital y los departamentos del Meta, Huila y Cundinamarca (parquesnacionales.gov.co). El río Tunjuelo nace en la laguna de Los Tunjos o Chisacá a 3,850 msnm, en las estribaciones del páramo Sumapaz, y desemboca en el río Bogotá a 2,540 msnm. Los principales tributarios de la cuenca alta que descienden del páramo Sumapaz constituyen el sistema de abastecimiento de agua potable de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá para la localidad de Usme.

Como objetivo principal de esta investigación se propuso estimar la oferta del recurso hídrico que se origina en dicho sistema y bajo diferentes escenarios climáticos, determinar los efectos hidrológicos sobre el rendimiento hídrico del ecosistema. El presente trabajo usa un modelo basado en el “procedimiento de contabilidad de aguas para efectuar el balance hídrico detallado según Holdridge” para la determinación del recurso hídrico. Se concluye que el área de estudio presenta una precipitación promedio mensual multianual de 1272.88 mm año⁻¹ y una temperatura promedio de 12.8 °C. El rendimiento actual de la cuenca es de 19.85 L s⁻¹ km⁻². Los resultados muestran una tendencia de incremento de las precipitaciones a lo largo del siglo respecto al periodo de referencia 1991-2014. Sin embargo los aumentos de temperatura harán que la evapotranspiración real se eleve y por tanto habrá una disminución significativa para el periodo 2095-2100, en los escenarios proyectados, del rendimiento hídrico para la cuenca alta del río Tunjuelo.

Palabras Clave: *Páramo Sumapaz, Modelación hidrológica, escenarios climáticos, Río Tunjuelo.*

ABSTRACT

The páramos of the tropical Andes were affected by the consequences of climate change, as the reduction in the area of the páramo increases due to the increase in temperature, there may be significant changes in the seasonality, the disturbance of the flow of the current and the precipitation, having a direct impact on the quantity and time of discharge, depending on the hydrological storage of the páramo basins (Buytaert *et al.*, 2006).

The páramo Sumapaz includes approximately 43 % of the bigger complex of páramos of the world, the complex of Cruz Verde – Sumapaz (Morales *et al.*, 2007). One of the main functions is the water regulation of the high basins of the rivers Tunjuelo, Sumapaz, Blanco, Ariari, Guape, Duda y Cabrera as a provider of ecosystem services for the Capital District and the departments of the Meta, Huila and Cundinamarca (parquesnacionales.gov.co). The Tunjuelo river is born in the lagoon The Tunjos or Chisacá to 3.850 msnm, in spurs of the Sumapaz páramo, and ends at the Bogota river to 2.540 msnm. The main tributaries of the river basin that descend from the Sumapaz páramo constituting the system of potable water supply of the Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá for the locality of Usme.

As primary target of this investigation seted out to consider the supply of the hydric resource that is originated in this system and under different climatic scenes, to determine the hidrologyc effect on the hydric yield of the ecosystem. The present work uses a model based on the “procedure of water accounting to carry out the detailed hydric balance according to Holdridge” for the determination of the hydric resource. One concludes that the study area presents/displays a precipitation multiannual monthly average of 1272,88 mm year⁻¹ and one temperature average of 12.8 °C. The present yield of the river basin is of 19.85 L s⁻¹ km⁻². The results show a tendency of increase of precipitations throughout the century with respect to the period of reference 1991-2014. Nevertheless the increases of temperature will cause that the real evapotranspiration rises and therefore will be a significant diminution for period 2095-2100, in the projected scenarios, of the hydric yield for the high river basin of the Tunjuelo river.

Keyword: *Sumapaz Páramo, Hydrological Modelling, Climate Change Scenarios, Tunjuelo River*

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un factor importante que afecta al equilibrio de las regiones de alta montaña y su régimen hidrológico, así como a los servicios prestados por estos ecosistemas (Sguerra *et al.*, 2011). Debido a que la extracción de agua subterránea es escasa y difícil, el agua superficial del páramo es el proveedor más importante para las ciudades (Buytaert *et al.*, 2004). La importancia de entender la oferta hídrica radica en que el páramo es el mayor abastecedor de agua de la región de Los Andes de Colombia, Venezuela y Ecuador y de partes extensas de las zonas interandinas, de las costas del Caribe y el Pacífico de Costa Rica y Panamá, hasta el desierto del norte de Perú (Malagón & Pulido, 2000; Poulénard, 2000). A pesar de su importancia como un suministrador de agua, la hidrología de los páramos es muy poco entendida (Buytaert *et al.*, 2012).

Los páramos de Los Andes tropicales serían severamente afectados por las consecuencias del retroceso de los glaciares por cambio climático, pues a medida que incrementa la reducción del área del páramo por el aumento de la temperatura, otros cambios climáticos importantes serían el aumento de la estacionalidad, la perturbación del flujo hídrico superficial y posiblemente una reducción en la precipitación, teniendo un impacto directo en la cantidad y el tiempo de descarga, dependiendo del almacenamiento hidrológico de las cuencas de páramo (Buytaert *et al.*, 2006). Además, la menor contribución del deshielo puede intensificar el cambio hacia un clima de páramo más seco, pero la contribución exacta de la escorrentía del glaciar a la escorrentía superficial total en los páramos está poco documentada (ídem).

De acuerdo al Estudio Nacional del agua [ENA] (IDEAM, 2010), muchos países se han centrado en estudiar los impactos sobre posibles cambios futuros en las precipitaciones y temperaturas como consecuencia del cambio global, y una de las conclusiones se refiere a la importancia de vincular lo que sucede en la actualidad con la gestión del agua, en términos de su déficit y/o exceso, debido a la variabilidad climática natural. En Ecuador, la menor contribución de agua de deshielo a la descarga de los ríos alterará la capacidad de los páramos y los acuíferos existentes para producir agua, dado que son, en parte, alimentados por el agua del deshielo glaciar (Favier *et al.*, 2008; Villacis *et al.*, 2009). En Perú, estudios de vulnerabilidad realizados en la región sugieren que, debido al retroceso glacial, el 60% de la población se verá afectada por la menor disponibilidad de agua y ocurrirá lo mismo con la energía hidroeléctrica (Chuquisengo Vasquez, 2004).

En el contexto nacional, Colombia es el país con mayor área de páramos, los cuales se encuentran en las tres cordilleras, siendo el páramo de Sumapaz el de mayor extensión (IGAC, 1977). El páramo Sumapaz contribuye con sus aguas a dos de las principales cuencas hidrográficas del país, las de los ríos Magdalena y Orinoco (Pedraza *et al.*, 2015). Estudios técnicos ambientales del Complejo de Páramos Cruz Verde-Sumapaz del IAvH y CEERCCO (2015), señalan que para el páramo Sumapaz, la cuenca del río Bogotá está representada en la subcuenca del **río Tunjuelo**, de importancia para los habitantes de Bogotá debido a su posición geográfica, extensión, valores paisajísticos, ambientales, y cuya oferta hídrica generada en esta región abastece de agua la parte sur del distrito capital.

Sin embargo, datos meteorológicos e hidrológicos son casi inexistentes, y la literatura científica es extremadamente escasa evidenciando un desconocimiento del cambio climático en páramos Colombianos. A partir de la perspectiva anterior, es preciso adelantar investigaciones que pretendan desarrollar modelos hidrológicos, ya que son herramientas útiles de simulación para la descripción del comportamiento hidrológico de cuencas y la predicción de impactos potenciales que derivan cambios en el régimen de descarga (Croke *et al.*, 2004).

Se sabe que el análisis de la información histórica, indica que las alteraciones que se producen en el régimen de lluvias en Colombia son causadas, en parte, por la variabilidad climática interanual, relacionada con el ciclo El Niño, La Niña - Oscilación del Sur, el cual ha sido causa de sequías y lluvias extremas en diferentes regiones geográficas del planeta (Montealegre, 2000). Así pues, el conjunto de modelos climáticos realizados hasta la fecha predicen que la temperatura subirá en promedio $3.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ hasta el final del siglo XXI (Buytaert *et al.* 2010). La variación de estas estimaciones se explica por la gran variabilidad local y las limitaciones en los modelos y datos que los alimentan. Buytaert también señala que se prevé que el aumento de temperatura al rango de alturas de los páramos sea mayor ($4.0 - 5.0^{\circ}\text{C}$), sin embargo, la variabilidad temporal y espacial a pequeña escala puede seguir siendo dominada por fluctuaciones naturales del sistema climático por fenómenos como el de El Niño.

Basados en lo anteriormente expuesto, el objetivo principal del presente trabajo fue generar un modelo numérico hidrológico de la cuenca alta del río Tunjuelo para simular y estimar los efectos hidrológicos del cambio climático sobre la oferta hídrica del ecosistema. Se realizó la calibración de los resultados del modelo comparándolos con los caudales provenientes de la captación de las plantas que componen el sistema sur de EAAB (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá) y escorrentía en el río

Tunjuelo. Se simuló con las proyecciones de cambio climático bajo tres escenarios: E1, E2 y E3. El escenario E1, está basado en las proyecciones climáticas de la CAR (Corporación Autónoma Regional), las cuales fueron seleccionadas para el presente estudio debido a su importancia como escenarios de cambio climático generados específicamente para el territorio de la CAR, donde se localiza la región del páramo Sumapaz. Para el escenario E2, se usaron las proyecciones de los resultados de los nuevos escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100, un ejercicio de más de dos años de trabajo por parte del IDEAM, que sigue las más recientes metodologías propuestas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su Quinto Informe de Reporte (2013). Finalmente el escenario E3, se elaboró con proyecciones optimistas realizando un ligero incremento a los valores mínimos presentados en el escenario E1 con el fin de comparar el comportamiento de estos escenarios.

1.1. Pregunta de investigación

- ¿Cuál es la dimensión del cambio en la oferta hídrica de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz, bajo diferentes escenarios de cambio de climático?

1.2. Hipótesis

Para dar respuesta a la pregunta de investigación planteada, se han propuesto las siguientes hipótesis alternativas:

- a. Si el Cambio Climático eleva las tasas de evaporación y disminuyen las tasas de precipitación, entonces, significará una reducción en la oferta superficial en la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz.
- b. Los escenarios de cambio climático en la región del páramo Sumapaz afectarán el funcionamiento hidrológico del páramo y por tanto su servicio ecosistémico de abastecimiento de agua para el Sistema La Regadera.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Conceptualización del Modelo Numérico Hidrológico

Se desarrolló un modelo numérico computacional basado en el “procedimiento de contabilidad de aguas para efectuar el balance hídrico detallado según Holdridge” (Ewel y Madriz, 1968) (Burbano, Velásquez, Carmona, 2008). Éste es el resultado de la combinación del sistema de contabilidad por meses del balance hídrico propuesto por Thornthwaite (tabulación de suma y resta que relaciona la precipitación mensual con la evapotranspiración potencial, basada en la temperatura media mensual a través del año para calcular la cantidad de agua en el suelo, el escurrimiento y la deficiencia o exceso de humedad durante el curso del año promedio para cualquier estación que tiene datos de temperatura y precipitación), con ciertas modificaciones (se utiliza las formulas derivadas por Holdridge para el cálculo de la evapotranspiración potencial para llegar a una aproximación más realista del balance hídrico) (Ewel y Madriz 1968).

Partiendo de las siguientes premisas, se realizaron los cálculos de las variables evapotranspiración potencial (*PET*), evapotranspiración real (*RET*), humedad del suelo, exceso y déficit de agua y escorrentía:

- a. Los cálculos se inician en el mes siguiente al que la suma del exceso de agua acumulada da igual o superior a la capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo.
- b. La **capacidad máxima de almacenamiento del suelo (*Cmxs*)**, se considera igual al 5.0% de la precipitación total anual para las zonas de vida del piso Montano.
- c. La **reducción de agua del suelo (*Ras*)**, se asume que solo el 65% de la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo se evacúa. El 35% restante será la reserva del suelo.

Para el presente estudio, para el cálculo de la **evapotranspiración potencial (*PET*)** se empleó las fórmulas derivadas por Hamon, con base en la temperatura media mensual, dado que la *PET* se calcula únicamente a partir del número de horas de luz solar, la presión de saturación y la temperatura, información disponible de la zona de estudio:

PET en mm día^{-1} $PET = 29.8Hr_{\text{día}} \frac{e_{\text{sat}}(T)}{(T+273.2)}$, donde $Hr_{\text{día}}$ es el número de horas de luz solar al día, $e_{\text{sat}}(T)$ es la presión de vapor de saturación (kPa) a la temperatura de la superficie del aire T ($^{\circ}\text{C}$). La $e_{\text{sat}}(T)$ en Pa se calculó mediante la fórmula $e_{\text{sat}} = 611 * \exp\left(\frac{17.27T}{237.3+T}\right)$ (Shaw y Riha, 2011).

