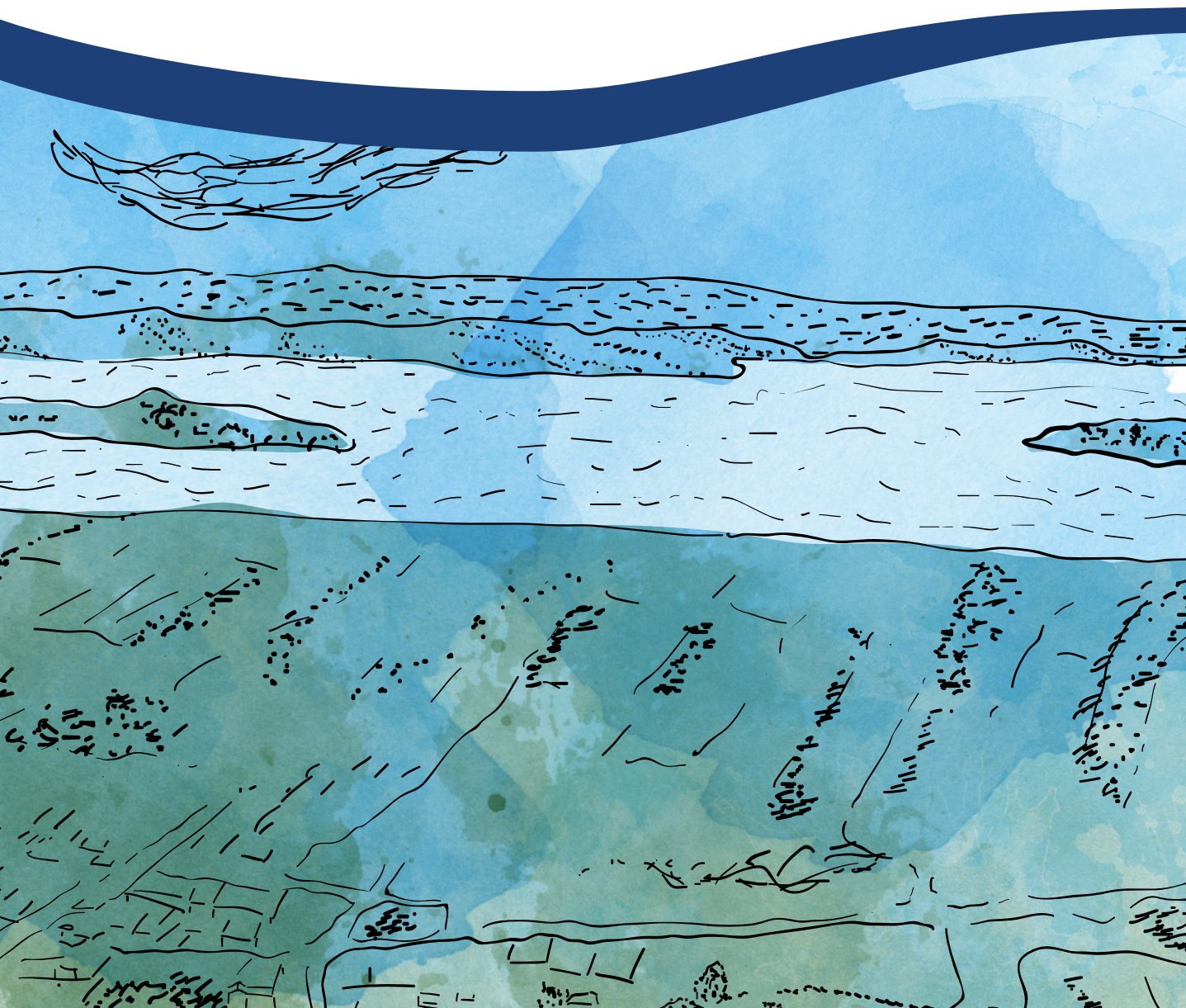




El ambiente
es de todos

Minambiente

MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA



Financiado por:



Liderado por:



En alianza con:



CONDESAN
Consenso para el Desarrollo Sostenible
de la Ecorregión Andina



Instituto de Meteorología,
Hidrología y Estudios Ambientales



Puntos Focales Nacionales

José Francisco Charry
Punto Focal Nacional
Director de Cambio Climático y Gestión de Riesgo
Ministerio de Ambiente y Desarrollo
Sostenible (Minambiente)

Ana Celia Salinas
Punto Focal Técnico
Subdirectora de Ecosistemas e
Información Ambiental
Instituto de Hidrología, Meteorología y
Estudios Ambientales (Ideam).

Autor

Juan Camilo Peña
Especialista hidrólogo

Equipo técnico editor

Julio Cesar Álvarez
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Revisión y aportes

CONDESAN

Blanca Rengifo
Coordinadora Regional Proyecto AICCA

Ana Carolina Benítez
Comunicación CONDESAN

Alexandra Garces
Especialista en Monitoreo

Equipo editorial y de comunicaciones.

TDD TALLER DE DISEÑO SAS

Ana Rincón
Camilo Casasbuenas
Libardo Fernández
Viviana Abril
Andrés Garzón
David León
María Jaramillo
Julian Martínez

MODELACIÓN HIDROLÓGICA
EN LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA

Esta publicación ha sido realizada con el apoyo del “Proyecto Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en Recursos Hídricos de los Andes - AICCA”. El proyecto es financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM/GEF), implementado por el banco de desarrollo de América Latina (CAF) y ejecutado por el Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). Este material tiene como objetivo mostrar los resultados obtenidos de la modelación de la cuenca del Lago de Tota, para orientar procesos de la gestión hídrica frente a la oferta y la disponibilidad del agua. La información y actividades presentadas en este material fueron construidas a partir de la revisión y síntesis de los productos desarrollados por el Proyecto AICCA, fuentes secundarias de información. El proyecto AICCA en Colombia es ejecutado en alianza con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

Cómo citar

Peña, J. G. 2020. Modelación hidrológica en la cuenca del Lago de Tota. Bogotá, D.C. AICCA, GEF, CAF, CONDESAN, Minambiente, Ideam.

Las publicaciones de CONDESAN contribuyen con información para el desarrollo sostenible de los Andes y son de dominio público. Los lectores están autorizados a citar o reproducir este material en sus propias publicaciones. Se solicita respetar los derechos de autor de los investigadores y CONDESAN y enviar una copia de la publicación en la cual se realizó la cita o publicó el material a nuestras oficinas.

LIMA – PERÚ
Av. Codornices 253 – Surquillo.
+511 6189400

QUITO – ECUADOR
Calle Germán Alemán E12-123
y Carlos Arroyo del Río.

condesan@condesan.org
www.condesan.org
Facebook @CONDESANandes

CONTENIDO

GLOSARIO — 6

INTRODUCCIÓN — 10

CONTEXTO — 15

CUENCA DEL LAGO DE TOTA — 15
Subcuencas del Lago de Tota — 18
Características climáticas — 21
Comportamiento del régimen
de precipitación — 23

METODOLOGÍA — 29

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA
CON ESCENARIOS DE VARIABILIDAD
CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO (VC/CC) EN
LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA — 32

Demanda Hídrica Total — 32
Proyección del Caudal de Demanda
Total (2030-2050) — 38
Oferta Hídrica Total Superficial Simulada
– Escenario Histórico — 39
Oferta Hídrica Total Superficial Simulada
Bajo Escenarios de Variabilidad y
Cambio Climático — 42
Balance Hídrico del Lago de Tota –
Escenario Histórico — 48
Balance Hídrico del Lago de Tota Bajo Escenarios
de Variabilidad y Cambio Climático — 51
Índice de Uso del Agua (IUA) — 62
Índice de Uso del Agua (IUA) Bajo Escenarios
de Variabilidad y Cambio Climático — 65

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE
RESULTADOS — 72

¿Cuánto aportan al Lago las corrientes que
NO tienen medición de caudales? — 72
¿Cuáles variables del balance hídrico
explican el cambio en el almacenamiento
del lago de Tota? — 73
¿Cuáles variables del balance hídrico
son las más relevantes? — 74
¿Cuánto aportan, realmente, los caudales
desviados del río Olarte al Lago de Tota? — 74
De las pérdidas por consumo de agua
¿Cuáles sectores representan la mayor
demanda del recurso hídrico? — 74
Bajo un escenario de lluvias extremas ¿qué cota
alcanzaría la lámina de agua del lago? — 74
¿Cómo cambia el balance hídrico futuro bajo
los escenarios de variabilidad climática
y cambio climático ((VC/CC))? — 75
¿Cómo cambia el balance hídrico si aumenta
la demanda de extracción del lago? — 76

Referencias bibliográficas — 78

Índice de tablas

Tabla 1. Estadísticas de la cuenca, subcuencas, lago y complejo insular, AICCA 2020.
Tabla 2. Estaciones hidrometeorológicas definidas para la zona de estudio, IDEAM.
Tabla 3. Estaciones meteorológicas con datos de precipitación.
Tabla 4. Demanda por sectores en la cuenca del Lago de Tota, Corpoboyacá 2012.
Tabla 5. Áreas cultivos actuales en la cuenca del Lago de Tota, DNP 2014.
Tabla 6. Caudal de demanda actual estimado por sectores en la cuenca del lago de Tota, AICCA 2020
Tabla 7. Caudales de oferta bajo los escenarios de VC/CC para las subcuencas de mayor importancia, AICCA 2020
Tabla 8. Descripción de los escenarios de VC/CC - balance hídrico del lago, AICCA 2020.
Tabla 9. Categorías del IUA a nivel mensual multianual para las subcuencas del Lago de Tota y bajo escenarios de VC/CC, AICCA 2020.
Tabla 10. Categorías del IUA en el promedio anual para las subcuencas del Lago de Tota y bajo escenarios de VC/CC, AICCA 2020.

Índice de gráficos

Gráfico 1. Precipitación mensual multianual de la estación 24030230 – Iza, AICCA 2020.

Gráfico 2. Precipitación anual de la estación 24030230 – Iza, AICCA 2020.

Gráfico 3. Precipitación mensual multianual de la estación 35160010 – Potrerito, AICCA 2020.

Gráfico 4. Precipitación anual de la estación 35160010 – Potrerito, AICCA 2020.

Gráfico 5. Proceso metodológico del modelo hídrico bajo escenarios de VC/CC para la cuenca del Lago de Tota., AICCA 2020.

Gráfico 6. Demanda por sectores en las subcuencas del Lago de Tota, Corboyacá 2012.

Gráfico 7. Estadísticas de consumo estimado de caudal por sectores en las subcuencas del Lago de Tota, AICCA 2020.

Gráfico 8. Proyección caudal de demanda total en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Gráfico 9. Estadísticas de la oferta hídrica total superficial simulada para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Gráfico 10. Estadísticas de la oferta hídrica total superficial simulada mensual multianual para el período HISTÓRICO (1990-2018) entre dos subcuencas localizadas al occidente y oriente de la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Gráfico 11. Estadísticas de la oferta hídrica total superficial simulada bajo escenarios de VC/CC en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Gráfico 12. Simulación escenario histórico balance hídrico del lago, AICCA 2020.

Gráfico 13. Simulación escenario SECO de VC/CC y proyección de demanda de referencia, AICCA 2020.

Gráfico 14. Simulación escenario SECO de VC/CC y proyección de demanda con aumento del 25 %, AICCA 2020.

Gráfico 15. Simulación escenario SECO de VC/CC y proyección de demanda con aumento del 50 %, AICCA 2020.

Gráfico 16. Simulación escenario SECO de VC/CC y proyección de demanda con aumento del 100 %, AICCA 2020.

Gráfico 17. Caudales de descarga vertedero de herradura para las simulaciones del escenario SECO de VC/CC, AICCA 2020.

Gráfico 18. Simulación escenario HÚMEDO de VC/CC y proyección de demanda de referencia, AICCA 2020.

Gráfico 19. Simulación escenario HÚMEDO de VC/CC y proyección de demanda con aumento del 25 %, AICCA 2020.

Gráfico 20. Simulación escenario HÚMEDO de VC/CC y proyección de demanda con aumento del 50 %, AICCA 2020.

Gráfico 21. Simulación escenario HÚMEDO de VC/CC y proyección de demanda con aumento del 100 %, AICCA 2020.

Gráfico 22. Caudales de descarga vertedero de herradura para las simulaciones del escenario HÚMEDO de VC/CC, AICCA 2020.

Gráfico 23. Estacionalidad cotas de nivel del lago para los escenarios seco y húmedo de VC/CC y escenario de referencia para el desvío del río Olarte (esc. referencia), AICCA 2020.

Gráfico 24. Estadísticas del IUA para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Gráfico 25. Estadísticas del IUA bajo escenarios de VC/CC en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Gráfico 26. Estadísticas de la oferta hídrica total superficial simulada para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Mapa de localización cuenca del Lago de Tota escala cartográfica 1:500.000, AICCA 2020.

Ilustración 2. Mapa topobatimétrico del lago de Tota, IDEAM y AICCA 2020.

Ilustración 3. Fotografías de las estaciones limnimétricas con medición de caudal y niveles, AICCA 2020.

Ilustración 4. Mapa delimitación de la cuenca del Lago de Tota escala cartográfica 1:25.000, AICCA 2020.

Ilustración 5. Imagen panorámica del canal de conexión río Olarte y el lago de Tota, AICCA 2020.

Ilustración 6. Mapa clasificación climática de la cuenca del Lago de Tota, AICCA-INGEAG 2020.

Ilustración 7. Mapa comportamiento del régimen de precipitación en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Ilustración 8. Mapa de demanda hídrica actual en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Ilustración 9. Mapa de oferta hídrica total superficial simulada para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Ilustración 10. Mapa de oferta hídrica total superficial simulada escenario SECO para el período futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Ilustración 11. Mapa de oferta hídrica total superficial simulada escenario HÚMEDO para el período futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Ilustración 12. Cotas de nivel máximas y mínimas del lago de Tota para el escenario SECO de VC/CC, AICCA 2020.

Ilustración 13. Cotas de nivel máximas y mínimas del lago de Tota para el escenario HÚMEDO de VC/CC, AICCA 2020.

Ilustración 14. Mapa del índice de uso del agua (IUA) para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Ilustración 15. Mapa del índice de uso del agua (IUA) escenario SECO para el período futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

Ilustración 16. Mapa del índice de uso del agua (IUA) escenario HÚMEDO para el período futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020.

GLOSARIO

Modelación hidrológica: es una herramienta de gran importancia para el estudio de la construcción de las avenidas, que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado

de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia (Dueñas, 1997).

Oferta hídrica: es la porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo-cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar (IDEAM, 2004).

Demanda hídrica: comprende la extracción de agua del sistema natural destinada a suplir las necesidades o requerimientos del consumo humano, la producción sectorial y las demandas de los ecosistemas no antrópicos. Se define como: el agua extraída consumida más el agua extraída no consumida (IDEAM, 2013).

Efluente (o emisario): en hidrología, corresponde a un curso de agua, también llamado distributivo, que desde el punto de confluencia se desprende de un lago o río como una derivación menor ya sea natural o artificial.

Afluente: cuerpo de agua que desemboca en un río superior o de mayor importancia. El afluente o tributario se une al efluente en el sitio o zona conocida como confluencia.

Batimetría: es el estudio de los fondos lacustres o marinos que representan el relieve del fondo o terreno.

Balance hídrico: es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que entran en un sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado.

Caudal: el caudal es una cantidad de líquido proporcionada por una fuente cualquiera dentro de la unidad de tiempo. Se expresa en litros por minutos (l/min).

“Oferta hídrica: es la porción de agua que después de haberse precipitado sobre la cuenca y satisfecho las cuotas de evapotranspiración e infiltración del sistema suelo-cobertura vegetal, escurre por los cauces mayores de los ríos y demás corrientes superficiales, alimenta lagos, lagunas y reservorios, confluye con otras corrientes y llega directa o indirectamente al mar (IDEAM, 2004).”

Ciclo hidrológico: el ciclo hidrológico de la Tierra es el mecanismo global que hace posible la transferencia de agua desde los océanos a la superficie y desde la superficie o sub superficie y las plantas, a la atmósfera que envuelve nuestro planeta; Las principales variables naturales de los procesos del ciclo hidrológico son: precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración. Las actividades humanas (vivienda, industria, ganadería, agricultura, entre otros) pueden alterar los componentes del ciclo natural mediante afectaciones del uso del suelo y a través de la utilización, reutilización y vertido de residuos en los recorridos naturales de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (UNESCO, 2006).

Caudal ambiental: se define como “el volumen de agua necesario en términos de calidad, cantidad, duración y estacionalidad para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los usuarios *aguas abajo* de la fuente hídrica, de la cual dependen tales ecosistemas” (Decreto 3930, 2010).

Delimitación de la cuenca: “Una cuenca hidrográfica se delimita por la línea de divorcio de las aguas. Se entiende por línea de divorcio la cota o altura máxima que divide dos cuencas contiguas”. Cuando los límites de las aguas subterráneas de una cuenca no coincidan con la línea divisoria de aguas, sus límites serán extendidos subterráneamente más allá de la línea superficial de divorcio hasta incluir la de los acuíferos subterráneos cuyas aguas confluyen hacia la cuenca deslindada (Artículo 2 del decreto 1729 del 2002).

Cuenca: entiéndase por Cuenca u hoyo hidrográfica el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten una red natural con uno o varios cauces naturales de caudal continuo o intermitente y confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar (Decreto 1728 de 2002).

Subcuenca: conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente. (GWP, 2011).

Red de estaciones hidrometeorológicas: corresponde a las estaciones hidrológicas y meteorológicas; la información que se obtiene a partir del monitoreo de variables en estas estaciones se utiliza para la generación de productos de análisis climático, en particular para la caracterización de los sistemas hídricos, la estimación de la oferta hídrica superficial, generación de indicadores hídricos, evaluación del riesgo, entre otros.

Régimen hidrológico: es el modelo predominante del flujo de aguas en un periodo de tiempo (GreenFacts, 2011). En el Glosario Hidrológico Internacional (Unesco, s.f.) se define como “variaciones del estado y características de una masa de agua que se

repiten regularmente en el tiempo y en el espacio y que son cíclicas, por ejemplo, estacionales”.

Topografía: es el estudio de la superficie de un terreno . Por ejemplo, la topografía se refiere a montañas, valles, ríos o cráteres en la superficie.

Calibración: es el proceso con el que se comprueba y ajusta, mediante la comparación con valores estándar, la precisión de un instrumento de medición. En un modelo hidrológico el estándar de comparación son las variables medidas u observadas que se intentan reproducir. Por ejemplo: las series de caudales en el cierre de una cuenca Qobs, que se compara con los resultados simulados por el modelo Qsim.

Cambio climático: Variación del estado del clima identificable en las modificaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persisten durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2014).

Variabilidad climática: desviación de las estadísticas del clima de un determinado período (mes, estación o año) respecto a las estadísticas a largo plazo de dicho lapso (OMM, 2012). Oscilaciones del clima en períodos de años y decenios.

Escenarios de cambio climático: representación del clima futuro, basado en un conjunto de relaciones climatológicas, que se utiliza en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirve a menudo de insumo para conocer los posibles impactos (IPCC, 2014).

Adaptación al cambio climático: El IPCC define la adaptación como aquellas iniciativas y medidas encaminadas a reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos

ante los efectos reales o esperados de un cambio climático. Existen diferentes tipos de adaptación; por ejemplo: preventivo y reactivo, privado y público, y autónomo y planificados. Algunos ejemplos de adaptación son la construcción de diques fluviales o costeros, la sustitución de plantas sensibles al choque térmico por otras más resistentes, etc. (DNP, 2017).

Conflicto socioambiental: Tensión que surge cuando las visiones, percepciones, necesidades e intereses de dos o más personas o grupos en relación con el acceso y uso de los recursos naturales se contraponen o se excluyen entre sí, sosteniendo objetivos incompatibles. Están asociados con las oportunidades de cambio a partir del reconocimiento de las dinámicas del territorio (Lederach, 2003).

Gobernanza ambiental: Conjunto de prácticas, políticas, reglas e instituciones que configuran la manera en que las personas interactúan con el ambiente y lo integran con la protección, con el desarrollo económico y social desde la perspectiva del desarrollo sostenible, considerando la función de todos los agentes que repercuten en él (Gobiernos, ONG, sector privado, sociedad civil) (PNUMA, 2008).

Precipitación: es el volumen de agua que cae por acción de la gravedad sobre la superficie terrestre en forma de lluvia, llovizna o granizo procedente de la condensación del vapor de agua (IDEAM, 2010a). Depende de tres factores: la presión atmosférica, la temperatura y, especialmente, la humedad atmosférica.

Problemática ambiental: Se entiende como una afectación o alteración negativa del entorno que afecta el equilibrio vital de un ecosistema (MADS – PROMAC – GIZ, 2017).

“ **Gobernanza ambiental:** Conjunto de prácticas, políticas, reglas e instituciones que configuran la manera en que las personas interactúan con el ambiente para integrarlo con la protección y con el desarrollo económico y social desde la perspectiva del desarrollo sostenible, considerando la función de todos los agentes que repercuten en él (Gobiernos, ONG, sector privado, sociedad civil) (PNUMA, 2008). ”

INTRODUCCIÓN

Los efectos asociados a la variabilidad y el cambio climático son cada vez más pronunciados, las amenazas derivadas de estos, proyectadas a largo plazo, generan impactos significativos en la regulación, oferta y disponibilidad del recurso hídrico de las diferentes regiones del país. En una escala temporal no muy lejana, se proyecta un escenario en el que la demanda del recurso hídrico irá incrementando en comparación con el estado de los cuerpos de agua y los ecosistemas claves asociados a la regulación hídrica. Es así como la Política Nacional para la gestión integral del recurso hídrico, establece en su objetivo 4. [Riesgos], que se debe desarrollar la gestión integral de los riesgos asociados a la oferta y disponibilidad del agua. Lo anterior, considerando que los riesgos en la gestión del agua hacen referencia a la oferta y disponibilidad del recurso: en términos de déficit y exceso, condiciones que son influenciadas por los cambios en las condiciones del Clima. A continuación, presentamos una serie de preguntas orientadoras que ofrecen una mirada de los resultados obtenidos de la modelación de la cuenca del Lago de Tota.

¿Por qué es importante entender el ciclo hidrológico y el balance hídrico?

“El ciclo hidrológico en la Cuenca de Lago de Tota como cuerpo de agua léntico, cuenta con 27 subcuencas en las cuales se tienen en cuenta las siguientes variables: precipitación, temperatura y evaporación para definir la entrada y salida del recurso hídrico.”

El clima y el ciclo hidrológico están estrechamente vinculados de tal manera que el incremento de temperatura y la variación en la precipitación esperados en los escenarios más probables de cambio climático, tendrán un impacto importante en la disponibilidad de los recursos hídricos del mundo.

Por ello, es importante entender los procesos que se representan como un ciclo en actividad continua a escala global como son la evapotranspiración, la precipitación, la infiltración, la percolación y la escorrentía superficial y subterránea. El ciclo hidrológico en la Cuenca de Lago de Tota como cuerpo de agua léntico, cuenta con 27 subcuencas en las cuales se tienen en cuenta las siguientes variables: precipitación, temperatura y evaporación para definir la entrada y salida del recurso hídrico.

Para las entradas de agua se consideran: la lluvia que cae sobre el espejo de agua, el caudal de escorrentía que drena por las cuencas aferentes al cuerpo de agua, los caudales de las corrientes afluentes (p. e. Las Cintas, Los Pozos, Tobal, etc.), los caudales de los vertimientos y el agua que se filtra subterráneamente.

Para las salidas de agua se tiene en cuenta el agua que se evapora del espejo de agua, el caudal afluente que descarga por el vertedero de herradura, las extracciones para satisfacer la demanda de los usuarios (irrigación, acueductos, túnel de Cuítiva, etc.) y el agua que se infiltra subterráneamente. El balance hídrico puede definirse como la relación existente entre la oferta y la demanda hídrica.

Los modelos de balance hídrico se utilizan principalmente para tres aspectos:

1. Reconstrucción de la hidrología de la cuenca.
2. Estimación de los impactos del cambio climático.
3. Evaluación de los patrones geográficos y estacionales de la oferta y la demanda.

¿Cómo se relaciona el balance hídrico con el ordenamiento y planificación ambiental y territorial?

Teniendo en cuenta que el recurso hídrico es imprescindible para la vida y el desarrollo de los territorios, se debe hacer un análisis exhaustivo sobre cómo hacer una adecuada gestión, ordenación y manejo de las sub zonas hidrográficas y macro cuencas que almacenan el recurso y de las cuales se abastece la población y los sectores sectores productivos que son usuarios. Es por esto por lo que, al incorporar en el ejercicio de ordenación y manejo de las cuencas la variable climática, con los escenarios y proyecciones, los análisis de vulnerabilidad y riesgo asociados, que en un momento confluyen en la determinación de medidas de adaptación de largo plazo como respuesta a las variaciones climáticas proyectadas o reales, permitirá tomar acciones frente a los posibles efectos y amenazas de la variabilidad y el cambio climático.

Es así, como la incorporación y consideraciones de las variables asociadas al comportamiento del recurso hídrico y el cambio climático en la ordenación y el manejo de las cuencas hidrográficas, se convierte en una oportunidad para hacer frente y avanzar en la adaptación al cambio climático. Los POMCA (Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca), como instrumentos que definen directrices de orientación en el desarrollo sostenible de los territorios al interior de una cuenca, por su determinante jerarquía ambiental en el ordenamiento territorial, tienen incidencia en

“al incorporar en el ejercicio de ordenación y manejo de las cuencas la variable climática, con los escenarios y proyecciones, los análisis de vulnerabilidad y riesgo asociados, que en un momento confluyen en la determinación de medidas de adaptación de largo plazo como respuesta a las variaciones climáticas proyectadas o reales, permitirá tomar acciones frente a los posibles efectos y amenazas de la variabilidad y el cambio climático.”

los modelos de ocupación y uso del suelo, favoreciendo la protección y conservación de los recursos naturales, en especial el hídrico, ya que los ecosistemas estratégicos presentes en una cuenca son los que aseguran la regulación hídrica y otros servicios ecosistémicos.

De otra parte, esta información adquiere una mayor efectividad y fortaleza con, un reconocimiento del territorio. Por medio de la identificación de vulnerabilidad, riesgo, sensibilidad y capacidad adaptativa, se ordenan los cuerpos de agua superficiales y subterráneos en términos de subzonas hidrográficas, se caracteriza los sistemas productivos y sectores económicos, analizando su vulnerabilidad a los impactos de la variabilidad y cambio climático, desde una visión más amplia de desarrollo regional.

¿Cómo se relaciona la información obtenida con la adaptación al cambio climático?

