

Capítulo II

El páramo: regulador hídrico Aplicación de modelos para estimación de caudales



1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la generación de conocimiento bajo el enfoque de conservación de ecosistemas naturales, es indispensable analizar cada uno de sus componentes, entre los cuales se encuentra tal vez uno de los más importantes, la disponibilidad y distribución del recurso hídrico. El páramo es considerado como regulador de un número importante de cuencas hidrográficas a lo largo del territorio nacional; por esta razón, el componente hidrológico, al igual que su comportamiento, es clave al momento de tomar decisiones encaminadas a la preservación y sostenibilidad de este valioso ecosistema.

La validación adecuada de modelos hidrológicos a partir de información climática (precipitación) es indispensable para realizar análisis que cuantifiquen los impactos del cambio climático sobre el comportamiento hidrológico de una cuenca y su directa influencia sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, especialmente para consumo humano y actividades agrícolas.

El páramo de La Cortadera es un importante regulador hídrico, ya que es el encargado de mantener el caudal de la represa La Copa, cuyas aguas son destinadas para las actividades agropecuarias de municipios como Paipa, Duitama, Tibasosa y Sogamoso, entre otros, por medio del Distrito de Riego y Drenaje del Alto Chicamocha y Firavitoba (Usochicamocha).

La información que se tiene en la actualidad acerca de los ecosistemas de alta montaña es amplia, generalizada y aislada (Morales et ál., 2007). Pese a que existen trabajos hidrológicos completos en Colombia sobre este tipo de ecosistemas, no se han hecho muchos estudios que establezcan las características hídricas y permitan conocer de manera detallada el estado actual; problemática que no es ajena en el páramo de La Cortadera.

Cuantificaciones del balance hídrico con modelos tradicionales de hidrología de cuencas muestran una subestimación de su producción hídrica real, lo cual podría

deberse a la falta de contabilización del importante aporte hídrico del agua contenida en la atmósfera e interceptada por las plantas (denominada precipitación horizontal) y que no es registrada en las estaciones de medición de precipitación (Díaz, Navarrete & Suárez, 2005).

En hidrología, los modelos numéricos son una herramienta básica con la que se puede estudiar el ciclo hidrológico y las relaciones hidrológicas con los problemas científicos y prácticos. Desde mediados de 1960 numerosos modelos hidrológicos se han establecido y desarrollado a partir de los principios simples y conceptos de modelos distribuidos y basados en la física. Entre estos modelos, la herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT), desarrollada en la década del noventa del siglo pasado, es un modelo para el estudio de cuencas hidrográficas.

El estudio hidrológico está enfocado en el análisis de la red hídrica que se genera del páramo de La Cortadera, con el fin de conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca total y de las cinco subcuencas que lo componen, como herramienta para la planeación y el ordenamiento territorial, la toma de decisiones de carácter institucional, el uso y el manejo de los recursos naturales, además para establecer la función hidrológica que cumple como proveedor de bienes y servicios ambientales, especialmente de agua, para suplir las necesidades de los habitantes de varios municipios.

2. MARCO DE REFERENCIA

El ecosistema de páramo ha proporcionado una importante función socioeconómica a la comunidad andina como su principal fuente de agua. Debido a las circunstancias climáticas especiales, los suelos poco profundos y porosos con alto contenido de materia orgánica, y su topografía formada por la acción de los glaciares, la hidrología superficial del páramo tiene características extraordinarias. Comparados con cuencas montañosas de otras regiones, los ríos que descienden desde los páramos tienen un flujo base sostenido como resultado de la elevada capacidad de regulación del agua del páramo. Sin embargo, esta función está amenazada por un incremento de la actividad humana durante los últimos años (Buytaert et ál., 2006).

Según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT (2003), el páramo es un ecosistema donde elementos como la vegetación, el suelo y el subsuelo, han desarrollado un gran potencial para interceptar, almacenar y regular el agua. La importancia de este ecosistema radica fundamentalmente en dichas funciones, que regulan de esta manera los flujos hídricos superficiales y subterráneos.

En los páramos colombianos, la humedad se manifiesta por el rocío, la constante neblina y las lloviznas frecuentes, características de las altas montañas tropicales.

Esta gran humedad no está directamente relacionada con una precipitación alta, ya que a pesar de que existen regiones donde la precipitación anual es superior a 3000 mm, muchos páramos tienen una precipitación media anual aproximada de 1000 mm o menos. Rivera y Rodríguez (2011) reportan precipitaciones anuales en páramos colombianos que pueden oscilar entre valores bajos de 600 mm·año⁻¹ hasta más de 3.000 mm·año⁻¹; sin embargo, por las bajas temperaturas y la alta nubosidad, la evapotranspiración es reducida, situación que es una de las principales razones del alto rendimiento hídrico de estos ecosistemas.

De esta forma, debido a las características hidrogeológicas, con diversidad de sustratos geológicos fracturados que alimentan acuíferos superficiales y subterráneos, los páramos se convierten en zonas que favorecen la acumulación y regulación de las aguas subterráneas, principalmente por la disposición de sistemas de fallamiento y de diaclasas locales, claves en la percolación e infiltración del agua superficial.

Todas estas características expresan la importancia del páramo como regulador hídrico, por sostener el flujo base de las corrientes que nacen y descienden de estos ecosistemas hacia las áreas medias y bajas, y por ofrecer excelente calidad de agua. Estas propiedades son derivadas de su alta capacidad de almacenamiento asociada al potencial de infiltración, a los complejos de humedales, a la morfología de las cuencas, al tipo de suelos, a la formación de niebla y a la capacidad de retención de las plantas, entre otros (Rivera & Rodríguez, 2011).

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico y su balance global constituyen el modelo básico para entender el funcionamiento del sistema hídrico y las interacciones entre el océano y el continente. Este ciclo representa el proceso continuo de la circulación y transformación del agua en sus diversos estados en la esfera terrestre. Su dinámica es determinada por las condiciones de la radiación solar, la acción de la gravedad y las interacciones de las capas superiores de la Tierra: atmósfera, litósfera y biósfera (IDEAM, 2010).

La descripción conceptual del ciclo hidrológico se presenta consecutivamente, de acuerdo con el orden de los procesos en la dirección del flujo del agua en estos ecosistemas; es decir, entradas por precipitación en todas sus formas (vertical y horizontal: lluvia que es transportada por el viento y la niebla), precipitación neta dentro del bosque, agua en el horizonte orgánico, escorrentía superficial, infiltración de la precipitación, evapotranspiración, agua en el suelo, percolación profunda y drenaje en la cuenca (Tobón, 2009).