La Figura 1, muestra la interrelación de las variables de entrada del modelo (temperatura T , precipitación P y evapotranspiración potencial ETP) y las premisas anteriormente mencionadas (capacidad máxima de almacenamiento del suelo $Cmxs$ y reserva de agua del suelo Ras), para el cálculo de la evapotranspiración real RET , los excesos de agua Ea , la recarga o reducción de agua en el suelo Ras^{+} y Ras^{-} , la humedad en el suelo al final del mes Hs y los déficit de humedad y precipitación presentados durante el curso del año Dh y Dp .

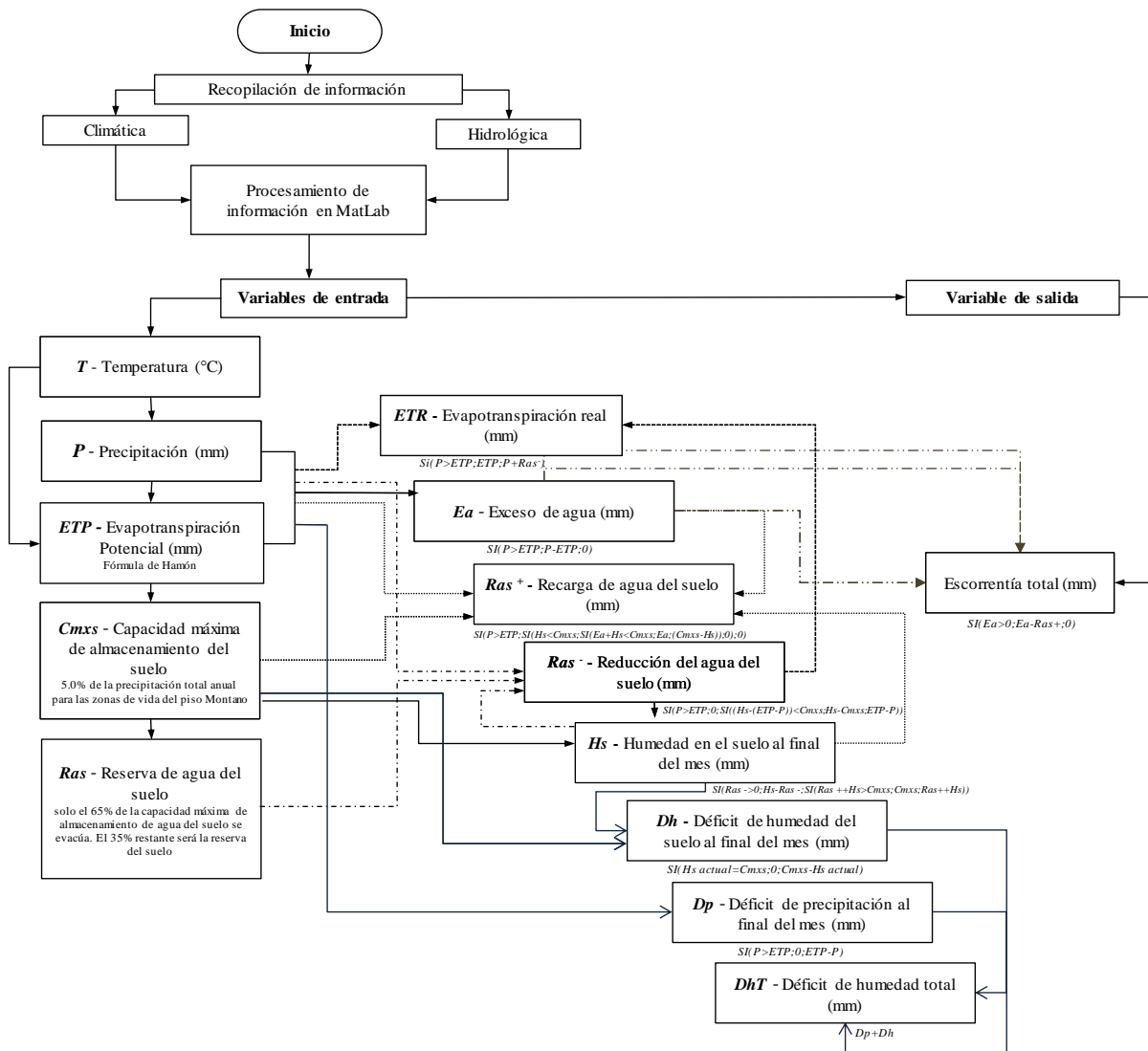


Figura 1. Diagrama de flujo interacción de las variables de entrada y salida del modelo.

La **evapotranspiración real (RET)**, expresada en mm, se calculó teniendo en cuenta que si la precipitación es mayor a la evapotranspiración potencial, entonces, **RET** será igual al valor de la potencial. Si no, tomará el valor de la suma de la precipitación más la reducción del agua del suelo.

Después, la **humedad en el suelo al final del mes**, se calculó considerando que si se presentó reducción de agua en el suelo, entonces, hay que restar la humedad del suelo al final del mes menos la reducción del agua. De lo contrario, se hará la suma entre la recarga del suelo del mes actual y la humedad del suelo del mes anterior siempre y cuando este valor No exceda el valor de la capacidad máxima de los suelos.

Así mismo, el **exceso de agua** se estimó teniendo en cuenta que para todos aquellos meses en que la precipitación excede la evapotranspiración potencial, entonces, el exceso de agua será igual a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, si no, no habrá para ese mes exceso de agua.

Así pues, la **reducción de agua del suelo** se calculó analizando que solo habrá reducción de agua en el suelo para todos aquellos meses en los que la precipitación es menor a la evapotranspiración potencial. Si esta diferencia y la humedad del suelo al final del mes anterior es menor a la capacidad máxima de reducción de agua en el suelo, entonces, la recarga del suelo de ese mes estará dada por la humedad del suelo al final del mes anterior menos la capacidad máxima de reducción de agua en el suelo. De lo contrario, se dejará el valor de **PET-P**.

Habrà agua para **escorrentía** sólo si el suelo se completa a capacidad de campo, lo cual puede requerir desde uno hasta varios meses. Si en el mes se presentó exceso de agua, entonces, la es correntía será el la diferencia entre el exceso de agua y la recarga de agua del suelo. La escorrentía total (mm mes^{-1}), se convierte en **caudal** ($\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$) correspondiente a cada mes, al pasar los milímetros mm a metros, éstos a su vez se multiplican por el área (m^2) correspondiente a la cuenca alta del río Tunjuelo.

Finalmente, en el anexo 1 se presenta el detalle de las fórmulas empleadas para la determinación de los anteriores variables. El modelo generado se calibró con información del periodo 2007-2012,

luego fue validado con información del periodo 2013-2014. Finalmente se realizaron proyecciones en diferentes escenarios climáticos.

2.2. Escenarios de cambio climático

A continuación se describen las proyecciones de los cambios en las variables climatológicas que fueron usados en el presente estudio, denominados Escenarios E1, E2 y E3; de acuerdo a la CAR, los escenarios proyectados por el IDEAM y un escenario proveniente de la elaboración propia.

2.2.1. Escenario E1 (CAR)

El escenario E1, está basado en las proyecciones climáticas de la CAR (Corporación Autónoma Regional), las cuales fueron seleccionadas para el presente estudio debido a su importancia como escenarios de cambio climático generados específicamente para el territorio de la CAR, donde se localiza la región del páramo Sumapaz. Adicional, en la elaboración de los escenarios de cambio climático se tuvieron en cuenta las consideraciones incluidas por el IPCC-TGICA (1999) y se calcularon las normas climáticas para cada periodo bajo los escenarios A2 y B2 descritos en el informe especial sobre escenarios de emisiones del IPCC (2000).

Según los escenarios elaborados para el clima futuro en la región de la CAR realizados por Pabón (2011), durante el siglo XXI los cambios se irán haciendo cada vez más notorios. En el periodo 2011-2040 el clima será más cálido y lluvioso que lo registrado en el periodo de referencia 1971-2000 excepto la zona alta que cubre el altiplano y altitudes mayores en donde la precipitación estaría por debajo. En la tabla 1, se describe la oscilación de los valores de las variables climatológicas para la región del Sumapaz:

Tabla 1. Valores entre los que oscilarán los cambios de las variables climatológicas en la región de Sumapaz de acuerdo a la CAR en los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con respecto al periodo de referencia.

TABLA POR PERIODOS / ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 2017-2100 PABÓN-CAR					
2017-2040		2041-2070		2071-2100	
Cambio de Temperatura media	Cambio de Precipitación	Cambio de Temperatura media	Cambio de Precipitación	Cambio de Temperatura media	Cambio de Precipitación
1.0°C	Aumento de más del 10.0%	1.0°C	Aumento generalizado de más del 10%	Entre 3 y 4°C	Reducción entre el 10-30%; aumento de más del 10% en la parte alta y media.

En el periodo 2041- 2070 las condiciones serian aún más calurosas (temperaturas anuales en 2.0 - 3.0°C por encima de los periodos de referencia) y el aumento de la precipitación cubriría gran parte de la región especialmente en la parte alta. En el 2071-2100 el calentamiento alcanzaría los 4.0 °C y el aumento de la precipitación cubriría la región con aumentos de más del 10% de los volúmenes anuales del clima de referencia.

2.2.2. Escenario E2 (IDEAM)

La elaboración de los escenarios de Cambio Climático para Colombia (2011 - 2100), siguió las nuevas metodologías generadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en su Quinto Informe de Evaluación (AR5) del año 2013. Por lo tanto, de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (IDEAM *et al.*, 2015), se tomaron los nuevos Escenarios de Cambio Climático 2011-2100, para las variables de precipitación y temperatura media para el departamento de Cundinamarca. La tabla 2 muestra los escenarios proyectados para los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

Tabla 2. Valores entre los que oscilarán los cambios de las variables climatológicas en el departamento de Cundinamarca de acuerdo al IDEAM en los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con respecto al periodo de referencia.

TABLA POR PERIODOS / ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 2017-2100 IDEAM					
2017-2040		2041-2070		2071-2100	
Cambio de Temperatura media	Cambio de Precipitación	Cambio de Temperatura media	Cambio de Precipitación	Cambio de Temperatura media	Cambio de Precipitación
0.8°C	7.99%	1.5°C	9.00%	2.3°C	8.21%

El IDEAM no cuenta con proyecciones climatológicas locales como las presentadas por la CAR para la región de Sumapaz. Sin embargo, se utilizaron los cambios proyectados para todo el departamento de Cundinamarca. Para el fin de siglo se podrá presentar elevaciones de temperatura promedio de 2.3°C adicionales a los valores actuales. Asimismo, los principales aumentos de precipitación podrán presentarse con valores de entre 8% y 9% adicionales a los valores actuales.

2.2.3. Escenario E3 (OPTIMISTA)

Para la elaboración propia de este escenario se tomó como referencia las proyecciones del escenario E1 de la CAR, a los cuales se les proyectó un incremento optimista promedio de 3% para la variable precipitación y una disminución promedio de 0.83°C para la variable temperatura. Dado que el escenario E1 de la CAR es ambiguo (dice mayor a 10%), se tomó un escenario en el cual, en efecto se asignaron unos valores ligeramente mayores a aquel valor mínimo reportado por Pabón (2011). Así pues, ya que en los otros modelos se corrieron los valores mínimos, era también relevante hacer un análisis de cómo sería el comportamiento de las variables frente a unos valores ligeramente incrementados. La tabla 3 muestra los escenarios proyectados para los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

Tabla 3. Valores optimistas entre los que oscilarán los cambios de las variables climatológicas en el Páramo de Sumapaz en los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con respecto al periodo de referencia, basados en la elaboración propia.