El cambio climático es sin duda un desafío que se relaciona directamente con la cantidad y calidad de agua. Entre los impactos más importantes del cambio climático se han identificado, por ejemplo: mayor frecuencia e intensidad de las inundaciones y sequías, una mayor escasez de agua, un agravamiento de la erosión y sedimentación, entre muchos otros. Todos ellos directa o indirectamente están relacionados con el agua.

En este sentido es esencial avanzar en el conocimiento de la cantidad disponible y en la demanda para diferentes actividades tanto antrópicas, como naturales. Esta información junto con las proyecciones de las variaciones medias en temperatura y precipitación, sobre escenarios futuros, representan lo que podría ocurrir con la oferta y demanda del agua, en el contexto de un cambio climático.

Conociendo estas dinámicas las comunidades pueden de forma colectiva emprender acciones o medidas para hacer frente a dichos cambios en el Clima y sus impactos en el agua. Por ejemplo, si las proyecciones evidencian aumentos en la temperatura y disminuciones en la precipitación y la demanda de agua aumenta día a día, las comunidades podrían enfocar sus esfuerzos en establecer tecnologías que permitan almacenar el agua a lo largo de los meses y con ello disminuir los impactos en los cambios de disponibilidad del agua.

Para el caso de la cuenca del Lago de Tota, con el fin de priorizar acciones que propendan a disminuir la vulnerabilidad del recurso hídrico en escenarios proyectados del clima, se ha estudiado el Índice de Uso de Agua (IAU), para el período 2030-2050. Este indicador evidencia la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores y usuarios,

en relación con la oferta hídrica superficial disponible para cada subcuenca (IDEAM, 2014). Esta información, en conjunto con otros insumos generados para la cuenca ha constituido la base para identificar y priorizar acciones de adaptación necesarias en los socioecosistemas.

¿Cuáles son los conflictos socioambientales identificados en la cuenca relacionados con el agua?

Para el caso de la cuenca del Lago de Tota, se identifican tres tipos de conflictos socioambientales relacionados con el agua:

1. *Concepción del Lago como objeto de explotación frente a concepción del Lago como ser vivo, sujeto de derechos.* Esto tiene que ver con un proceso de cambio cultural que inicia con la incursión española en el mundo Muisca, que incidió en la transformación u ocultamiento de los parámetros de pensamiento propios, dejando de concebir el agua como elemento sagrado, fundamento de la cultura, y a entenderla como objeto de explotación de carácter utilitario y sin vida propia. Esto ha desembocado en el uso desmedido de la misma, sin tener en cuenta sus ciclos dinámicos y que se expresa en la confrontación entre los diferentes lenguajes de valoración, que hoy se encuentran sobre el lago de Tota y sus cuencas.
2. *Toma de decisiones unilaterales o desde intereses particulares e incumplimiento de normas establecidas frente a estrategias para la gobernanza.* Históricamente se han tomado decisiones sobre la cuenca del Lago de Tota que responden a intereses particulares, llegando incluso a otorgar el “uso exclusivo” de sus aguas a propietarios privados o empresas determinadas en momentos históricos específicos. De la misma manera se han presentado situaciones de incumplimiento reiterativo de normas y fallos judiciales que minan las posibilidades de gobernanza en el área de la cuenca. Aunque en este tiempo se han creado instancias de concertación, como el Consejo de Cuenca y la Mesa Permanente por el Lago de Tota, estos espacios se encuentran inactivos, por la falta de operatividad y credibilidad de una verdadera incidencia de los procesos comunitarios en la toma de decisiones. A esto se suma el desconocimiento sobre las dinámicas de la cuenca, lo que genera una situación de confrontación entre diversos actores, que es necesario abordar.
3. *Uso del agua para consumo humano y para diferentes actividades productivas (agricultura, piscicultura, turismo) frente a preservación de servicios ambientales de la cuenca del Lago de*

“El uso del agua es un tercer factor que pone actores en conflicto, dado que hay confrontación de intereses entre quienes usan el agua para sus actividades productivas (cebolleros y otros cultivadores, trucheros y hoteleros principalmente), quienes la consumen de manera cotidiana desde sus viviendas y quienes tienen interés en la preservación de la biodiversidad de los ecosistemas presentes en la cuenca.”

“Para el caso de la cuenca del Lago de Tota, con el fin de priorizar acciones que propendan a disminuir la vulnerabilidad del recurso hídrico en escenarios proyectados del clima, se ha estudiado el Índice de Uso de Agua (IAU), para el período 2030-2050.”

Tota. El uso del agua es un tercer factor que pone actores en conflicto, dado que hay confrontación de intereses entre quienes usan el agua para sus actividades productivas (cebolleros y otros cultivadores, trucheros y hoteleros principalmente), quienes la consumen de manera cotidiana desde sus viviendas y quienes tienen interés en la preservación de la biodiversidad de los ecosistemas presentes en la cuenca. Conocer los ciclos hidrológicos y el balance hídrico de la cuenca, puede contribuir al manejo de estas situaciones de conflicto, ya que proporcionan información que reduce la incertidumbre y la especulación sobre las dinámicas en el área. Por eso, este es un insumo que, desde un análisis técnico, suma a la comprensión de dinámicas socioculturales en el territorio como senda para gestionar los conflictos mencionados.

CONTEXTO

CUENCA DEL LAGO DE TOTA

La cuenca del Lago de Tota se localiza a los **72° 54' 50,1" W** y **5° 32' 5,8" N** aproximadamente, cuenta con un área de 22.524,4 Ha (225,24 Km²) a escala 1:25.000, se encuentra localizada en los municipios de Aquitania con el 61,4 % de área en la cuenca; Tota con el 21,3 % de área en la cuenca; Cuítiva con el 9,0 % de área en la cuenca; y Sogamoso con el 8,3 % de área en la cuenca, todos pertenecientes al departamento de Boyacá. El municipio con mayor área en la cuenca es Aquitania, seguido por Tota y Cuítiva, la importancia del municipio de Sogamoso radica en que se abastece de agua para sus actividades domésticas, productivas e industriales, aunque es el que menor área tiene dentro de la cuenca.

Ahora, según la zonificación hidrográfica¹, la cuenca del Lago de Tota se encuentra clasificada como subzona hidrográfica (código 3516), con 225,6 Km² a escala 1:500.000. Esta se define como una cuenca endorreica, es decir, que no posee ninguna salida natural o desemboca en el mar. Al lago donde desembocan sus aguas se le conoce como Lago de Tota, del cual nace el Río Upía (subzona hidrográfica), que abastece a su vez al Río Meta (zona hidrográfica), pertenecientes al Área Hidrográfica del Orinoco.

La cuenca del Lago de Tota colinda al norte y occidente con la subzona hidrográfica del río Chicamocha (área hidrográfica Magdalena-Cauca), al oriente con la subzona hidrográfica del río Cusiana (área hidrográfica Orinoco) y al sur con la subzona hidrográfica del río Upía (área hidrográfica Orinoco). Ver Ilustración 1

¹ Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. IDEAM, noviembre 2013

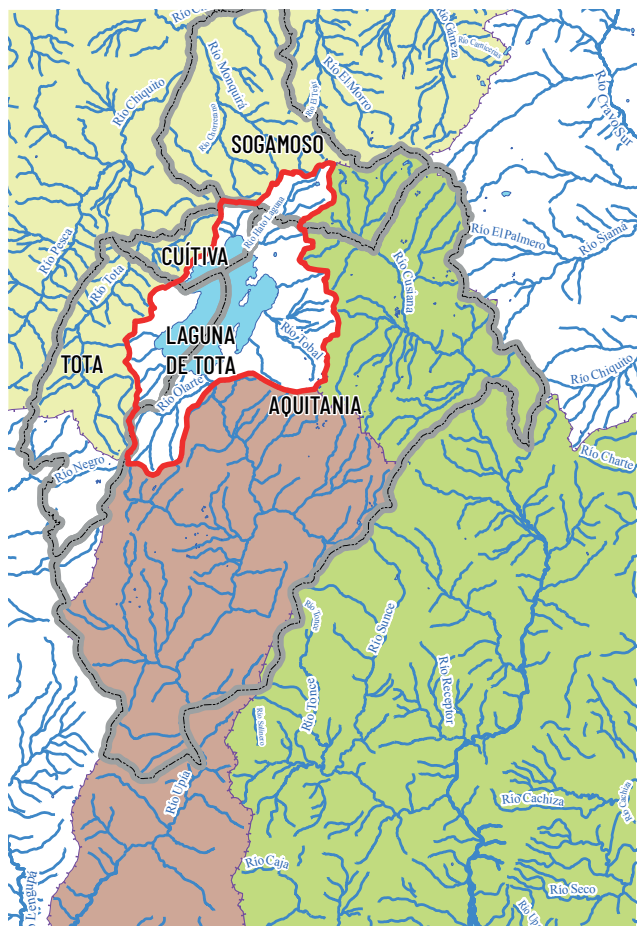


Ilustración 1. Mapa de localización cuenca del Lago de Tota escala cartográfica 1:500.000, AICCA 2020

El lago de Tota en el cual desembocan las aguas de la cuenca se caracteriza por ser el de mayor extensión del país y el segundo de alta montaña en Suramérica. Con base en los resultados obtenidos por la topobatimetría (IDEAM y AICCA, 2020), el lago cuenta con una superficie aproximada de 5.515 Ha (55,15 Km²), correspondiente al 24 % de la cuenca y un volumen de almacenamiento aproximado de 1.854,8 millones de metros cúbicos para la cota 3.015 m.s.n.m., altitud a la que se encuentra el lago aproximadamente. Cuenta con 12 Km de largo, 7 Km de ancho, un perímetro de 54,6 Km y una profundidad máxima de 63,4 m (Ilustración 2). Según *Resolución 1786 de 2012 (Corpoboyacá)*, la cota máxima de inundación establecida es de 3.015,65 m.s.n.m. y 30 m de ronda hídrica de protección.

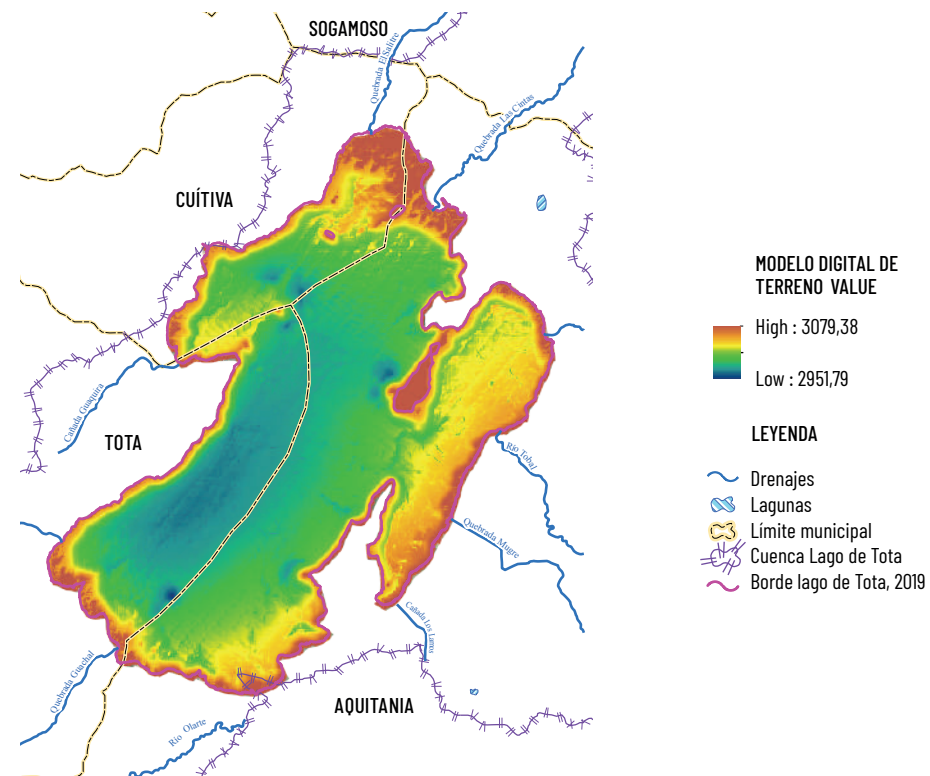


Ilustración 2. Mapa topobatimétrico del lago de Tota, IDEAM y AICCA 2020

El Lago cuenta con un complejo insular compuesto por 4 islas destacándose la *isla San Pedro* de 47 Ha de extensión y se encuentra rodeado por los páramos de *Las Alfombras*, *Suse*, *Hirva*, *Toba*, *Curies*, *Pozos* y *Hatolaguna*, entre otros. Estos, pertenecientes al complejo de páramos Tota-Bijagual-Mamapacha con una extensión de 151.247 Ha, de las cuales 12.508,2 Ha (55,5 % de la cuenca) corresponden a la parte alta de la cuenca.

El Lago de Tota es la reserva del 13,55 % del agua a nivel nacional y es una de las principales cuencas hidrográficas en la región; sus características constituyen un valor ambiental y económico a nivel regional y nacional, pues representa el abastecimiento de agua para consumo humano de 250.000 habitantes, aproximadamente el 20% del total de la población del departamento de Boyacá² (DANE 2013), y para el cultivo de aproximadamente 2.500 Ha de cebolla en rama (MADS, 2013).

² “De acuerdo a las proyecciones para el departamento que es de 1.272.855 habitantes. DANE 2013”.

Subcuencas del Lago de Tota

La cuenca del Lago de Tota está subdividida por 27 subcuencas (unidades hidrográficas de nivel I, escala 1:25.000) que alimentan el lago de Tota. La Ilustración 3 representa la localización de estas, mientras que la Tabla 1 indica las estadísticas.

OBJETO ESPACIAL	CÓDIGO	NOMBRE GEOGRÁFICO	ÁREA (Ha)	ÁREA (KM2)	%
Cuenca	3516	Lago de Tota	22.524,4	225,24	100%
	351601	Directos Lago de Tota Sur - Aquitania	104,0	1,04	0,46%
	351602	Quebrada Aíes	142,5	1,42	0,63%
	351603	Directos Lago de Tota Península de Aquitania	76,4	0,76	0,34%
	351604	Cañada Los Lamos	465,3	4,65	2,07%
	351605	Quebrada Aquablanca	756,8	7,57	3,36%
	351606	Quebrada Muore	344,8	3,45	1,53%
	351607	Río Tobal	3.159,9	31,60	14,03%
	351608	Directos Lago de Tota entre Río Tobal y Quebrada Los Pozos	165,8	1,66	0,74%
	351609	Directos Lago de Tota Este - Aquitania	54,0	0,54	0,24%
	351610	Quebrada Los Pozos	661,4	6,61	2,94%
	351611	Quebrada Los Corales	222,8	2,23	0,99%
	351612	Quebrada Salvia	210,9	2,11	0,94%
	351613	Directos Lago de Tota entre Quebradas Salvia y Las Cintas	273,4	2,73	1,21%
	351614	Quebrada Las Cintas	3.111,2	31,11	13,81%
	351615	Quebrada El Salitre	734,5	7,34	3,26%
	351616	Quebrada Los Rico	147,6	1,48	0,66%
	351617	Directos Lago de Tota Deste - Cuitiva	336,2	3,36	1,49%
	351618	Cañada Guaquirá	836,3	8,36	3,71%
	351619	Directos Lago de Tota Deste - Tota	266,0	2,66	1,18%
	351620	Quebrada Casasia	417,2	4,17	1,85%
	351621	Quebrada Donsiquira	169,7	1,70	0,75%
	351622	Quebrada Arravanes	209,1	2,09	0,93%
	351623	Quebrada Guachal	1.072,1	10,72	4,76%
	351624	Quebrada Zapatero	83,9	0,84	0,37%
	351625	Quebrada Hato Viejo	196,9	1,97	0,87%
	351626	Zanión San Antonio	178,2	1,78	0,79%
	351627	Río Olarte	2.566,6	25,67	11,39%
			16.963,5	169,62	75,30%
Lago	N/A	Tota	5.504,3	55,04	
	N/A	San Pedro	47,0	0,47	0,21%
	N/A	Santa Helena	4,9	0,05	0,02%
	N/A	Santo Domingo	1,6	0,02	0,01%
	N/A	Cerro Chiquito	3,0	0,03	0,01%
Sistema insular			56,5	0,57	0,25%

Tabla 1. Estadísticas de la cuenca, subcuencas, lago y complejo insular, AICCA 2020

Las subcuencas río Tobal, quebrada Las Cintas (Hato Laguna) y río Olarte se caracterizan por ser las de mayor extensión con 31,6 km2, 31,1 km2 y 25,7 km2, respectivamente. A su vez son las de mayor aporte de caudal (oferta hídrica total superficial simulada promedio multianual 1990-2018) con aproximadamente 678 l/s, 492 l/s y 425 l/s, respectivamente. La cuenca cuenta con 5 estaciones hidrológicas activas de categoría limnimétrica, de las cuales tres suministran datos tanto de caudales como de niveles y las otras dos de niveles (profundidad) únicamente; cuatro de estas se encuentran ubicadas en el municipio de Aquitania y una en el municipio de Tota. Ver Tabla 2

CÓDIGO	NOMBRE	CATEGORÍA	FECHA INSTALACIÓN	LATITUD	LONGITUD	MUNICIPIO	DATOS
35097010	DESAGUADERO	Limnimétrica	15/02/1964	5,48725	-72,934111	Aquitania	Caudal y Niveles
35097030	HATO LAGUNA	Limnimétrica	15/10/1970	5,585833	-72,8985	Aquitania	Caudal y Niveles
35097050	CRADERO	Limnimétrica	15/02/1971	5,55775	-72,879889	Aquitania	Caudal y Niveles
35097070	ESCALERAS	Limnimétrica	15/09/1971	5,491944	-72,9385	Tota	Niveles
35097260	STA. INÉS	Limnimétrica	15/10/1989	5,533333	-72,883333	Aquitania	Niveles

Tabla 2. Estaciones hidrometeorológicas definidas para la zona de estudio, IDEAM

Las estaciones limnimétricas “Escaleras - 35097070” y “Santa Inés - 35097260” miden el nivel (profundidad) del lago de Tota, la primera ubicada al sur del lago cerca de su desembocadura por lo tanto cerca al nacimiento del río Upía, esta carece de cota cero; mientras la segunda ubicada al oriente del lago en límites del predio de la corporación Corpoboyacá sede Santa Inés cuya cota cero es 3014.587 m.s.n.m. Las estaciones limnimétricas “Hato Laguna - 35097030”, “Criadero - 35097050” y “Desaguadero - 35097010” miden el caudal como el nivel del mismo (Ilustración 3), la primera estación ubicada en la subcuenca quebrada Las Cintas o también conocida como Hato Laguna (351614), la segunda ubicada en la subcuenca quebrada Los Pozos (351610) y la tercera ubicada en la subcuenca río Olarte (351627) aguas arriba de las compuertas de desvío, estructura construida para desviar parte del caudal del río Olarte hacia el lago de Tota a través de un canal artificial. Por lo tanto, se puede analizar que de las 27 subcuencas solo 3 cuentan con estaciones de medición de caudal (subcuencas instrumentadas). Ver Ilustración 4



Ilustración 3. Fotografías de las estaciones limnimétricas con medición de caudal y niveles, AICCA 2020

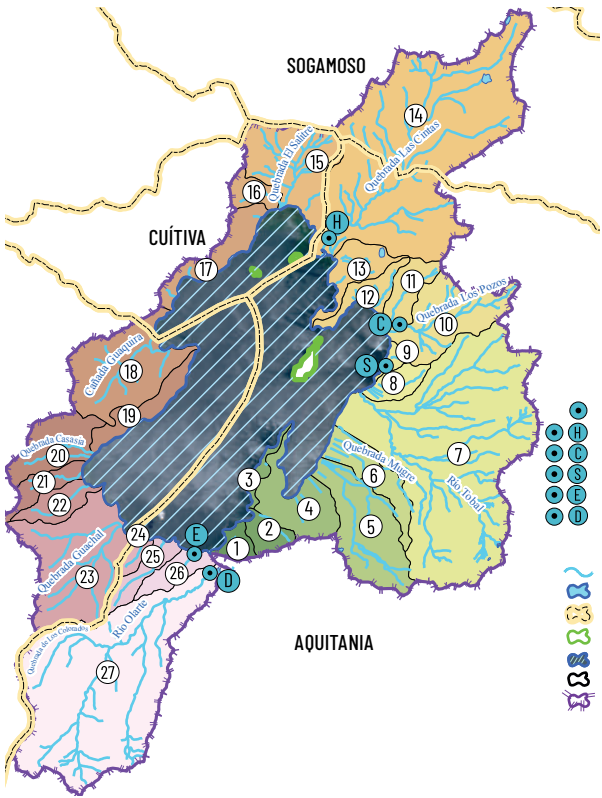


Ilustración 4. Mapa delimitación de la cuenca del Lago de Tota escala cartográfica 1:25.000, AICCA 2020

Es importante aclarar que la subcuenca río Olarte topográficamente desemboca sus aguas al río Upía y no al lago de Tota. Pero debido a la construcción del canal de conexión entre este y el lago, históricamente ha hecho parte de la cuenca del Lago de Tota. Este canal permite que parte del caudal del río Olarte alimente al lago de Tota. Ver Ilustración 5



Ilustración 5. Imagen panorámica del canal de conexión río Olarte y el lago de Tota, AICCA 2020

Características climáticas

La cuenca pertenece al subsistema climático Andino Atlántico, característico de la Cordillera Oriental, donde la humedad recibida de la Orinoquia y Amazonia es transportada y transformada en precipitación orográfica (Vargas-Ríos & Pedraza, 2004).

La cuenca pertenece al subsistema climático Andino Atlántico, característico de la Cordillera Oriental, donde la humedad recibida de la Orinoquia y Amazonia es transportada y transformada en precipitación orográfica (Vargas-Ríos & Pedraza, 2004).

En la cuenca se identificaron los siguientes tipos de clima (Ilustración 6): Extremadamente frío húmedo con 751,59 hectáreas, Extremadamente frío semihúmedo con 531,74 hectáreas, Muy frío húmedo con 16.496,39 hectáreas, Muy frío semihúmedo con 3.745,53 hectáreas y Muy frío superhúmedo con 999,12 hectáreas. Para un total de 22.524,4 hectáreas pertenecientes al área de la cuenca del Lago de Tota.

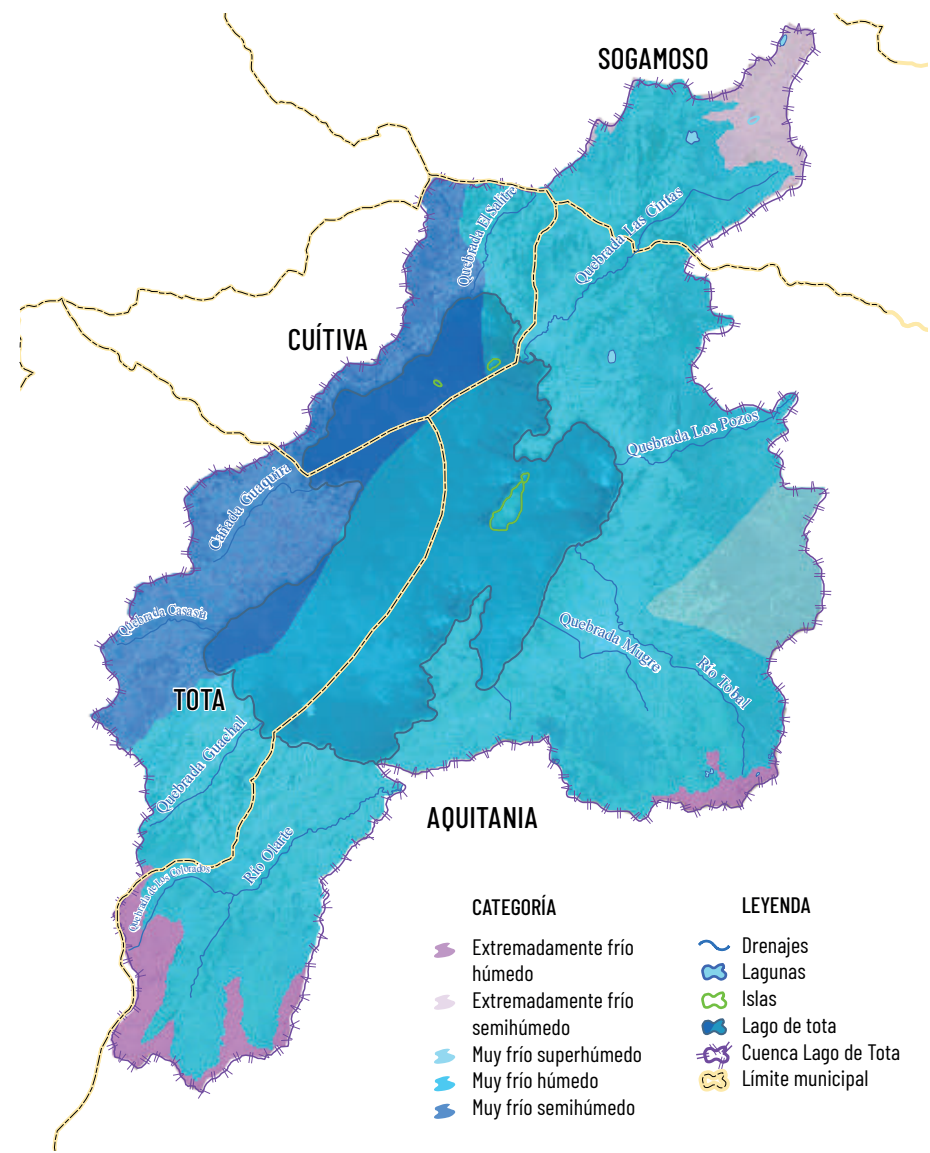


Ilustración 6. Mapa clasificación climática de la cuenca del Lago de Tota, AICCA-INGEAG 2020

Comportamiento del régimen de precipitación

Con el objeto de representar el comportamiento del régimen de precipitación en la cuenca del Lago de Tota, se consideró la recopilación de información de 9 estaciones meteorológicas (Tabla 3) que abarcan la zona occidental a las afueras de la cuenca (área hidrográfica Magdalena - Cauca), como la zona oriental a las afueras de la cuenca (área hidrográfica del Orinoco). Con esta información se realizó el análisis del comportamiento de la precipitación con base en los datos mensuales multianuales (promedio) identificando comportamientos de régimen bimodal en el costado occidental de la cuenca, como monomodal en el costado oriental de la cuenca.

El régimen monomodal se caracteriza por un período seco y uno de lluvias al año, mientras que el régimen bimodal se caracteriza por dos períodos secos y dos de lluvias al año.