El ciclo hidrológico está gobernado por procesos naturales que ocurren de manera continua. El agua cae sobre la superficie terrestre en forma líquida o sólida, parte

de la cual puede evaporarse antes de tocar la superficie terrestre. Aquella fracción que alcanza la vegetación es parcialmente retenida por las hojas de las plantas (intercepción). De allí, una parte es evaporada de nuevo hacia la atmósfera, en tanto que la fracción restante cae hacia el suelo, en donde puede infiltrarse o escurrir por las laderas, siguiendo la dirección de las mayores pendientes del terreno. La parte del agua que escurre a lo largo de las laderas puede ser interceptada por las depresiones naturales del terreno, en donde se evapora o infiltra; o, por último, se mueve a través de los drenajes naturales de la cuenca y forma el flujo superficial. Estos tres flujos –superficial, subsuperficial y subterráneo– conforman la escorrentía, que integra los cauces de las corrientes, alimenta los diferentes almacenamientos y drena finalmente al mar.

Esta compleja interacción entre la atmósfera y los procesos superficiales y subsuperficiales afecta el régimen, la cantidad, la distribución y la calidad del agua en las diferentes unidades hidrográficas. Por ello, los componentes del ciclo hidrológico difieren en sus características químicas, bioquímicas, variabilidad espacial y temporal, resiliencia, vulnerabilidad a la presión (incluidos usos de la tierra y cambio climático), susceptibilidad a la contaminación y capacidad de proveer servicios ambientales apropiados para ser utilizados en forma sostenible (IDEAM, 2010).

2.2 HIDROLOGÍA EN EL PÁRAMO

Según el MAVDT (2003), el páramo es un ecosistema donde elementos como la vegetación, el suelo y subsuelo, han desarrollado un gran potencial para interceptar, almacenar y regular el agua; la importancia de este ecosistema radica en estos procesos.

A pesar de su limitada extensión alrededor del mundo (35.000 km²) (Hofstede, Segarra & Mena, 2003), los páramos se reconocen por los servicios ambientales que proporcionan a escala local y global (Kappelle & Horn, 2005). Entre estos servicios se encuentran la conservación de la biodiversidad, el almacenamiento de carbono en el suelo, la hidroenergía y, principalmente, el abastecimiento de agua potable para las grandes ciudades, como es el caso de Bogotá (Colombia) que depende casi en un 95 % del agua proveniente de los páramos (Buytaert et ál., 2011).

El rendimiento hídrico de los páramos está relacionado, entre otros, con factores con variables como la orografía y la presencia de vegetación arbustiva de tipo suculento y cespitoso, que logra incorporar al suelo un régimen de precipitación errática. Dicha precipitación es finalmente almacenada por el suelo que actúa como un excelente regulador hídrico y es convertida por este en un flujo constante de agua (Buytaert et ál., 2011).

La necesidad de la modelación hidrológica de los ecosistemas de páramo ha sido ampliamente discutida, como lo presentan Sáenz, Domínguez y Díaz-Granados (2001) y enfatizan Bruinjzeel y Hamilton (2000). La mayoría de la investigación en páramos se ha enfocado en su flora y fauna, actualmente existen pocos estudios sobre los procesos hidrológicos propios de estos ecosistemas.

2.2.1 Precipitación horizontal. Los aportes de agua a la zona no saturada del suelo en ecosistemas naturales provienen principalmente de la precipitación convencional o lluvia. Sin embargo existen otros mecanismos distintos en los que el agua atmosférica puede incorporarse al suelo. En este sentido, el cambio en las variables precipitación y temperatura también producen cambios en la humedad relativa; con una menor precipitación, existe una mayor posibilidad de radiación solar y menor nubosidad, y dado que, normalmente, las nubes afectan significativamente la energía, la luz y los regímenes de temperatura e importan potencialmente grandes cantidades de agua como precipitación y precipitación horizontal (corresponde a la niebla) (Mulligan, 2010), todo lo anterior representaría efectos más drásticos sobre el funcionamiento hidrológico del páramo.

La niebla es una nube a ras de suelo. Se compone de muy pequeñas gotas de agua que por ser tan pequeñas ($< 40 \mu\text{m}$), no tienen peso suficiente para caer y, por tanto, quedan suspendidas en el aire y son desplazadas por este (Cereceda, 2000). Estas pequeñas gotas pueden unirse dando lugar a gotas de mayor tamaño que discurren por el obstáculo y caen al suelo. Este proceso hidrológico es conocido como precipitación de niebla (Ritter, Regalado, Aschan & Gómez, 2005); también se puede definir como la humedad contenida en las nubes bajas o en la neblina, que es atrapada por las plantas y condensada en gotas más grandes que se precipitan por la superficie de la vegetación y los suelos.

Attaroff y Rada (2000) definen la precipitación horizontal como entradas adicionales por interceptación del agua de la niebla y de la lluvia transportada por el viento en una dirección diferente a la vertical. Ese tipo de precipitación tiene un papel importante en la hidrología de los páramos, especialmente en aquellos que tienen bajos niveles de precipitación vertical (Rivera & Rodríguez, 2011).

Aunque la dinámica de la interceptación del agua de la niebla por la vegetación aún no es muy clara y el monitoreo de esta debería ser el primer paso para mejorar el entendimiento del proceso, esta es entendida como un proceso físico donde la vegetación actúa como una barrera física que captura las pequeñas gotas de niebla y las incorpora de manera efectiva al suelo por goteo desde el dosel. La idea intuitiva de diferentes autores sugiere una relación de eficiencia diferente para la captura del agua de niebla, según el tipo de vegetación o factores biológicos y los factores climáticos (Navarrete, 2004).

2.3 HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE SUELO Y AGUA –SWAT–

En hidrología, los modelos numéricos son una herramienta básica con la que se puede estudiar el ciclo hidrológico y las relaciones hidrológicas con los problemas científicos y prácticos. Desde mediados de 1960, numerosos modelos hidrológicos se han establecido y los han desarrollado a partir de los principios simples y los conceptos de modelos distribuidos y basados en la física. Entre estos modelos, la herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT), desarrollada en la década del noventa, es un modelo para el estudio de cuencas hidrográficas de gran tamaño.