TABLA POR PERIODOS / ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 2017-2100 OPTIMISTAS					
2017-2040		2041-2070		2071-2100	
Cambio de Temperatura media	Cambio de Precipitación	Cambio de Temperatura media	Cambio de Precipitación	Cambio de Temperatura media	Cambio de Precipitación
0.50°C	12.5%	1.0C	13.0%	3.0°C	13.5%

3. OBJETIVOS

a. Objetivo General

Modelar el funcionamiento hidrológico de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz para determinar los efectos hidrológicos del cambio climático sobre la oferta hídrica.

b. Objetivos Específicos

- Generar el modelo numérico hidrológico de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz para determinar los efectos hidrológicos del cambio climático sobre la Oferta Hídrica del ecosistema.

- Validar los resultados del modelo comparándolos con los caudales provenientes de los datos registrados en las estaciones aledañas a la zona.
- Simular las condiciones actuales y futuras de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz, bajo escenarios del IDEAM, la CAR y uno de elaboración propia.

4. METODOLOGÍA

4.1. Área de estudio

La cuenca del río Tunjuelo, Figura 1, hace parte integral de la gran cuenca del río Bogotá, localizada al sur oriente de Bogotá y parte de Soacha (Universidad Nacional de Colombia [UNC], 2007). El río Tunjuelo nace en la laguna de Los Tunjos o Chisacá a 3,850 msnm, en las estribaciones del páramo Sumapaz hasta la confluencia con el río Bogotá a 2,540 msnm. Esta cuenca se encuentra dentro de las coordenadas Este 983069.028 m - 1002396 m y Norte 1004395.939 m - 963814.993 m, en el Sistema de Referencia Proyectado Colombia Zona Bogotá. (Rivera, 2010). De acuerdo con el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá (CAR, 2006), la cuenca del río Tunjuelo es de orden 3 según la clasificación de Horton y abarca el 7% del área total de la cuenca del río Bogotá. Cuenta con un área de drenaje de 41,427 ha, con una longitud en su cauce principal de aproximadamente 73 km (CSHB, 2008); el río Tunjuelo drena hacia el río Bogotá, siendo la subcuenca de mayor extensión (390 km²) (CAR, 2009).

La cuenca alta del río Tunjuelo, Figura 1, que va desde el nacimiento del río hasta la presa La Regadera, cuenta con un área de 14,499 ha y representa cerca del 35% del área total de su cuenca. En la cuenca, compuesta por las subcuencas de los afluentes Chisacá, Mugroso y Curubital, existen los embalses Chisacá y La Regadera administrados por el EAAB y creados con fines de abastecimiento de agua potable (SDA, 2015). El Embalse Chisacá, con un volumen total de 6.81 hm³, se localiza en la confluencia del río que lleva su mismo nombre con el río Mugroso. El Embalse La Regadera, con un volumen total de 3.73 hm³, se localiza aguas abajo de la confluencia de los ríos Curubital y Chisacá. Estos dos embalses permiten obtener un caudal cercano a 1.0 m³ s⁻¹

para el abastecimiento de agua conducido a las plantas de potabilización La Laguna y Vitelma (INGETEC, 2002).

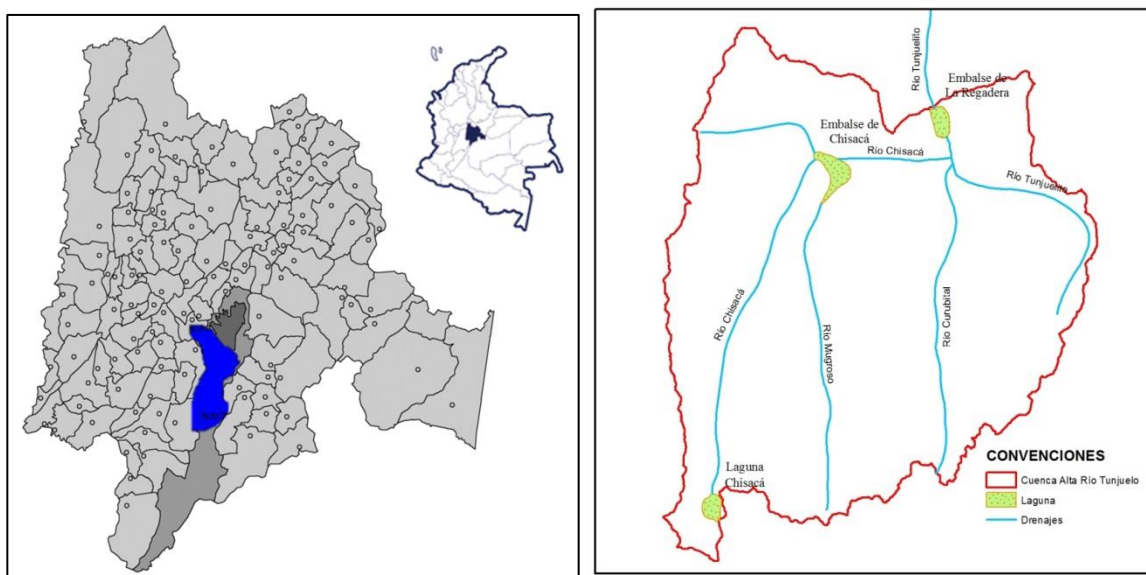


Figura 2. Localización general y específica del área de estudio. Fuente base: Elaboración propia.

Las condiciones hidroclimáticas en esta cuenca son: de acuerdo al POMCA (2007), en la cuenca alta del río Tunjuelo, la temperatura media anual (sobre los 3800 msnm) alcanza valores de hasta 7.0 °C. Con frecuencia, las temperaturas máximas que se observan a comienzos de la tarde y pueden llegar a los 14.0 - 15.0 °C en la parte alta. Las temperaturas mínimas, por lo general, alcanzan valores de 4.0 - 5.0 °C, aunque eventualmente (sobre todo en enero y febrero) pueden presentarse valores menores de 0 °C en las zonas altas. Hasta el sitio de La Regadera, la cuenca del Río Tunjuelo pertenece al piso térmico de páramo y entre La Regadera y el Río Bogotá, al piso térmico frío (INGETEC, 2002).

Por su ubicación, la parte alta de la cuenca presenta un régimen de lluvias típico de los Llanos Orientales Colombianos, el cual es monomodal con máximas precipitaciones en los meses de junio a agosto. La precipitación media anual multianual en la zona del páramo de la cuenca descende de 1,122 mm en la estación Los Tunjos – Chisacá a 1,002 mm en la estación La Regadera. Se presenta un periodo seco entre diciembre y marzo cuando ocurre menos del 20% de la precipitación anual y un periodo húmedo largo entre abril y noviembre. Las precipitaciones máximas medias mensuales ocurren en mayo y las mínimas en Enero (EAAB, 2005).

4.2. Información de entrada del modelo

La información de entrada del modelo utilizado para el análisis de la cuenca, fueron los datos de precipitación, de temperatura y evapotranspiración potencial de la cuenca alta del río Tunjuelo. Algunos de estos datos fueron suministrados por las bases de datos de las entidades IDEAM, EAAB y CAR. Se utilizaron datos mensuales de las estaciones que estuvieran localizadas dentro del área la cuenca. Una vez efectuado el análisis de la información disponible, se seleccionó un total de 8 estaciones pluviométricas y 6 climatológicas. A continuación se describen las variables de entrada del modelo:

4.2.1. Precipitación

La Tabla 4 y la Figura 3 muestran las estaciones pluviométricas usadas para los datos de precipitación de la cuenca del río Tunjuelo. Los datos faltantes fueron estimados mediante el método de la razón normal (Monsalve, 2009), que emplea la razón de los valores normales de las estaciones próximas a la estación que se desea calcular. Con la matriz completa de valores de precipitación para cada estación se realizó con la ayuda del software MatLab una interpolación lineal de los datos para estimar promedios mensuales multianuales para la cuenca. Adicional, se realizó un análisis de sequía y mayor humedad utilizando el método estadístico estructurado a través de series de tiempo (Pérez de León, 2012), en las estaciones Bocagrande y La Regadera. Los resultados generados fueron aplicados a la interpolación lineal de datos presentes y a las series de datos de precipitación proyectadas de los escenarios de cambio climático E1, E2 y E3.

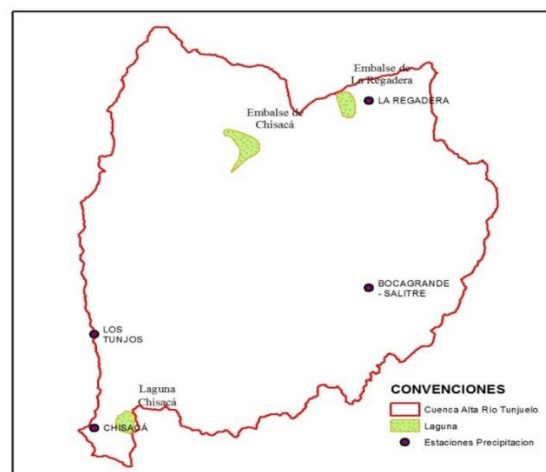


Figura 3. Estaciones de precipitación utilizadas para el estudio. Elaboración propia.

Tabla 4. Información sobre las estaciones pluviométricas utilizadas en el estudio.

Entidad	Nombre	Estaciones Precipitación				Localización	
		Fecha de Inicio	Fecha Final	Altura (msnm)	Cuenca	Coordenadas	
						Latitud	Longitud
IDEAM	SENA K 30	1993	2004	2553	R. Tunjuelo	4°35'43.3"N	74°6'42.6"W
EAAB	LOS TUNJOS	1989	2014	3780	R. Chisacá	4°19'N	74°13'W
EAAB	LA REGADERA	1994	2014	2960	R. Tunjuelo	4°24'N	74°08'W
CAR	PICOTA LA	1985	2012	2680	R. Tunjuelo	4°32'34.4"N	74°6'44.5"W
CAR	LUMBRE LA	1950	1988	2540	R. Tunjuelo	4°38'8.2"N	74°11'42.6"W
CAR	DOÑA JUANA	1993	2013	2861	R. Tunjuelo	4°30'3.0"N	74°8'14.3"W
CAR	CHISACÁ	1946	1955	3450	Lag. Chisacá	4°17'10.2"N	74°13'12.3"W
EAAB	BOCAGRANDE - SALITRE	1995	2014	3475	Q. Los Salitres	2°20'N	74°08'W

4.2.2. Temperatura

La Tabla 5 y la Figura 4 muestran las estaciones climatológicas utilizadas en el presente estudio. Cabe resaltar la alta variabilidad cronológica de los registros y series de años incompletas. Finalmente se trabajó con una serie de datos comprendida entre el periodo 1991 hasta el 2014. Teniendo en cuenta que la parte alta de la cuenca no dispone de registros de temperaturas significativos, éstos fueron estimados con la relación entre las temperaturas medias mensuales versus altitud construida para el departamento de Cundinamarca por la CAR (EAAB, 2014, p. 22):

$$(1) \quad T (^{\circ}\text{C}) = (a \times \text{Altitud}) + b$$

Dónde a y b son parámetros para cada uno de los meses del año.

Tabla 5. Información sobre las estaciones climatológicas en el estudio.

Entidad	Nombre	Estaciones Temperatura				Localización	
		Fecha de Inicio	Fecha Final	Altura (msnm)	Cuenca	Coordenadas	
						Latitud	Longitud
IDEAM	COL SAN CAYETANO	2002	2014	3100	R. Tunjuelo	4°31'0.31"N	74°5'17.6" W
IDEAM	SAN JOSE	2002	2009	2700	R. Tunjuelo	4°30'5.6" N	74°7'9.5" W
CAR	DOÑA JUANA	1991	2012	2700	R. Tunjuelo	4°30'3" N	74°8'14.3" W
IDEAM	COL SANTIAGO PEREZ	2002	2014	2565	R. Tunjuelo	4°34'34.4"N	74°7'51.3" W
IDEAM	SENA K 30	2005		2553	R. Tunjuelo	4°35'43.3" N	74°6'42.6" W
CAR	AGUAS CLARAS	2009	2012	1956	R. Sumapaz	4°30'0" N	74°10'0" W

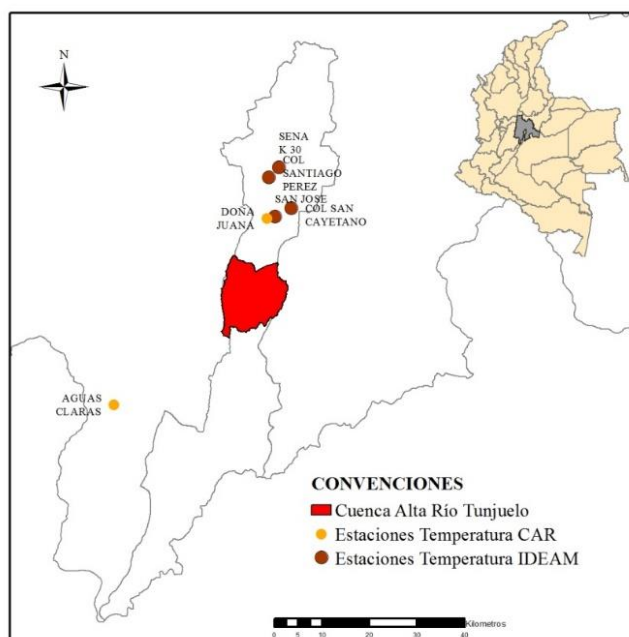


Figura 4. Estaciones de temperatura utilizadas para el estudio. Elaboración propia.