CÓDIGO	NOMBRE	CATEGORÍA	FECHA INSTALACIÓN	LATITUD	LONGITUD	MUNICIPIO	DATOS	TEMPORALIDAD (DATOS)
24030120	PESCA	Pluviográfica	15/02/1957	5,523033	-73,076848	Pesca	Precipitación	1957-2018
24030230	IZA	Pluviométrica	15/02/1958	5,6155	-72,976278	Iza	Precipitación	1958-2018
24030540	FIRAVITOBA	Pluviométrica	15/04/1971	5,664528	-72,978278	Firavitoba	Precipitación	1971-2018
24035340	AEROPUERTO A LLERAS C	Climática Principal	15/01/1974	5,676944	-72,967917	Sogamoso	Precipitación y Temperatura	1982-2018
35090070	GUAMO DE SISBACA	Pluviométrica	15/06/1981	5,366667	-72,916667	Aquitania	Precipitación	1984-2018
35095030	EL TUNEL	Climática Ordinaria	15/02/1971	5,574914	-72,947694	Cuitiva	Precipitación y Temperatura	1971-2018
35160010	POTRERITO	Pluviométrica		5,477583	-72,948611	Aquitania	Precipitación	1965-2018
35190010	LAS CINTAS	Pluviográfica	15/02/1971	5,614139	-72,867667	Sogamoso	Precipitación	1971-2018
35195060	TOQUILLA - AUT	Climática Ordinaria		5,523611	-72,790972	Aquitania	Precipitación	1971-2018

Tabla 3. Estaciones meteorológicas con datos de precipitación

La recopilación de la información data de la década del ochenta hasta el año 2018, identificando saltos de años por falta de datos recopilados para algunas de las estaciones. La Ilustración 7 representa tanto la ubicación de las estaciones meteorológicas identificadas para la zona de estudio como el comportamiento del régimen de precipitación.

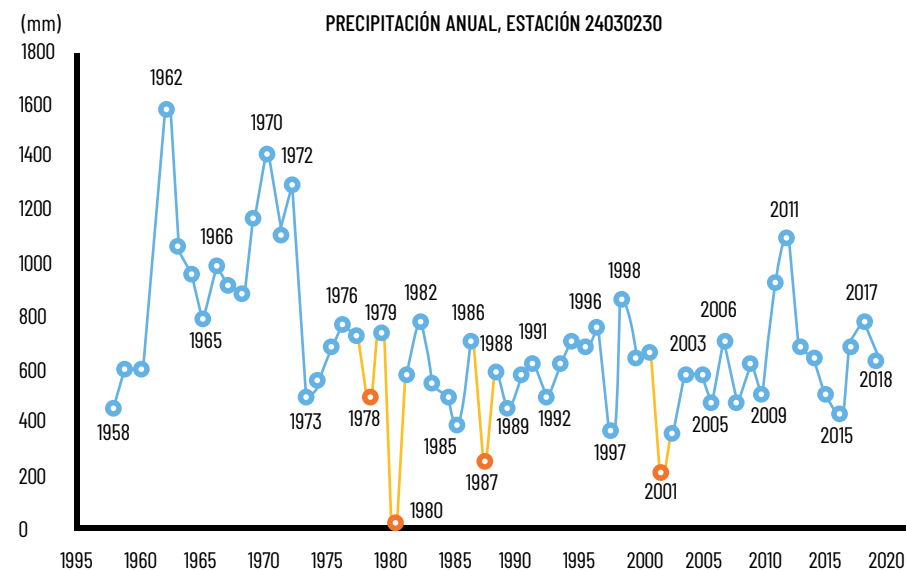


Gráfico 2. Precipitación anual de la estación 24030230 – Iza, AICCA 2020

Con base en los datos de precipitación mensual multianual y anual (promedio), para la estación de Iza se identifica un comportamiento de régimen de precipitación bimodal con dos períodos secos y dos de lluvias al año. Este mismo comportamiento de régimen de precipitación se presenta en las estaciones de Pesca (24030120), Firavitoba (24030540), Aeropuerto A. Lleras C (24035340) y estación El Túnel (35095030). Todas ellas localizadas en el área hidrográfica Magdalena - Cauca costado occidental de la cuenca del Lago de Tota.

* Estación 35160010 – Potrerito.

La estación Potrerito se encuentra instalada en el municipio de Aquitania (Boyacá), en la cual se logró recopilar datos de precipitación (en milímetros) desde el año 1965 hasta el 2018. Dentro de esta temporalidad se identificó que el año 2005 presenta un déficit en la recopilación de los datos de precipitación.

Con base en los datos de precipitación mensual, multianual (promedio), se identifica que en la zona de la estación Potrerito se presenta un comportamiento de régimen de precipitación monomodal, con un período de lluvias máximas al año entre el mes de abril y octubre siendo su máxima en julio con 107,7 mm promedio; seguido por un período de poca pluviosidad en el año entre el mes de noviembre y marzo, como puede apreciarse en el siguiente pluviograma (Gráfico 3).

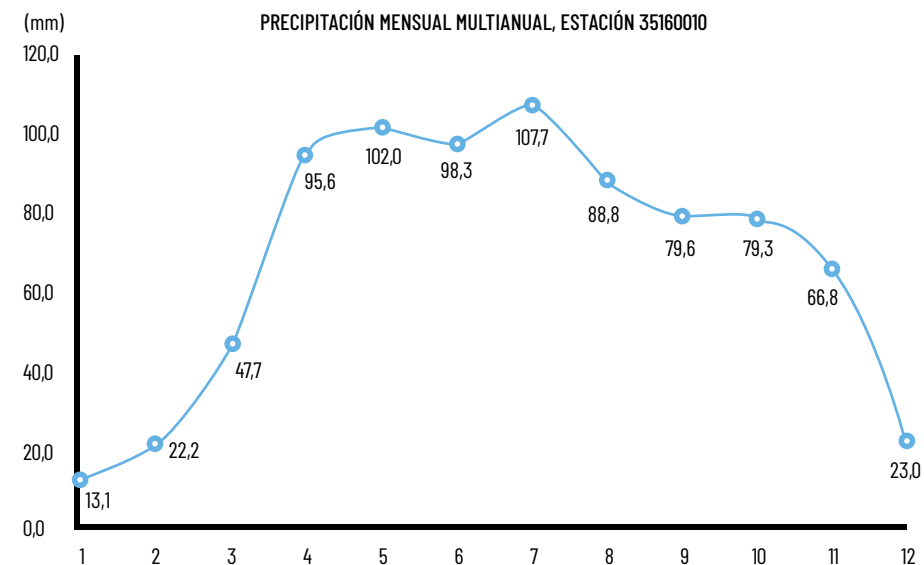


Gráfico 3. Precipitación mensual multianual de la estación 35160010 – Potrerito, AICCA 2020

Con base en los datos recopilados de precipitación anual se identifica, dentro de la temporalidad, un promedio de precipitación de 805,8 mm; una mínima de 567,1 mm para el año 1974 y una máxima de 1.044,0 mm para el año 1980. El año 2011 también cuenta con un valor bastante alto en concentración de la precipitación (1.004,3 mm) siendo coincidente con el Fenómeno de La Niña presentado en Colombia. Dentro de este periodo de tiempo se evidencia un comportamiento de precipitación entre los 600 mm y 1.000 mm. En el siguiente pluviograma se puede apreciar lo anteriormente descrito (Gráfico 4).

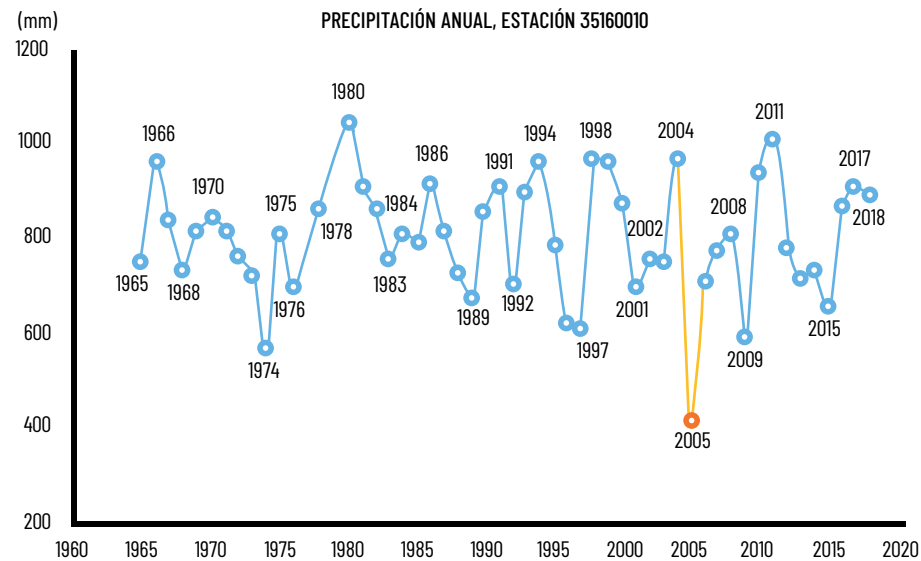


Gráfico 4. Precipitación anual de la estación 35160010 – Potrerito, AICCA 2020

Con base en los datos de precipitación mensual, multianual como anual (promedio), para la estación Potrerito se identifica un comportamiento de régimen de precipitación monomodal con un período seco y uno de lluvias al año. Este mismo comportamiento de régimen de precipitación se presenta en las estaciones Guamo de Sisbacá (35090070), Las Cintas (35190010) y Toquilla Automática (35195060). Todas ellas localizadas en el área hidrográfica del Orinoco costado oriental de la cuenca del Lago de Tota.

METODOLOGÍA

Los resultados de la modelación hídrica bajo escenarios de variabilidad y cambio climático (VC/CC), se basan en el desarrollo de una metodología propuesta y sintetizada en el gráfico 5. En esta se expresan los modelos, ecuaciones y variables que intervienen en el proceso de modelación del ciclo hidrológico y del balance hídrico del lago de Tota bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático.

Con variables climáticas e información hidrológica se calibró y validó el modelo lluvia-escorrentía GR2M. Este modelo, con el paso mensual de tiempo, es parsimonioso y solamente tiene dos parámetros que encapsulan globalmente los procesos físicos de la cuenca. Estas características permitieron estimar los parámetros del modelo en las subcuencas no instrumentadas que drenan al lago en un proceso denominado “regionalización de parámetros”.

La modelación del lago de Tota se hizo mediante el balance hídrico del cambio en el almacenamiento del cuerpo de agua. Con la lluvia y la evapotranspiración mensuales interpoladas espacio-temporalmente en el centroide del lago, los aportes de las subcuencas afluentes, la demanda de los usuarios que captan del lago y el agua vertida por el lago a través del vertedero de herradura, se solucionó la ecuación de almacenamiento.

Con el modelo del ciclo hidrológico y el balance hídrico del lago de Tota, se generó la simulación de estos, bajo escenarios de variabilidad y cambio climático (VC/CC) para la cuenca del Lago de Tota. Estos modelos se simularon para el período 2030-2050, empleando como datos de entrada los escenarios a nivel mensual de precipitación y temperatura media generados por Proyecto AICCA.

En primer lugar, se proyectaron las series mensuales de precipitación y temperatura media para cada una de las 27 subcuencas (incluyendo el lago) que conforman la cuenca del lago de Tota bajo los escenarios de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) (escenarios seco y húmedo). En segundo lugar, se analizaron los datos oficiales de demanda para los diferentes sectores, se hicieron estimaciones con el agrícola y se proyectaron para el sector doméstico en el período 2030-2050. Por último, se simularon los escenarios de modelación hidrológica bajo los escenarios de

La modelación del lago de Tota se hizo mediante el balance hídrico del cambio en el almacenamiento del cuerpo de agua. Con la lluvia y la evapotranspiración mensuales interpoladas espacio-temporalmente en el centroide del lago, los aportes de las subcuencas afluentes, la demanda de los usuarios que captan del lago y el agua vertida por el lago a través del vertedero de herradura, se solucionó la ecuación de almacenamiento.

variabilidad climática y cambio climático y cambio climático (VC/CC) y otras variables de interés para el mismo período.

Entre las variables adicionales para la simulación de escenarios se plantearon proyecciones en la demanda de los usuarios y en los aportes del canal de desvío del río Olarte. De esta manera, se logra evaluar el impacto de los escenarios de variabilidad climática y cambio climático y cambio climático (VC/CC) en el balance hídrico del lago y la oferta hídrica disponible en la cuenca, es decir, evaluar la afectación de los servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) en las subcuencas del lago de Tota.

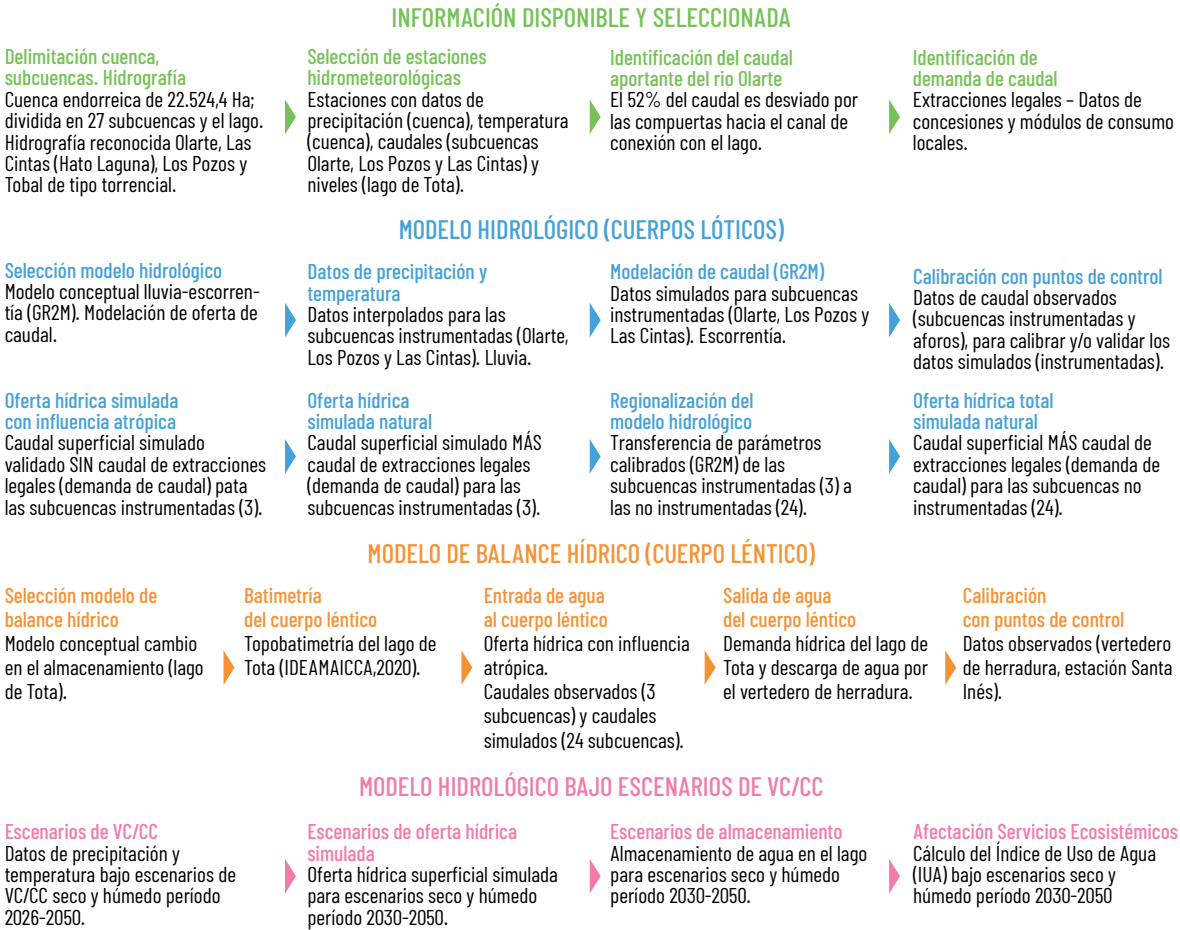


Gráfico 5. Proceso metodológico del modelo hídrico bajo escenarios de (VC/CC) para la cuenca del Lago de Tota., AICCA 2020

Para tener en cuenta:

La mejor alternativa para estimar la oferta hídrica de las corrientes que drenan al lago de Tota es la de los modelos hidrológicos del tipo lluvia-escorrentía.

Para las variables climatológicas, las estaciones seleccionadas tienen más de 25 años de registro para los cuales menos del 20 % son datos ausentes, por lo tanto, cumplen con los criterios requeridos para la modelación.

Los puntos de control dentro de la topología son puntos que contienen datos para calibrar y/o validar los resultados de las simulaciones.

Los datos históricos observados de los caudales no representan la oferta hídrica natural de la cuenca puesto que hay extracciones de los usuarios (legales e ilegales) para satisfacer su demanda. Para reproducir la hidrología histórica de la cuenca se propone usar los datos de las concesiones y los módulos de consumo locales para estimar la demanda real, y ajustar los caudales observados o medidos de modo que se quite la influencia antrópica y estos caudales representen los caudales de oferta natural de la cuenca.

Para evaluar cómo se afectan los servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua bajo los escenarios de variabilidad climática y cambio climático y cambio climático (VC/CC) en las subcuencas del Lago de Tota, fue necesario el cálculo del Índice de uso del agua (IUA).

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON ESCENARIOS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO (VC/CC) EN LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA

Demanda Hídrica Total

De acuerdo con la información de los usuarios con concesión vigente y caudal otorgado (módulos de consumo locales) dentro de la cuenca del lago de Tota, consultada en la Resolución 1539 del 13 de junio de 2012 por medio de la cual se reglamenta el uso del recurso hídrico de las corrientes pertenecientes a las microcuencas Los Pozos, Hato Laguna, Olarte y Tobal, afluentes del Lago de Tota y las derivaciones del mismo a través de motores eléctricos u otros combustibles presenta, el caudal de demanda existente por sectores en la cuenca del lago de Tota. Por su parte, en la Gráfico 6 se presenta por subcuenca o fuente, los valores existentes de demanda mostrados en la tabla. Véase tabla 4.

Subcuenca/Fuente	Doméstico (l/s)	Pecuario (l/s)	Agrícola (l/s)	Industrial (l/s)	Piscícola (l/s)	TOTAL
LAGO DE TOTA	13.5	0.003	71.20		0.031	84.70
LAS CINTAS	9.8	0.116	15.85			25.75
LOS POZOS	0.5	0.002	0.23			0.77
OLARTE	2.2	0.000	9.78			11.94
TOBAL	15.5	0.585	17.18			33.31
TUNEL CUITIVA	421.9	1.854	281.07	30.30		735.16
TOTAL	463.4	2.559	395.31	30.30	0.031	891.63

Tabla 4: Demanda por sectores en la cuenca del Lago de Tota, Corpoboyacá 2012

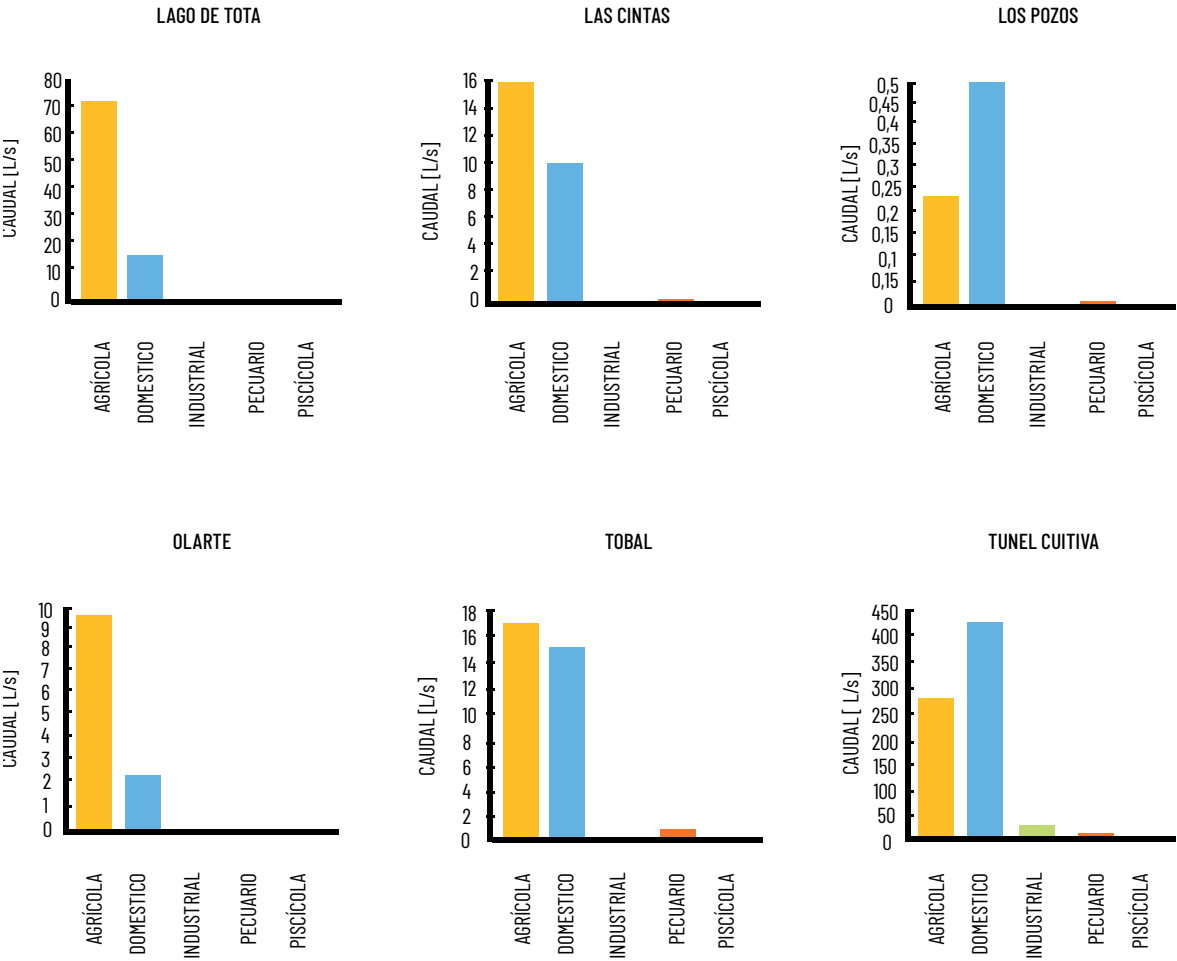


Gráfico 6. Demanda por sectores en las subcuencas del Lago de Tota, Corpoboyacá 2012

Teniendo en cuenta los datos de demanda hídrica expresados anteriormente (Corpoboyacá, 2012), se observa que de las 27 subcuencas del Lago de Tota solo 4 cuentan con información de caudal extraído, más la extracción de caudal del lago de Tota.

Por lo cual se vio la necesidad de estimar la demanda actual (año 2019) para el sector agrícola en toda la cuenca del Lago de Tota, soportada en la estimación de necesidades de riego de los cultivos (cebolla, papa, haba, cultivos varios, y pastoreo), siendo el riego por aspersión el sistema más común en la cuenca,s y determinadas por medio de la consultoría *Estructura Ecológica Principal (EEP)* generada por el proyecto AICCA, a partir de la interpretación de imágenes satelitales y la metodología CORINE Land Cover (CLC). En la Tabla 5 se presentan las áreas de los cultivos actuales de la cuenca del Lago de Tota con respecto a los reportados en el CONPES (DNP, 2014).

Cultivo	Área(ha)	
	CONPES 2014	AICCA-IGEAG 2019
Cebolla	2500	1573.7
Papa	600	192.3
Arveja	90	-
Trigo	75	-
Cebada	38	-
Zanahoria	10	-
Habas	22	5.3
Cultivos varios	-	668.1
Pastoreo y cultivos	-	3967.1
TOTAL	3335	2439.4

Tabla 5: Áreas cultivos actuales en la cuenca del Lago de Tota, DNP 2014

“Es importante resaltar que estos resultados son teóricos en la medida que los módulos de consumo son una estimación y que no necesariamente los agricultores aplican esta cantidad de agua a sus cultivos.”

En primer lugar, teniendo en cuenta que la precipitación multianual acumulada de las estaciones meteorológicas del IDEAM localizadas en la cuenca del Lago de Tota está en el rango de 400 a 1.000 mm, la necesidad básica de riego promedio por aspersión para cebolla junca y papa es de 0,21 l/s * ha y 0,17 l/s * ha, respectivamente. Por lo tanto, de acuerdo con las áreas cultivadas actuales la demanda para cebolla junca y papa es 330,5 l/s y 32,7 l/s, respectivamente, y sumadas 363,2 l/s. Si se compara este valor con la demanda total del sector agrícola presentado en la Tabla 4, 395,3 l/s, se observa que la diferencia es de aproximadamente 32 l/s que podría ser la demanda requerida por los cultivos agrupados como “Cultivos varios”.

Es importante resaltar que estos resultados son teóricos en la medida que los módulos de consumo son una estimación y que no necesariamente los agricultores aplican esta cantidad de agua a sus cultivos.

Estimada la demanda actual (año 2019) para el sector agrícola en toda la cuenca del Lago de Tota, más la demanda para los sectores doméstico, pecuario, industrial y piscícola consultada en la *Resolución 1539 del 13 de junio de 2012*, se logró determinar la demanda hídrica en la cuenca del Lago de Tota. En la Tabla 6 se presenta el caudal de demanda actual estimado por sectores en la cuenca del Lago de Tota, mientras que el Gráfico 7 representa las estadísticas de consumo de caudal por sectores para las 27 subcuencas, descartando el consumo de caudal en el lago de Tota al encontrarse a otra escala, es decir, de las 27 subcuencas la mayor demanda hídrica total es de 106,7 l/s mientras que la demanda en el lago es de 819,9 l/s.