SWAT fue diseñado para aceptar entradas disponibles con el fin de permitir el uso general en grandes regiones, y también ser continuo en el tiempo y, de esta forma, permitir la simulación de los factores de gestión del suelo, validado en un amplio intervalo de regímenes hidrológicos. SWAT incorpora las características de varios institutos como el Departamento de Agricultura de USA (USDA) y el Servicio de Investigación Agrícola (ARS). Igualmente, los modelos han sido objeto de continua revisión y ampliación de sus capacidades (Chen & Wu, 2012).

SWAT es un modelo integrado que incluye componentes tales como clima, hidrología, suelo, nutrientes, plaguicidas, manejo del suelo, bacterias y agentes patógenos. El modelo es un simulador computacionalmente eficiente de hidrología y calidad del agua a varias escalas, que se ha utilizado en muchas aplicaciones internacionales (Schuol, Abbaspour, Srinivasanand & Yang, 2008). Incluye procedimientos para describir cómo la concentración de CO₂, la precipitación, la temperatura y la humedad afectan el crecimiento vegetal. También simula la evapotranspiración, la nieve y la generación de escorrentía, y se utiliza para investigar los impactos del cambio climático (Rouholahnejad et ál., 2012).

SWAT es un modelo de simulación continua que opera en intervalos de tiempo diarios. La heterogeneidad espacial de la cuenca se integra a partir de información del modelo de elevación digital, suelos y los datos de uso de la tierra por medio de sistemas de información geográfica. La parametrización espacial del modelo SWAT se realiza dividiendo la cuenca en subcuencas a partir de la topografía. Estas se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) basadas en las características del suelo y el uso de la tierra.

En los últimos años, la herramienta SWAT ha sido utilizada en muchos países y se ha probado para la simulación hidrológica a diferentes escalas espaciales, para investigar las estrategias de gestión de cuencas hidrográficas. En Grecia se modeló la calidad del agua en una cuenca de tamaño medio y se utilizó tecnología SIG como una herramienta de gestión ambiental (Pisinaras, Petalas, Gikas, Gemetzi & Tsihrintzis, 2010), mostrando buenos resultados entre los datos observados y

simulados; igualmente se demostró que la combinación entre SWAT y el apoyo tecnológico SIG es una herramienta muy útil en la evaluación de alternativas de gestión.

En 18 países de África Occidental (Schuol et ál., 2008), la modelación SWAT permitió la cuantificación de la disponibilidad de agua dulce en un área de 4×10^6 km², como respuesta a la preocupación mundial por el desabastecimiento de agua dulce; también se simuló la cuenca del río Simiyu, aportante del lago Victoria, con muy buenos resultados (Mulungu & Munishi, 2007).

En Francia, sobre cuencas altamente intervenidas por cultivos agrícolas, SWAT ha tenido un buen desarrollo con variables, como caudales diarios simulados, sedimentos y partículas de carbono, que coinciden con los valores observados en campo (Oeurng, Sauvage & Sánchez, 2011), y ha demostrado la versatilidad del programa en este tipo de modelación.

En Brasil se ha utilizado SWAT para la simulación de caudales de corrientes de agua utilizando datos de pluviómetros y pluviógrafos dentro y fuera de la cuencas (Strauch et ál., 2012). En Perú se modeló la cuenca del río Cañete, en estudio realizado por Uribe y Quintero (2011), con resultados muy acertados de acuerdo con los caudales medidos y observados.

El modelo hidrológico SWAT ha sido implementado para la modelación de los caudales de un río en China, para simular la respuesta hidrológica al cambio climático en diferentes escenarios (Song & Zhang, 2012). En Colombia solo se han realizado los trabajos reportados por Navarrete (2004), Díaz et ál. (2005) y Lombana (2006), en los cuales se tiene en cuenta un modelo de precipitación horizontal para ecosistemas de páramo simulados por medio de la herramienta SWAT. Estos trabajos indican la importancia hidrológica de los páramos y, con el modelamiento hidrológico, obtienen aportes de la precipitación horizontal de un 18 % de la precipitación vertical, tal como lo reportan estudios similares. También enfatizan en la necesidad de continuar investigando la dinámica hidrológica de estos ecosistemas en el país.

3. METODOLOGÍA

3.1 IDENTIFICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Con el fin de adelantar el análisis hidrológico de la cuenca, se identificó la información espacial y alfanumérica necesaria para su caracterización. En la delimitación, zonificación de cobertura y uso del suelo para las cuencas, se utilizaron imágenes de sensores remotos, y se adquirieron modelos digitales de elevación de la zona de estudio.

Adicionalmente, se solicitó al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) las series históricas de los diferentes parámetros climáticos, tanto de la zona de estudio como de estaciones cercanas, así como las relaciones intensidad-duración-frecuencia.

3.2 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Se desarrolló con el propósito de evaluar las imágenes satelitales, así como el estado y calidad de las series hidroclimatológicas. Como resultado se obtuvo una clasificación preliminar del uso y cobertura del suelo, la cual se ajustó a partir de visitas de campo, identificación y tratamiento de valores dudosos, llenado de datos faltantes y corrección de heterogeneidades.

También se hizo identificación, recolección y procesamiento de la información primaria, que consistió principalmente en la realización de visitas de campo que permitieron obtener la información necesaria para garantizar la veracidad de la información secundaria.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO

Se establecieron las características morfométricas de las diferentes cuencas pertenecientes al páramo de La Cortadera, a partir de la determinación de áreas mediante el modelo digital del terreno; así mismo, se llevó a cabo un análisis topográfico que permitió la delimitación de cada una de las cuencas hidrográficas.

Para el análisis geomorfológico de las cuencas se establecieron las principales características que inciden en la respuesta de la cuenca a eventos de precipitación, tales como área, perímetro, densidad de drenaje, entre otras. Luego se determinó el tipo de cobertura de las cuencas, indispensable para analizar el comportamiento del suelo en eventos de escorrentía efectiva.

3.4 DETERMINACIÓN DE PERIODOS DE RETORNO Y CONSTRUCCIÓN DE CURVAS IDF

Las curvas de intensidad–duración–frecuencia (IDF) se construyen por medio de puntos representativos de la intensidad media de precipitación para diferentes duraciones, todos correspondientes a una misma frecuencia o período de retorno. Mediante las curvas IDF es posible estimar la intensidad de tormentas de distintas duraciones y para diferentes periodos de retorno. La metodología usada para el cálculo de las curvas IDF consiste básicamente en realizar un análisis de frecuencia a cada una de las series de valores máximos de precipitación obtenidas para cada duración. La serie a la cual se le realiza el análisis de frecuencias puede ser seleccionada de tres formas:

a) *Serie máximas anuales*. Está conformada por cada uno de los valores máximos de precipitación observados en cada uno de los años de registro.

b) *Serie de duraciones parciales*. Está conformada por aquellos datos que sobrepasan un valor base predefinido.

c) *Serie de excedencias anuales*. En la cual el valor base, de la serie anterior, es seleccionado de tal forma que el número de datos que conforman la serie sea igual al número de años de registros.