4.2.3. Evapotranspiración Potencial

Para el cálculo de la *evapotranspiración potencial (PET)* se empleó las fórmulas derivadas por Hamon (Shaw y Riha, 2011), con base en la temperatura media mensual, PET en mm día^{-1}

$PET = 29.8Hr_{\text{día}} \frac{e_{\text{sat}}(T)}{(T+273.2)}$, donde $Hr_{\text{día}}$ es el número de horas de luz solar al día, $e_{\text{sat}}(T)$ es la presión de vapor de saturación (kPa) a la temperatura de la superficie del aire T ($^{\circ}\text{C}$). La $e_{\text{sat}}(T)$ en Pa se calculó mediante la fórmula $e_{\text{sat}} = 611 * \exp\left(\frac{17.27T}{237.3+T}\right)$.

4.3. Calibración y validación del modelo

La calibración constituye el procedimiento de construcción del modelo, a partir del cual se obtiene de manera sistemática un conjunto de parámetros óptimos y valores iniciales, que se ajustan a las características particulares de cada cuenca (Blasone *et al.*, 2008). En el presente estudio, para la calibración del modelo numérico hidrológico generado, se realizó la estimación de los caudales de salida de la cuenca alta a través de los informes hídricos mensuales y diarios de captación de agua por las plantas de la EAAB del periodo 2007-2012. Estos caudales de salida reales (Q_r), corresponden a la suma de los valores mensuales de caudales afluentes ($\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$) que abastecen las plantas del sistema sur de la EAAB: Vitelma, El Dorado y La

Laguna y el desembalse en el sitio de presa La Regadera (que corresponde al caudal que se entrega al Río Tunjuelo).

Posteriormente, luego de haber calculado los valores mensuales de escorrentía (mm mes^{-1}), se realizó una corrección por rezago ya que el método según Holdridge no tiene en cuenta el rezago en la relación precipitación-escorrentía, considerando un rezago de “0” en sus cálculos. En este estudio se realizaron 39,500 simulaciones apoyados en el software MatLab para seleccionar la mejor combinación. Los porcentajes de rezago hallados para el modelo final fueron: 70.0% para el propio mes, 26.0% para el mes siguiente, 2.0% para el tercer mes siguiente, 1.0% para el cuarto mes siguiente y 1.0% para el quinto mes.

Adicional, para la calibración de los resultados se optó por utilizar el método de error absoluto medio MAE (Roy *et al.*, 2016), el análisis de pendiente e intercepto, y el coeficiente de correlación R^2 (Alexander *et al.*, 2015). Estos estadísticos permiten medir la precisión de la simulación.

El **Coefficiente de correlación R^2** se calculó mediante la fórmula $R^2 = 1 - \frac{\sum(Qr - Qe)^2}{\sum(Qr - \bar{Q})^2}$ (Alexander, *et al.*, 2015) dónde (Qr) son los datos de los caudales reales observados, \bar{Q} es la media de los valores de caudal y (Qe) son los valores correspondientes al caudal estimado. Así mismo, el **Error absoluto medio (MAE)**, se estimó mediante la fórmula $MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|Q_i - Qr_{iobs}|}{N}$, dónde Q_i son los valores de caudal estimado, Qr_{iobs} caudales reales observados y N es el número de valores analizados.

La validación se considera el procedimiento de verificación posterior, indispensable para evaluar la confiabilidad del modelo. En este paso se somete a prueba el modelo contra una serie de datos independientes, a fin de determinar con qué grado de exactitud el modelo reproduce o imita dicha información, utilizando los valores de los parámetros encontrados durante la calibración (Beven, 2001). Solo la variable (Qr), proveniente de datos reales de las plantas de captación de agua, representaba mejor la oferta hídrica de la cuenca, mientras que las otras variables del modelo fueron estimadas y sometidas a procedimientos para completar datos, lo que conllevaba a presentar errores estadísticos. Para el presente estudio, solo se realizó la

validación de los caudales reales (Q_r) y los caudales proyectados con el modelo (Q_e) para el periodo de dos años 2013-2014.

4.4. Simulación de escenarios tendenciales de cambio climático y efecto sobre la respuesta hídrica de la cuenca

Bajo el marco de las proyecciones de los escenarios de cambio climático descritos anteriormente, para el presente estudio, con los escenarios de cambio climático generados E1, E2 y E3, se realizó la comparación de los posibles cambios que habría en diferentes periodos del siglo XXI con respecto al clima del periodo de referencia 1991-2014 asignado para este estudio (tabla 6). Las variables con las que se analiza este cambio son la temperatura y precipitación.

Tabla 6. Valores entre los que oscilarán los cambios de las variables climatológicas de los cuatro escenarios en los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2100, con respecto al periodo de referencia.

ESCENARIOS	Variable	2017-2040	2041-2070	2071-2100
E1 CAR*	Precipitación	Aumenta 10.0%	Aumenta 10.0%	Aumenta 10.0%
	Temperatura	Aumenta 1.0°C	Aumenta 2.0°C	Aumenta 4.0°C
E2 IDEAM**	Precipitación	Aumenta 7.99%	Aumenta 9.00%	Aumenta 8.21%
	Temperatura	Aumenta 0.80°C	Aumenta 1.50°C	Aumenta 2.30°C
E3 OPTIMISTA	Precipitación	Aumenta 12.5%	Aumenta 13.0%	Aumenta 13.5%
	Temperatura	Aumenta 0.50°C	Aumenta 1.0°C	Aumenta 3.0°C

* Pabón J.D 2011. **IDEAM, et al. 2015.

Finalmente, para el análisis de resultados de la proyección de los cuatro escenarios, se estimó la suficiencia o insuficiencia de precipitación para sostenimiento de los ecosistemas aplicando el **Índice de Aridez (IA)** sugerido en la metodología del Estudio Nacional del agua - ENA (IDEAM, 2010), como se expresa en la fórmula $Ia = \frac{PET-RET}{PET}$, donde PET evapotranspiración potencial (mm) y RET evapotranspiración real (mm). Finalmente, para la estimación del **rendimiento hídrico** se procedió a convertir el caudal medio anual estimado de $m^3 \text{ mes}^{-1}$ a $L \text{ s}^{-1}$ y este valor dividirlo por el área de la cuenca en km^2 .

5. RESULTADOS

A continuación se describen los hallazgos encontrados con la información de entrada que requirió el modelo, los resultados de la calibración y validación, y los principales efectos hidrológicos sobre la cuenca del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz respecto a los escenarios de cambio climático de la CAR, el IDEAM y el de elaboración propia.

5.1. Hidrología de la cuenca

Respecto a la información requerida por el modelo, tenemos para la cuenca, el valor de precipitación promedio mensual multianual es de 1272.88 mm año⁻¹. El mes de mayo registra los mayores valores de precipitación, en la estación Bocagrande, 204.7 mm mes⁻¹ y en la estación La Regadera 145.4 mm mes⁻¹. Los valores mínimos fueron de 33.6 y 25.8 mm mes⁻¹ respectivamente (Figura 5). La temperatura promedio de la cuenca registrada en el periodo de referencia es de 12.88°C, presentando los mínimos valores en los meses de Julio, Agosto y Septiembre. La temperatura máxima presentada es de 14.68°C en el año 2013 y el mínimo de 10.97°C en el 2007. Los valores de evapotranspiración real (*RET*) en la cuenca alta, figura 5, muestran una media de 54.9 mm mes⁻¹, con un valor mínimo de 45.1 mm mes⁻¹ en Febrero y un máximo de 57.9 mm mes⁻¹ en Octubre. El volumen de escorrentía estimado para la cuenca alta del río Tunjuelo en el periodo de referencia 1991-2014 fue de 51.67 mm año⁻¹ equivalente a un rendimiento hídrico de 19.85 litro s⁻¹ km⁻².

Cabe resaltar que no se encontró diferencias importantes respecto a los valores de *PET* (coeficiente de correlación R^2 de 0,99). Como resultado de la baja evapotranspiración, hay un gran excedente de agua que alimenta al río Tunjuelo en el periodo mayo a agosto. La comparación de la información hidrometeorológica para los dos años de medición evidencia una baja variabilidad temporal de la precipitación, evapotranspiración y caudal en la cuenca.

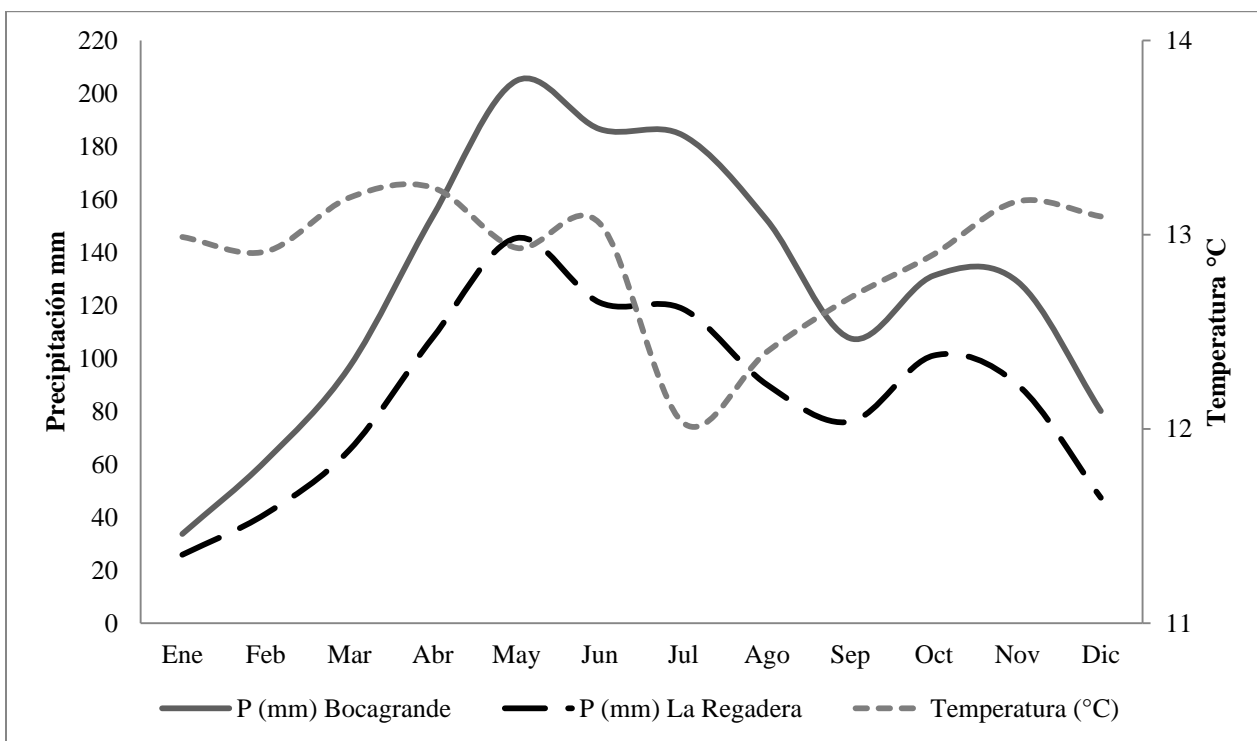


Figura 5. Ciclo anual de precipitación (mm) y temperatura °C promedio de las estaciones Bocagrande y La Regadera.