Cód. Subcuencas	Subcuencas	Doméstico (l/s)	Pecuario (l/s)	Agrícola (l/s)	TOTAL
351601	Directos Lago de Tota Sur - Aquitania	0	0	8,743	8,743
351602	Quebrada Ajies	0	0	10,611	10,611
351603	Directos Lago de Tota Península de Aquitania	0	0	8,478	8,478
351604	Cañada Los Lamos	0	0	52,855	52,855
351605	Quebrada Aguablanca	0	0	37,731	37,731
351606	Quebrada Mugre	0	0	32,954	32,954
351607	Río Tobal	15,5	0,585	90,545	106,672
351608	Directos Lago de Tota entre Río Tobal y Quebrada Los Pozos	0	0	1,333	1,333
351609	Directos Lago de Tota Este - Aquitania	0	0	0,091	0,091
351610	Quebrada Los Pozos	0,5	0,002	1,593	2,142
351611	Quebrada Los Corales	0	0	1,328	1,328
351612	Quebrada Salvia	0	0	16,514	16,514
351613	Directos Lago de Tota entre Quebradas Salvia y Las Cintas	0	0	2,612	2,612
351614	Quebrada Las Cintas	9,8	0,116	33,122	43,022
351615	Quebrada El Salitre	0	0	6,466	6,466
351616	Quebrada Los Rico	0	0	3,222	3,222
351617	Directos Lago de Tota Oeste - Cuitiva	0	0	0,436	0,436
351618	Cañada Guáquira	0	0	0	0
351619	Directos Lago de Tota Oeste - Tota	0	0	0	0
351620	Quebrada Casasia	0	0	0,191	0,191
351621	Quebrada Donsiquira	0	0	11,388	11,388
351622	Quebrada Arrayanes	0	0	7,359	7,359
351623	Quebrada Guachal	0	0	11,25	11,25

Cód. Subcuencas	Subcuencas	Doméstico (l/s)	Pecuario (l/s)	Agrícola (l/s)	TOTAL
351624	Quebrada Zapatero	0	0	0,546	0,546
351625	Quebrada Hato Viejo	0	0	5,148	5,148
351626	Zanjón San Antonio	0	0	12,098	12,098
351627	Río Olarte	2,2	0	6,558	8,713
351600	Lago de Tota (Túnel de Cuitiva y concesiones)				819,86
TOTAL					1.211,8

Tabla 6: Caudal de demanda actual estimado por sectores en la cuenca del lago de Tota, AICCA 2020

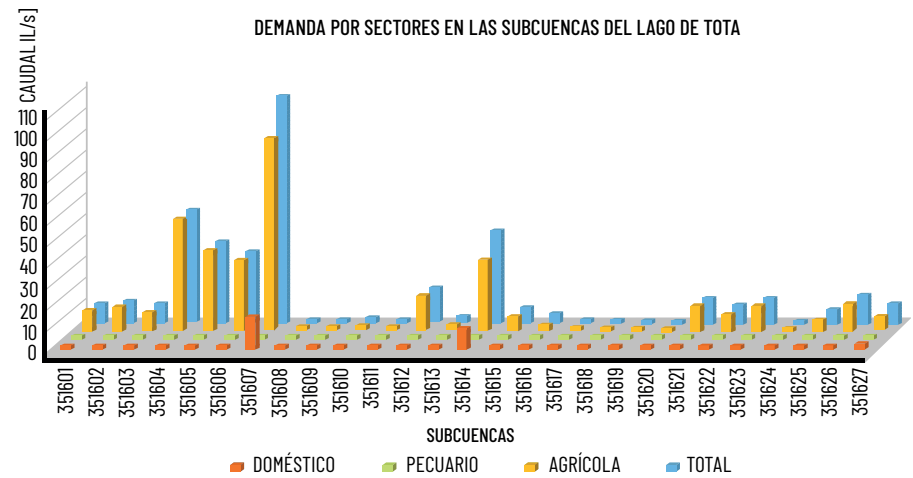


Gráfico 7. Estadísticas de consumo estimado de caudal por sectores en las subcuencas del Lago de Tota, AICCA 2020

“ Los datos de demanda por sectores muestran que el principal uso del recurso hídrico en la cuenca es el doméstico y que el Lago de Tota, a través del túnel de Cuitiva, es la fuente de mayor extracción de agua, siendo el principal usuario el acueducto de Sogamoso. ”

Los datos de demanda por sectores muestran que el principal uso del recurso hídrico en la cuenca es el doméstico y que el lago de Tota, a través del túnel de Cuitiva, es la fuente de mayor extracción de agua, siendo el principal usuario el acueducto de Sogamoso. Después del doméstico, el sector agrícola es el de mayor demanda de agua, también a través del túnel de Cuitiva, para los diferentes distritos de riego. En tercer lugar, está el sector industrial, también a través del túnel de Cuitiva, siendo Acerías Paz del Río el único usuario. En cuarto lugar, con un valor muy pequeño el sector pecuario y por último el piscícola. Con respecto a las subcuencas, el sector que más demanda agua es el agrícola seguido

por el doméstico y en mucha menor proporción el pecuario. En orden, por el caudal extraído, la subcuenca que presta el mayor servicio ecosistémico relacionado con el recurso hídrico es el río Tobal, seguido por la quebrada las Cintas, el río Olarte y la quebrada los Pozos. La Ilustración 8 representa espacialmente la demanda hídrica actual en la cuenca del Lago de Tota.

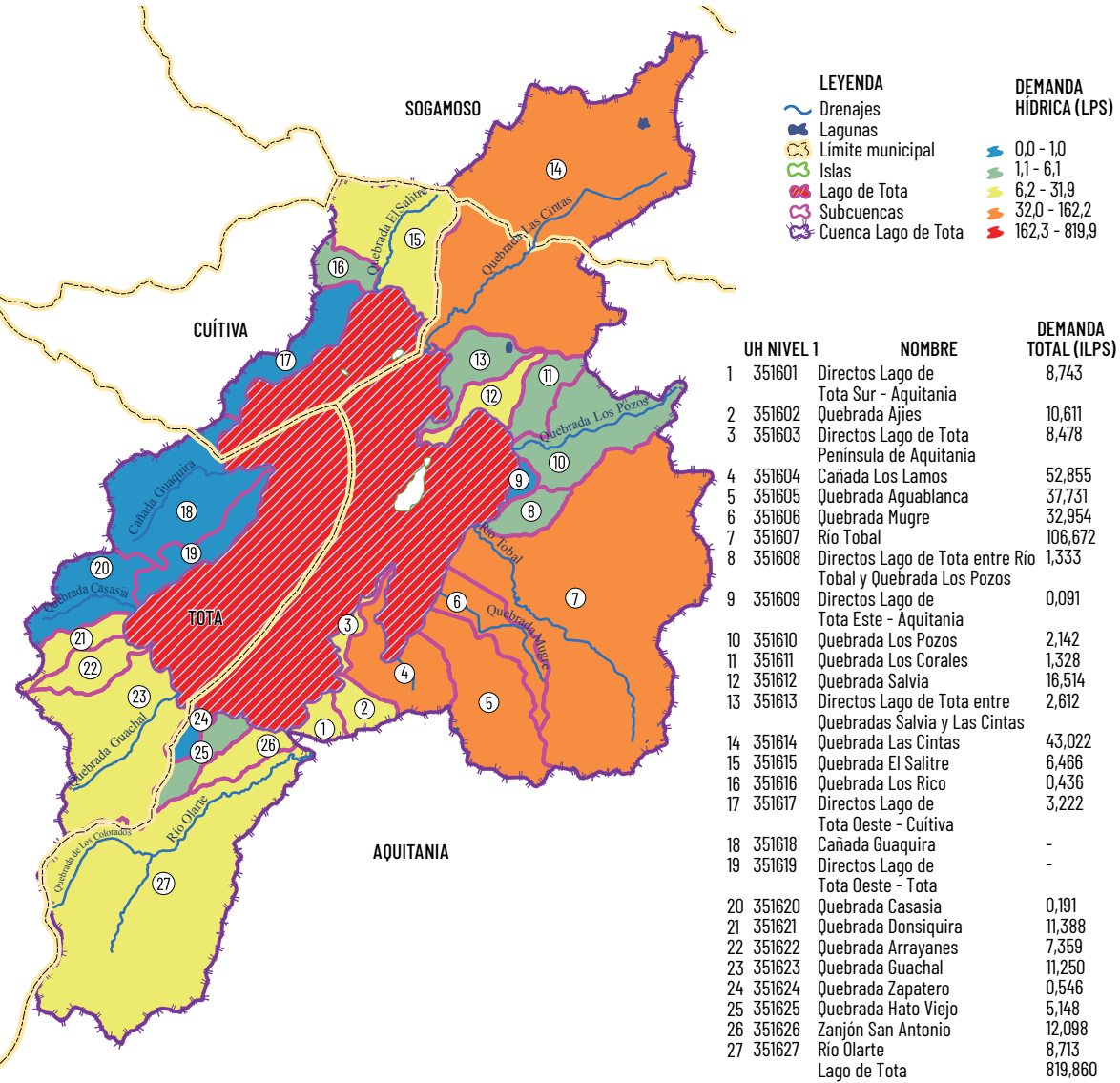


Ilustración 8. Mapa de demanda hídrica actual en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

Se aclara que, el caudal de demanda total para la cuenca del Lago de Tota tiene el mayor peso en la incertidumbre de las simulaciones del modelo hidrológico y un fuerte impacto dentro del balance hídrico del lago. Se estima que el caudal de demanda total real pudo llegar a ser en promedio hasta 2,45 veces el valor de referencia actual.

Proyección del Caudal de Demanda Total (2030-2050)

“ Para la cuenca del Lago de Tota se resalta que, en las condiciones actuales, no se ve factible que haya una expansión de la frontera agrícola o una reconversión o cambio del uso con diferente actividad.”

Para considerar proyecciones futuras en la demanda de los usuarios de la cuenca del Lago de Tota, que sean aproximadas a la realidad, se pueden emplear los módulos de consumo, que son la cantidad de agua que se requiere para el desarrollo de una actividad o la obtención de un producto. Mediante los módulos se determinan los caudales a asignar a una comunidad o a personas naturales o jurídicas para el desarrollo de sus actividades domésticas, agropecuarias, industriales, comerciales o de otro tipo (UPB y Corpoboyacá, 2015).

Es de resaltar que en la cuenca del Lago de Tota, en las condiciones actuales, no se ve factible que haya una expansión de la frontera agrícola o una reconversión o cambio del uso con diferente actividad. Entonces, para el sector agrícola se mantiene el valor oficial de 395,3 l/s de caudal demandado, pues el que se estimó a partir de las áreas de los cultivos y los módulos de consumo es ligeramente menor; para los sectores pecuario, industrial, piscícola también se tomó el valor oficial de la Tabla 4, es decir no se hacen proyecciones. Por su parte, para el sector doméstico se hace una proyección agregada de la demanda total, teniendo en cuenta un posible aumento en la demanda de caudal a través de las extracciones del túnel de Cuítiva, ya sea por el aumento de la población en la ciudad de Sogamoso, o bien por la aprobación por parte de la autoridad ambiental de nuevas concesiones de tipo trasvase hacia otros usos y territorios fuera de la cuenca.

Para las posibles extracciones a través del túnel de Cuítiva se proponen tres escenarios que estiman la proyección de demanda total para el período 2030-2050, un aumento de la demanda total del 25%, 50% y 100 %. En estos escenarios la proyección de la demanda total tendría las siguientes variaciones:

- * Para el escenario de referencia en el rango 896,05 l/s (2029) – 908,1 l/s (2050);
- * Para el escenario con incremento del 25 % en el rango 1.120,07 l/s (2029) – 1.135,12 l/s (2050);

- * Para el escenario con incremento del 50 % en el rango 1.344,08 l/s (2029) – 1.362,15 l/s (2050);
- * Para el escenario con incremento del 100 % en el rango 1.792,11 l/s (2029) – 1.816,2 l/s (2050).

En el Gráfico 8 se presenta tanto el escenario de referencia como la proyección del caudal de demanda total para el período 2030-2050.

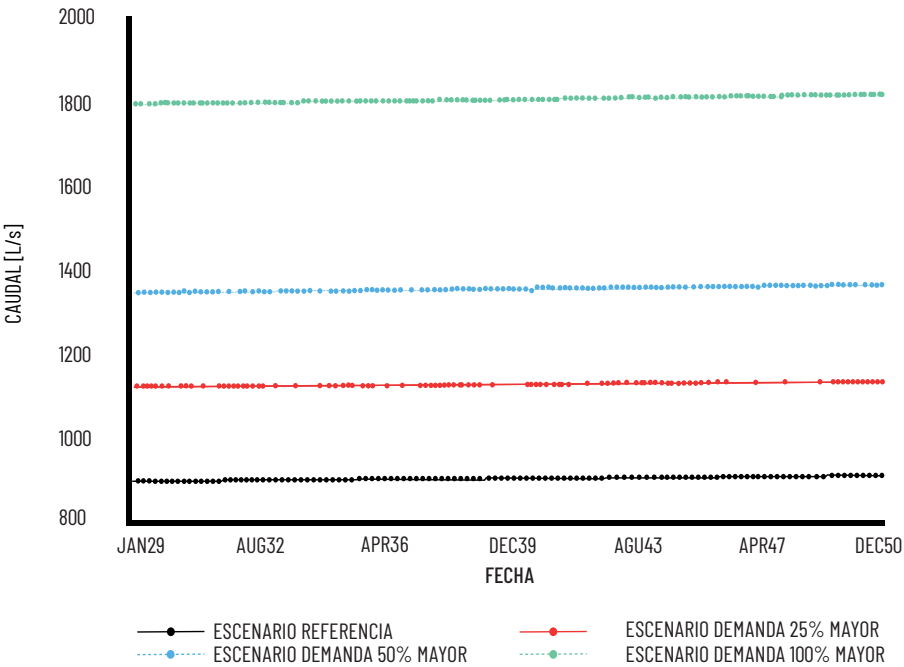


Gráfico 8. Proyección caudal de demanda total en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

Oferta Hídrica Total Superficial Simulada – Escenario Histórico

El modelo GR2M se calibró con información de caudal (l/s) histórico mensual multianual disponible para el período 1990-2018, que arroja una oferta hídrica total superficial simulada promedio de 111,3 l/s; una mínima de 10,9 l/s; y una máxima de 677,9 l/s en el área superficial de las subcuencas del Lago de Tota. La oferta mínima pertenece a

la subcuenca directos Lago de Tota Este – Aquitania (351609), mientras que la oferta máxima pertenece a la subcuenca del río Tobal (351607), seguida por la subcuenca quebrada Las Cintas (Hato Laguna) con 492,0 l/s y la subcuenca del río Olarte con 425,0 l/s. El restante de subcuencas ofrece caudales de 0 a 100 l/s como de 100 a 200 l/s. La Ilustración 9 representa espacialmente la oferta hídrica total superficial simulada para el período histórico (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, mientras que el Gráfico 9 representa las estadísticas de oferta hídrica histórica para las 27 subcuencas.

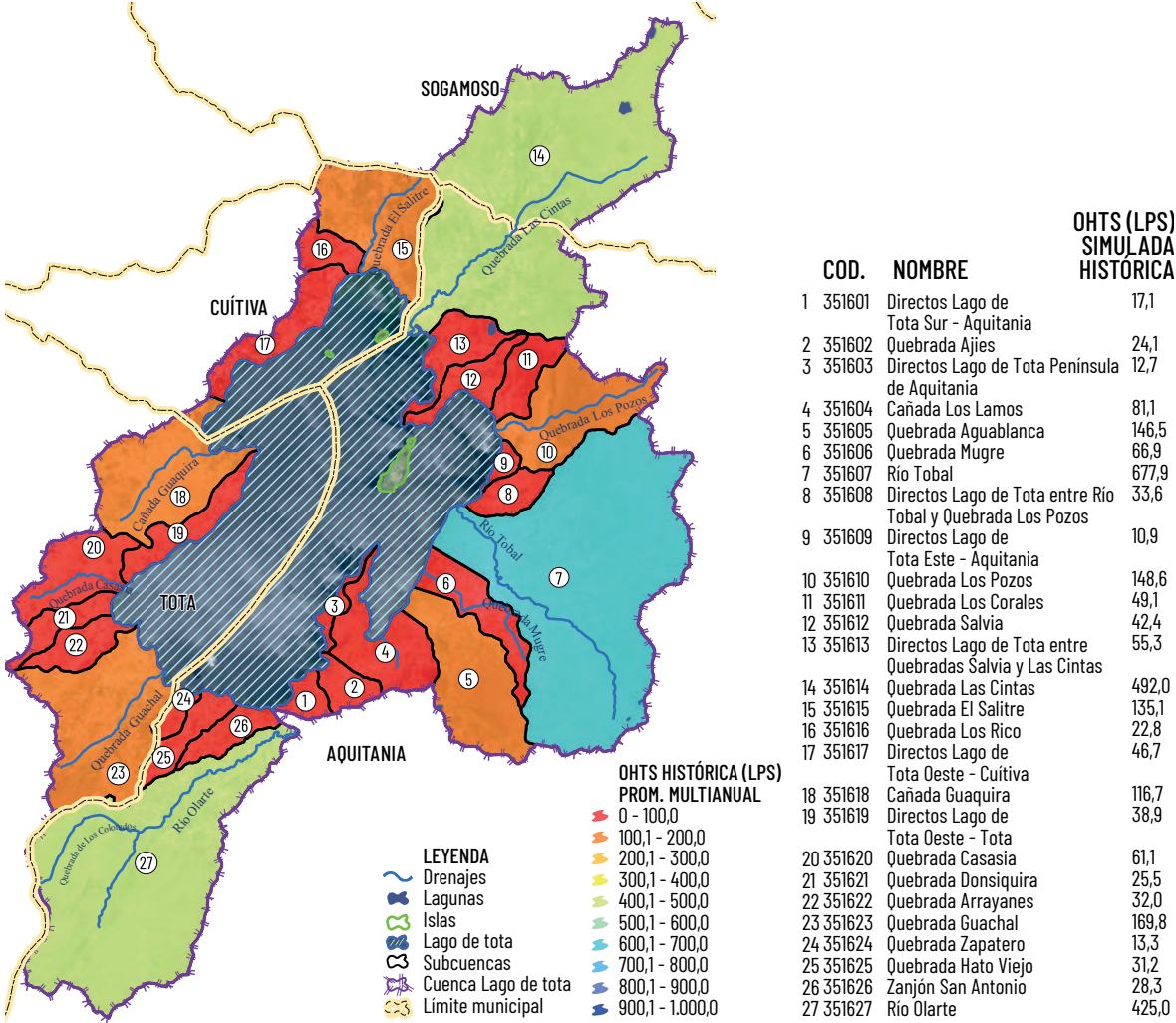


Ilustración 9. Mapa de oferta hídrica total superficial simulada para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

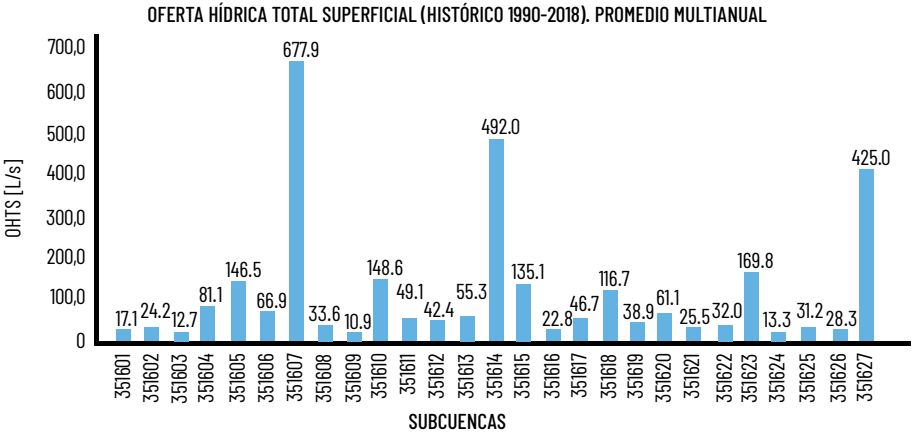


Gráfico 9. Estadísticas de la oferta hídrica total superficial simulada para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

Los resultados agregados a nivel mensual multianual indican que el caudal de oferta presenta el mismo comportamiento que la precipitación bajo régimen bimodal para la zona occidental, y monomodal para la zona oriental de la cuenca. En el Gráfico 10 se muestra que para una de las subcuencas ubicadas al occidente (quebrada El Salitre - 351615) tiene un comportamiento del caudal de oferta hídrica caracterizado por dos períodos de baja oferta (Diciembre – Marzo y Agosto - Septiembre) y dos de alta oferta (Abril – Julio y Octubre - Noviembre) en el año; mientras que para una de las subcuencas ubicadas al oriente (quebrada Aguablanca - 351605) su comportamiento de caudal de oferta hídrica se caracteriza por un período de baja oferta (Diciembre – Marzo) y uno de alta oferta (Abril – Noviembre) en el año.

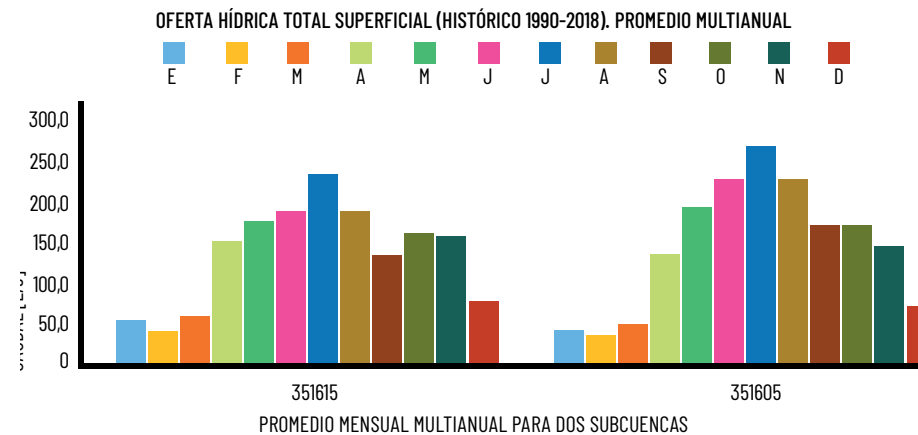


Gráfico 10. Estadísticas de la oferta hídrica total superficial simulada mensual multianual para el período HISTÓRICO (1990-2018) entre dos subcuencas localizadas al occidente y oriente de la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

Oferta Hídrica Total Superficial Simulada Bajo Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático

Con el propósito de generar un escenario de referencia que permita determinar, con el modelo GR2M calibrado, cómo cambia el caudal de oferta de las 27 subcuencas que drenan al lago de Tota, se ingresaron como variables de entrada las series mensuales de precipitación y temperatura media generadas bajo los escenarios de variabilidad y cambio climático: escenarios seco y húmedo.

Los escenarios de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) para la cuenca del Lago de Tota fueron elaborados por el proyecto AICCA (2019). Se tomaron los datos de precipitación mensuales y los datos de temperatura media mensual agregados espacialmente a nivel de subcuenca a partir de la información meteorológica disponible para la zona de estudio en las estaciones del IDEAM. El período de referencia histórico es 1984-2018 para la precipitación y para la temperatura a nivel mensual multianual replicada anualmente como una variable cíclica por la escasa información disponible.

Con esta información de referencia se generaron los escenarios futuros de cambio climático con modelos globales seleccionados a partir de su desempeño en la representación de los fenómenos de variabilidad climática y cambio climático

(eventos El Niño/La Niña a nivel global). Estos modelos permitieron generar series diarias y mensuales de precipitación y temperaturas media tanto para el período HISTÓRICO 1984-2018 como para el período futuro 2030-2050 bajo los escenarios de cambio climático que son diferentes a los escenarios RCP del Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. Estos escenarios serán aquellos que proyecten, para el período 2030-2050, las siguientes condiciones:

1. Reducción de los niveles de precipitación anual y el aumento del máximo número de días secos consecutivos en el año ("Escenario SECO");
2. Aumento en la precipitación anual e incremento del número de días consecutivos con precipitaciones en el año y en el número de días con lluvias superiores al percentil 95 ("Escenario HÚMEDO").

Finalmente se hizo un proceso estadístico de reducción de escala con el método Delta QQ.

De acuerdo con los análisis realizados por Armenta (2019), los resultados de los escenarios de precipitación muestran que para el escenario SECO se darían reducciones de lluvia entre un 10-20 % en diciembre y entre marzo y junio y leves aumentos (del 5-10 %) entre julio y agosto. La duración de los mayores períodos secos se extenderá en promedio de 5 a 9 días. En cuanto al cambio de intensidad que ocasionarían los fenómenos de variabilidad climática y cambio climático se esperan reducciones de hasta un 70 % e incrementos del orden del 60-80 %. Por su parte, para el escenario HÚMEDO se presentarían incrementos de la precipitación del orden del 15-40 % en diciembre y entre febrero y agosto, dándose los más altos en abril, mayo y julio.

La duración de los períodos extensos de lluvias aumentará en promedio de 4 a 7 días y, para las lluvias extremas, aumentarán entre 7 y 9 días. De otra parte, para los cambios de la intensidad de las lluvias por fenómenos de variabilidad climática, ante eventos, como el fenómeno de La Niña los incrementos serían mayores al 70 % llegando a presentarse meses con lluvias de más del 100 % mientras que ante eventos, como el fenómeno de El Niño se reducirían entre un 10-45 %.

Para los escenarios de temperatura media, de acuerdo con Armenta (2019), se esperaría que la temperatura aumente durante todo el año, con los mayores aumentos en noviembre y diciembre y entre marzo y mayo. En el escenario SECO, la temperatura aumentaría entre 0,7 y 0,9 °C, mientras que, para el escenario HÚMEDO, ésta se incrementaría entre 0,6 y 0,8 °C.

Con esta información de referencia se generaron los escenarios futuros de cambio climático con modelos globales seleccionados a partir de su desempeño en la representación de los fenómenos de variabilidad climática y cambio climático (eventos El Niño/La Niña a nivel global).

De acuerdo con los análisis realizados por Armenta (2019), los resultados de los escenarios de precipitación muestran que para el escenario SECO se darían reducciones de lluvia entre un 10-20 % en diciembre y entre marzo y junio y leves aumentos (del 5-10 %) entre julio y agosto.

Con estos escenarios fue posible simular con el modelo GR2M calibrado, cómo cambia a futuro (2030-2050) el caudal de oferta de las 27 subcuencas que drenan al lago de Tota.

Teniendo en cuenta que los escenarios fueron generados para el período 2030-2050 y que el modelo GR2M se calibró con información histórica disponible para el período 1990-2018, la oferta hídrica total superficial simulada para el escenario SECO presenta un promedio de 94,0 l/s; una mínima de 8,8 l/s; y una máxima de 597,8 l/s en el área superficial de las subcuencas del Lago de Tota. La oferta mínima pertenece a la subcuenca directos Lago de Tota Este – Aquitania (351609), mientras que la oferta máxima pertenece a la subcuenca del río Tobal (351607), seguida por la subcuenca del río Olarte con 391,8 l/s y la subcuenca quebrada Las Cintas (Hato Laguna) con 385,4 l/s. El restante de subcuencas ofrece caudales de 0 a 100 l/s como de 100 a 200 l/s. La Ilustración 10 representa espacialmente la oferta hídrica total superficial simulada escenario SECO para el período futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota.