Una vez seleccionada la serie de máximos, se estableció el rango de duraciones para el cual se estimaron las curvas IDF. Luego, a cada una de las series obtenidas para cada duración, se le ajustó una función de distribución, normalmente la distribución Gumbel. Con la función de distribución ajustada a los datos observados, se construyeron familias de curvas en las cuales pudieron estimarse las intensidades máximas para diferentes duraciones con distintas probabilidades de ocurrencia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cuencas delimitadas hacen parte del páramo de La Cortadera y tienen en común que el nacimiento de sus principales tributarios es el páramo y el sitio de entrega natural de sus aguas es un valle donde se ubica la represa de La Copa. Se estudió la cuenca total y las cinco subcuencas por separado, ya que cada una tiene varias corrientes de agua importantes y de esta forma se facilita la interpretación (Figura 2.1).

4.1 ÁREA DE LA CUENCA PRINCIPAL Y SUBCUENCAS. PÁRAMO DE LA CORTADERA

Las cuencas se delimitaron a partir del modelo de elevación digital (DEM) con resolución de 30 m y con el programa SWAT (por sus siglas en inglés, Soil and Water Assessment Tool), que determina las cuencas de acuerdo con las corrientes de agua identificadas en el modelo. A cada corriente de agua identificada, se le asigna el punto de salida y el programa genera automáticamente el límite de cada cuenca y su red hídrica.

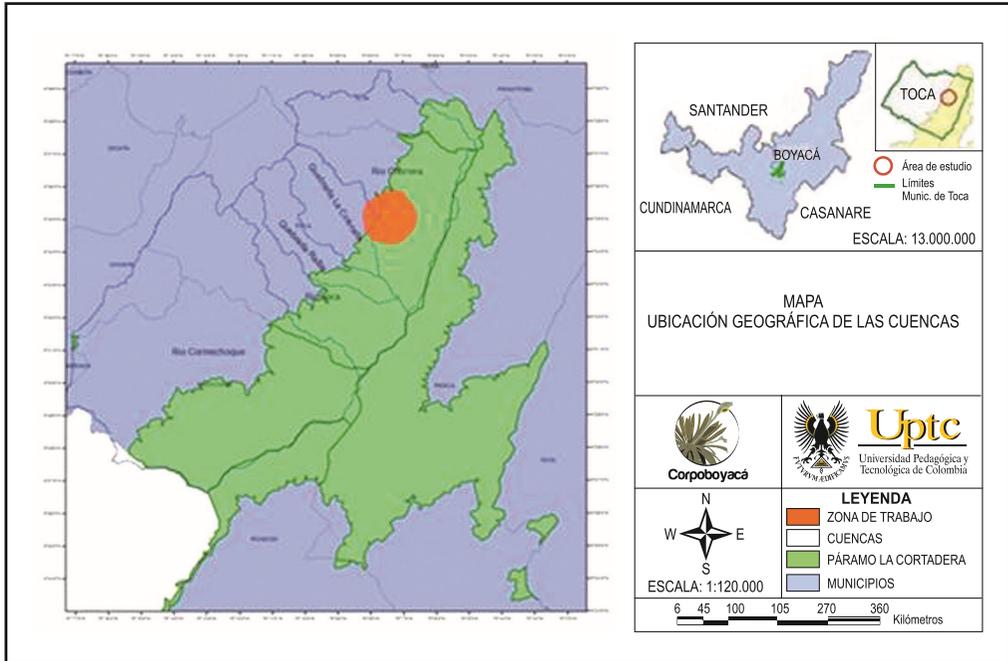


Figura 2.1 Cuencas delimitadas dentro del área del páramo La Cortadera. Zona correspondiente al color verde

4.2 ANÁLISIS MORFOMÉTRICO

4.2.1 Cuenca San Francisco. La corriente principal es el río Cormechoque con una longitud de 23838.29 m formada por los ríos La Cana, Siachoque y las quebradas Ánimas, Gacha, Tinsita, Ojo de Agua, El Encenillo, Matecana, Tuneca, El Vallado, Pozo Negro. El área de la cuenca del río Cormechoque es de 164.01 km²; puede ser catalogada como una cuenca intermedia pequeña, con poca capacidad de almacenamiento de agua. El perímetro obtenido es de 62.37 km.

La densidad de la red de drenaje para la cuenca es de 0.0019, que indica una cuenca mal drenada. Una red de drenaje con un valor bajo indica bajos volúmenes de escurrimiento y bajas velocidades del agua. Este valor muestra que la cuenca, en una tormenta, tiene poco aporte de agua a la corriente principal.

La forma de la cuenca de acuerdo con el valor obtenido aplicando la fórmula que relaciona el ancho medio de la cuenca y la longitud axial de la misma es de 0.53. Una cuenca con factor de forma inferior a 1 indica que tiene forma alargada y está sujeta a presentar crecientes, las cuales son lentas y sostenidas. El resultado para el coeficiente de compacidad es de 1.37, que revela que en el momento de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones.

De acuerdo con el índice de alargamiento, la cuenca es cuadrada, 1.12. Este índice determina qué tan rápida es la reacción de la corriente principal ante precipitaciones en la cuenca. Valores cercanos a 1 indican una forma cuadrada y valores mayores a 2, una forma alargada.

La mayor parte del comportamiento hidrológico de la cuenca y las características físicas están determinadas por la topografía, ya que a mayores pendientes, mayores velocidades de agua y menor tiempo de concentración de la cuenca. La diferencia de altura definirá la temperatura y precipitación del lugar. Para la cuenca San Francisco, el rango de altitudes va desde 3.500 hasta 2.650 msnm.

La pendiente fue determinada mediante el programa Arc Gis, con base en el modelo de elevación digital y la topografía del terreno. Para esta cuenca, la pendiente media del terreno es de 8.55 % y la pendiente media del cauce principal es de 6.56 %.

4.2.2 Cuenca río Toca. La corriente principal de esta cuenca es el río Toca con una longitud de 14690.59 m, formada por el río Toca que se une con la quebrada Honda y la quebrada Chorro Blanco.