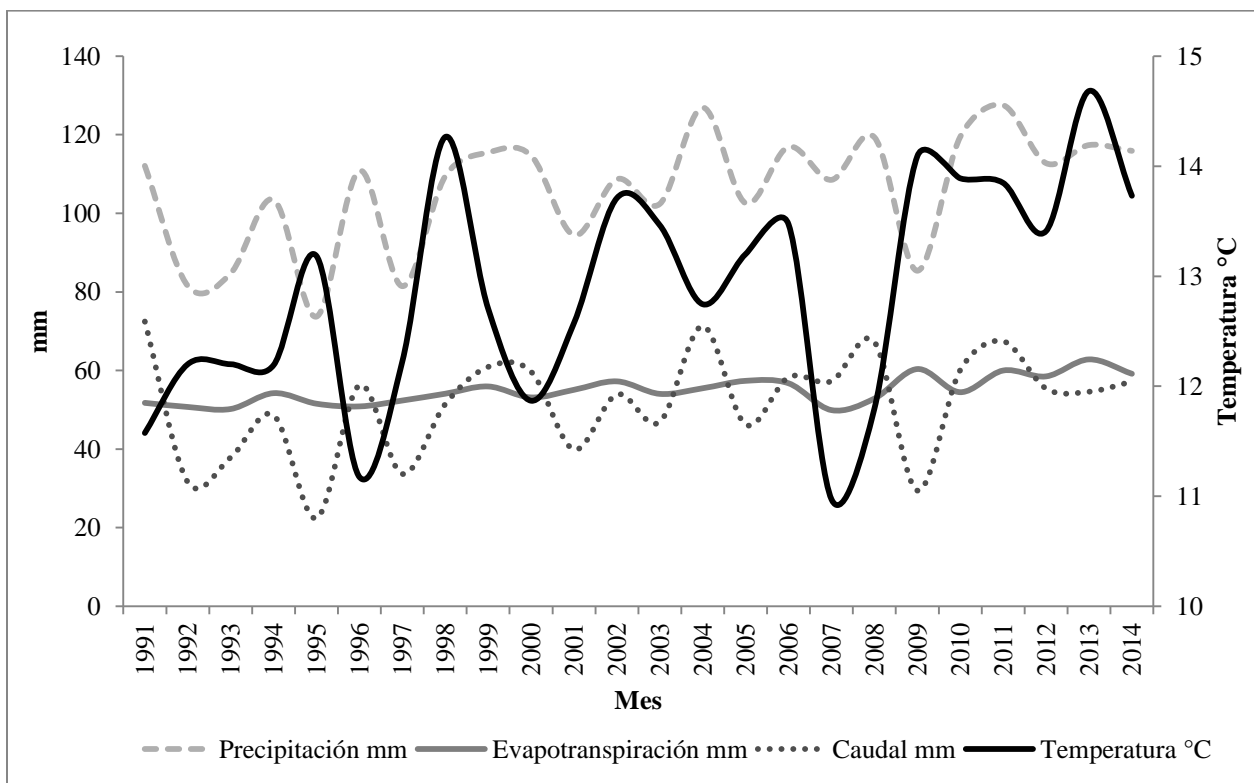


Figura 6. Valores promedio anual de las variables climatológicas en el periodo de referencia 1991-2014 de la cuenca alta del río Tunjuelo.

5.2. Calibración y Validación

El análisis de correlación del modelo numérico generado, mostró un R^2 de 0.7948 lo que indica un coeficiente de correlación positiva y moderadamente alta (Figura 7). Igualmente, la pendiente de la recta (0.9433), indica que el modelo generado presenta incrementos similares a los incrementos observados. Así mismo, de acuerdo al número 4.3, una buena predicción se da cuando el MAE es menor al rango de los valores reales multiplicado por 0.1 (Roy *et al.*, 2016). Los valores usados para este MAE fueron los logaritmos en base 10 de los caudales reales (Q_r) y los caudales estimados (Q_e). De tal manera que se obtuvo un valor de MAE del 8,3% indicando una predicción aceptable del modelo.

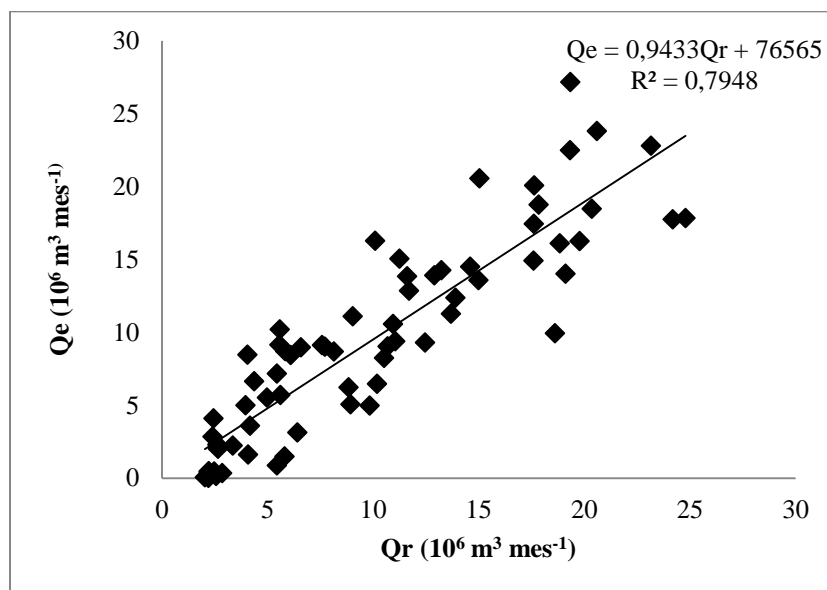


Figura 7. Correlación proceso de calibración del modelo Caudal observado real (Q_r) vs Caudal estimado (Q_e) para el periodo 2007-2012.

Para la validación del modelo en la segunda serie de datos con un total de 24 registros correspondiente al periodo 2013 y 2014, los resultados arrojaron un R^2 de 0.7785 lo que indica un coeficiente de correlación positiva y moderadamente alta. La pendiente disminuyó a 0.8589 y el valor del MAE arrojó un valor de 18%. Se evidencia que el análisis de resultados estuvo afectado por la poca cantidad de datos del periodo de validación. Sin embargo, se evidencia una buena correlación entre los datos de acuerdo a la figura 8. Los anteriores resultados validan el modelo planteado, lo que indica que se ajusta a las condiciones reales de la cuenca alta del río Tunjuelo y favorece la simulación de la oferta hídrica bajo los escenarios utilizados en el presente estudio.

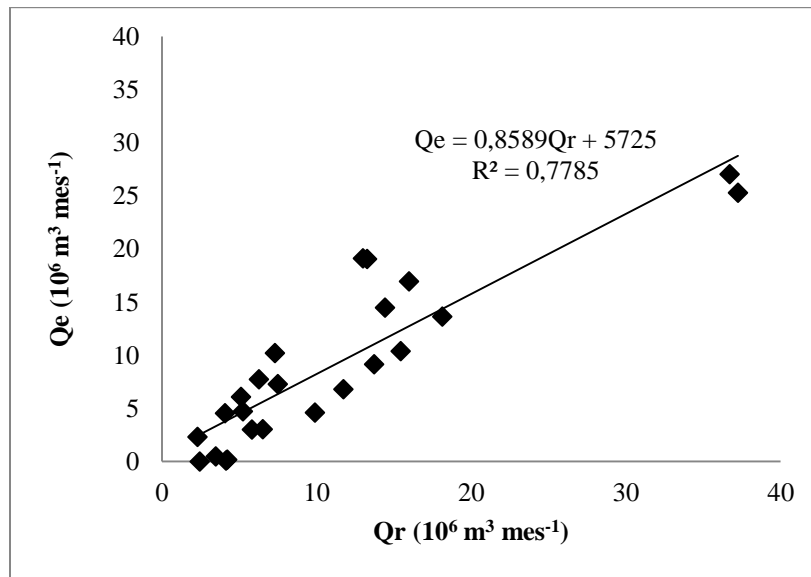


Figura 8. Correlación proceso de validación del modelo Caudal observado real (Qr) vs Caudal estimado (Qe) para el periodo 2013-2014.

5.3. Simulación de escenarios tendenciales de cambio climático

Los tres escenarios de proyección evaluados para el año **2017-2040** se denominaron: El escenario combinado de aumento de la precipitación en 10.0% y aumento de temperatura en 1.0°C; E2 escenario combinado de aumento de la precipitación en 7.99% y aumento de temperatura en 0.8°C y E3 o escenario combinado de aumento de la precipitación en 12.5% y aumento de temperatura en 0.5°C. A continuación, se describen los resultados para este periodo evaluado:

En términos generales, para el periodo 2017-2040, la temperatura del aire (Figura 9), aumentaría 1.62°C por encima de lo observado en el periodo de referencia (1991-2014), con aumentos hasta de 2.13°C en el escenario E1. En los tres escenarios evaluados (E1, E2 y E3), la precipitación anual durante el periodo 2017-2040 tendría un incremento promedio del 9.48%, en comparación con la que se observaba en el periodo de referencia; estos aumentos se observan principalmente en el escenario E1 y E3 (Figura 10). De acuerdo con Pabón (2011), las posibles implicaciones en el caso de aumento del promedio de precipitación, para la cuenca alta del río Tunjuelo, sería la mayor frecuencia de periodos con inundaciones y los deficitarios de lluvias serían menores. Por el contrario, si el cambio climático conduce hacia una reducción del promedio de precipitación, la frecuencia de los periodos secos sería mayor, afectando la oferta superficial de la cuenca.

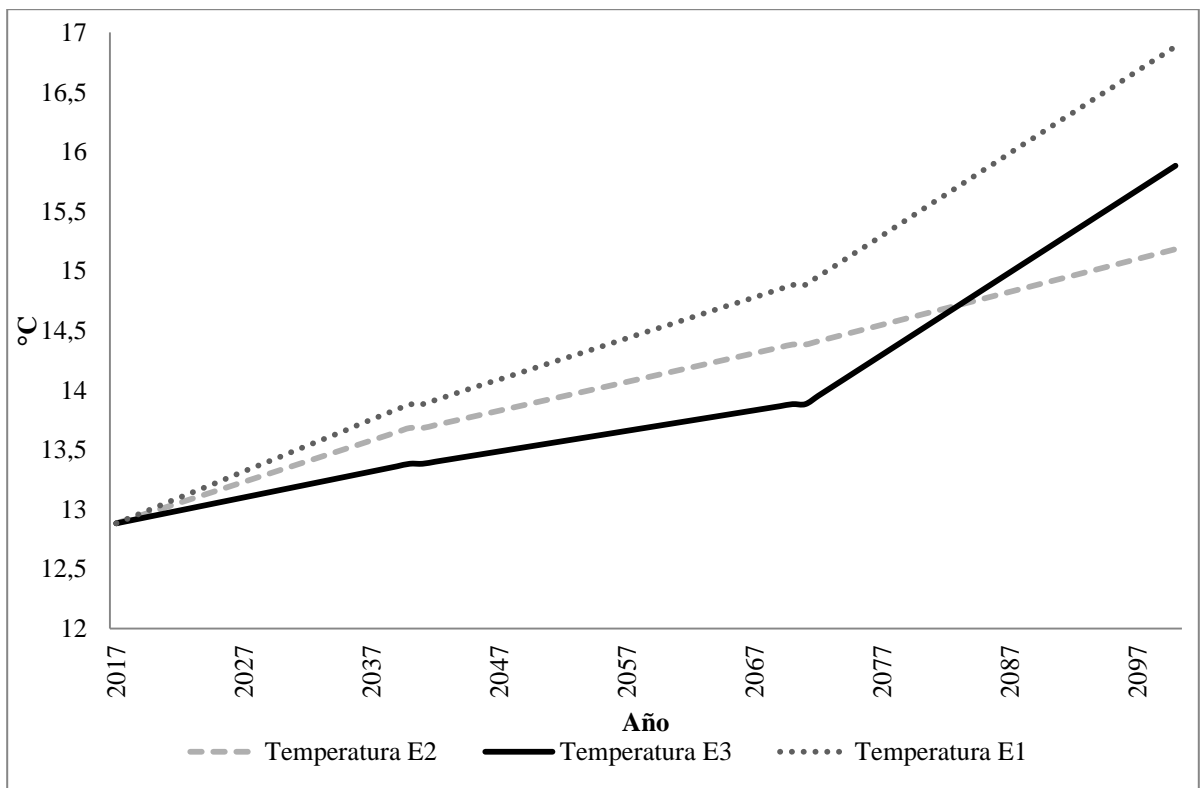


Figura 9. Temperatura media anual proyectada bajo los escenarios E1, E2 y E3 del periodo 2017-2100.