Ahora, la oferta hídrica total superficial simulada para el escenario HÚMEDO presenta un promedio de 154,0 l/s; una mínima de 14,3 l/s; y una máxima de 948,4 l/s en el área superficial de las subcuencas del Lago de Tota. La oferta mínima pertenece a la subcuenca directos Lago de Tota Este – Aquitania (351609), mientras que la oferta máxima pertenece a la subcuenca del río Tobal (351607), seguida por la subcuenca quebrada Las Cintas (Hato Laguna) con 666,6 l/s y la subcuenca del río Olarte con 629,8 l/s. El restante de subcuencas ofrece caudales de 0 a 100 l/s como de 100 a 200 l/s y de 200 a 300 l/s. La Ilustración 11 representa espacialmente la oferta hídrica total superficial simulada en HÚMEDO para el período futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota.

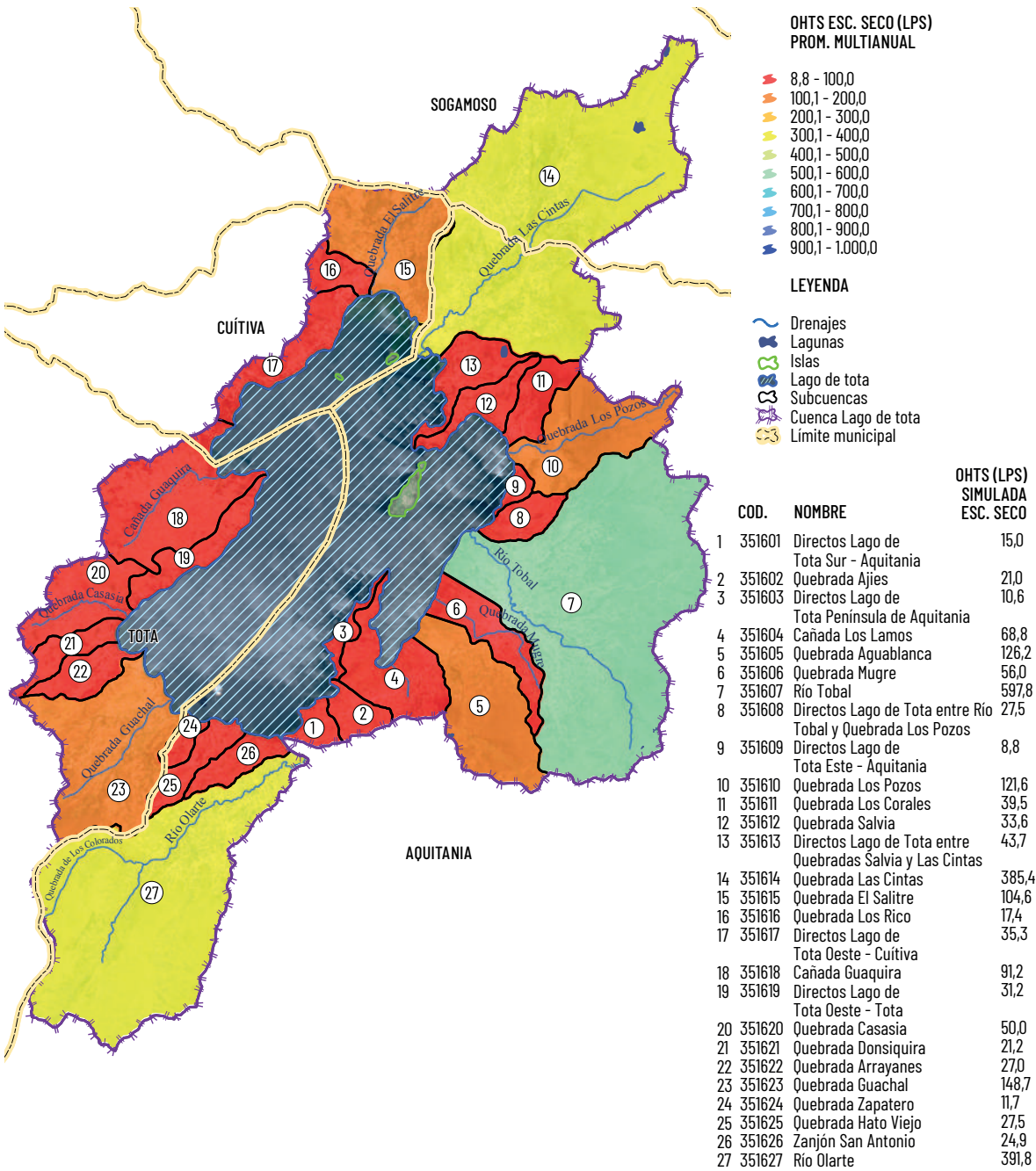


Ilustración 10. Mapa de oferta hídrica total superficial simulada escenario SECO para el período futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

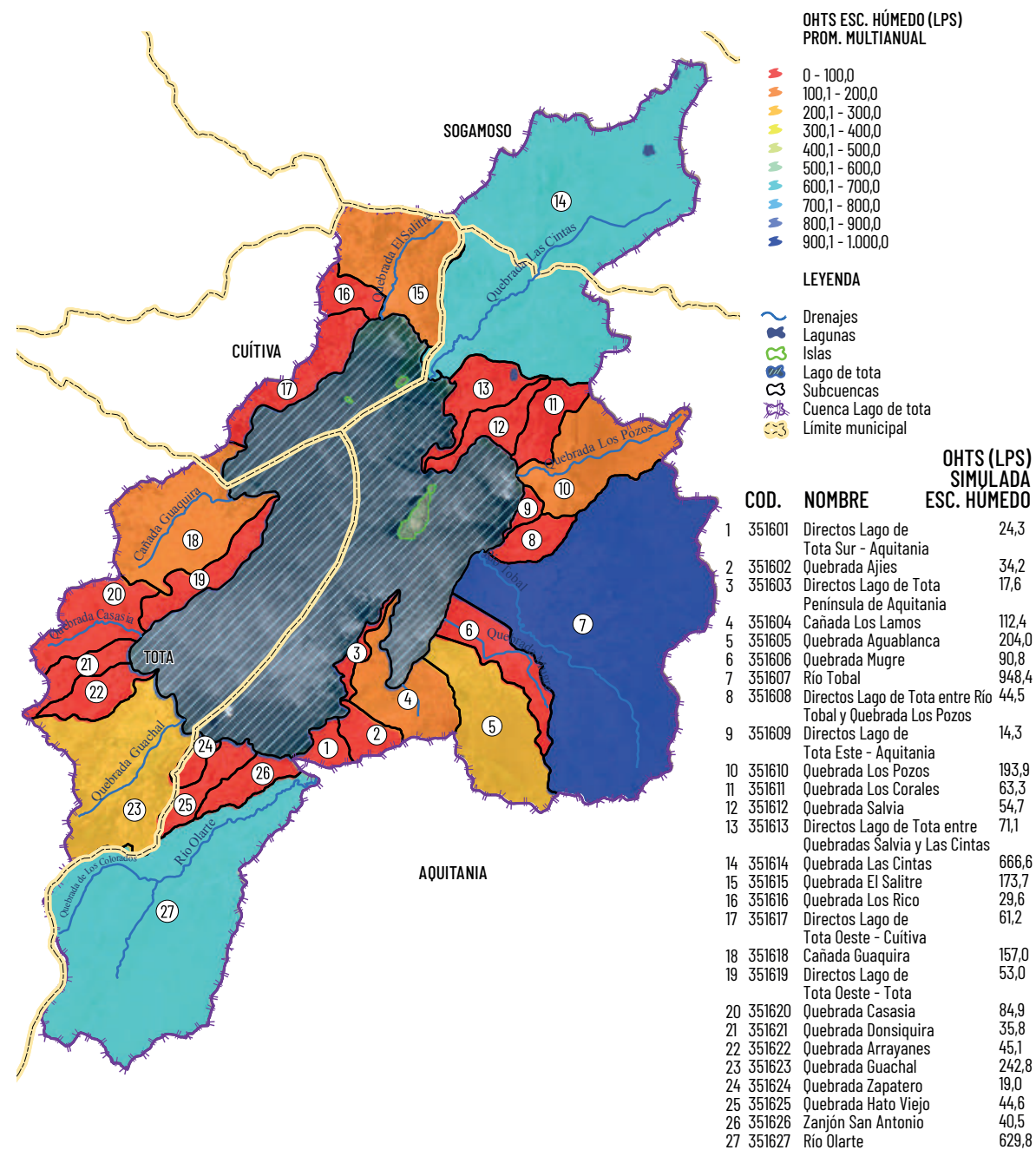


Ilustración 11. Mapa de oferta hídrica total superficial simulada escenario HÚMEDO para el periodo futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

Los resultados agregados a nivel mensual multianual indican que el caudal de oferta presenta el mismo comportamiento que la precipitación bajo los escenarios de variabilidad y cambio climático, evidenciando para el escenario SECO una disminución del caudal de oferta comparado con la histórica, mientras que para el escenario HÚMEDO se evidencia un aumento del caudal de oferta (Gráfico 11).

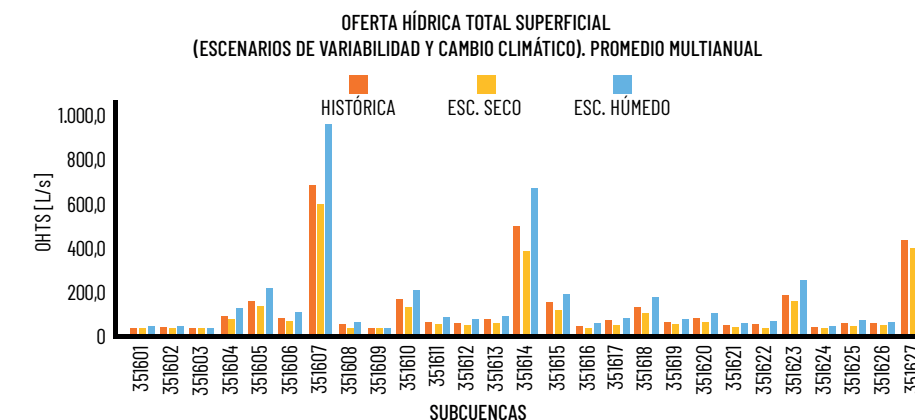


Gráfico 11. Estadísticas de la oferta hídrica total superficial simulada bajo escenarios de (VC/CC) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

Si comparamos específicamente las subcuencas de mayor importancia, se evidencia que la subcuenca quebrada Los Pozos dentro de los escenarios y comparados con la oferta HISTÓRICA mantiene su caudal dentro del rango de 100 a 200 l/s, mientras que las subcuencas río Tobal, quebrada Las Cintas y río Olarte para el escenario SECO se disminuiría un rango de 100 l/s y para el escenario HÚMEDO se subirían dos rangos de 100 l/s. La Tabla 7 presenta los caudales de oferta bajo los escenarios de variabilidad y cambio climático para las subcuencas de mayor importancia.

Cod.	Subcuenca	OHTS (l/s) SIMULADA		
		Histórico	Esc. Seco	Esc. Húmedo
351607	Río Tobal	677,9	597,8	948,4
351610	Quebrada Los Pozos	148,6	121,6	193,9
351614	Quebrada Las Cintas	492,0	385,4	666,6
351627	Río Olarte	425,0	391,8	629,8

Tabla 7: Caudales de oferta bajo los escenarios de (VC/CC) para las subcuencas de mayor importancia, AICCA 2020

Balance Hídrico del Lago de Tota – Escenario Histórico

“ Los principales resultados que arrojó el estudio del levantamiento topográfico y de batimetría del lago de Tota IDEAM y AICCA (2020) fueron, la determinación de la cota de la lámina de agua para finales del año 2019 a 3.015,2 m.s.n.m. (cota del borde del lago) ”

El escenario histórico simulado para el balance hídrico del lago de Tota se encuentra en el período de 1990 a 2018.

Para modelar matemáticamente el cuerpo léntico del lago de Tota se determinó el modelo de balance hídrico del cambio en el almacenamiento (relación entre el agua que entra y el agua que sale del sistema), donde la única variable de interés es el cambio en la profundidad o cota del lago. Esto implica que se debe obtener una relación Cota-Área Espejo del

Agua-Volumen Almacenado (capacidad del lago), calculada bajo datos batimétricos del lago IDEAM y AICCA (2020).

Los principales resultados que arrojó el estudio del levantamiento topográfico y de batimetría del lago de Tota IDEAM y AICCA (2020) fueron, la determinación de la cota de la lámina de agua para finales del año 2019 a 3.015,2 m.s.n.m. (cota del borde del lago), esta cota se determinó como el límite entre la zona sumergida y emergida durante el levantamiento topobatimétrico y se obtuvo a partir del ortomosaico y las cotas de nivel del lago registradas por la estación SANTA INES [3509726]; el área del lago con 55,15 km² y un volumen de 1.854,8 X 10⁶ m³ para la cota 3.015 m.s.n.m.

Para solucionar el modelo de balance hídrico del cambio en el almacenamiento, se debe conocer todas las variables que intervienen en el balance del lago de Tota.

Una de las entradas de agua al lago son los caudales de las corrientes afluentes (p. e. Las Cintas, Los Pozos, Tobal, etc.). Estos caudales afluentes vienen de dos lugares: la primera, de los aportes de las corrientes Olarte, Las Cintas y Los Pozos pues se tienen los caudales observados en las estaciones DESAGUADERO [35097010], HATO LAGUNA [35097030] y CRIADERO [35097050], respectivamente; la segunda, de los caudales simulados por el modelo GR2M para las 24 subcuencas restantes. Es decir, que la suma de los caudales afluentes de todas las subcuencas es una de las principales entradas de agua al lago.

Por otra parte, dado que se estimó el porcentaje del caudal del río Olarte que se desvía al lago a través de las compuertas (aprox. 0.52), los datos de la estación DESAGUADERO [35097010] y los simulados por el modelo GR2M para esta subcuenca se afectaron por este porcentaje. Otro ajuste importante que se debe tener en cuenta es la demanda de los usuarios en algunas de las 27 subcuencas de acuerdo con las concesiones vigentes (Resolución 1539 del 13 de junio de 2012).

Es así como, se asume por conservación de masa, que la demanda de los usuarios en los diferentes puntos de las subcuencas disminuye el caudal afluente, entonces se puede restar al caudal de oferta simulado por el modelo GR2M, el caudal de demanda por subcuenca. Este procedimiento es el inverso al que se hizo para ajustar los caudales (oferta natural) de las estaciones hidrológicas durante la calibración de los parámetros del modelo GR2M.

Las salidas de agua del lago son básicamente dos: la demanda de los usuarios que captan del lago y el agua descargada por el vertedero de herradura. De acuerdo con la Tabla 4, para el túnel de Cuítiva la demanda es igual a 735,16 l/s y para las demás captaciones del lago la demanda es igual a 84,70 l/s, para un total de 819,86 l/s. Estos caudales de demanda son válidos después de la Resolución 3071 de 2014 que reglamenta a los usuarios del túnel de Cuítiva. Anterior a ese año se estima que el caudal captado por el túnel estaba entre 1.000 y 1.200 l/s, entonces, para la simulación se asumió que antes de 2014 el caudal de demanda del túnel era de 1.200 l/s.

Por otro lado, los registros de caudal de las estaciones HATO LAGUNA [35097030], CRIADERO [35097050] y DESAGUADERO [35097010] tienen vacíos de información con más de tres datos ausentes seguidos que no se pueden completar. Por esta razón, los caudales simulados con el modelo GR2M se usaron en estas estaciones para rellenar los datos ausentes del período Ene 1991-Dic 2018.

Los datos de cota de nivel de la estación Santa Inés sirven para comparar la solución numérica del balance (calibración – punto de control) y poder determinar el grado de ajuste de los datos de entrada, es decir, estimar cuáles variables del balance son las que más afectan el cambio en el almacenamiento.

Recordando la aclaración oportuna indicada para el caudal de demanda total, donde este tiene el mayor peso en la incertidumbre de las simulaciones del modelo hidrológico y un fuerte impacto dentro del balance hídrico del lago, estimando que el caudal de demanda total real pudo llegar a ser en promedio hasta 2,45 veces el valor de referencia actual. Por lo anterior, dentro del escenario histórico solamente se propone evaluar dos escenarios: 1) no desviar el río Olarte y 2) desviar el río Olarte 100 %.

En el Gráfico 12 se presenta los resultados simulados de los escenarios de desvío del río Olarte. Como referencia se presentan las cotas de nivel de la estación Santa Inés (Corpoboyacá) y los volúmenes observados que se obtienen con las curvas de capacidad del lago, calculadas bajo el levantamiento topobatimétrico del lago de Tota IDEAM y AICCA (2020). También se presentan los valores simulados con los datos de la topobatimetría de IDEAM y AICCA (2020) en el

“ Para los escenarios propuestos, se evidencia que si no existiera desvío del río Olarte (línea azul) las cotas de nivel hubieran alcanzado valores por debajo del mínimo histórico (3013.2 m.s.n.m.) y el modelo se vuelve numéricamente inestable. ”

que se estima que en promedio se desvía el 51.89 % del caudal del río Olarte. Para los escenarios propuestos, se evidencia que si no existiera desvío del río Olarte (línea azul) las cotas de nivel hubieran alcanzado valores por debajo del mínimo histórico (3013.2 m.s.n.m.) y el modelo se vuelve numéricamente inestable. Por su parte, si se desviara todo el caudal del río Olarte al comienzo de la simulación se hubiese elevado la cota y el volumen de almacenamiento, pero después del 2010 se hubiese mantenido cercano a los valores históricos. En este escenario se obtiene una cota máxima de 3015.6 m.s.n.m. La cota máxima histórica es 3015.4 m.s.n.m.

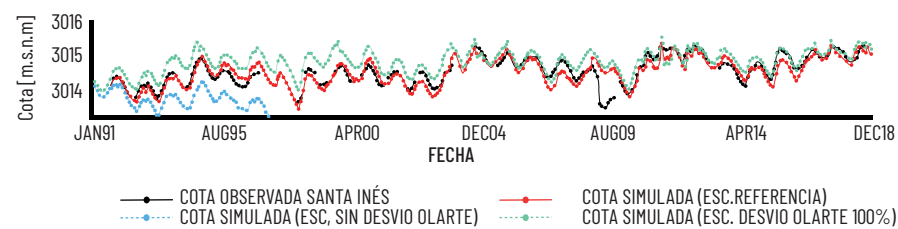


Gráfico 12. Simulación escenario histórico balance hídrico del lago, AICCA 2020

Teniendo en cuenta las anteriores simulaciones se puede indicar que los dos escenarios evaluados (no desviar el río Olarte y desviar el río Olarte el 100%) vuelven numéricamente inestable el modelo de balance hídrico del lago de Tota. Uno con cotas resultantes por debajo del mínimo histórico (3013.2 m.s.n.m.) y el otro con una cota máxima muy cercana a la cota máxima histórica, pero sin la conservación del caudal ecológico aguas abajo de las compuertas, ocasionando alteraciones en el corredor ecológico del río Olarte como en el río Upía. Este último siendo el río que nace en el vertedero de herradura del lago de Tota.

Se puede concluir que la modelación del lago de Tota se hizo mediante el modelo de balance hídrico del cambio en el almacenamiento del cuerpo de agua. Con la lluvia y la evapotranspiración mensuales interpoladas espacio-temporalmente en el centroide del lago, los aportes de las subcuencas afluentes, la demanda de los usuarios que captan del lago y el agua vertida por el lago a través del vertedero de herradura, se solucionó la ecuación de almacenamiento. Como la principal salida de agua del lago es la demanda de los usuarios y la mejor estimación que se tiene de su valor son los valores reportados a la fecha en las concesiones de Corpoboyacá, se propusieron tres simulaciones diferentes para cuantificar la incertidumbre de esta variable dentro del balance.

Balance Hídrico del Lago de Tota Bajo Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático

Empleando como datos de entrada los escenarios de variabilidad y cambio climático para el caudal de oferta de las cuencas aferentes al lago y las proyecciones de demanda total, se puede simular cómo cambia el balance hídrico del lago en los escenarios seco y húmedo de variabilidad y cambio climático. De esta manera se puede simular cómo cambian las cotas de nivel del lago bajo estos escenarios. En la Tabla 8 se presenta un resumen de las condiciones para las cuales se simulan estos escenarios.

Variable/Escenario	Condición
Caudal desvío río Olarte	• No desviar (esc. sin desvío Olarte) • Desviar el promedio de referencia (esc. referencia) • Desviar 100 % (esc. desvío Olarte 100 %)
Precipitación: Esc. Seco	Reducción lluvia anual del 10-20 % hacia el año 2050; Extensión promedio de 5 a 9 días en la duración de los mayores periodos secos.
Temperatura: Esc. Seco	Aumento temperatura entre 0,7 y 0,9 °C
Precipitación: Esc. Húmedo	Incremento lluvia anual del 15-40 % hacia el año 2050; Aumento promedio de 4 a 7 días en la duración de los periodos extensos de lluvias; Aumento entre 7 y 9 días más con lluvias extremas.
Temperatura: Esc. Húmedo	Aumento temperatura entre 0,6 y 0,8 °C
Demanda total	• Referencia: 896,05 l/s (2029) – 908,1 l/s (2050) • 25 % mayor: 1.120,07 l/s (2029) – 1.135,12 l/s (2050) • 50 % mayor: 1.344,08 l/s (2029) – 1.362,15 l/s (2050) • 100 % mayor: 1.792,11 l/s (2029) – 1.816,2 l/s (2050)

Tabla 8: Descripción de los escenarios de (VC/CC) - balance hídrico del lago, AICCA 2020

Como se espera que en el escenario HÚMEDO la cota máxima histórica (3.015,4 m.s.n.m.) sea superada, tanto las curvas de capacidad del lago como las curvas de descarga calculadas por IDEAM y AICCA (2020) se extendieron hasta la cota 3.020 m.s.n.m.

En este caso, a partir de la cota del borde del lago (3.015,2 m.s.n.m.), estimada bajo el levantamiento topobatimétrico del lago de Tota IDEAM y AICCA (2020), se asume que se mantiene constante el área del espejo del agua pues está muy cerca de la cota de la cresta del vertedero de herradura (3.015,245 m.s.n.m.) y la descarga a través de esta estructura es directamente proporcional a la cabeza de descarga. En este caso, el caudal de descarga, estimado a partir de la ecuación de descarga del

Como se espera que en el escenario HÚMEDO la cota máxima histórica (3.015,4 m.s.n.m.) sea superada, tanto las curvas de capacidad del lago como las curvas de descarga calculadas por IDEAM y AICCA (2020) se extendieron hasta la cota 3.020 m.s.n.m.

vertedero, alcanza valores desde los 54,2 m3/s en la cota 3.016 m.s.n.m. hasta los 856,99 m3/s en la cota 3.020 m.s.n.m., que es un caudal muy poco probable que ocurra en la realidad, pero que, sin embargo, es el que se obtiene a partir de la ecuación de descarga.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación del balance hídrico del lago, es decir, del cambio en el almacenamiento y la cota de elevación para el período 2030-2050, bajo los escenarios seco y húmedo de variabilidad y cambio climático, las proyecciones de demanda y los tres escenarios de desvío del río Olarte (Tabla 8). El escenario de desvío de referencia río Olarte, es en el que se asume que en promedio se desvía el 51,89 % del caudal del río Olarte (Peña, 2020b). Las simulaciones se iniciaron en Ene 2029 con una cota igual a 3.014,7 m.s.n.m. (percentil 50 de la serie observada), que equivale a un volumen inicial de $1.836,5 \times 10^6$ m3. En los resultados no se tiene en cuenta el año 2029 puesto que este año se simula para que el balance hídrico alcance el estado estable.

En los gráficos 13, 14, 15 y 16 se presentan los resultados de la simulación del balance hídrico del lago para el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) y las proyecciones de demanda total de referencia, como con aumentos del 25, 50 y 100 %, respectivamente.

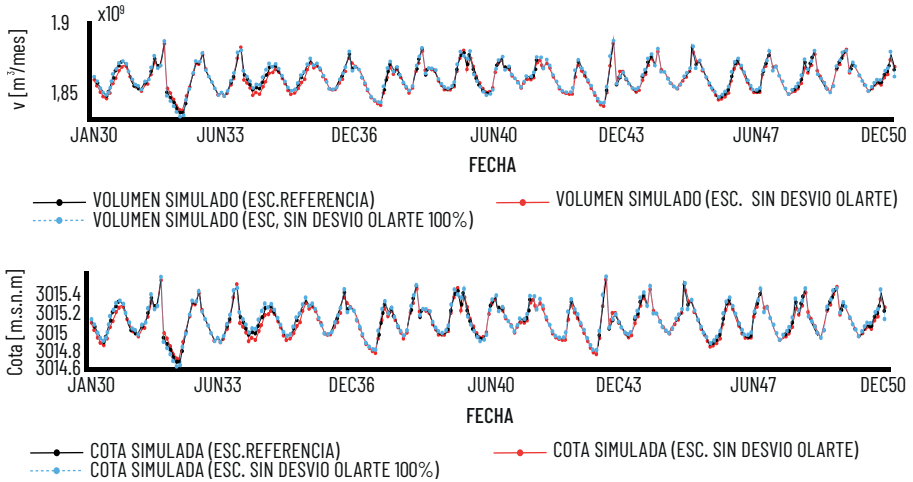


Gráfico 13. Simulación escenario SECO de (VC/CC) y proyección de demanda de referencia, AICCA 2020

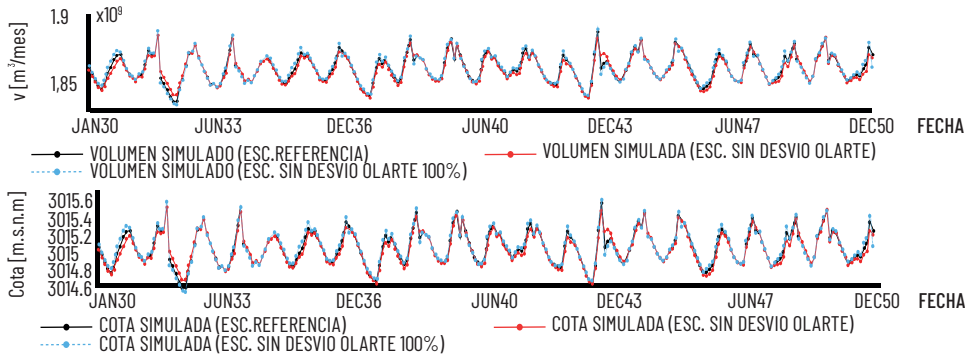


Gráfico 14. Simulación escenario SECO de (VC/CC) y proyección de demanda con aumento del 25 %, AICCA 2020

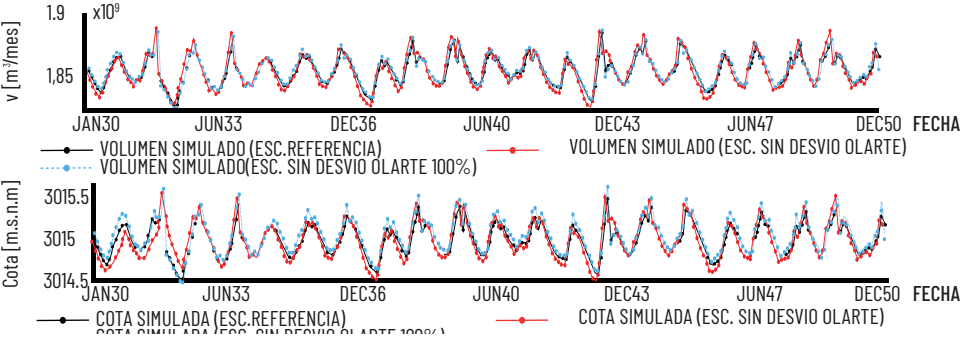


Gráfico 15. Simulación escenario SECO de (VC/CC) y proyección de demanda con aumento del 50 %, AICCA 2020

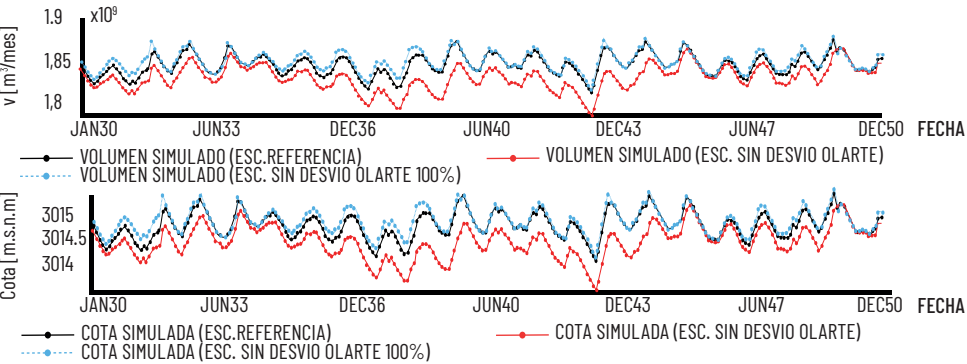


Gráfico 16. : Simulación escenario SECO de (VC/CC) y proyección de demanda con aumento del 100 %, AICCA 2020

En el Gráfico 17 se presenta los caudales de descarga del vertedero de herradura para las simulaciones del escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC).