El área de la cuenca del río Toca es de 30.4 km²; catalogada como una cuenca pequeña, con poca capacidad de almacenamiento de agua. El perímetro obtenido es de 36.42 km. La densidad de la red drenaje para la cuenca es de 0.0023, lo cual significa una cuenca mal drenada, con bajos aportes de caudal a la corriente principal al momento de presentarse una tormenta.

La forma de la cuenca es alargada y está sujeta a presentar crecientes, las cuales son lentas y sostenidas. El factor de forma se obtiene aplicando la fórmula que relaciona el ancho medio de la cuenca con la longitud axial de la misma. Para el caso de esta cuenca, el valor es 0.21, que evidencia una forma alargada. El coeficiente de compacidad, que es de 1.87, denota que en momentos de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones dado su carácter de alargamiento de acuerdo con el valor encontrado de 3.38. Este índice determina qué tan rápida es la reacción de la corriente principal ante precipitaciones en la cuenca.

Para la cuenca del río Toca, las altitudes van desde 3.750 a 2.650 msnm, la pendiente media del terreno es 10.87 % y la pendiente media del cauce principal es de 9.11 %.

4.2.3 Cuenca quebrada Raiba. La corriente principal de esta cuenca es la quebrada Raiba con una longitud de 12584.29 m, formada por varias corrientes sin nombre.

El área calculada para la cuenca de la quebrada Raiba es de 17.9 km², que puede ser catalogada como una cuenca pequeña con baja capacidad de almacenamiento de

agua. El perímetro de la cuenca es de 29.1 km, y la densidad de la red drenaje es de 0.0023, lo cual evidencia una cuenca mal drenada.

La forma de la cuenca, con base en la fórmula que relaciona el ancho medio de la cuenca y la longitud axial de la misma, es de 0.29. Cuando una cuenca muestra un factor de forma inferior a 1, indica que tiene una forma alargada y está sujeta a presentar crecientes lentas y sostenidas. El resultado obtenido para el coeficiente de compacidad es de 1.94, lo cual indica que en el momento de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones, dado su carácter de alargamiento de acuerdo con el valor encontrado de 5.14.

Las altitudes para esta cuenca están desde 3.435 a 2.670 msnm, la pendiente media del terreno es 8.18% y la pendiente media del cauce principal es de 9.63%.

4.2.4 Cuenca quebrada La Colorada. La quebrada La Colorada es la corriente principal de esta cuenca, tiene una longitud de 10637.22 m y está formada por varias corrientes sin nombre.

El área obtenida para la cuenca de la quebrada La Colorada es de 20.9 km², que es catalogada como una cuenca pequeña con poca capacidad de almacenamiento de agua. El perímetro de la cuenca es de 23.85 km.

La densidad de la red drenaje para esta cuenca es de 0.0025, hecho que significa una cuenca mal drenada. Este valor indica que la cuenca en el momento de una tormenta tiene poco aporte de agua a la corriente principal.

La forma de la cuenca es alargada y la longitud axial de la misma es de 0.28. El resultado obtenido para el coeficiente de compacidad es 1.46, lo que señala que en momentos de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones, dado su carácter de alargamiento de acuerdo con el valor encontrado de 2.23.

En la cuenca quebrada La Colorada, las altitudes están en rangos desde 3.280 a 2.685 msnm, la pendiente media del terreno es 7.2% y la pendiente media del cauce principal es de 7.4%.

4.2.5 Cuenca río Chorrera. La corriente principal de esta cuenca es el río Chorrera, con una longitud de 19219.77 m, formada por la quebrada Colorada, Los Morros, El Cucharero, El Chorro, Paso encantado, El Chuscal, La Gallinera, El Alisal, Paso de mula.

Tabla 2.1 Parámetros morfométricos de las cuencas del páramo de La Cortadera.

Cuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Ancho (km)	Densidad drenaje	Coefficiente compacidad	Factor de forma	Pendiente promedio (%)	Índice de alargamiento
Río Cormechoque	164.01	62.37	12.13	0.0019	1.37	0.53	8.55	1.12
Río Toca	30.46	36.42	3.44	0.0023	1.87	0.21	10.87	3.38
Quebrada La Raiba	17.90	29.17	2.05	0.0023	1.94	0.29	8.18	5.14
Quebrada La Colorada	20.97	23.85	3.90	0.0025	1.46	0.28	7.20	2.23
Río Chorrera	67.04	45.57	8.06	0.0020	1.57	0.65	9.48	1.70

Continuación tabla 2.1

Cuenca	Cauce principal	Longitud corriente principal (km)	Longitud total corrientes (km)	Longitud axial de la cuenca (km)	Pendiente media cauce (%)	Tiempo de concentración (min)
Río Cormechoque	Río Cormechoque	23.83	309.35	17.58	6.56	172
Río Toca	Río Toca	14.69	70.45	11.82	9.11	76
Quebrada La Raiba	Quebrada La Raiba	12.58	41.20	7.84	9.63	62
Quebrada La Colorada	Quebrada La Colorada	10.63	52.01	8.57	7.40	68
Río Chorrera	Río Chorrera	19.21	133.08	10.11	7.59	120

El área obtenida para la cuenca de la quebrada La Colorada e de 67.048 km², puede ser catalogada como una cuenca pequeña con poca capacidad de almacenamiento de agua. El perímetro obtenido es de 45.57 km. La densidad de la red drenaje para esta cuenca, que es de 0.0020, revela una cuenca mal drenada.

La forma de la cuenca es alargada, de acuerdo con el resultado de aplicar la fórmula que relaciona el ancho medio de la cuenca y la longitud axial de la misma, es de 0.65. El valor obtenido para el coeficiente de compacidad es de 1.57, que indica que en el momento de picos grandes o tormentas, la cuenca no tenderá a generar grandes crecientes o inundaciones, dado su carácter de alargamiento de acuerdo con el valor encontrado de 1.7.

Para la cuenca río Chorrera, las altitudes corresponden a rangos desde 3.450 a 2.650 msnm, la pendiente media del terreno es 9.48 % y la pendiente media del cauce principal es de 7.59 %. En la Tabla 2.1 se presentan las características morfométricas de las cuencas estudiadas.

4.3 DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÍNIMOS Y MEDIOS

El método utilizado para hallar caudales fue un modelo lluvia–escorrentía, denominado método racional, el cual se basa en:

Mediciones indirectas de precipitación, basadas en curvas IDF (intensidad–duración–frecuencia), ya establecidas.