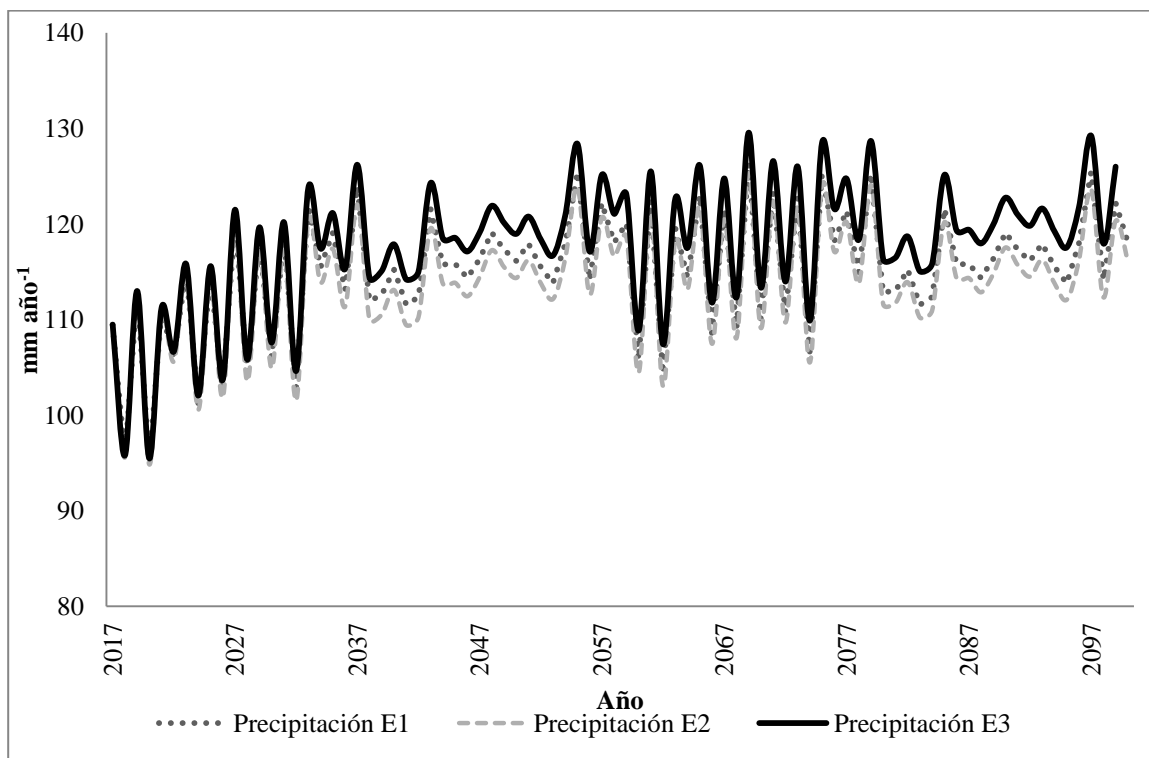


Figura 10. Precipitación media anual proyectada bajo los escenarios E1, E2 y E3 del periodo 2017-2100.

El escenario que más incide sobre el caudal de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz, es el escenario E1. Así pues, los valores de escorrentía presentaron una diferencia proporcional a los valores de lluvia proyectados. En el periodo de referencia, se registró un caudal de 3210.0 L s^{-1} equivalente a un rendimiento hídrico de $19.85 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, mientras que bajo el escenario E1 para el 2040 habría un incremento del 9.31% alcanzando un caudal de 3508.8 L s^{-1} equivalente a un rendimiento hídrico de $21.69 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Esto implica que el rendimiento hídrico de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz, no se vería afectado por los efectos de los cambios de temperatura proyectados en el primer periodo **2017-2040**.

Adicional, el coeficiente de escorrentía encontrado indica que el 51.0% de la precipitación se convierte en escorrentía y el 49.0% restante se pierde por evapotranspiración. Así mismo, los índices de aridez estimados alcanzaron valores de 1.96 lo que indica alta eficiencia hídrica de la cuenca alta en este periodo.

Para el segundo periodo evaluado, **2041-2070**, los tres escenarios de proyección evaluados se ajustaron a las siguientes condiciones: E1 o escenario de aumento de temperatura en 1.0°C ; E2 escenario combinado de aumento de la precipitación en 1.01% y aumento de temperatura en 0.7°C y E3 o escenario combinado de aumento de la precipitación en 0.50% y aumento de temperatura en 0.5°C . A continuación, se describen los resultados para este periodo evaluado:

En el periodo 2041-2070, la temperatura media anual del aire presenta en general una disminución del orden de 0.19°C con respecto al periodo anterior. Sin embargo, el comportamiento de las tasas de evapotranspiración (Figura 11), muestra un incremento por encima de los valores de precipitación; lo que implicaría que la cuenca alta del río Tunjuelo, experimentaría disminución leve del volumen de caudal cercano a 3464.0 L s^{-1} equivalente a un rendimiento hídrico de 21.42 L s^{-1} (que sigue siendo superior con respecto al periodo de referencia). Sin embargo, el coeficiente de escorrentía correspondiente a este periodo sigue cercano a 52.0%, se puede inferir que el 52.0% de la precipitación se convierte en escorrentía y el 48.0% restante se pierde por evapotranspiración. Los índices de aridez estimados también indican una disminución leve en la eficiencia hídrica con valores de 1.91.

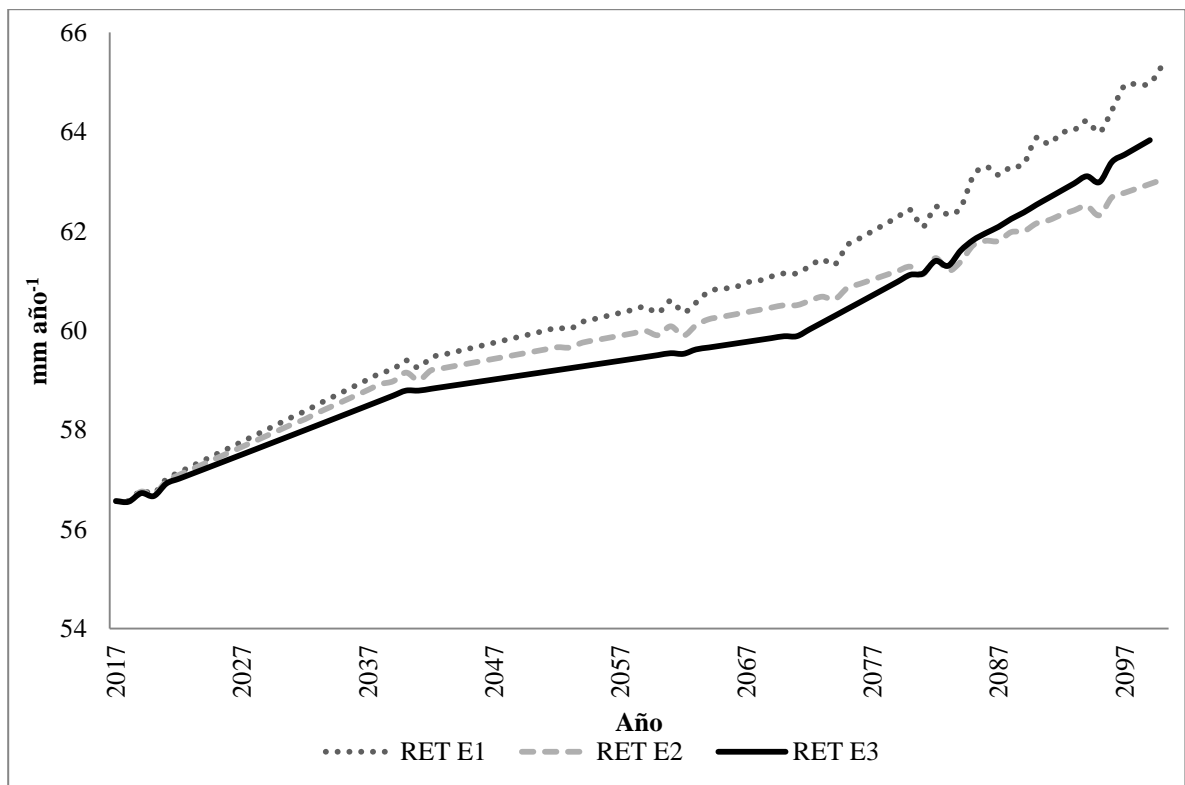


Figura 11. Evapotranspiración real media anual proyectada bajo los escenarios E1, E2 y E3 del periodo 2017-2100.

Finalmente, para el tercer periodo evaluado, 2071-2100, se simularon los tres escenarios de proyección bajo las siguientes variaciones de las variables en cuestión: E1 o escenario de aumento de temperatura en 2.0°C; E2 escenario combinado de disminución de la precipitación en 0.79% y aumento de temperatura en 0.8°C y E3 o escenario combinado donde la precipitación se mantiene con el incremento del periodo anterior de 0.50% y aumento de temperatura en 2.0°C. Los resultados para este periodo evaluado son:

Hacia el periodo **2095-2100**, en una mirada inicial es posible observar que las diferencias con los demás escenarios son notorias y el cambio es muy marcado frente al periodo de referencia 1991-2014. La cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz, alcanzaría cambios de temperatura que estarían entre 2.0 y 4.0°C. Según las simulaciones, en los escenarios E1, con el calentamiento de más de 3°C, el área estaría marcada por temperaturas cercanas a los 16.7°C.

Igualmente, hacia el periodo 2095-2100, habría un aumento generalizado de la precipitación mayor al 10.0% en relación con la observada en el período 1991-2014. El análisis detallado de lo que ocurre a través del año permitió constatar que este patrón es similar al periodo

de referencia donde los meses de Mayo, Junio y Julio presentarían los eventos de mayor precipitación y disminuciones significativas en los meses de Diciembre, Enero y Febrero. Las tasas de aumento de precipitación a final del siglo son del 11.82%.

Los índices de aridez alcanzaron los valores más altos, cercanos a los 2.02, señalando alta eficiencia hídrica a lo largo del periodo. Adicional se registró un aumento en los valores de evapotranspiración real del orden de 6.45%. La respuesta hídrica del páramo, bajo los escenarios de cambio climático proyectados para este periodo sobre la cuenca alta del río Tunjuelo (Figura 12), indican un aumento de los valores de caudal con respecto al periodo de referencia de 15.06% alcanzando un valor de rendimiento hídrico cercano a los $22.84 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

Finalmente, el modelo fue apto para construir escenarios de predicción bajo las proyecciones de los escenarios climáticos E1, E2, E3, con un grado de certidumbre del 79%. En las figuras 8, 9, y 10 se evidenció los cambios significativos en cada una de las variables a lo largo del siglo, y la figura 11 presenta el rendimiento hídrico superficial de la cuenca alta del río Tunjuelo proyectado para los tres escenarios de cambios climático.