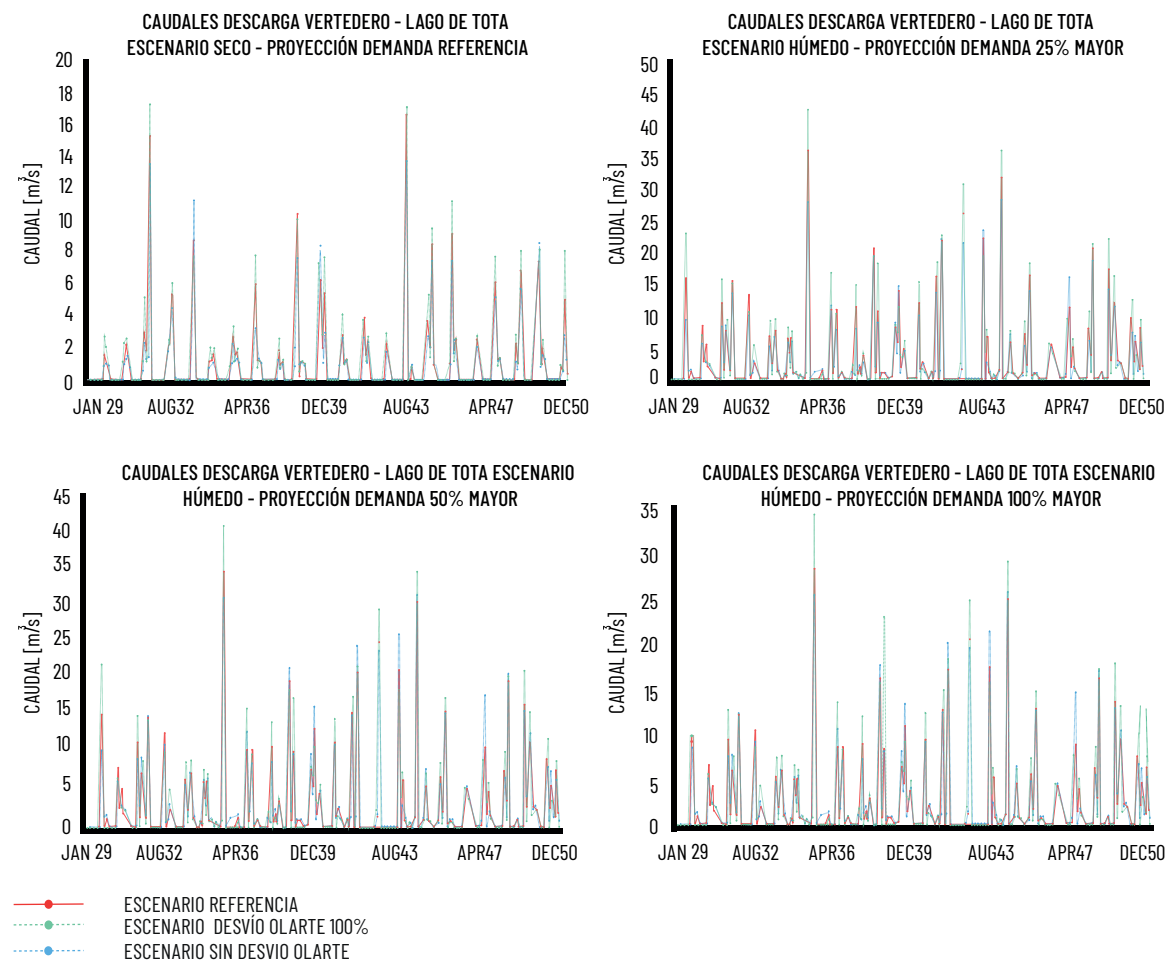


Gráfico 17. Caudales de descarga vertedero de herradura para las simulaciones del escenario SECO de (VC/CC), AICCA 2020

Por su parte, en los gráficos 18, 19, 20 y 21 se presentan los resultados de la simulación del balance hídrico del lago para el escenario HÚMEDO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) y las proyecciones de demanda total de referencia, como con aumentos del 25, 50 y 100 %, respectivamente.

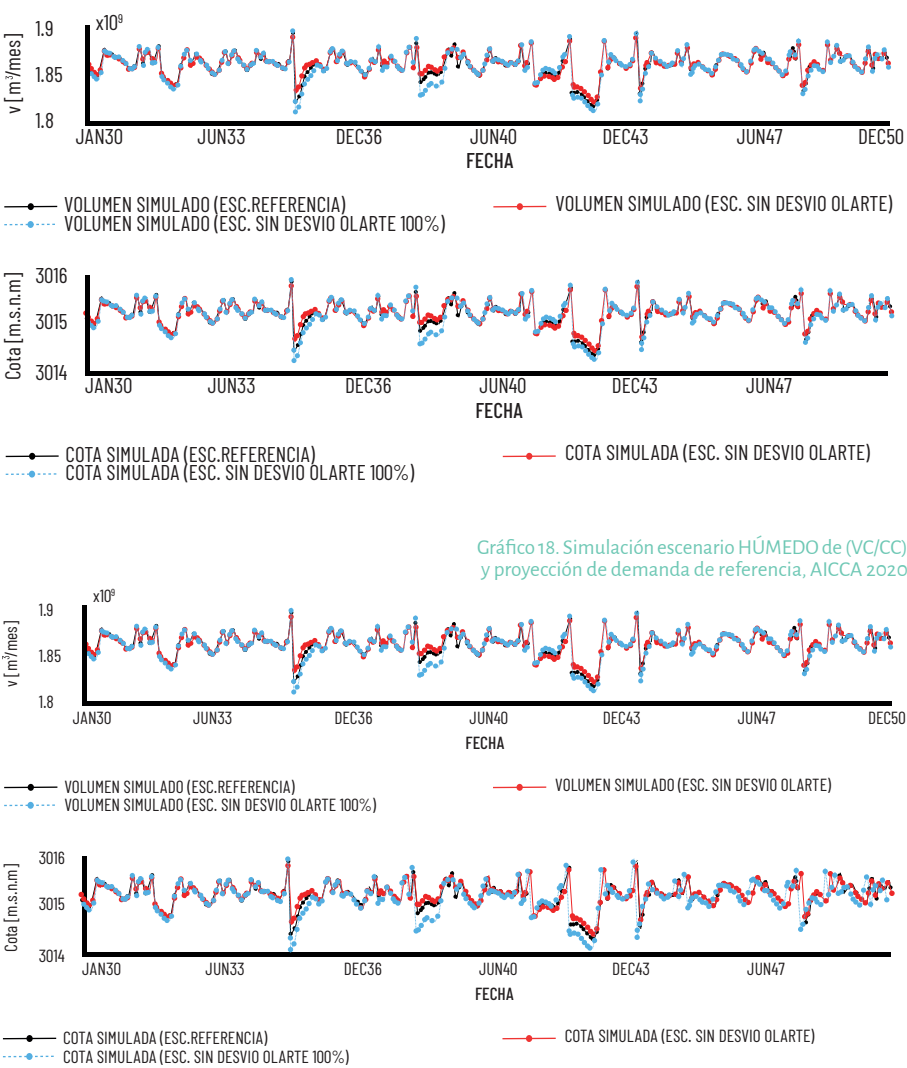


Gráfico 18. Simulación escenario HÚMEDO de (VC/CC) y proyección de demanda de referencia, AICCA 2020

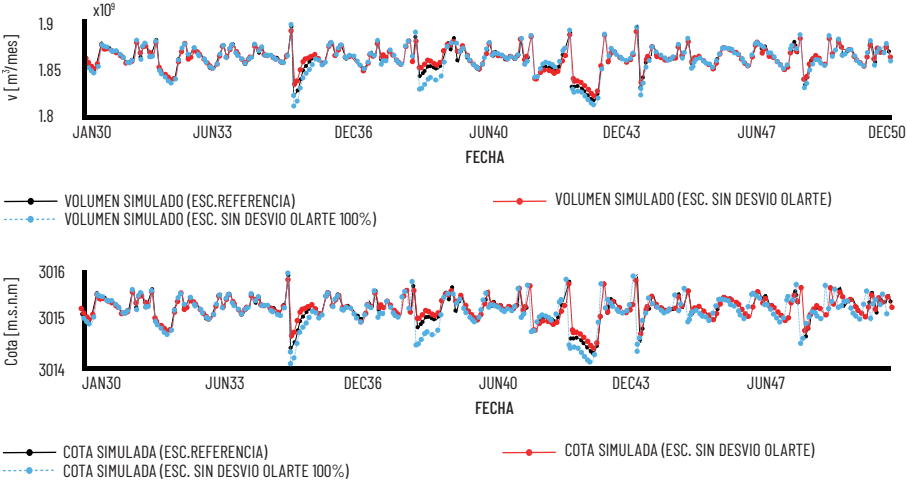


Gráfico 19. Simulación escenario HÚMEDO de (VC/CC) y proyección de demanda con aumento del 25 %, AICCA 2020

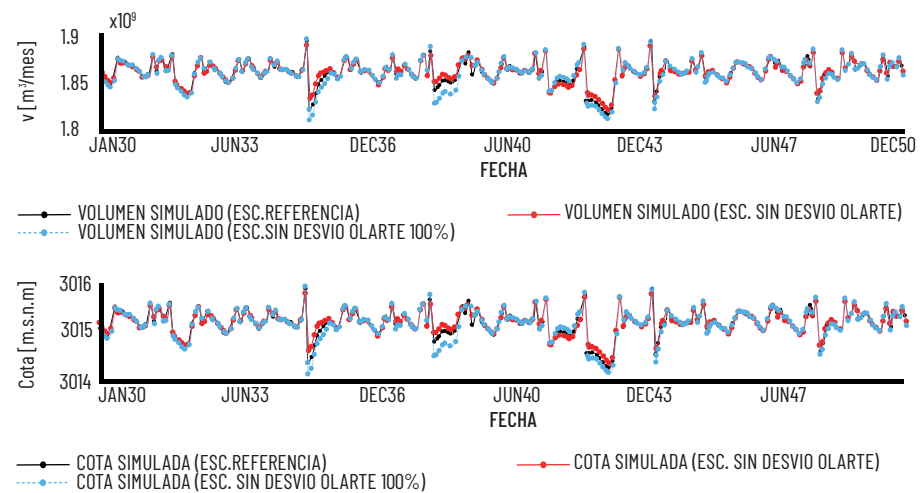


Gráfico 20. Simulación escenario HÚMEDO de (VC/CC) y proyección de demanda con aumento del 50 %, AICCA 2020

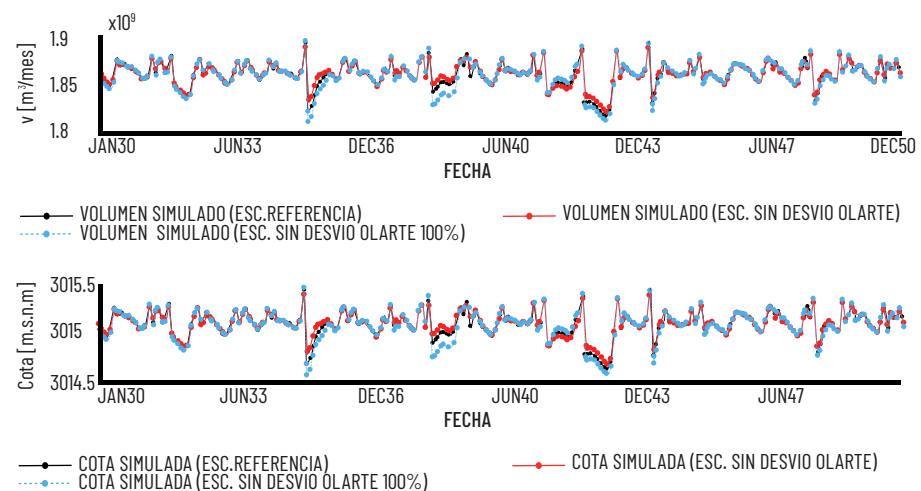


Gráfico 21. Simulación escenario HÚMEDO de (VC/CC) y proyección de demanda con aumento del 100 %, AICCA 2020

En el Gráfico 22 se presentan los caudales de descarga del vertedero de herradura para las simulaciones del escenario HÚMEDO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC).

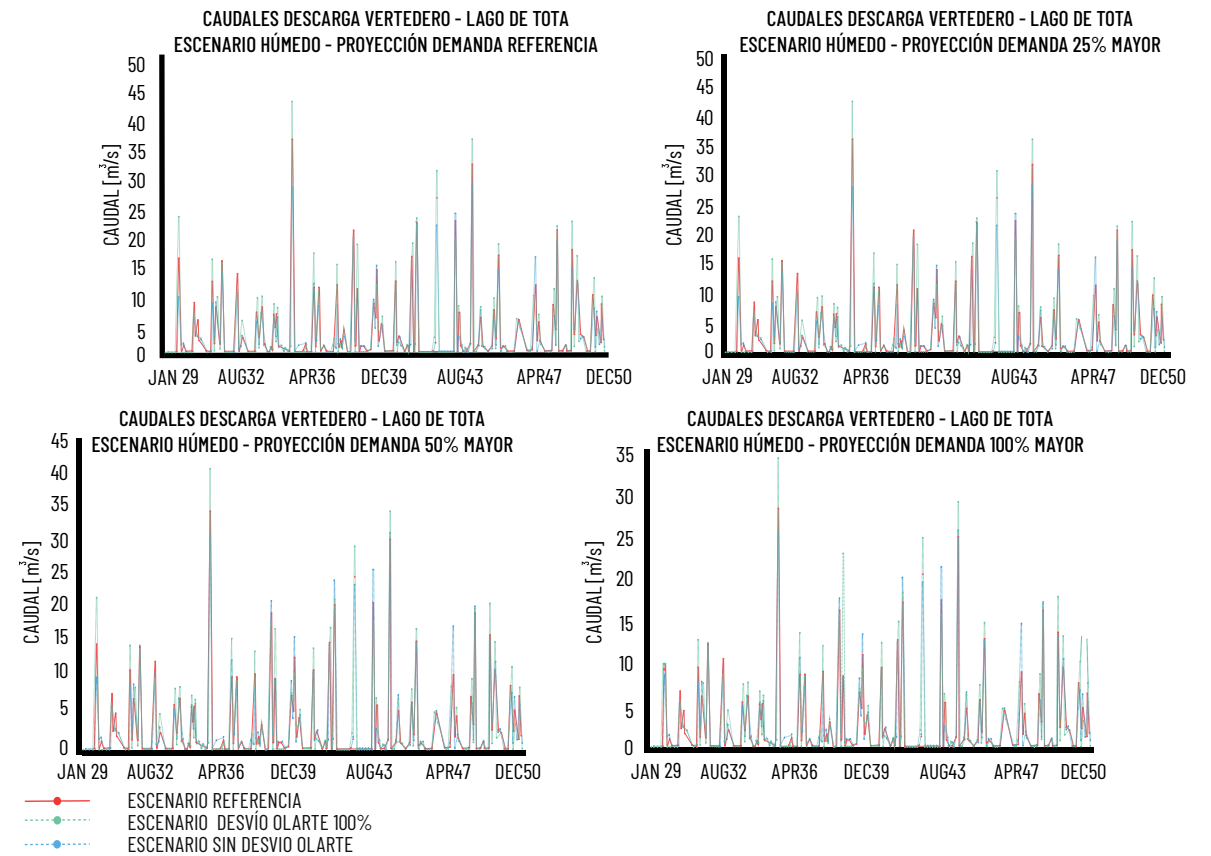


Gráfico 22. Caudales de descarga vertedero de herradura para las simulaciones del escenario HÚMEDO de (VC/CC), AICCA 2020

En general, los resultados de estas simulaciones muestran que para el escenario SECO de variabilidad y cambio climático (VC/CC), la variación de las cotas de nivel se da por la influencia directa de las condiciones climáticas de lluvia y evapotranspiración. Con respecto a los escenarios de desvío del río Olarte, su influencia en la variación de los niveles se vuelve importante para el escenario en el que no hay desviación (esc. sin desvío Olarte) y cuando aumenta la demanda total de referencia, especialmente si la demanda total de referencia aumenta 100 %. De otra parte, para el escenario HÚMEDO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC), en general, se observa que la variación de las cotas de nivel se da más por el control hidráulico del vertedero de herradura, pues siempre

Con el propósito de interpretar los resultados de los escenarios seco y húmedo de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) y el desvío de referencia del río Olarte (esc. referencia), las cotas de nivel simuladas se agregaron a nivel mensual multianual para hacer una comparación estacional con las cotas de nivel observadas en la estación Santa Inés (Corpoboyacá)

que se alcanzan cotas máximas y aumenta la descarga del vertedero ocurre una caída súbita en las cotas y se alcanzan cotas mínimas. Por esta razón, para el escenario en el que se desvía por completo el río Olarte (esc. desvío Olarte 100 %) se alcanzan las cotas mínimas cuando antecede una cota de nivel pico. Con respecto a los escenarios de desvío del río Olarte, su influencia en la variación de los niveles ya no es tan evidente en la dinámica estacional porque predominan las descargas del vertedero, pero sí son determinantes en las cotas máximas que se alcanzarían en el lago.

Con el propósito de interpretar los resultados de los escenarios seco y húmedo de variabilidad climática y cambio climático ((VC/CC)) y el desvío de referencia del río Olarte (esc. referencia), las cotas de nivel simuladas se agregaron a nivel mensual multianual para hacer una comparación estacional con las cotas de nivel observadas en la estación Santa Inés (Corpoboyacá) como se muestra en la Gráfico 23.

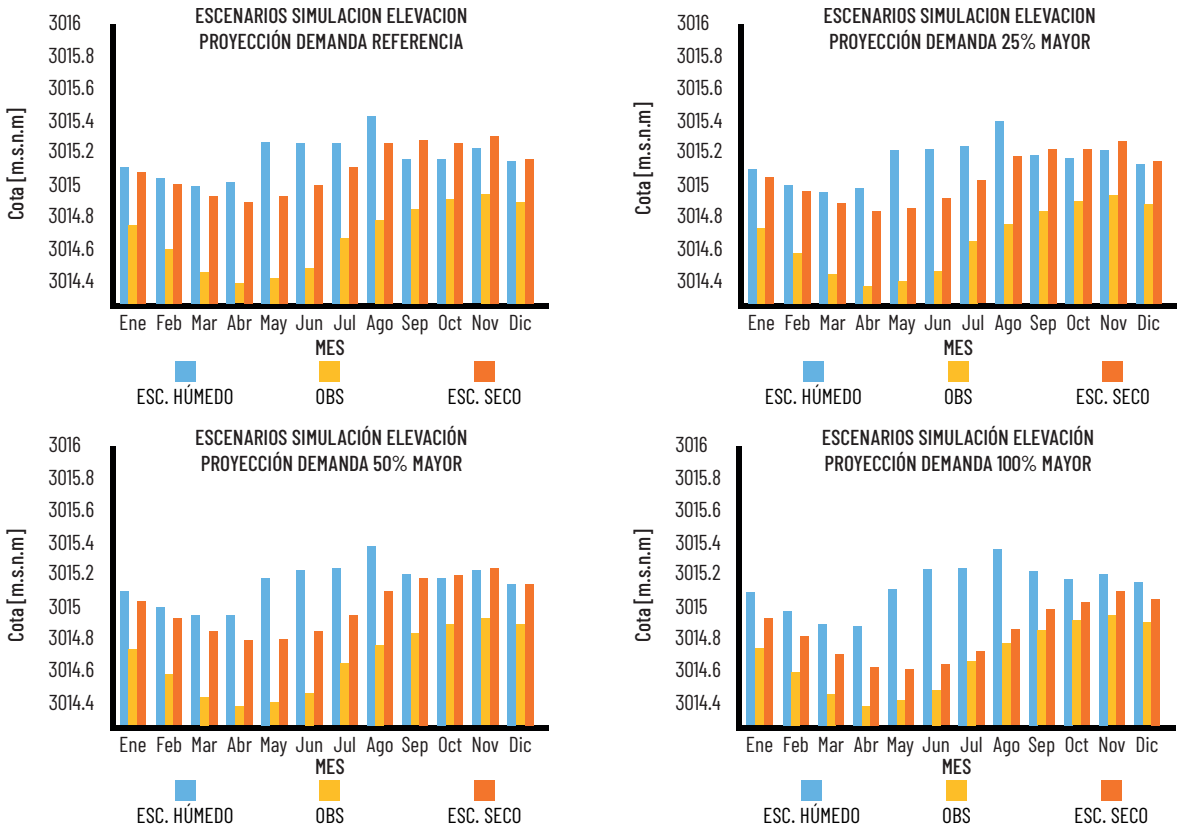


Gráfico 23. Estacionalidad cotas de nivel del lago para los escenarios seco y húmedo de (VC/CC) y escenario de referencia para el desvío del río Olarte (esc. referencia), AICCA 2020

Como vemos, si en el futuro se llegará a mantener en la cuenca la demanda total de referencia con el desvío del río Olarte (esc. referencia), esta decisión de gestión del recurso hídrico ayudaría a mitigar el impacto de una posible disminución en la capacidad de volumen de almacenamiento del lago para el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC), inclusive si esta demanda de referencia se aumentara un 100 %. Para el escenario HÚMEDO, mantener en la cuenca la demanda total de referencia implica directamente un aumento en el volumen de almacenamiento y en las cotas máximas del lago. Por otra parte, de estos resultados también se infiere que si la demanda total fuera 2,45 veces el valor de referencia, que es el valor histórico real de la demanda de la cuenca de acuerdo con Peña (2020b), el impacto para el lago en el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) sería una disminución directa en su volumen de almacenamiento, el espejo de agua y las cotas de nivel muy por debajo a como se conocen hoy en día.

Finalmente, para mostrar las cotas máximas y mínimas que se alcanzarían en la ronda perimetral del lago, de acuerdo con los escenarios descritos hasta aquí, con apoyo del profesional SIG del Proyecto AICCA, Julio Álvarez, se empleó el modelo topobatimétrico del lago (IDEAM y AICCA, 2020) para determinar las curvas de nivel que representan estas cotas en los escenarios de modelación. En las Ilustraciones 12 y 13 se presentan los mapas para los escenarios seco y húmedo de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC), respectivamente, que contienen los valores de las cotas de nivel máximas y mínimas y algunas zonas emblemáticas del lago como Playa Blanca y Santa Inés. En el escenario HÚMEDO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) se alcanzaría una cota máxima de 3.015,9 m.s.n.m. (cota máxima histórica 3.015,4 m.s.n.m.). En el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) se alcanzaría una cota mínima de 3.014,2 m.s.n.m. (cota mínima histórica 3.013,2 m.s.n.m.). Se aclara que estos mapas deben usarse como posibles valores de referencia puesto que los escenarios no son predicciones sino suposiciones e hipótesis.