Tiempo de concentración de la cuenca: se halla utilizando los valores de pendiente media de la cuenca, la longitud axial y el coeficiente de escorrentía establecido para dicho terreno.

Valores de área de la cuenca aportante: se obtienen con el fin de establecer un valor de caudal máximo pico a la salida o desembocadura de la cuenca.

$$Q = (C * I * A) * 2.78$$

C = Coeficiente escorrentía

I = Intensidad (mm·h⁻¹)

A = Área (ha)

El valor de 2.78, es utilizado con el fin de establecer unidades en litros por segundo (lt·s⁻¹), usando una intensidad (I) en (mm·h⁻¹) y el área en (ha).

4.3.1 Valores de caudal. Para determinar los *caudales pico a la salida de la cuenca*, se utilizó la metodología que consiste en hallar el caudal para periodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años. En el momento de establecer la intensidad por medio de

las curvas IDF, cada curva se graficó con el fin de encontrar la ecuación y generar la línea de tendencia más adecuada para su comportamiento, para disminuir la probabilidad de error.

Para los valores de *caudales medios* y *mínimos* se utilizó el método racional, basado en la información de precipitación de la estación más cercana a la cuenca por estudiar. Dicha precipitación se convirtió en intensidad de precipitación, para poder aplicar el método racional normalmente.

4.4 ANÁLISIS DE CAUDALES

Con el propósito de conocer la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del páramo de La Cortadera correspondiente al municipio de Toca, se ubicaron las estaciones limnimétricas en la zona de estudio con datos disponibles. En la Tabla 2.2 se presenta la información de las estaciones utilizadas.

Tabla 2.2 Estaciones limnimétricas en el área de influencia de la cuenca del páramo de La Cortadera

Cuenca	M/pio	Nombre	Coord. X	Coord. Y	Información		msnm
Río Cormechoque	Toca	San Cristóbal	1095739.00	1108821.16	1991	2010	2700
Río Chorrera	Toca	Chorrera	1105102.81	1111551.80	1992	2010	2700

4.4.1 Caudales río Cormechoque. Estación San Francisco. En la salida del río Cormechoque y en el borde de la represa de La Copa se encuentra ubicada la Estación Limnimétrica San Francisco. Se utilizaron los registros de caudales desde el año 1991 al 2010. En la Figura 2.2 se presentan los regímenes de caudales medios mensuales registrados.

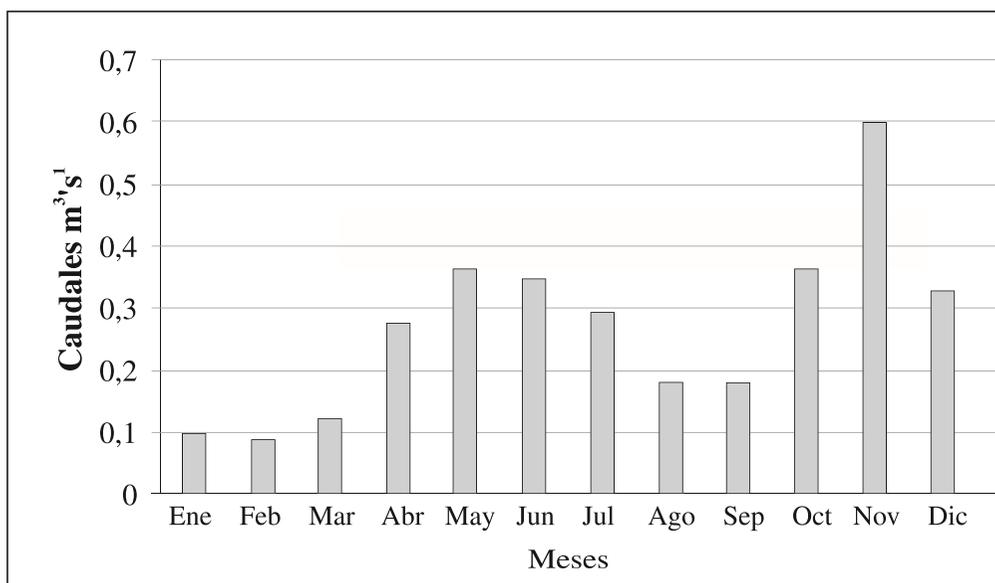


Figura 2.2 Caudales medios mensuales de la Estación San Francisco.

Como se puede apreciar, existe un régimen bimodal con dos periodos lluviosos en los meses de abril a mayo y octubre a noviembre, siendo el mes de julio el de valores de precipitación más altos. Los caudales no descienden inmediatamente pasada la temporada de lluvias, sino que se mantienen; es probable que los acuíferos que existen en la región aumenten durante la época de lluvias suministrando excedentes de agua a los ríos después de terminada la temporada.

4.4.2 Caudales río Chorrera. Estación Chorrera. En la parte intermedia del río Chorrera se encuentra la Estación Limnimétrica Chorrera. Para el análisis se utilizaron datos de caudales desde el año 1992 al 2010. En la Figura 2.3 se encuentran los regímenes de caudales medios mensuales registrados.

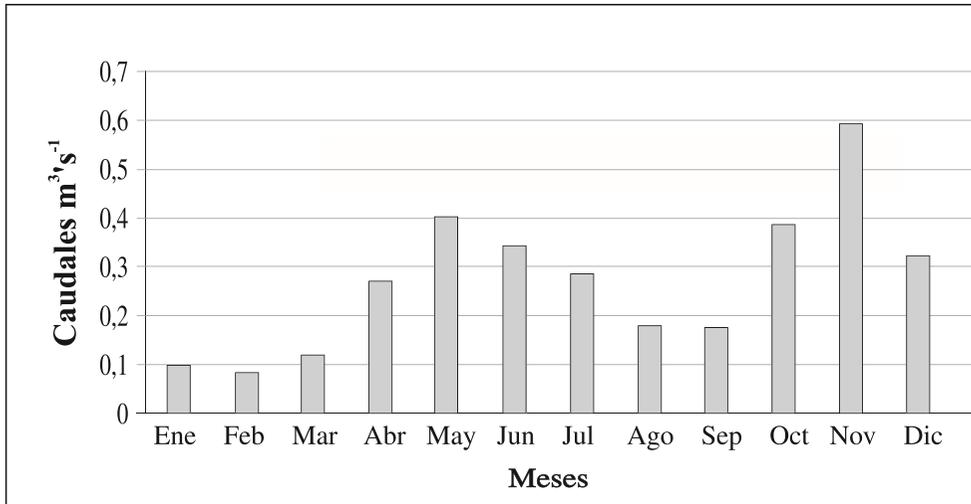


Figura 2.3 Caudales medios mensuales de la Estación Chorrera.