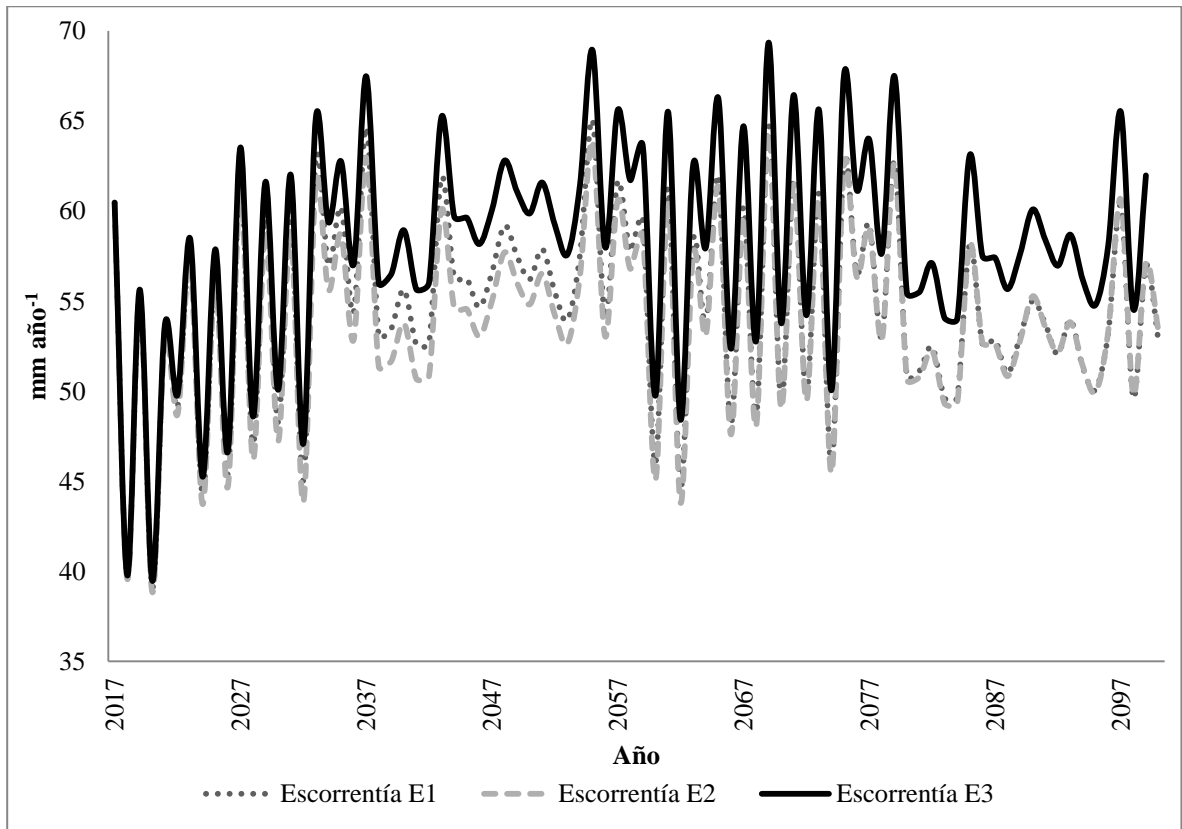


Figura 12. Escorrentía media anual proyectada bajo los escenarios E1, E2 y E3 del periodo 2017-2100.

6. DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados de las tasas de cambio en el rendimiento hídrico de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz presentadas anteriormente (periodo 2035-2040 aproximadamente un aumento del 10.11%; disminución en el periodo 2065-2070 de alrededor de 7.91% y para 2095-2100 un aumento cerca del 9.52% con respecto al periodo de referencia 1991), se puede afirmar que Bogotá no sufrirá de amenazas de reducción en el caudal que abastece su población por cambio climático. Por otro lado, los resultados de aumento del caudal de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz, no deben entenderse como un incremento en la amenaza por inundación, pues los datos aquí reportados, hacen referencia a valores mensuales y no a las curvas horarias de intensidad.

Una posible explicación para entender por qué no hay una disminución significativa de volúmenes anuales de precipitación en el área de estudio, es debido a que cuando no existen alteraciones del comportamiento de la temperatura superficial del mar, en general predomina un comportamiento de lluvias acorde a los valores típicos (Murcia y García, 2012); sin embargo, la localidad de Sumapaz obedece un caso especial de análisis, ya que el comportamiento observado radica en el hecho de que al tener características de páramo contiene una gran cantidad de recursos hídricos, esto en sumatoria a la cantidad de formaciones montañosas de la zona, permiten generar una constante precipitación (Escobar, O. F., 2012).

El comportamiento simulado de las precipitaciones mostro una tendencia a mantenerse altas respecto al periodo de referencia. Sin embargo, los resultados refutan la hipótesis planteada (ver numeral 1.2), la cual indicaba que el cambio climático elevaría las tasas de evaporación y disminuirían las tasas de precipitación, entonces, significaría una reducción en la oferta superficial en la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo de Sumapaz. Sin embargo, la revisión de literatura y los resultados obtenidos en este estudio nos lleva a afirmar que la cuenca alta del río Tunjuelo presentaría incrementos de precipitación entre el 10.0 y 30.0% y por ende presentaría aumentos significativos en valores de rendimiento hídrico alcanzando valores promedio de 21.74 L s^{-1} con un 79% de certidumbre de acuerdo a la calibración del modelo.

De acuerdo a los valores proyectados del rendimiento hídrico alcanzado bajo los tres escenarios, a final del siglo ($21.05 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, $21.16 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ y $23.01 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ respectivamente), se puede afirmar que las variaciones climatológicas en la parte alta de la cuenca del río Tunjuelo no afectarán el funcionamiento hidrológico del páramo y por tanto su servicio ecosistémico de abastecimiento de agua

para el Sistema La Regadera (plantas de tratamiento de agua de La Laguna y Vitelma de la EAAB). Estos resultados pueden ser una base para las entidades que gestionan la planeación de abastecimiento de agua para una población capitalina creciente. En la actualidad en la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz, se realiza la captación de agua para el suministro de agua potable para una población de 250,000 habitantes de Bogotá, ubicada en la localidad de Usme (UPZ de Gran Yomasa, Comuneros, Alfonso López y Danubio) mediante el sistema sur de abastecimiento de la EAAB (Alcaldía Local de Tunjuelito y Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2003). Sin embargo, de acuerdo a las proyecciones de población por localidades para Bogotá 2016-2020, reportados por la Secretaria Distrital de Planeación Bogotá SDP (2014), la población total proyectada para la localidad del Usme al año 2020 será de 348,332 habitantes.

Adicional, estos resultados evidencian también que en el corto plazo, Bogotá no debe buscar nuevas fuentes de abastecimiento de agua, teniendo en cuenta que, si bien hidrológicamente no habrá afectación a la oferta superficial de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz por cambio climático, podrán darse afectaciones por cambios en el uso del suelo, lo cual está fuera del objetivo del presente estudio.

La tabla 7, presenta un comparativo con los resultados de otras investigaciones realizadas de simulación de hidrología en páramo y otros ecosistemas, indicando la variabilidad en los modelos aplicados y los resultados reportados:

Tabla 7. Síntesis de otras investigaciones usando otros modelos hidrológicos

Referencia	Área de estudio	Modelo hidrológico	Resultados
Yaguache. L y Vásquez, R (2015)	Cuenca río Cosanga 1,700 y los 4,320 (Ecuador)	Water Evaluation And Planning System (WEAP)	Aporte de precipitación en paramo 2,618 mm año ⁻¹ Aporte de caudal base de paramo 6.20 m ³ s ⁻¹
Flores <i>et al.</i> , (2012).	Subcuencas de los ríos Quiroz y Chipillico (Perú)	Water Evaluation And Planning System (WEAP)	Caudal promedio anual del flujo base proveniente de los páramos de 2.65 m ³ s ⁻¹
Gil, E (2012)	Paramo Chingaza (Colombia)	<i>Catchment wáter dischargue and soil wáter</i> (TOPMODEL)	Bajo un escenario de disminución de la precipitación anual en 7,2 % hasta el año 2030, no se presentaría una disminución promedio en el caudal para el 2030 superior a 10%
Boughton, W (2003)	Bird Creek USA Kizu Japón Wollombi Brook Australia Kelantan Malasia Brosna Irlanda (19 zonas de captación)	<i>Australian Wáter Balance Model</i> (AWBM)	Variación del agua de escorrentía desde 23 a 581 mm año ⁻¹

En la modelación hidrológica en una cuenca de montaña tropical del río Cosanga en Ecuador, bajo el modelo Water Evaluation And Planning System (WEAP), el análisis de calidad de la simulación de los caudales observados presentó un coeficiente de determinación (de regresión lineal) $R^2 = 0.84$. (Yaguache L y Vásquez, R, 2015), valor cercano al reportado en el presente estudio $R^2 = 0.80$. Respecto al caudal aportado por el área de paramo ($6.20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), el valor reportado en el presente estudio para la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz es menor ($0.26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). También presentaron diferencias en los aportes de precipitación del páramo ($2.618 \text{ mm año}^{-1}$), mientras que el valor reportado en el presente estudio para el páramo Sumapaz está cerca de los $1272.88 \text{ mm año}^{-1}$. Estos valores son consistentes puesto que la diferencia radica en el área de estudio.

Simulaciones realizadas para las subcuencas de los ríos Quiroz y Chipillico (costa y sierra norte del Perú), bajo el modelo en WEAP (donde el período de modelación para las condiciones de calibración comprendió únicamente dos años 2009 y 2010), presentaron valores de caudal promedio anual del flujo base proveniente de los páramos de $2.654 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para un período de 50 años (2010-2059), bajo el escenario de aumento de la precipitación en 6% y aumento en la temperatura en 1.5°C (Flores *et al.*, 2012). Similarmente, bajo el escenario E2 del presente estudio (aumento de la precipitación en 9% y aumento en la temperatura en 1.5°C), los resultados reportados del caudal aportado por la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz fueron mayores ($3.499 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), para un periodo de 50 años. . Lo anterior demuestra que el modelo planteado arroja valores reales como los arrojados por modelos más sofisticados.

Por otro lado, los resultados del presente estudio muestran similitud con la investigación realizada en el páramo Chingaza, bajo un escenario de disminución de la precipitación anual en 7,2 % hasta el año 2030, no se presentaría una disminución promedio en el caudal para el 2030 superior a 10% en relación con el escenario de línea base (2008-2009) (Gil, 2012). Sin embargo, indica que bajo un escenario combinado, de aumento de la temperatura (0.63°C) y disminución de la precipitación (7.2 %), resulta una disminución del caudal promedio de 9,82%, lo cual se debe principalmente a la reducción de la variable precipitación. Los resultados de esta investigación indican que en relación a la línea base (1991-2014) hasta el año 2040, se presentaría un aumento en el caudal de 9.33% bajo el escenario E1, un aumento de 7.54% bajo el escenario E2 y 11.56% bajo el escenario E3.

Desde una perspectiva global, se puede analizar los datos publicados para otros ecosistemas, cuya modelación hidrológica se llevó a cabo a través del modelo Australian Water Balance Model (AWBM),

para 19 zonas de captación a través de Australia, los coeficientes de correlación basados en la esorrentía mensual son relativamente altos ($R^2 = 0.84$). La variación de la esorrentía reportada se encuentra entre 23 a 581 mm año⁻¹. Los datos son consistentes ya que el área de estudio es mayor (entre 0.9 a 3120 km²) y para futuras investigaciones se recomienda el uso del modelo generado en esta investigación para otros ecosistemas.

Uno de los principales aportes del presente estudio es el planteamiento de un modelo numérico hidrológico, basado en un sistema de ecuaciones que pueda ser implementado a escala de cuenca, teniendo en cuenta que hay una dificultad para la aplicación de modelos hidrológicos globales a escala local debido a la cantidad de información de entrada que requiere.

Así mismo, podemos mencionar que las dificultades y limitaciones encontradas en el presente estudio radican en la incertidumbre de los datos suministrados por las entidades pues varias estaciones carecen de información. Por lo tanto, la aplicación de modelos que estiman la oferta hídrica lleva consigo porcentajes de error considerables. Igualmente, en futuras investigaciones, se recomienda considerar en el modelo, el uso de la fórmula de “Penman-Monteith FAO98”, para la estimación de la evapotranspiración potencial. Esta fórmula ha tenido una relevancia extraordinaria en las investigaciones sobre balance energético, balance hídrico, requerimientos de agua, programas de irrigación, entre otras aplicaciones, desplazando la diversidad de formulaciones utilizadas para estimar la evapotranspiración. Simultáneamente, el término evapotranspiración potencial, *ETP*, es reemplazado por el de evapotranspiración de referencia, *ETo* (Guevara, 2006). Igualmente, en futuras investigaciones, para determinar cómo se afectaría el régimen hidrológico de la cuenca, podrán realizarse simulación de escenarios donde varié la capacidad de almacenamiento de los suelo, pues en el presente estudio permanece estático. También resultaría interesante incorporar al modelo, un módulo de capacidad de interceptación de la niebla por la vegetación de los páramos andinos ya que esto mostraría un aporte significativo a los valores de caudal estimados. Sumado a lo anterior, ya que el modelo propuesto plantea el manejo de la cuenca como una sola celda, no tiene en cuenta la diferencia de alturas. Por ello los modelos futuros deberían tener la capacidad de adaptarse a las condiciones climáticas en los ecosistemas de páramo, dadas por el factor de altitud. A pesar de estas limitaciones, este tipo de estudios son importantes ya que permiten conocer los impactos y la magnitud de los mismos sobre las cuencas hidrográficas a nivel local. Finalmente, la carencia de investigaciones y de conocimiento a

nivel regional del rendimiento hídrico de las cuencas, permite sugerir que es necesario que se continúe investigando para la validación de estos hallazgos.