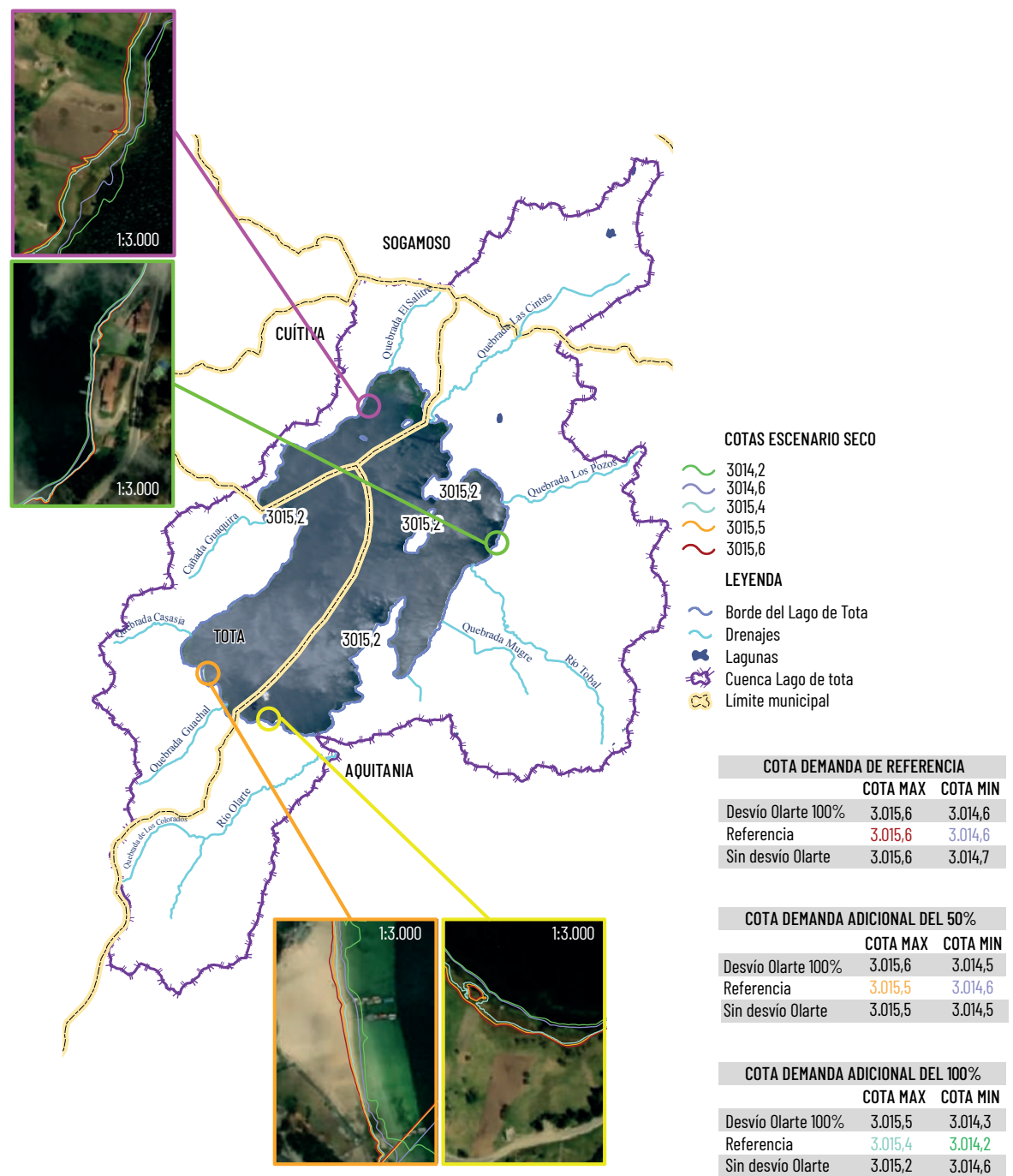


Ilustración 12. Cotas de nivel máximas y mínimas del lago de Tota para el escenario SECO de (VC/CC), AICCA 2020

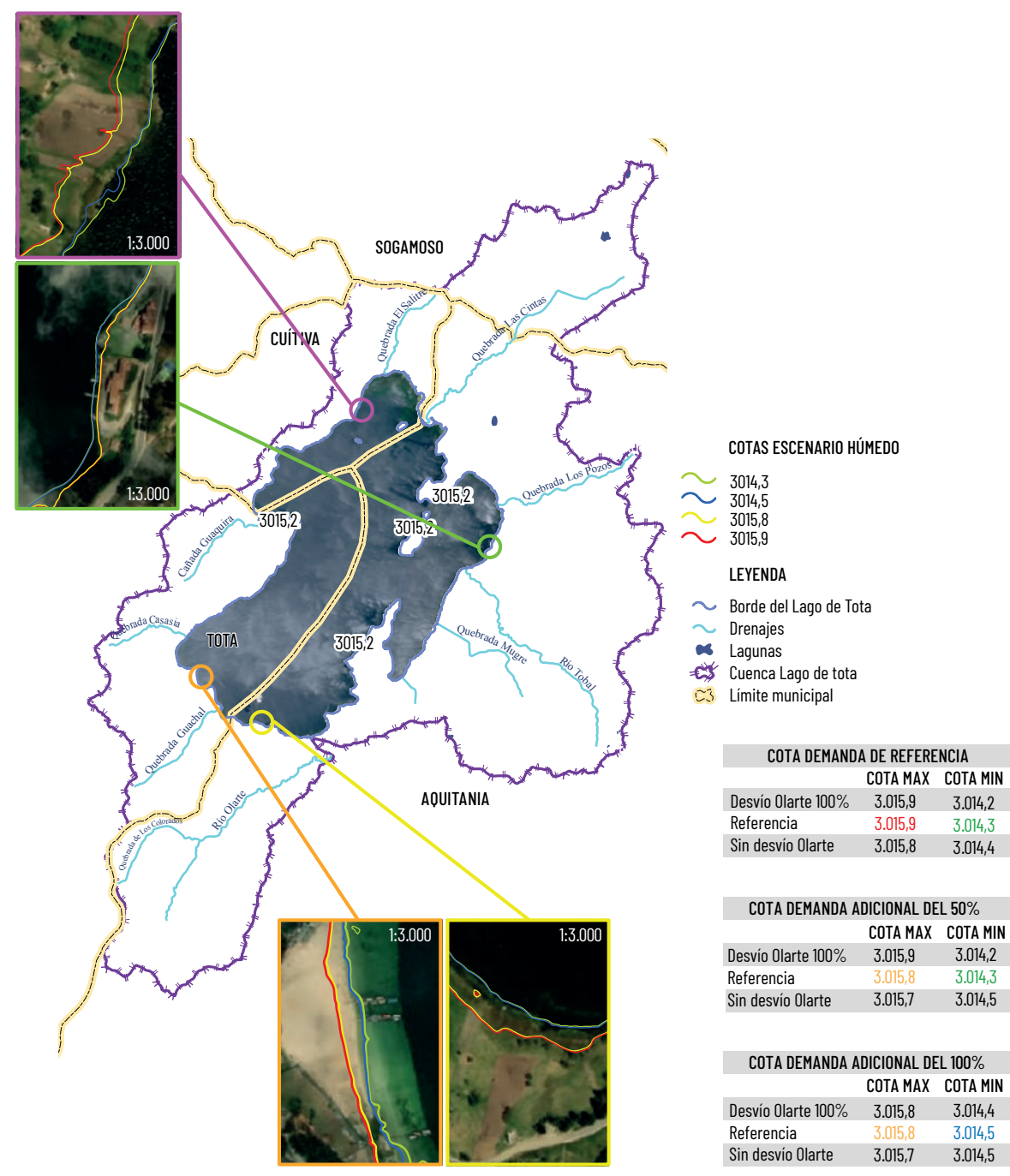


Ilustración 13. Cotas de nivel máximas y mínimas del lago de Tota para el escenario HÚMEDO de (VC/CC), AICCA 2020

Índice de Uso del Agua (IUA)

El índice de uso del agua, IUA, se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$IUA = \frac{DHO}{HTD} \cdot 100$$

donde *DH* es la demanda hídrica de las actividades socioeconómicas y de los ecosistemas y *OHTD* es la oferta hídrica superficial total disponible para una condición hidrológica promedio o de año seco.

Este índice se puede calcular para cualquier periodicidad (anual, semestral, trimestral, mensual, diario, etc.).

De acuerdo con la anterior ecuación, la cual define el índice de uso del agua (IUA), se necesitan dos variables para hacer esta estimación: la demanda hídrica y la oferta hídrica superficial total disponible.

Para la demanda hídrica total de las subcuencas se tomó la información de la Tabla 6 (Caudal de demanda actual estimado por sectores en la cuenca del lago de Tota). Mientras que la oferta hídrica superficial total disponible (OHTD) se obtuvo de la diferencia entre la oferta hídrica total superficial (OHTS) y el caudal ecológico.

De acuerdo con el IDEAM, el caudal ecológico se define como: “Caudal mínimo que debe mantenerse en un curso fluvial al construir una represa, captación o derivación, de forma que no se alteren las condiciones naturales del biotopo y se garantice el desarrollo de una vida fluvial igual, o al menos parecida, a la que existía anteriormente en el río”.

Por su parte, el antiguo Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial estableció en la Resolución 865 de 2004 que “El caudal mínimo ecológico o caudal mínimo remanente, es el caudal requerido para el sostenimiento del ecosistema, la flora y la fauna de una corriente de agua”. Esta resolución detalla la metodología de cálculo del índice de escasez y plantea dos métodos hidrológicos para calcular el caudal ecológico, el primero basado en el Estudio Nacional del Agua del IDEAM, en el cual se ofrecen lineamientos para llevar a cabo el ordenamiento del uso del recurso, considerando las zonas de mayor vulnerabilidad y peligro de desabastecimiento de agua y, el segundo, vincula el caudal mínimo a un porcentaje en torno al 25 % del mínimo caudal medio mensual multianual de la corriente estudiada.

Finalmente, aplicando la ecuación con las variables explicadas anteriormente, se obtiene el índice de uso del agua (IUA), a nivel mensual multianual y promedio anual multianual. En la Ilustración 14 se presenta espacialmente el índice de uso del agua

en las 27 subcuencas del Lago de Tota para el período HISTÓRICO 1990-2018, mientras que el Gráfico 24 representa sus estadísticas.

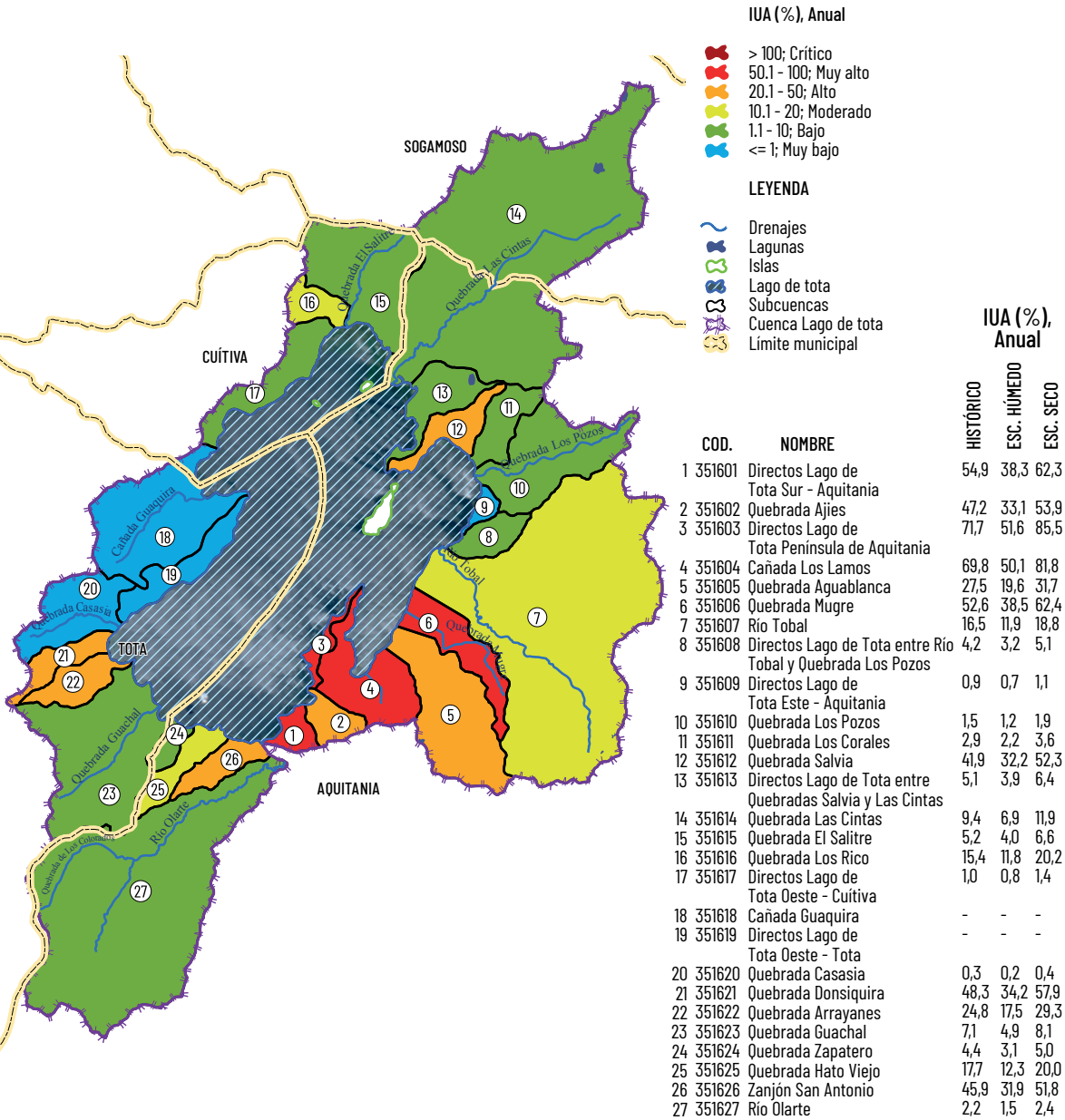


Ilustración 14. Mapa del índice de uso del agua (IUA) para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

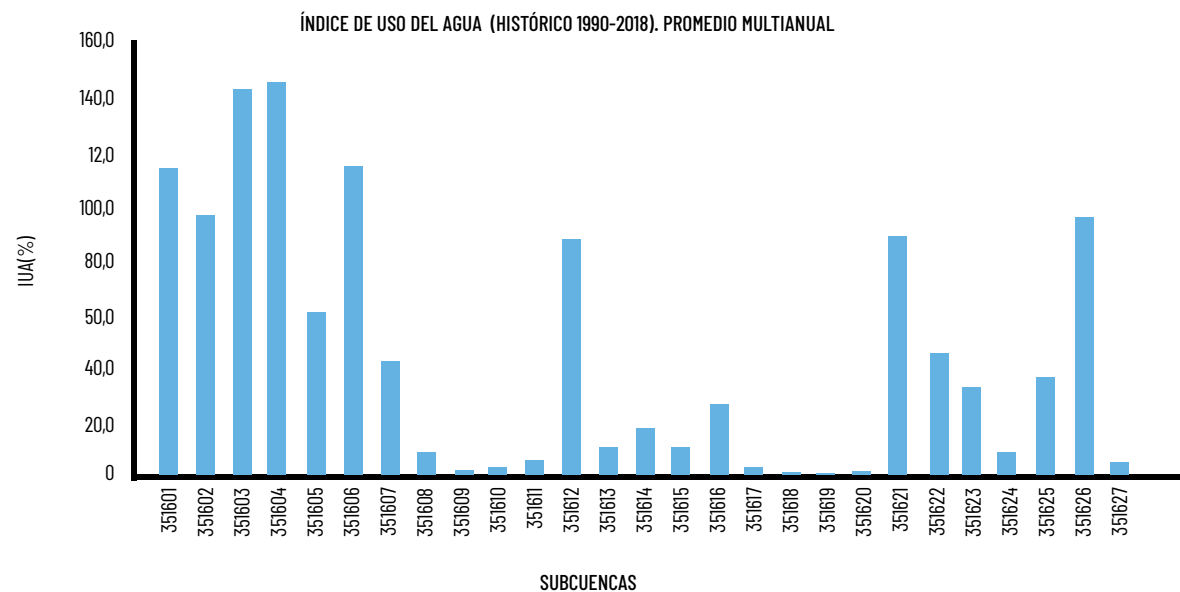


Gráfico 24. Estadísticas del IUA para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

Teniendo en cuenta que el IUA es una medida de la presión que hay sobre el caudal ecológico y la oferta hídrica disponible, es decir, sobre los servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua, los resultados muestran a nivel general, febrero es el mes con la mayor presión (promedio de 98,6 %) y en menor medida los meses de mayo, junio, julio y agosto (promedio de 14 %). A nivel de subcuencas, las que superan el 100 % (IUA crítico) son directos Lago de Tota Sur - Aquitania (351601), quebrada Mugre (351606), directos Lago de Tota Península de Aquitania (351603) y cañada Los Lamos (351604) con 112,9, 114,0, 140,8 y 143,1 % respectivamente, generando mayor presión durante el año. Las subcuencas del norte y sur que se encuentran en zona de páramo, es decir, quebrada Los Pozos (351610), quebrada Los Corales (351611), quebrada Las Cintas (Hato viejo - 351614) y río Olarte (351627), son las que menor presión presentan durante el año al contar con IUA dentro del rango de 1,1 a 10 % (IUA bajo). Mientras que la subcuenca del río Tobal (351607) a pesar de encontrarse en zona de páramo presenta un IUA dentro del rango de 10,1 a 20 % (IUA moderado) debido a su alta demanda hídrica influenciada por el sector agrícola.

Índice de Uso del Agua (IUA) Bajo Escenarios de Variabilidad y Cambio Climático

Para evaluar cómo se afectan los servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua bajo los escenarios de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) en las subcuencas del lago de Tota, se calculó el Índice de uso del agua (IUA), siguiendo la misma metodología empleada en el período histórico (1990-2018). En el cálculo del IUA bajo los escenarios de variabilidad climática y cambio climático ((VC/CC)), la demanda se asume como la actual, es decir, como si no tuviera ningún cambio futuro, con el objetivo de evaluar cuál es el impacto sobre los servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua si la cuenca se mantuviera como se conoce hoy en día (sin tener en cuenta la intervención antrópica futura). Entonces, para la demanda total de las subcuencas se emplearon los datos de la Tabla 4, pero para la demanda agrícola su valor se estimó bajo los datos de la Tabla 6. En la Ilustración 8 se presentó el mapa con la distribución y los valores de la demanda total obtenida. Después del lago, las subcuencas del río Tobal - 351607 (59,8) y la quebrada Las Cintas Hato Laguna - 351614 (385,4) son las que más demandan agua en la cuenca.

En las Ilustraciones 15 y 16 se presentan los mapas del índice de uso del agua (IUA) para dos condiciones hidrológicas: 1) caudal de oferta para el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) y 2) caudal de oferta para el escenario HÚMEDO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC). Ambos para el período 2030-2050.

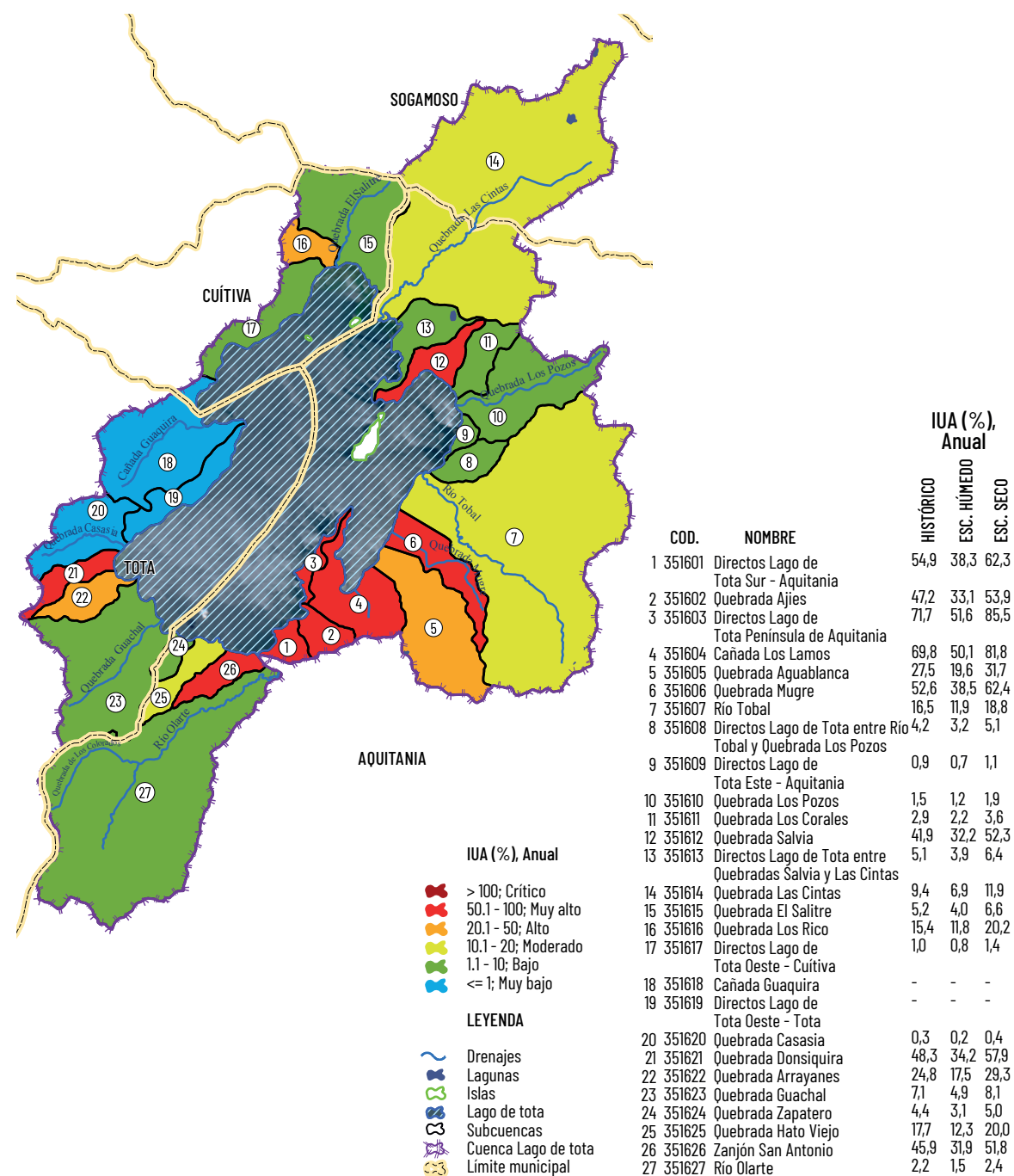


Ilustración 15. Mapa del índice de uso del agua (IUA) escenario SECO para el período futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

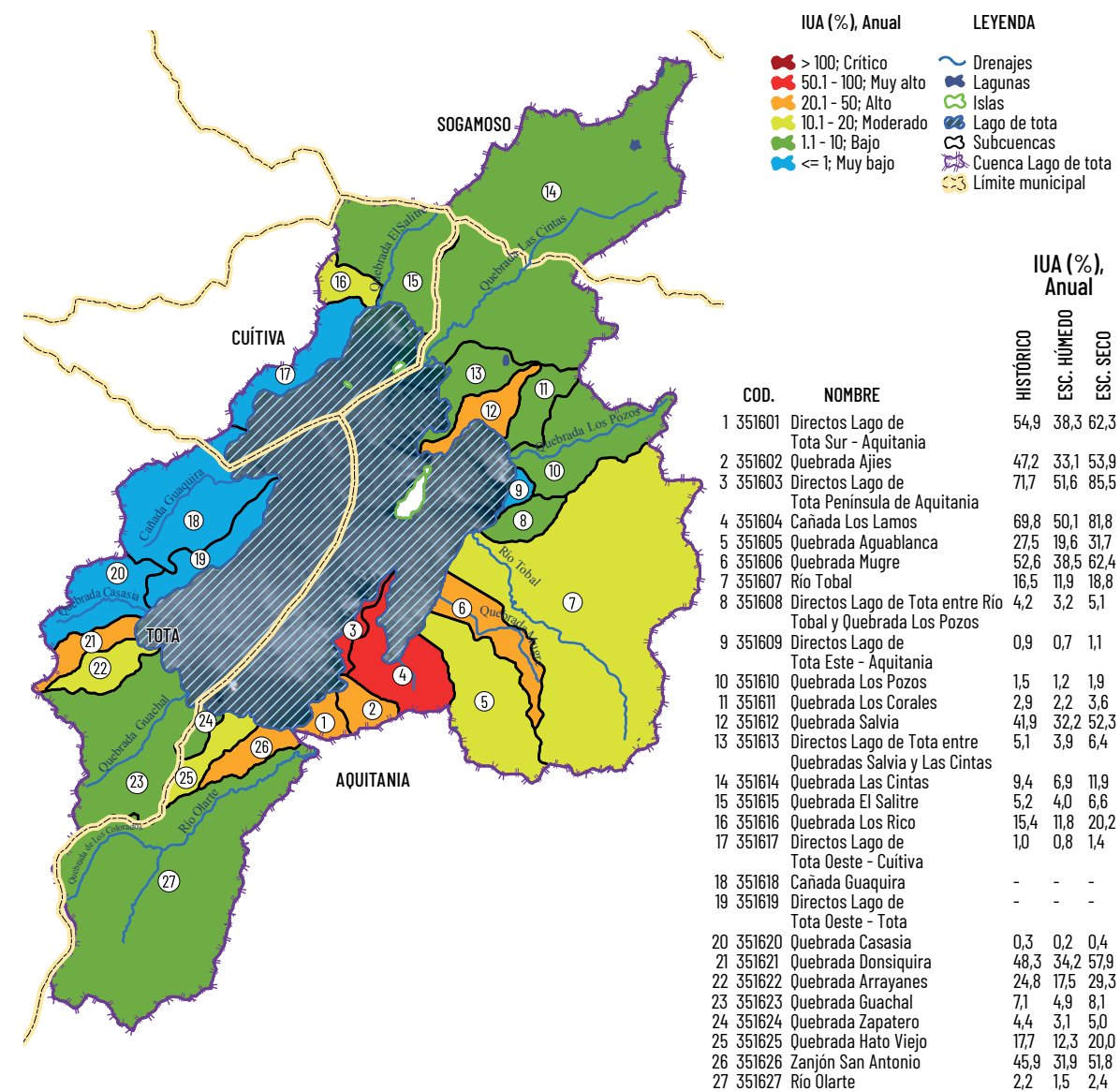


Ilustración 16. Mapa del índice de uso del agua (IUA) escenario HÚMEDO para el período futuro (2030-2050) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

En la Tablas 9 y 10 se presentan los resultados del cambio en la categoría del IUA en las subcuencas del Lago de Tota bajo los escenarios de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) (histórico, seco y húmedo).



SUBCUENCA	CÓDIGO	ENE		FEB		MAR		ABR		MAY		JUN	
		SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO
Canada guaquirá	351618												
Canada los lamos	351604												
Directos lago de tota entre qdas salvia y las cintas	351613												
Directos lago de tota entre rio tobal y qda los pozos	351608												
Directos lago de tota este- aquitania	351609												
Directos lago de tota oeste- cuitiva	351617												
Directorios lago de tota oeste-tota	351619												
Directorios lago de tota peninsula de aquitania	351603												
Directos lago de tota sur- aquitania	351601												
Quebrada aguablanca	351605												
Quebrada ajies	3516020												
Quebrada arrayanes	351622												
Quebrada casasia	351620												
Quebrada donsiquira	351621												
Quebrada el salitre	351615												
Quebrada guachal	351623												
Quebrada hato viejo	351625												
Quebrada las cintas	351614												
Quebrada los corales	351611												
Quebrada los pozo	351610												
Quebrada los ricos	351616												
Quebrada mugre	351606												
Quebrada salvia	351612												
Quebrada zapatero	351624												
Rio olarte	351627												
Rio tobal	351607												
Zanjon san antonio	351626												

SUBCUENCA	CÓDIGO	JUL		AGO		SEP		OCT		NOV		DIC	
		SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO	SECO	SIMULADO HUMEDO
Canada guaquirá	351618												
Canada los lamos	351604												
Directos lago de tota entre qdas salvia y las cintas	351613												
Directos lago de tota entre rio tobal y qda los pozos	351608												
Directos lago de tota este- aquitania	351609												
Directos lago de tota oeste- cuitiva	351617												
Directos lago de tota oeste- tota	351619												
Directos lago de tota peninsula de aquitania	351603												
Directos lago de tota sur- aquitania	351601												
Quebrada aguablanca	311605												
Quebrada ajies	351602												
Quebrada arrayanes	351622												
Quebrada casasia	351620												
Quebrada donsiquira	351621												
Quebrada el salitre	351615												
Quebrada guachal	351623												
Quebrada hato viejo	351625												
Quebrada las cintas	351614												
Quebrada los corales	351611												
Quebrada los pozos	351610												
Quebrada los rico	351616												
Quebrada mugre	351606												
Quebrada salvia	351612												
Quebrada zapatero	351624												
Rio olarte	351627												
Rio tobal	351607												
Zanjon san antonio	351626												

Tabla 9: Categorías del IUA a nivel mensual multianual para las subcuencas del Lago de Tota y bajo escenarios de (VC/CC), AICCA 2020

SUBCUENCA	CÓDIGO	ANUAL		
		SECO	SIMULADO	HÚMEDO
CANADA GUAQUIRA	351618	Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
CANADA LOS LAMOS	351604	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
DIRECTOS LAGO DE TOTA ENTRE QDAS SALVIA Y LAS CINTAS	351613	Bajo	Bajo	Bajo
DIRECTOS LAGO DE TOTA ENTRE RIO TOBAL Y QDA LOS POZOS	351608	Bajo	Bajo	Bajo
DIRECTOS LAGO DE TOTA ESTE- AQUITANIA	351609	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
DIRECTOS LAGO DE TOTA OESTE- CUITIVA	351617	Bajo	Bajo	Muy Bajo
DIRECTOS LAGO DE TOTA OESTE - TOTA	351619	Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
DIRECTOS LAGO DE TOTA PENINSULA DE AQUITANIA	351603	Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
DIRECTOS LAGO DE TOTA SUR- AQUITANIA	351601	Muy Alto	Muy Alto	Alto
QUEBRADA AGUABLANCA	351605	Alto	Alto	Moderado
QUEBRADA AJIES	351602	Muy Alto	Alto	Alto
QUEBRADA ARRAYANES	351622	Alto	Alto	Moderado
QUEBRADA CASASIA	351620	Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo
QUEBRADA DONSIQUIRA	351621	Muy Alto	Alto	Alto
QUEBRADA EL SALITRE	351615	Bajo	Bajo	Bajo
QUEBRADA GUACHAL	351623	Bajo	Bajo	Bajo
QUEBRADA HATO VIEJO	351625	Moderado	Moderado	Moderado
QUEBRADA LAS CINTAS	351614	Moderado	Bajo	Bajo
QUEBRADA LOS CORALES	351611	Bajo	Bajo	Bajo
QUEBRADA LOS POZOS	351610	Bajo	Bajo	Bajo
QUEBRADA LOS RICOS	351616	Alto	Moderado	Moderado
QUEBRADA MUGRE	351606	Muy Alto	Muy Alto	Alto
QUEBRADA SALVIA	351616	Muy Alto	Alto	Alto
QUEBRADA ZAPATERO	351624	Bajo	Bajo	Bajo
RIO OLARTE	351627	Bajo	Bajo	Bajo
RIO TOBAL	351607	Moderado	Moderado	Moderado
ZANJON SAN ANTONIO	351626	Muy Alto	Alto	Alto

Tabla 10: Categorías del IUA en el promedio anual para las subcuencas del Lago de Tota y bajo escenarios de (VC/CC), AICCA 2020

En general, para la condición HISTÓRICA simulada, los meses secos de diciembre, enero, febrero y marzo, son los de mayor presión principalmente para las subcuencas del Este y el Sureste de la cuenca. En el promedio anual, las subcuencas cañada Los Lamos (351604), quebrada Mugre (351606) y directo lago de Tota Sur - Aquitania (351601) son las que presentan mayor presión sobre el recurso hídrico. De otra parte, para la

condición SECA, los meses secos de diciembre, enero, febrero y marzo, siguen siendo los de mayor presión no solo para las subcuencas del Este y Sureste, sino para las del Sur y las del Noreste. En el promedio anual esta afectación se mantiene para las subcuencas del Este y el Sureste. Finalmente, para la condición HÚMEDA, los meses secos de diciembre, enero, febrero y marzo, siguen siendo los de mayor presión para las subcuencas del Este y el Sureste de la cuenca, pero con una leve disminución en la presión. En el promedio anual, la subcuenca de la cañada Los Lamos (351604) es la que presenta mayor presión sobre el recurso hídrico.

Los resultados agregados a nivel mensual multianual evidencian que el IUA para el escenario SECO presentaría una mayor presión sobre los servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua comparado con el histórico, mientras que para el escenario HÚMEDO se ve una menor presión sobre los servicios ecosistémicos de regulación y provisión de agua (Gráfico 25).

En general, para la condición HISTÓRICA simulada, los meses secos de diciembre, enero, febrero y marzo, son los de mayor presión principalmente para las subcuencas del Este y el Sureste de la cuenca.

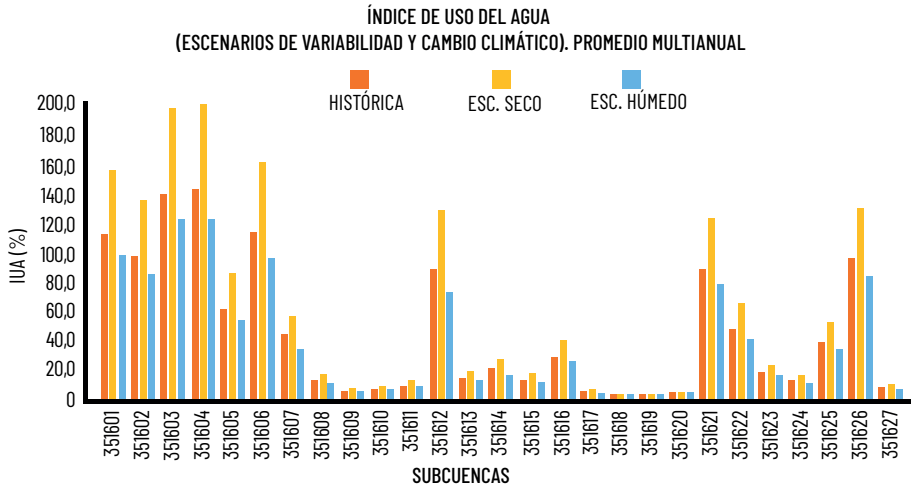


Gráfico 25. : Estadísticas del IUA bajo escenarios de (VC/CC) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE RESULTADOS

A continuación, se analizan los resultados obtenidos durante el proceso de modelación del ciclo hidrológico y del balance hídrico del lago de Tota, por medio de respuestas a preguntas planteadas en la metodología. Estas guardan relación con la incertidumbre inherente a cualquier estudio de modelación y a las variables que afectan e influyen en los resultados de las simulaciones del balance hídrico de la cuenca del lago de Tota.

¿Cuánto aportan al Lago las corrientes que NO tienen medición de caudales?

Las tres subcuencas: Quebrada Los Pozos (351610), Quebrada Las Cintas (351614) y Río Olarte (351627), son las más importantes para la calibración de los parámetros del modelo lluvia-escorrentía GR2M porque son las únicas subcuencas de las 27 que tienen datos hidrometeorológicos, es decir, son las subcuencas instrumentadas de la cuenca del Lago de Tota.

El Gráfico 26 del presente documento da respuesta a la primera incertidumbre inherente a cualquier estudio de modelación.

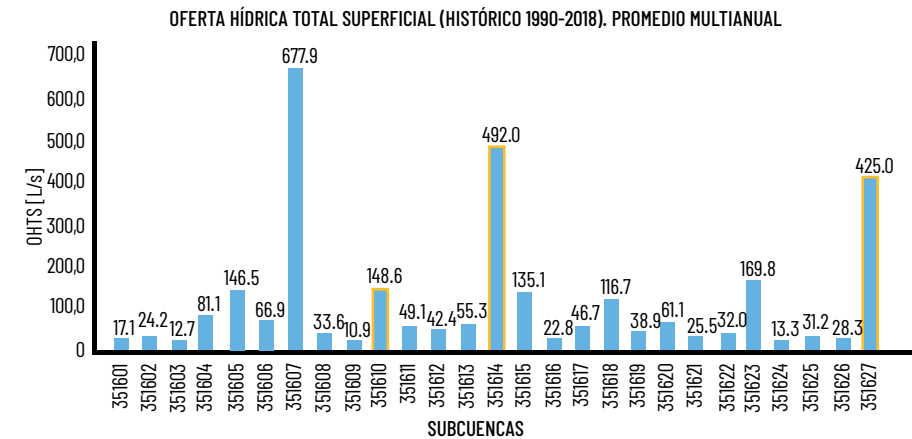


Gráfico 26. Estadísticas de la oferta hídrica total superficial simulada para el período HISTÓRICO (1990-2018) en la cuenca del Lago de Tota, AICCA 2020

¿Cuáles variables del balance hídrico explican el cambio en el almacenamiento del lago de Tota?

La modelación del lago de Tota se hizo con el balance hídrico del cambio en el almacenamiento del cuerpo de agua, donde sus variables más relevantes fueron la lluvia y la evapotranspiración mensuales interpoladas espacio-temporalmente en el centroide del lago, los aportes de las subcuencas afluentes, la demanda de los usuarios que captan del lago y el agua vertida por el lago a través del vertedero de herradura, las cuales permitieron darle solución a la ecuación de almacenamiento.

Como la principal salida de agua del lago es la demanda de los usuarios y la mejor estimación que se tiene de su valor son los valores reportados a la fecha en las concesiones de Corpoboyacá, se propusieron tres simulaciones diferentes para cuantificar la incertidumbre de esta variable dentro del balance.

“ Como la principal salida de agua del lago es la demanda de los usuarios y la mejor estimación que se tiene de su valor son los valores reportados a la fecha en las concesiones de Corpoboyacá, se propusieron tres simulaciones diferentes para cuantificar la incertidumbre de esta variable dentro del balance. ”

¿Cuáles variables del balance hídrico son las más relevantes?

Se analiza que en el balance hídrico del lago de Tota el caudal de demanda (variable) tiene el mayor peso en la incertidumbre de las simulaciones del modelo y un impacto significativo dentro del balance hídrico.

¿Cuánto aportan, realmente, los caudales desviados del río Olarte al Lago de Tota?

El modelo GR2M se calibró con información de caudal (l/s) histórico mensual multianual disponible para el período 1990-2018, que arrojan una oferta hídrica total superficial simulada promedio de 425,0 l/s por parte de la subcuenca del río Olarte. De la cual se estima que en promedio se desvía el 51.89 % del caudal del río Olarte hacia el lago de Tota, con un 48,11 % restante hacia el río Upía.

De las pérdidas por consumo de agua ¿Cuáles sectores representan la mayor demanda del recurso hídrico?

Con respecto al lago de Tota, a través del túnel de Cuítiva, el sector que más demanda agua es el doméstico, seguido por el sector agrícola, industrial, pecuario y piscícola. Mientras que, con respecto a las subcuencas el sector que más demanda agua es el agrícola, seguido por el sector doméstico y en una menor proporción el pecuario.

En orden, por el caudal extraído, la subcuenca que presta el mayor servicio ecosistémico relacionado con el recurso hídrico es el río Tobal, seguido por la quebrada las Cintas y el río Olarte.

Bajo un escenario de lluvias extremas ¿qué cota alcanzaría la lámina de agua del lago?

El escenario húmedo de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) para la cuenca del Lago de Tota consiste en proyectar, para el período 2030-2050, un aumento en la

precipitación anual e incremento del número de días consecutivos con precipitaciones en el año y en el número de días con lluvias superiores al percentil 95.

Empleando como datos de entrada el escenario húmedo de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) para el caudal de oferta de las cuencas aferentes al lago, la proyección de demanda total, escenario de referencia y el escenario de desvío de referencia del río Olarte, se pudo simular cómo cambia el balance hídrico del lago. De esta manera se pudo simular cómo cambian las cotas de nivel del lago bajo estos escenarios.

A continuación, se referencian las variables de dichos escenarios:

- * Precipitación: Incremento de lluvia anual del 15-40 % hacia el año 2050; Aumento promedio de 4 a 7 días en la duración de los períodos extensos de lluvias; Aumento entre 7 y 9 días más con lluvias extremas.
- * Temperatura: Aumento de temperatura entre 0,6 y 0,8 °C
- * Demanda Total escenario de referencia: 896,05 l/s (2029) – 908,1 l/s (2050)
- * Desvío de referencia río Olarte: Se asume que en promedio se desvía el 51,89 % del caudal.

Bajo un escenario de lluvias extremas (Esc. HÚMEDO) se alcanzaría una cota máxima de 3.015,9 m.s.n.m. (cota máxima histórica 3.015,4 m.s.n.m.).

Se aclara que estas cotas deben usarse como posibles valores de referencia, puesto que los escenarios no son predicciones sino suposiciones e hipótesis.

“ Si en el futuro se llegará a mantener en la cuenca la demanda total de referencia con el desvío de referencia del río Olarte (esc. referencia), esta decisión de gestión del recurso hídrico ayudaría a mitigar el impacto de una posible disminución en la capacidad de volumen de almacenamiento del lago para el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) ”

¿Cómo cambia el balance hídrico futuro bajo los escenarios de varia variabilidad climática y cambio climático ((VC/CC))?

Si en el futuro se llegara a mantener en la cuenca la demanda total de referencia con el desvío de referencia del río Olarte (esc. referencia), esta decisión de gestión del recurso hídrico ayudaría a mitigar el impacto de una posible disminución en la capacidad de volumen de almacenamiento del lago para el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC), inclusive si esta demanda de referencia aumentara un 100 %. Para el escenario HÚMEDO, mantener en la cuenca la demanda total de referencia implica directamente un aumento en el volumen de almacenamiento y en las cotas máximas del lago. Por otra parte, de estos resultados también se infiere que si la

demanda total fuera 2,45 veces el valor de referencia, que es el valor histórico real de la demanda de la cuenca, el impacto para el lago en el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) sería una disminución directa en su volumen de almacenamiento, el espejo de agua y las cotas de nivel muy por debajo a como se conocen hoy en día.

Manteniendo en la cuenca, para un futuro (2030-2050), la demanda total de referencia junto con el desvío de referencia del río Olarte, el escenario HÚMEDO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) alcanzaría una cota máxima de 3.015,9 m.s.n.m. (cota máxima histórica 3.015,4 m.s.n.m.), mientras que el escenario SECO de (VC/CC) alcanzaría una cota mínima de 3.014,2 m.s.n.m. (cota mínima histórica 3.013,2 m.s.n.m.).

¿Cómo cambia el balance hídrico si aumenta la demanda de extracción del lago?

Para considerar proyecciones futuras en la demanda de los usuarios de la cuenca del Lago de Tota, que sean aproximadas a la realidad, se puede emplear los módulos de consumo que son la cantidad de agua que se requiere para el desarrollo de una actividad o la obtención de un producto.

Para la cuenca del Lago de Tota se resalta que, en las condiciones actuales no se ve factible que haya una expansión de la frontera agrícola o una reconversión o cambio del uso diferente al cultivo. Entonces, para el sector agrícola se mantiene el valor oficial de 395,3 l/s de caudal demandado, pues el que se estimó a partir de las áreas de los cultivos y los módulos de consumo es ligeramente menor; para los sectores pecuario, industrial, piscícola también se mantienen los valores oficiales de consumo.

Por su parte, para el sector doméstico se hace una proyección agregada de la demanda total, teniendo en cuenta un posible aumento en la demanda de caudal a través de las extracciones del túnel de Cuítiva, ya sea por el aumento de la población en la ciudad de Sogamoso, o bien por la aprobación por parte de la autoridad ambiental de nuevas concesiones de tipo trasvase hacia otros usos y territorios fuera de la cuenca.

Para las posibles extracciones a través del túnel de Cuítiva se proponen tres escenarios que estiman la proyección de demanda total para el período 2030-2050, un aumento de la demanda total del 25, 50 y 100 %. En estos escenarios la proyección de la demanda total tendría las siguientes variaciones:

- * Para el escenario de referencia en el rango 896,05 l/s (2029) – 908,1 l/s (2050);

- * Para el escenario con incremento del 25 % en el rango 1.120,07 l/s (2029) – 1.135,12 l/s (2050);
- * Para el escenario con incremento del 50 % en el rango 1.344,08 l/s (2029) – 1.362,15 l/s (2050);
- * Para el escenario con incremento del 100 % en el rango 1.792,11 l/s (2029) – 1.816,2 l/s (2050).

Ahora, empleando como datos de entrada los escenarios de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) (seco y húmedo) para el caudal de oferta de las cuencas aferentes al lago, las proyecciones de demanda total (incremento del 25, 50, 100 %) y el escenario de desvío de referencia del río Olarte (aprox. 52 %), se puede simular cómo cambia el balance hídrico del lago en los escenarios seco y húmedo de variabilidad y cambio climático.

En general, los resultados de estas simulaciones muestran que para el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC), la variación de las cotas de nivel se da por la influencia directa de las condiciones climáticas de lluvia y evapotranspiración. De otra parte, para el escenario HÚMEDO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC), en general se observa que la variación de las cotas de nivel se da más por el control hidráulico del vertedero de herradura, pues siempre que se alcanzan cotas máximas y aumenta la descarga del vertedero ocurre una caída súbita en las cotas y se alcanzan cotas mínimas.

En específico, se indica la simulación del cambio de cotas de nivel en el lago de tota bajo escenarios de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC).

Para el escenario SECO, teniendo en cuenta el escenario de desvío de referencia del río Olarte (aprox. 52 %), las cotas (m.s.n.m.) máximas y mínimas serían:

- * Demanda de referencia: Max. 3.015,6 y Min. 3.014,6
- * Demanda con incremento del 25 %: Max. 3.015,6 y Min. 3.014,6
- * Demanda con incremento del 50 %: Max. 3.015,5 y Min. 3.014,6
- * Demanda con incremento del 100 %: Max. 3.015,4 y Min. 3.014,2

Mientras que, para el escenario HÚMEDO, teniendo en cuenta el escenario de desvío de referencia del río Olarte (aprox. 52 %), las cotas (m.s.n.m.) máximas y mínimas serían:

- * Demanda de referencia: Max. 3.015,9 y Min. 3.014,3
- * Demanda con incremento del 25 %: Max. 3.015,8 y Min. 3.014,3
- * Demanda con incremento del 50 %: Max. 3.015,8 y Min. 3.014,3
- * Demanda con incremento del 100 %: Max. 3.015,8 y Min. 3.014,5

“ El escenario húmedo de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC) para la cuenca del Lago de Tota consiste en proyectar, para el período 2030-2050, un aumento en la precipitación anual e incremento del número de días consecutivos con precipitaciones en el año y en el número de días con lluvias superiores al percentil 95. ”

“ En general, los resultados de estas simulaciones muestran que para el escenario SECO de variabilidad climática y cambio climático (VC/CC), la variación de las cotas de nivel se da por la influencia directa de las condiciones climáticas de lluvia y evapotranspiración. ”

Referencias bibliográficas

Armenta, G., Septiembre 2019. *Escenarios de variabilidad climática y cambio climático para la cuenca del Lago de Tota*. CONDESAN Proyecto AICCA.

Corpoboyacá, 2012. *Resolución 1539 del 13 de junio de 2012 por medio de la cual se reglamenta el uso del recurso hídrico de las corrientes pertenecientes a las microcuencas Los Pozos, Hato Laguna, Olarte y Tobal, afluentes del Lago de Tota y las derivaciones del mismo a través de motores eléctricos u otros combustibles*. Corporación Autónoma Regional de Boyacá.

DNP, 2014. *CONPES 3801: Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del lago de Tota*. Departamento Nacional de Planeación, República de Colombia.

Dueñas, C. (1997). *Marco normativo vigente ante el riesgo de inundaciones*. Madrid.

Fontaine, 2007. *Verde y negro: ecologismo y conflictos por petróleo en el Ecuador*. En G. Fontaine, G. van Vliet, R. Pasquis (coords.), *Políticas ambientales y gobernabilidad en América Latina*. Quito. Ecuador FLACSO-IDDRI-CIRAD

Forcada, 2012, *El futuro de la gobernanza medioambiental internacional en: Revista de Derecho Ambiental*, vol. 32, 2012.

Hernández, L.H., 2020. *Documento (Formato físico y digital) con información identificada y detallada de los conflictos socio-ambientales y el mapa de los actores locales*. Proyecto Adaptación a los Impactos Climáticos en los Recursos Hídricos de los Andes AICCA.

IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua*. Bogotá D.C.: Publicaciones del IDEAM.

IDEAM, 2014. *Glosario indicadores hídricos*. Obtenido de: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/iua>

IDEAM, 2019. *Estudio Nacional del Agua 2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM, AICCA, 2020. *Informe levantamiento topográfico y de batimetría del lago de Tota*. Proyecto de Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en Recursos Hídricos en los Andes (AICCA) Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

INGEAG, 2019. *Desarrollo de los mapas Zonificación Climática; Cobertura de la tierra; Uso de la tierra; y los Ecosistemas. Todas en formato espacial (vectorial) a escala 1:25.000*. Bogotá. CONDESAN, IDEAM.

IPCC, 2014. *Cambio climático 2014 mitigación del cambio climático*. Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

MADS - PROMAC – GIZ, 2017. *Guía Metodológica para el Diseño y la Implementación de Procesos de Prevención y Transformación de Conflictos por el Agua*.

MinAmbiente, ANLA, 2013. *Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. Bogotá.

Peña, J. C., 2020a. *Documento con la caracterización con enfoque hidrológico, análisis y recomendaciones del afluente seleccionado (río Tobal)*. Proyecto de Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en Recursos Hídricos en los Andes (AICCA) - Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

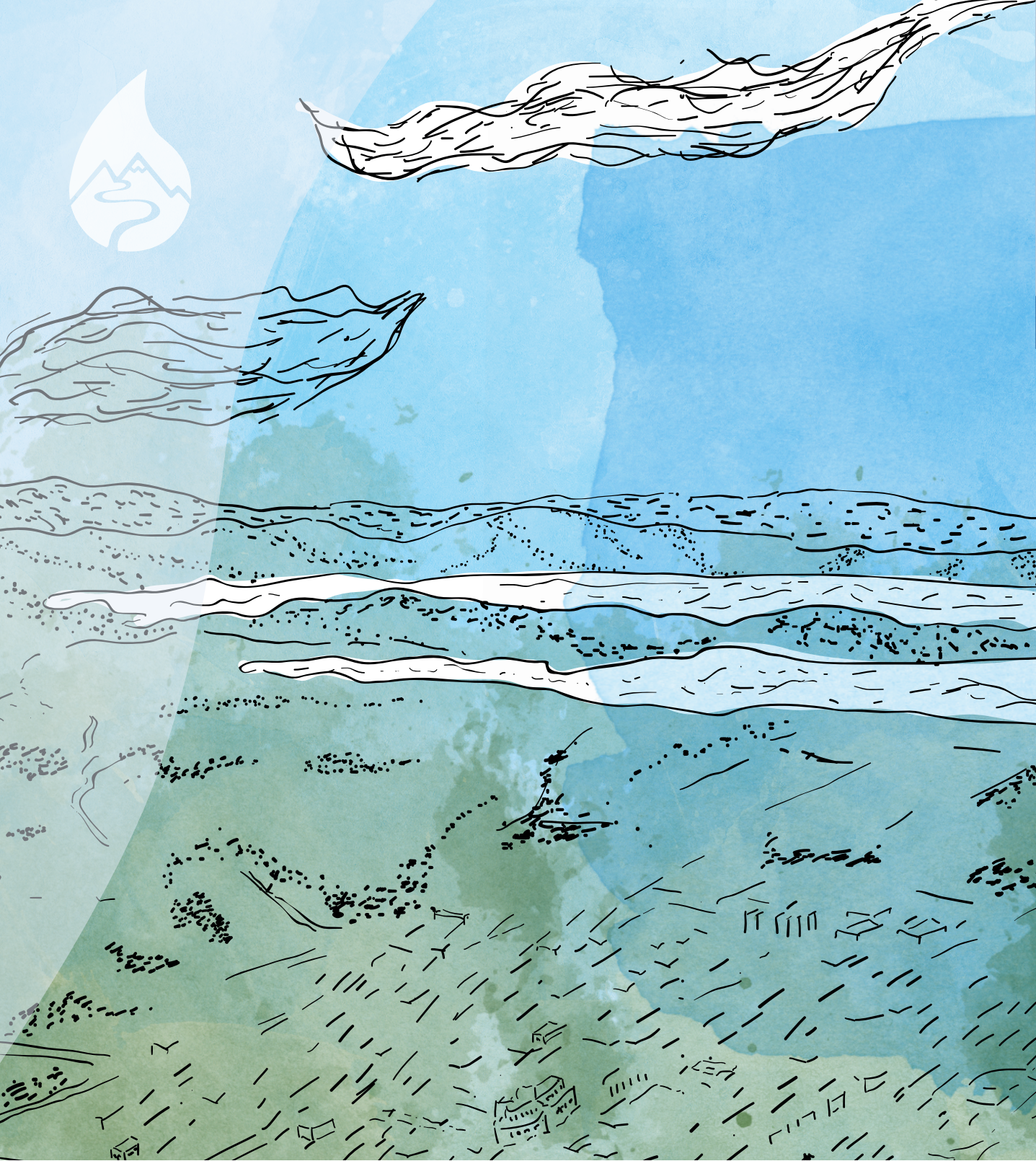
Peña, J. C., 2020a. *Documento técnico con la actualización y análisis de los diferentes escenarios de modelación hidrológica, los escenarios de VC/CC y otras variables de interés*. Proyecto de Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en Recursos Hídricos en los Andes (AICCA) - Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Peña, J. C., 2020b. *Informe técnico con los resultados de modelación hídrica de la cuenca del lago de Tota*. Proyecto de Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en Recursos Hídricos en los Andes (AICCA) - Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

PNUMA, 2008. *Gobernanza Ambiental*. Recuperado de: http://www.unep.org/pdf/Environmental_Governance_sp.pdf

UPB, Corpoboyacá, 2015. *Determinación de módulos de consumo de agua para sector industrial, pecuario, agrícola, energético y de servicios en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá y determinación de metas de reducción de pérdidas en los sectores recreativo y hoteleros presentes del área de influencia del municipio de Paipa*. Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). Grupo de Investigaciones Ambientales Instituto de Energía, Material y Medio Ambiente Universidad Pontificia Bolivariana.





Financiado por:



Liderado por:



En alianza con:



CONDESAN
Consortio para el Desarrollo Sostenible
de la Ecorregión Andina