Los reportes de estación evidencian un régimen bimodal con dos periodos de lluvias en los meses de abril a junio y octubre a noviembre, siendo este último mes el de mayores precipitaciones. Los caudales no se mantienen de un período a otro, probablemente existe un cambio en las coberturas vegetales que disminuyen la producción de agua en los acuíferos. Además es una corriente de orden bajo, comparada con el río Cormechoque.

4.5 CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA POR EL MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN

Los polígonos de Thiessen son una manera sencilla para la interpolación, que consiste en asignar a cada punto no muestreado el valor de su punto de control más cercano, usando polígonos de proximidad. Esta técnica fue introducida por Thiessen (1911), quien estaba interesado en averiguar cómo usar los registros pluviométricos para estimar la precipitación total una región. La ventaja de los polígonos Thiessen es el enfoque en la gran simplicidad, pero en realidad no producen un campo de estimación continuo; en consecuencia, al procesamiento de datos nominales de esta manera no se le suele llamar interpolación (Ruelland, Bardin, Billen & Servat, 2008).

Para calcular el promedio de la precipitación en un área, una práctica común es sumar los valores registrados en cada estación dentro del área y dividirlo en la suma del número de estaciones consideradas. Según Thiessen (1911), el hecho de que la precipitación varía considerablemente a lo largo no solo de grandes áreas, sino también en áreas muy limitadas, es una cuestión de observación común.

Para el cálculo de los caudales medios de las cuencas identificadas, se utilizaron los datos de valores totales mensuales de precipitación (mm) de las estaciones que tienen influencia en la cuenca del páramo de La Cortadera. En la Tabla 2.3 se presentan los datos de las estaciones utilizadas.

Los datos de las estaciones climatológicas utilizadas en el estudio hidrológico son los mismos empleados en el capítulo anterior en el proceso de caracterización del comportamiento de parámetros climáticos en la región (véase Figura 1.1).

Tabla 2.3 Estaciones climatológicas utilizadas.

Municipio	Estación	Tipo	Coord. X	Coord. Y	Período de tiempo (años)		Elevación (msnm)
Siachoque	Siachoque	PM ¹	1091697.08	1101851.51	1957	2011	2720
Pesca	Pesca	PG ²	1112014.34	1101882.85	1957	2011	2678
Oicatá	El Encanto	PM	1084683.14	1110746.15	1992	2011	2645
Chivatá	Col Agrop	PM	1090231.02	1105223.81	1992	2011	2900
Tuta	San Antonio	PM	1093903.54	1119975.21	1971	2011	2580
	Los Azulejos	PG	1097602.18	1116294.13	1976	2011	2780
Toca	El Garrocho	PM	1105216.23	1113701.17	1974	2011	2836
	Casa Amarilla	PM	1102776.22	1103711.14	1974	2011	3200
	La Copa	CO ³	1097221.62	1112919.19	1992	2011	2700
	San Cristóbal	ME ⁴	1099073.93	1109235.38	1971	2011	2700
Soracá	Pila La Fca	PM	1086156.17	1101844.05	1992	2011	2873
Rondón	Rondón	CO	1097264.61	1083426.77	1991	2011	2120

La ponderación de la precipitación media polígonos de Thiessen, se muestra en la Figura 2.4.

¹ **PM:** Estación pluviométrica

² **PG:** Estación pluviográfica

³ **CO:** Estación climatológica ordinaria

⁴ **ME:** Estación meteorológica

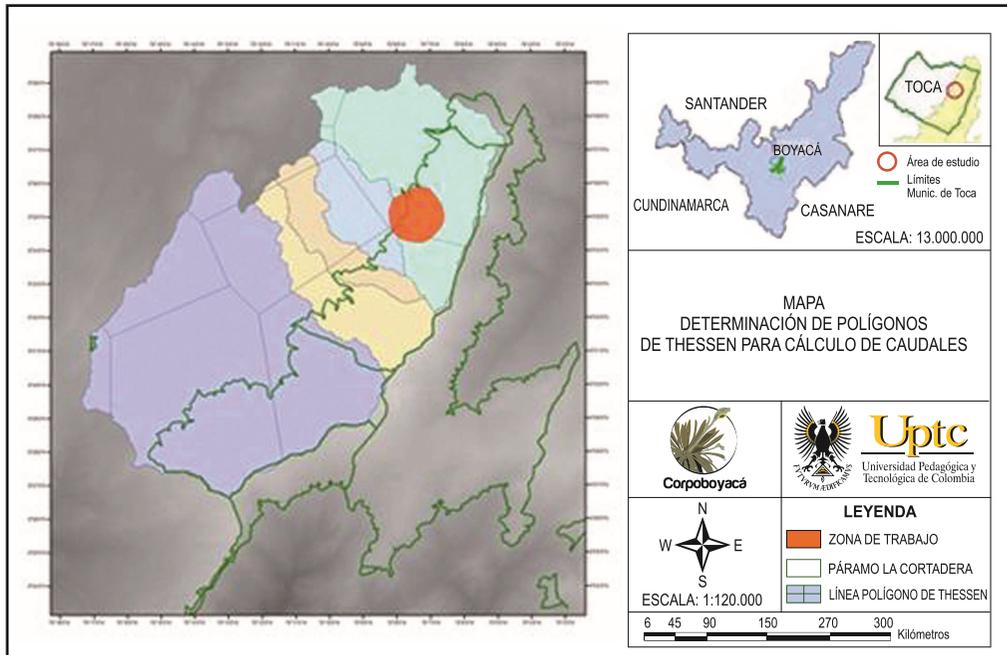


Figura 2.4 Polígonos de Thiessen.

5. CONCLUSIONES

Las cuencas identificadas para la zona de estudio se caracterizan por poseer un área pequeña con caudales base, sostenidos durante todas las épocas del año.

Existe un régimen bimodal con dos periodos lluviosos en los meses de abril a mayo y octubre a noviembre, siendo el mes de julio el de mayor valor. Los caudales no descienden inmediatamente pasada la temporada de lluvias, sino que se mantienen; probablemente la presencia de acuíferos en la región aumenta durante la época de lluvias, suministrando excedentes de agua a los ríos después de terminada la temporada.