7. CONCLUSIONES

- El modelo numérico hidrológico computacional resultó apropiado en la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca alta del río Tunjuelo, páramo de Sumapaz, ya que logró establecer los valores de escorrentía superficial y permitió la simulación de los caudales generados bajo escenarios supuestos de cambio climático.
- La calibración y validación del modelo mediante el ajuste por rezago permitió un buen funcionamiento y así lograr establecer una línea base del periodo de referencia para la simulación de escenarios futuros.
- El rendimiento hídrico alcanzado de los tres escenarios a final del siglo fue de $21.05 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, $21.16 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ y $23.01 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ respectivamente, todos por encima del periodo de referencia. Los valores de evapotranspiración real incrementaran a lo largo del siglo. Sin embargo, al final de siglo (2095-2100) habrá una disminución respecto a la mitad del periodo (2065-2070) en el rendimiento hídrico de la cuenca alta del río Tunjuelo. Esto se debe principalmente a aumentos en la temperatura que hacen que la evapotranspiración real se eleve.
- Los efectos de los escenarios de cambio climático causados sobre el rendimiento hidrológico de la cuenca alta del río Tunjuelo para el año 2040 serían moderados como revelan los aumentos encontrados en el caudal, en el escenario E1 cercanas al 9.31%, 5.97% en el escenario E2 y en el escenario E3 cercanas al 15.06%.
- Bogotá no sufrirá de amenazas de reducción en el caudal que abastece su población por cambio climático. Por otro lado, los resultados de aumento del caudal de la cuenca alta del río Tunjuelo en el páramo Sumapaz, no deben entenderse como un incremento en la amenaza por inundación, pues los datos aquí reportados, hacen referencia a valores mensuales y no a las curvas horarias de intensidad.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Local de Tunjuelito y Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2003). *Cuenca del Río Tunjuelo. Apoyo a Procesos de Sensibilización, Divulgación y Control Social. Componente Mesa Interlocal*. Convenio No. 027-03 del 2003. Bogotá. Consultado en Marzo 1, 2018, desde <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/cuenca-del-ri-o-tunjuelo>
- Alexander, D., Tropsha, A., Winkler, D. (Jun 22, 2015). *Beware of R2: simple, unambiguous assessment of the prediction accuracy of QSAR and QSPR models*. Consultado en Agosto 1, 2017, desde <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jcim.5b00206>
- Banco Mundial. (2017). *Promedio detallado de precipitaciones (mm anuales)*. Consultado en Octubre 10, 2017, desde <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.PRCP.MM?view=map>
- Beven, K.J. (2001). *Rainfall-runoff modelling: the primer*: 360p.
- Blasone, R.S., Madsen, H. and Rosbjerg, D., 2008. Uncertainty assessment of integrated distributed hydrological models using GLUE with Markov chain Monte Carlo sampling. *Journal of Hydrology*, 353(1-2): 18-32.
- Buytaert W. (2010) Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management. Pp. 1247 – 1258.
- Buytaert, W., De Bièvre, B, R. Hofstede, F. Cisneros, G. Wyseure y J. Deckers. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth science reviews*. Vol 79. Pp 53 – 72.
- Buytaert, W., De Bièvre, B., Wyseure, G. and Deckers, J. (2004). The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of land use changes on the hydrology of catchments in the Ecuadorian Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Buytaert, W., R. Céleri, B. De Brièvre y F. Cisneros. (2012). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Revista Colombia tiene Páramos* 2: 8-27.
- Calidad del sistema hídrico de Bogotá (CSHB). (2008). Primera Edición. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana: Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaria Distrital de Ambiente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

- Chquisengo Vásquez, O. (ed.). (2004). El fenómeno El Niño en Perú y Bolivia; experiencias participación local. Lima: Intermediate Technology Development Group. 209 pp.
- Corporación Autónoma Regional, CAR. (2009). Adecuación hidráulica y recuperación ambiental Río Bogotá. Volumen I. Estrategia Regional. Evaluación ambiental y Plan de Gestión Ambiental.
- Croke, B.F.W., Merritt, W.S. and Jakeman, A.J. (2004). A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 291(1-2): 115-131.
- EAAB. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2014). Desarrollo y validación de la evaluación regional del agua en la cuenca hidrográfica del río Tunjuelo. Producto 3. Orden De Servicio No. 2-02-4300-908-2013.
- EAAB. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2005). Estudio a nivel de factibilidad y diseño básico de las obras necesarias para la restitución del cauce del Río Tunjuelo en el sector de las canteras. Proyecto 6822. Aspectos hidrológicos y sedimentológicos. Bogotá. 2060-00-HD-RP-001.
- Escobar, O. F. (2012). Proyección de la variación de la temperatura y la precipitación ante Cambio Climático para Bogotá. Universidad Santo Tomas. Facultad de ingeniería Ambiental. Bogotá.
- Ewel, J. y A. Madriz, 1968. Zonas de vida de Venezuela, memoria explicativa sobre el mapa ecológico. 2 ed. Editorial Sucre, Caracas, Venezuela. 270 p.
- Favier, V., A. Coundrain, E. Cadier, B. Francou, E. Ayabaca, L. Maisincho, E. Pradeiro, M. Villacís y P. Wagnon. (2008). Evidence of groundwater flow on Antizana ice-covered volcano, Ecuador. *Hydrological Sciences Journal* 53:278-291.
- Flores-Lopez. F, Escobar. M, Purkey. David. (2012). Modelamiento de la contribución del páramos a la hidrología Bajo un Escenario de Cambio Climático. Ministerio del Ambiente – MINAM. San Isidro, Lima. Disponible <http://www.care.org.pe/wp-content/uploads/2015/06/Modelamiento-de-la-contribucion-del-paramos-a-la-hidrologia-en-el-Peru.pdf>

- Guevara Díaz, J. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra Nueva Etapa*, vol. XXII, núm. 31, 2006, pp. 31-72. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela
- Gil Morales, G. (2012). Modelación hidrológica de los páramos andinos con Topmodel: páramo de Chingaza, Colombia. Tesis Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- IAvH & CEERCCO. (2015). *Estudios técnicos, económicos, sociales y ambientales complejo de páramos cruz Verde – Sumapaz*. Convenio de Cooperación No. 13-13-014-188CE Instituto Humboldt & Comisión Conjunta del Corredor de Ecosistemas Estratégicos de la Región Central de la Cordillera Oriental – CEERCCO. Bogotá. Disponible en repository.humboldt.org.co/bitstream/20.500.11761/9480/.../13-13-014-188%20CE.pdf
- IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (2010). Estudio Nacional del Agua. Bogotá.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- IGAC. (1977). Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia. Instituto Geográfico de Colombia, Agustín Codazzi. Subdirección Agrológica
- INGETEC S.A. (2002). Diseños para la construcción de las obras de control de crecientes en la Cuenca del Río Tunjuelo (Proyecto embalse Cantarrana).
- IPCC. (2013). Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Malagón. D & Pulido C. (2000). Suelos del páramo Colombiano. Colombia Diversidad Biótica III. La región de la vida paramuna. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Bogotá.
- Monsalve, G. (2009). Hidrología en la Ingeniería. Bogotá. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. (págs. 384)

- Montealegre J., & J. Pabon. (2000). La Variabilidad Climática Interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña–Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. Meteorol. Colomb. 2:7-21. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. – Colombia
- Murcia, J., & García, O. (2012). Alteraciones de la precipitación y la temperatura ante variabilidad y cambio climático para la ciudad de Bogotá. Subdirección de Meteorología. IDEAM.
- Pabón J. D (2011). El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Universidad Nacional de Colombia – Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Bogotá D.C., 128 páginas.
- Pedraza-Peñalosa, Paola & Betancur, Julio & Franco-Rosselli, Pilar. (2015). Chisacá, un recorrido por los páramos andinos. Pg 11.
- Pérez de León. M. (May 23, 2012). *Estimación de periodos húmedos y secos en la Hidrología*. Consultado en Julio 1, 2017, desde <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/revista/85/pdfs/hidrologia.pdf>
- Rivera. N y Gomez. J. (2010). Impacto del uso de la tierra en la generación de caudales y sedimentos: caso cuenca del rio Tunjuelo – Cundinamarca. Aplicación del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Contrato de prestación de servicios para la asociación ecológica y social – ASECOL. Santiago de Cali. 67 pg
- Roy, K., Narayan, D., Ambure, P., Aher, R. (2016). *Be aware of error measures. Further studies on validation of predictive QSAR models. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 152,18–33. Consultado en Julio 1, 2017, desde <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-8560a291-4c3b-3117-bbc7-14697330e916/tab/summary>
- SDA Secretaria Distrital de Ambiente. (2015). Descripción y Contexto de las Cuencas Hídricas del Distrito Capital (Torca, Salitre, Fucha Y Tunjuelo). Informe Técnico No. 01575. Grupo Recurso Hídrico Superficial. Secretaría Distrital De Ambiente. Pp. 36.
- SDA Secretaria Distrital De Ambiente. Bogotá. (2007). *Diagnóstico POMCA Tunjuelito*. Consultado en Mayo 2017, desde <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/diagnostico-pomca-tunjuelito>

- SDP Secretaria Distrital De Planeación Bogotá. (2014). Proyecciones de población para localidades de Bogotá 2016-2020. Boletín 69. Consultado en Marzo 2018, desde <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estadisticas/Bogotá%20de%20Estadísticas/2014/Boletín69.pdf>
- Sguerra, S., P. Bejarano., O. Rodríguez, J. Blanco, O. Jaramillo, G. Sanclemente. (2011). “Corredor de Conservación Chingaza - Sumapaz - Guerrero. Resultados del Diseño y Lineamientos de Acción”. Conservación Internacional Colombia y Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ESP. Bogotá, Colombia.184 pp.
- Shaw, S., Riha, S. (2011). Assessing temperature-based PET equations under a changing climate in temperate, deciduous forests. *Hydrol. Process.* Department of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, NY, USA. 25 (1466–1478).
- UNC Universidad Nacional de Colombia. (2007). Documento técnico de diagnóstico preliminar del Río Tunjuelo. Marco del Convenio 40.
- UNC Universidad Nacional de Colombia IDEA. (2004). *Informe de consultoría medio ambiente Mesa De Planificación Regional Bogotá*. Consultado en Octubre 2017, desde <https://www.institutodeestudiosurbanos.info/endatos/0100/0120/01210.htm>
- Yaguache, L. y Vázquez, R. Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo. *Aqua-LAC - Vol. 7 - N° 1 - Mar. 2015.* pp. 63- 76. Disponible en <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/08Modelaciondelaofertahidricaenunacuencademontana.pdf>

9. ANEXOS

9.1. Anexo 1. Formulación del modelo

a. Premisas del modelo

Cmxs - Capacidad máxima de almacenamiento del suelo: 5.0% de la precipitación total anual para las zonas de vida del piso Montano.

Ras - Reserva de agua del suelo: solo el 65% de la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo se evacúa. El 35% restante será la reserva del suelo

b. Variables de entrada

T - Temperatura (°C)

P - Precipitación (mm)

ETP - Evapotranspiración Potencial (mm): Fórmula de Hamón

c. Formulas balance hídrico

ETR - Evapotranspiración real (mm):

$$SI(P > ETP; ETP; P + Ras^-)$$

Ea - Exceso de agua (mm):

$$SI(P > ETP; P - ETP; 0)$$

Ras⁺ - Recarga de agua del suelo (mm):

$$SI(P > ETP; SI(Hs < Cmxs; SI(Ea + Hs < Cmxs; Ea; (Cmxs - Hs)); 0); 0)$$

Ras⁻ - Reducción del agua del suelo (mm):

$$SI(P > ETP; 0; SI((Hs - (ETP - P)) < Cmxs; Hs - Cmxs; ETP - P))$$

Hs - Humedad en el suelo al final del mes (mm):

$$SI(Ras^- > 0; Hs - Ras^-; SI(Ras^+ + Hs > Cmxs; Cmxs; Ras^+ + Hs))$$

Dh - Déficit de humedad del suelo al final del mes (mm):

$$SI(Hs_{actual}=Cmxs;0;Cmxs-Hs_{actual})$$

Dp - Déficit de precipitación al final del mes (mm):

$$SI(P>ETP;0;ETP-P)$$

DhT - Déficit de humedad total (mm):

$$Dp+Dh$$

d. Variable de salida

Escorrentía total (mm)

$$SI(Ea>0;Ea-Ras+;0)$$