Se observa una reducción de los caudales en las épocas secas, producto de la baja precipitación y del aumento en el cambio de coberturas vegetales de la zona, aspectos que contribuyen con el descenso en el almacenamiento de agua en los suelos.

La precipitación media se encuentra entre 550 y 900 mm·año⁻¹, lo que confirma que es un área con baja precipitación. El rendimiento hidrológico corresponde al almacenamiento de agua en el suelo, gracias a sus características de retención de agua.

A pesar de la destrucción acelerada de las coberturas vegetales de bosque altoandino y de páramo, aún se registran caudales altos medidos en las estaciones limnimétricas.

REFERENCIAS

- Ataroff, M. y F. Rada. 2000. «Deforestation Impact on Water Dynamics in a Venezuelan Andean Cloud Forest». *Ambio* 29: 440-444.
- Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79, 53–72. Retrieved from http://paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/2006_ESR.pdf; consulta: julio de 2012.
- Buytaert, W. & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(11), 1784-1799.
- Bruijnzeel, L.A. & Hamilton, L.S. (2000). Decision time for cloud forest. Water related issues and problems of humid tropics and other warm humid regions. *WWP, IHP, Humid Tropics Programme Series*, (13).
- Cereceda, P. (2000). Los atrapa nieblas, tecnología alternativa para el desarrollo rural. *Revista Medio Ambiente y Desarrollo Cipma*, 16(4), 51-56.
- Chen, J. & Wu, Y. (2012). Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features. *Journal of Hydrology*, 420–421, 319–328.
- Díaz, M., Navarrete, J. & Suárez, T. (2005). Páramos hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64-75. Recuperado de <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/A8%2022.pdf>;
- Hofstede, R., Segarra, P. & Mena, P. (2003). *Los páramos del mundo. Proyecto Atlas Mundial de los Páramos*. Quito: Global Peatland Initiative/NC-.IUCNE/EcoCiencia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2010). *Estudio nacional del agua 2010*. Bogotá D.C. Recuperado de <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/021888/021888.htm>; consulta abril de 2013.
- Kapelle, M. & Horn, S. P. (2005). Hacia una breve descripción del concepto páramo. En Instituto Nacional de Biodiversidad -INBio (ed.). *Páramos de Costa Rica*. (pp. 29-36). Santo Domingo de Heredia: INBio.
- Lombana, C. (2006). *Modelación y generación de estrategias de intervención de cuencas paramunas. Caso de estudio cuencas abastecedoras de agua potable, páramo de Chingaza*. Tesis de pregrado. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá, Colombia. 114 p.

- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial MAVDT. (2003). *Resolución 0839 del 1 de agosto de 2003 “Por la cual se establecen los términos de referencia para la elaboración del Estudio sobre el Estado Actual de Páramos y del Plan de Manejo Ambiental de los Páramos”*. Bogotá D.C.: Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=9149>;
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourt, J.C., Olaya, E., Posada, E. & Cárdenas, L. (2007). *Atlas de Páramos de Colombia*. Bogotá, D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. 208 p.
- Mulligan, M. (2010). Modeling the tropics-wide extent and distribution of cloud forest and cloud forest loss, with implications for conservation priority. In L.A. Bruijnzeel, F.N. Scatena & L.S. Hamilton (eds.) *Tropical montane cloud forests: science for conservation and management* (pp. 14-38). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Mulungu, D. & Minishi, S. (2007). Simiyu River catchment parameterization using SWAT model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, 1032–1039.
- Navarrete, J. (2004). *Hidrología de páramos, modelación de la cuenca alta del río Blanco con AVSWAT 2000*. Tesis de maestría. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá, Colombia.
- Oeurng, C., Sauvage, S. & Sánchez, J.M. (2011). Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology*, 401(3-4), 145–153.
- Pisinaras, V., Petalas, C., Gikas, G., Gemetzi, A. & Tsihrintzis, V. (2010). Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Desalination*, 250(1.1), 274–286.
- Ritter, A., Regalado, C.M., Aschan, G. & Gómez, L.A. (2005). Contribución hídrica de la captación de niebla al balance de un bosque de Laurisilva en el Parque Nacional de Garajonay. En J. Samper & A. Paz (eds). *Memorias VII Jornadas de investigación en la zona no saturada del suelo*. (pp. 351-358). Universidad da Coruña.
- Rivera, D. & Rodríguez, C. (2011). *Guía divulgativa de criterios para la delimitación de páramos de Colombia*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 68 p.

- Ruelland, D., Bardin, S., Billen, G. & Servat, E. (2008). Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation on a large basin in West Africa. *Journal of Hydrology*, 361(1-2), 96– 117.
- Rouholahnejad, E., Abbaspour, K.C., Vejdani, M., Srinivasan, R., Schulin, R. & Lehmann, A. (2012). A parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, 31, 28-36.
- Sáenz, J.A., Domínguez, F. & Díaz-Granados, M. (2001). Needs in the quantification of paramo ecosystems hidrology. Applicable model proposal. In *Proceedings of The Annual Agu Hydrology Days* (pp.198-210). Hydrology Days Annual Meeting; 21st, Hydrology days.
- Schuol, J., Abbaspour, K., Srinivasanand, R. & Yang, J. (2008). Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic Model. *Journal of Hydrology*, 3528(1-2), 30-49.
- Song, L. & Zhang, J. (2012). Hydrological Response to Climate Change in Beijiang River Basin Based on the SWAT Model. International Conference on Modern Hydraulic Engineering. *Procedia Engineering*, 28, 241–245.
- Strauch, M., Bernhofer, C., Koide, S., Volk, M., Lorz, C. & Makeschin, F. (2012). Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 414–415(11), 413–424.
- Thiessen, A.H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Mon. Weather Rev.* 39, 1082–1084. Retrieved from <http://docs.lib.noaa.gov/rescue/mwr/039/mwr-039-07-1082b.pdf>;
- Tobón, C. (2009, mayo). *Los bosques andinos y el agua*. Serie investigación y sistematización No. 4. Quito: Programa Regional para la Gestión Social de Ecosistemas Forestales Andinos ECOBONA- INTERCOOPERATION, CONDESAN. 122 p. Recuperado de <http://www.bosquesandinos.info/ECOBONA/Bosques,%20final-web.pdf>;
- Uribe, R. N. & Quintero, M. (2011). *Aplicación del modelo hidrológico SWAT a la cuenca del río Cañete*. Lima, Perú: Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT.