

Análisis de la dinámica del agua

en la cuenca del Orinoco en Colombia

PILOTO DE APLICACIÓN



ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL AGUA EN LA CUENCA DEL ORINOCO EN COLOMBIA—EJERCICIO PILOTO DE APLICACIÓN DE LA "RUTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL AGUA EN EL TERRITORIO"

©THE NATURE CONSERVANCY (TNC)
www.nature.org
colombia@tnc.org
Teléfono TNC (+57) 1-6065837

Claudia Vásquez Marazzani
Directora de la unidad de conservación del Norte de Andes y Sur de Centro América (NASCA)

Andrés Zuluaga Salazar
Coordinador de la Estrategia de Tierras

Equipo interno The Nature Conservancy:

Jonathan Nogales Pimentel
Carlos Rogéliz Prada
Deissy Arango González
Elena Montes Jaramillo
Tomas Walschburger

Cita de la obra:
The Nature Conservancy. Análisis de la dinámica del agua en la cuenca del Orinoco en Colombia. Ejercicio piloto. Bogotá D.C. 2020.

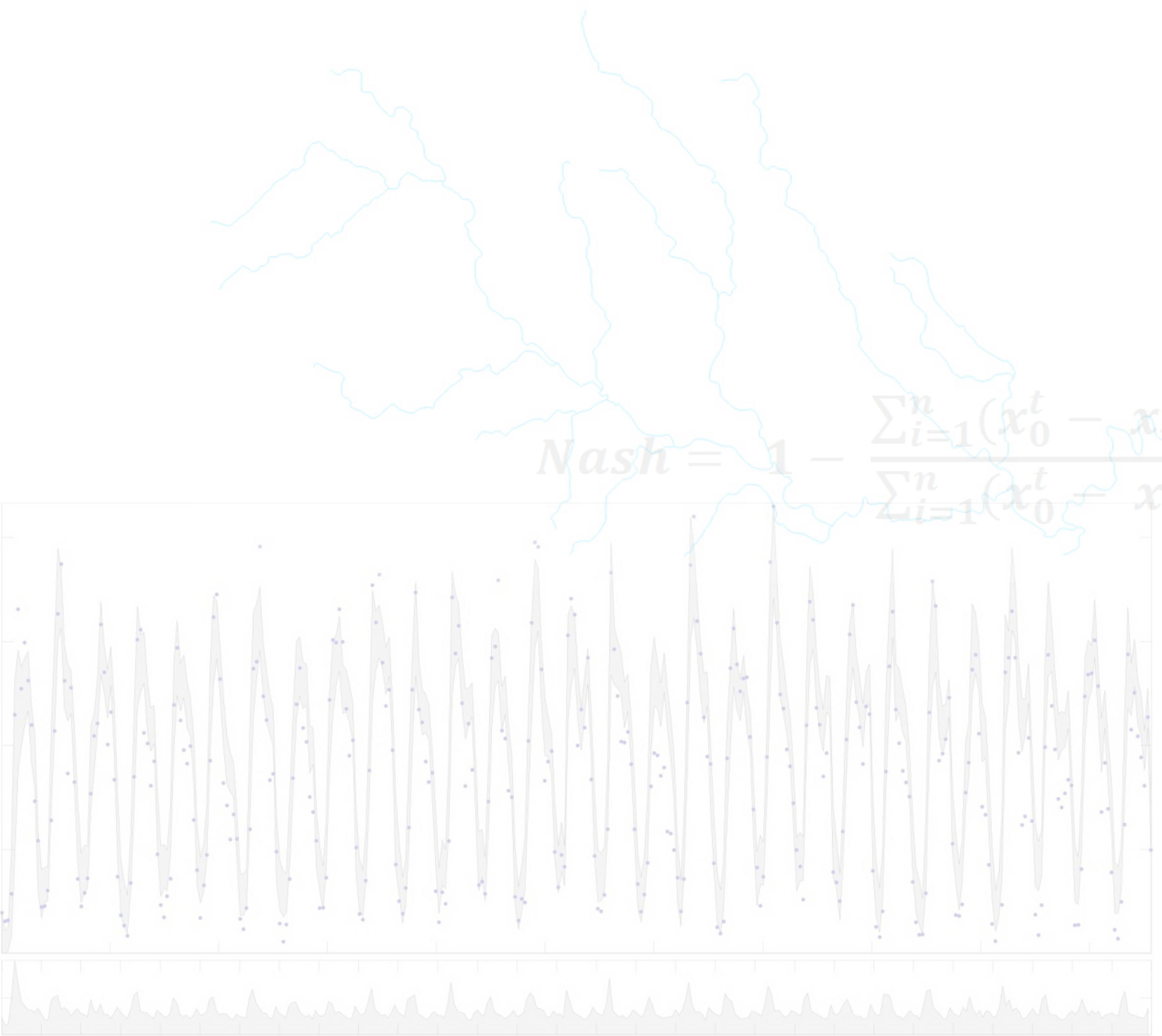
Producción editorial:
Fairatie Creatividad

ISBN Obra digital:
978-958-53050-0-7

ISBN Obra impresa:
978-958-52666-8-1



Con el apoyo de:



Introducción

El crecimiento de la población y el aumento del nivel de vida en el mundo, han generado una mayor demanda de alimentos; esta situación está impulsando la producción agrícola en las últimas tierras naturales remanentes. En Colombia, la Orinoquia constituye el segundo sistema de sabanas más grande de América del Sur y es considerada como la última frontera agrícola para el país. Actualmente, esta región está experimentando una rápida expansión del desarrollo agrícola a gran escala, que incluye plantaciones de palma de aceite, caucho y eucalipto, así como cultivos anuales como arroz, maíz y soja, principalmente para abastecer una demanda interna creciente.

Otras regiones del país han experimentado auges agrícolas similares, con poca o ninguna planificación ligada a los cambios en el uso de la tierra y la infraestructura asociada, como la empleada para la energía y las comunicaciones; lo que ha causado la pérdida de la biodiversidad y de los beneficios de la naturaleza. Dada la etapa temprana en la cual se encuentra la Orinoquia con respecto a otras regiones, resulta estratégico pensar en una planificación y gestión del territorio en torno al agua.

Desde el punto de vista del recurso hídrico, se debe conocer las disponibilidad y demanda de agua en la región, así como también, entender los procesos hidrológicos que allí tienen lugar y cómo éstos se verán afectados ante los cambios agroindustriales, factor que repercute de forma directa en la disponibilidad de agua para los distintos usos. A partir de estos conocimientos, se pueden desarrollar estrategias que faciliten la previsión de dichas afectaciones.

Cuando hablamos de la Orinoquia colombiana, nos referimos no solo a las sabanas de las zonas planas, sino a toda la superficie que drena sus aguas hacia el río Orinoco, es decir a la cuenca del mismo nombre, que incluye las tierras altas de la cordillera oriental del país. Esta cuenca, comprende una extensión de 347.208 kilómetros cuadrados, conocer la disponibilidad hídrica y estudiar los procesos hidrológicos en cada uno de sus afluentes solamente con monitoreo en campo, resultaría inviable, muy costoso o demasiado riesgoso para llevarlo a cabo dadas las restricciones de acceso a algunas áreas. La modelación matemática hidrológica, brinda la posibilidad de entender, a partir de expresiones matemáticas, los procesos hidrológicos en una cuenca, además ofrece la

oportunidad de simularlos a futuro, así como también prever sus afectaciones mediante la variación de sus parámetros. Para poder discernir la forma en la cual se debe modelar la Orinoquia colombiana, de tal manera que permita entender y evaluar los procesos hidrológicos que en ella tienen lugar, se debe seguir un protocolo de modelación, que consiste en una secuencia lógica y discreta, de pasos orientados a la obtención de un resultado.

Este documento presenta los principales resultados del análisis de la dinámica del agua en la cuenca del río Orinoco en Colombia, siguiendo los pasos planteados en la "*Ruta metodológica para el análisis de la dinámica del agua en el territorio*", elaborada por The Nature Conservancy (TNC, 2020)¹. Se inicia por una breve descripción del contexto de la cuenca y su diversidad de ríos; luego se aborda el entendimiento de la dinámica del agua a través del estudio del clima y la hidrología, las demandas de agua, los procesos físicos observados a través de la conceptualización y desarrollo de un modelo configurado y validado; posteriormente se distinguen algunos escenarios de desarrollo y se muestran los resultados particulares de ciertos ejercicios realizados a escalas territoriales más pequeñas, siguiendo también la ruta completa del proceso, los cuales permiten ver la aplicación y la utilidad de este tipo de ejercicios.

Se concluyó que el modelo matemático desarrollado, posee la capacidad de representar los procesos de interés en el área de estudio, asociados a condiciones climáticas, demandas, usos del suelo, interacción río-planicie y balance hídrico. Además, el modelo permite tener representaciones espaciales de la disponibilidad hídrica y de variables de interés en un análisis dinámico en tiempo a resolución mensual. En este sentido, el uso del modelo puede estar orientado a la exploración de diferentes escenarios de desarrollo, con el objetivo de estudiar sus efectos en la región de la Orinoquia colombiana y sus impactos sobre el agua, teniendo en cuenta las restricciones y limitaciones de dicho modelo.

¹. The Nature Conservancy (2020). Ruta metodológica para el análisis de la dinámica del agua en el territorio. Integración de la oferta y la demanda para la modelación y simulación de escenarios. Bogotá D.C.

1 La importancia del agua

La cuenca del río Orinoco en Colombia, posee una extensión aproximada de 347.208 km², abarcando la totalidad de los departamentos de Arauca, Casanare, Vichada, gran parte del Meta y parte de Guaviare, Guainía, Cundinamarca, Boyacá, Norte de Santander, Vaupés y Santander. La porción presente en Colombia, representa el 36,5% de toda la gran cuenca del río Orinoco, que se representa en la figura 1.

A nivel hídrico, esta región posee una alta oferta de agua durante los meses de junio, julio y agosto, llegando a alcanzar caudales en el río Meta, en su desembocadura en el Orinoco, por encima de los 10.000 metros cúbicos por segundo. Sin embargo, en los meses de estiaje, como enero y febrero, la oferta hídrica puede bajar de manera sustancial llegando a valores de caudal inferior a 1.000 metros cúbicos por segundo; el agua dulce producida en la cuenca del Orinoco es uno de los medios de mayor potencial económico. Además, los distintos bosques de la región, representan un recurso aprovechable para la explotación de materias primas y especies prometedoras para mercados de alimento, aceites, fibras, madera, leña, aromas, perfumes, medicinas y resinas entre otros, desde un enfoque de conservación y recuperación de los ecosistemas (Corporinoquia et al. 2005)².

Bajo este contexto, se considera fundamental que, en el desarrollo de los planes de ordenamiento productivo y escenarios de expansión, el agua sea un eje central de estudio, como un recurso limitante para el desarrollo y un componente fundamental a tener en cuenta en la planificación del territorio.

Unidades hidrológicas de análisis

El territorio colombiano, desde un enfoque político administrativo, se encuentra dividido en departamentos, los cuales, desde el punto de vista gubernamental, facilitan la administración del territorio. Sin embargo, los límites departamentales no siempre coinciden con los límites naturales que definen la formación de las llamadas cuencas hidrográficas, que drenan el agua a través de un cauce principal. Como consecuencia de lo anterior, para entender la dinámica del agua en la Orinoquia colombiana, se definieron como unidades básicas de análisis, las Unidades Hidrológicas (UH) representadas en la figura 2, que son las cuencas más pequeñas que componen toda la cuenca del río Orinoco en Colombia.

En este orden de ideas, las Unidades Hidrológicas se generaron a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) de 12,5 metros de resolución espacial, producido por la misión Alos Palsar, lanzada en enero del 2006 por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, el cual fue corregido preliminarmente por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y posteriormente por The Nature Conservancy (TNC). En total, se definieron 4.273 UH, cerca del 40% de estas, aportan sus aguas al río Guaviare, el 30% al río Meta y el 30% restante a los ríos Vichada, Tomo, Bitá y otros. La información detallada puede ser consultada en el documento componente de oferta³.

2. Correa, H. D., Ruiz, S. L. y Arévalo, L. M. (eds) (2005). Plan de acción en biodiversidad de la cuenca del Orinoco – Colombia / 2005 - 2015 – Propuesta Técnica. Bogotá D.C.: Corporinoquia, Cormacarena, I.A.v.H, Unitrópico, Fundación Omacha, Fundación Horizonte Verde, Universidad Javeriana, Unillanos, WWF - Colombia, GTZ - Colombia. 273 p.

Figura 1. Localización de la cuenca del río Orinoco

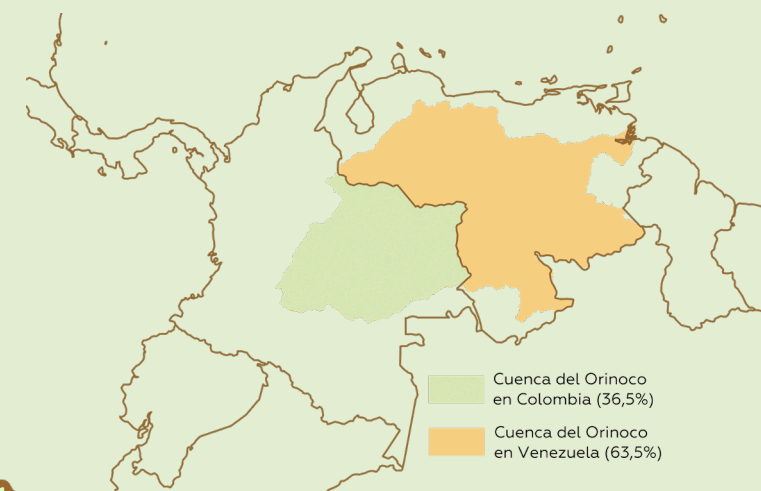
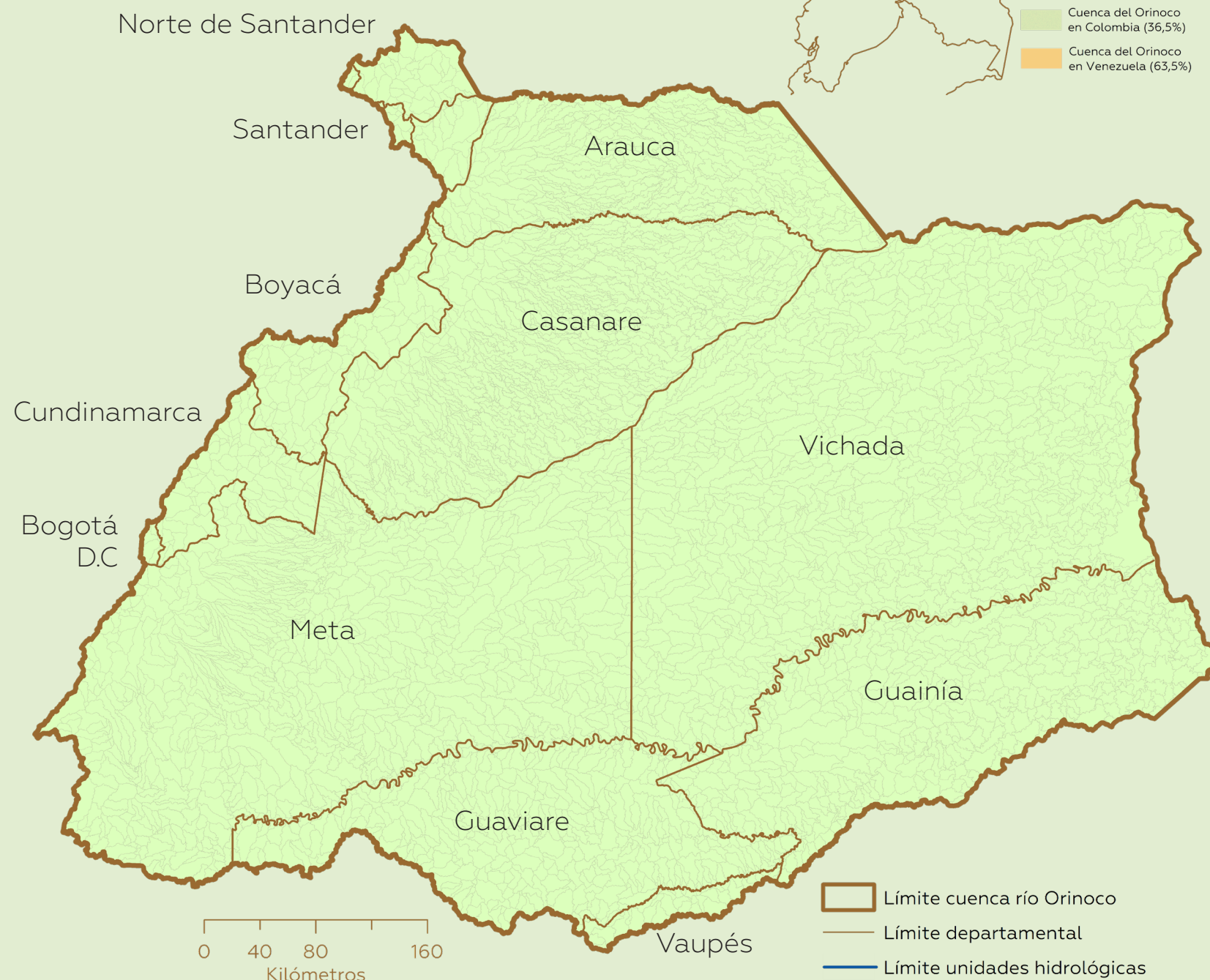
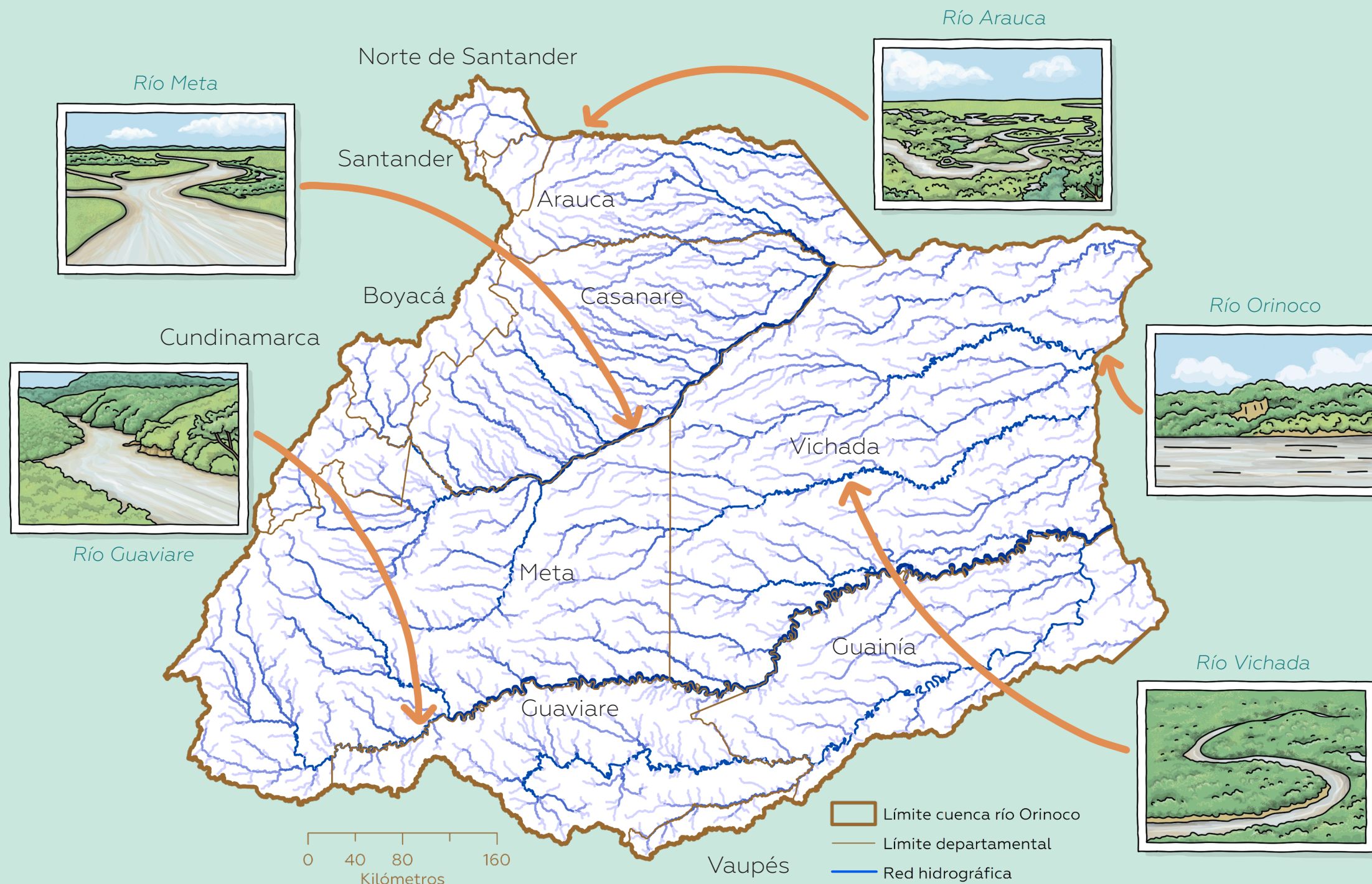


Figura 2. Unidades hidrológicas en la cuenca del río Orinoco en Colombia



2 La diversidad de ríos y el ciclo del agua

Figura 3. Red hidrográfica en la cuenca del Orinoco en Colombia



El drenaje de la cuenca del río Orinoco es muy diverso y complejo, debido a la gran variedad de estructuras geomorfológicas que deben recorrer los numerosos ríos que conforman esa red, la cual ha sido resaltada en la figura 3 para efectos de su visualización. En el área se recogen las vertientes andinas, el Macizo de las Guayanas y las planicies hacia el centro; que se agregan, en su mayoría, a los afluentes que bajan de los Andes. En Colombia esta cuenca cubre cerca del 34 % del territorio (Dominguez, C. 1998)⁴.

La estructuración de la red de drenaje, como insumo base para el análisis, implicó un proceso de revisión y depuración de información bastante amplio, pues la representación de la conectividad topológica de la red de drenaje, era un factor fundamental para la representación de los procesos hidrológicos a partir de modelación matemática hidrológica. La cuenca del Orinoco en Colombia presenta variaciones en sus elevaciones muy bajas, inferiores a 300 metros sobre el nivel del mar, haciendo de esta una región principalmente plana. Esta condición, tiene ciertas implicaciones para la identificación de las áreas de drenaje y la red hídrica, a partir de procesos computacionales, mediante Modelos de Elevación Digital (DEM), con estos se pueden generar diversos resultados, unos más precisos que otros, dependiendo de la resolución espacial y de la calidad de información del DEM.

En cuanto al ciclo del agua en la Orinoquia colombiana, este exhibe un comportamiento monomodal o de un solo periodo de máximas precipitaciones. En consecuencia, los periodos de lluvia y caudales más bajos se presentan en los meses enero, febrero y marzo, mientras que los periodos de mayores lluvias y caudales se presentan en los meses de abril, mayo, junio y julio. Esta situación se debe principalmente a la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que es uno de los mecanismos preponderantes para explicar la variabilidad anual y semianual de la precipitación en Colombia. (Velez et al. 2000)⁵.

3. The Nature Conservancy (2017). Componente de oferta. Landscape planning for agro-industrial expansion in a large, well-preserved savanna: how to plan multifunctional landscapes at scale for nature and people in the Orinoquia region, Colombia. Bogotá DC.

4. Dominguez, C. (1998). La gran cuenca del Orinoco, Colombia Orinoco. Fondo FEN Colombia, Bogotá.

5. Velez, J., Poveda, G. & Mesa, O., (2000). Balances Hidrológicos de Colombia Universidad Nacional, ed., Medellín.

3 El entendimiento del agua

3.1 Clima e hidrología

3.1.1 Selección, recopilación y procesamiento de las variables analizadas

Para esta etapa del proceso, se realizó la recopilación y revisión de información secundaria de variables climáticas e hidrológicas. Para esto se consultaron entidades públicas, como las Corporaciones Autónomas Regionales y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), a partir de las cuales, se logró consolidar la base de datos con los registros hidrometeorológicos para el área de interés a resolución mensual. En total se identificaron 526 estaciones de monitoreo, tanto de variables meteorológicas como hidrológicas.

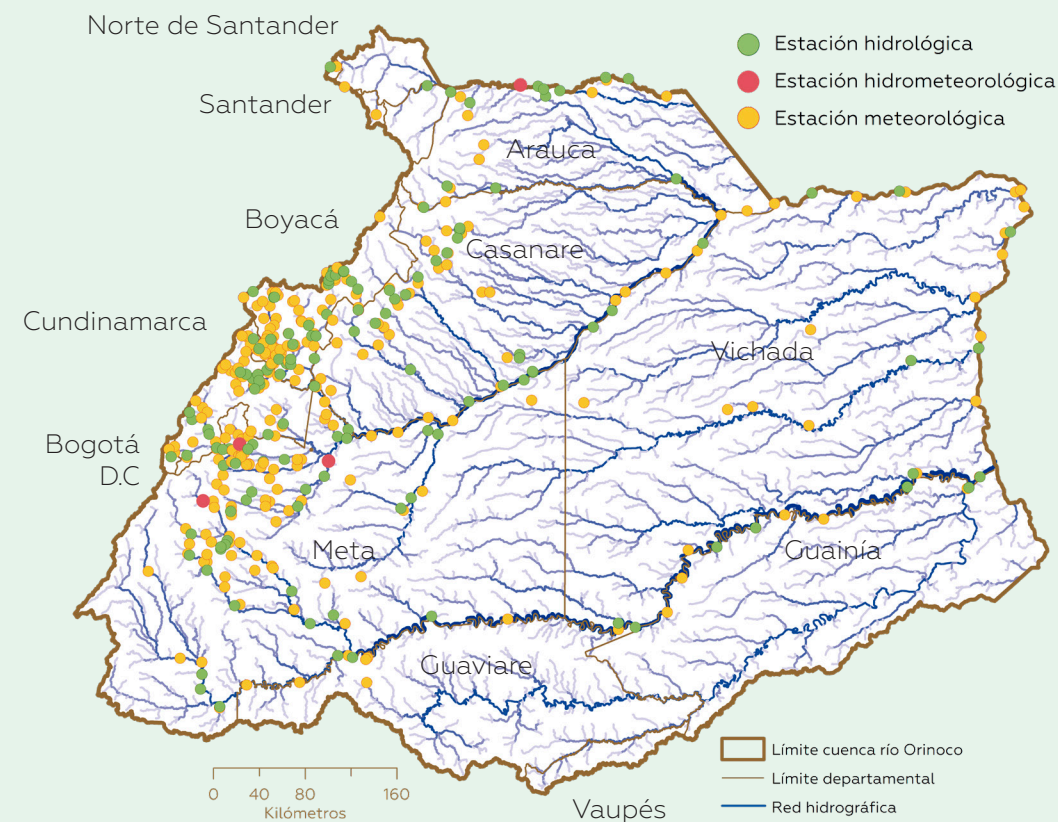
Sin embargo, de acuerdo a la disponibilidad y estado de los datos, se seleccionaron las variables de precipitación, temperatura y caudal para la elaboración del análisis de la dinámica del agua en la región. De igual manera se consolidó información sobre geología, suelos, pendientes y cobertura de la tierra, a partir de la cual, se establecieron algunos coeficientes para el modelo. La información detallada puede ser consultada en el documento componente de oferta³.

A las variables seleccionadas se les realizó un análisis de homogeneidad y consistencia con el ánimo de verificar la calidad de los datos recopilados, a través del estudio de completitud, datos anómalos y complementación de valores faltantes. A continuación, se describen los pasos de este proceso.

PASO 1 Recopilación de la información tomada por la red de estaciones que registran los datos del clima y del agua.

La mayoría de las estaciones son meteorológicas y se localizan en el sector occidental, presentándose una cobertura incipiente en la región central y oriental. Por otra parte, se encontraron varias estaciones suspendidas, evidenciándose que no se cumple con el criterio de densidad de estaciones sugerido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2011)⁶. De las 526 estaciones identificadas, se obtuvo la información de 468 de ellas, con periodo de registro vigente hasta el 2014. La distribución espacial de las estaciones con información disponible se presenta en la Figura 4.

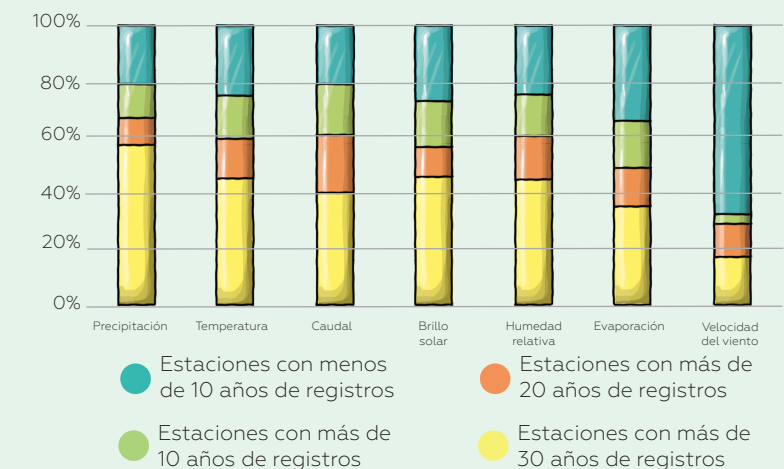
Figura 4. Distribución espacial de estaciones hidrométricas y meteorológicas con información disponible



PASO 2 Selección de la serie de datos más apropiados para usar en el análisis.

A la información recolectada de cada una de las variables climáticas e hidrológicas, se le realizó un inventario del estado de los datos, en relación con el periodo de registro. En la figura 5 se puede observar el consolidado.

Figura 5. Consolidado de los periodos de registro para cada una de las variables climáticas e hidrológicas



PASO 3 Revisión de la calidad de la información para completar los datos faltantes, eliminar datos extraños y reemplazarlos por información más correcta.

En general, se evidenciaron discontinuidades temporales en la mayoría de las variables como se muestra en la Figura 6, sin embargo, fueron inferiores a un 30%. También se observaron registros temporales superiores a 20 años en más del 40%, exceptuando la variable de velocidad del viento.

Debido a la gran variabilidad de la precipitación asociada a los eventos climáticos como la Oscilación del Sur (ENSO), conocida como los fenómenos de El Niño y La Niña, hacen que la identificación de datos anómalos no sea una tarea fácil, por lo que la selección de la metodología para su identificación es primordial tal como lo describe Chandola et al. (2007)⁷. En el presente estudio se implementaron las metodologías de Tukey (Box Plot) y Grubbs para precipitación y temperatura respectivamente, para la generación de datos faltantes.

6. Organización Meteorológica Mundial (2011). Guía de prácticas climatológicas Edición de 2011. N° 100.
7. Chandola, V., Arindam, B. & Vipin, K., (2007). Outlier detection: A survey. Technical Report Department of Computer Science and Engineering.

En la Figura 7, se presenta el diagrama de Box Plot (caja de bigotes) para la estación de Acacias para cada mes. El tamaño de la caja nos muestra qué tan grande es la variación del 50% de los datos. Cuanto más grande sea la caja, es posible aceptar valores irregulares y los puntos de color rojo, presentan datos potencialmente anómalos de la serie de precipitación de dicha estación.

Figura 6. Consolidado de porcentaje de datos faltantes para cada una de las variables climáticas e hidrológicas

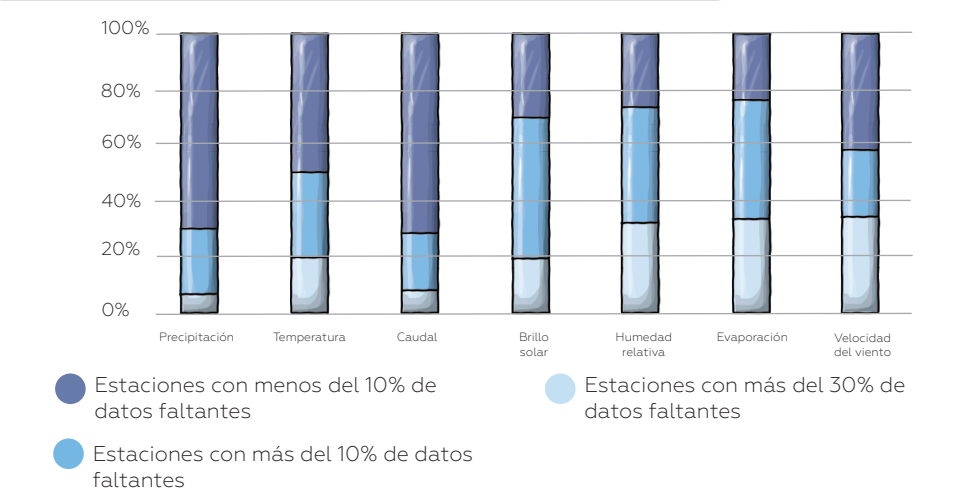
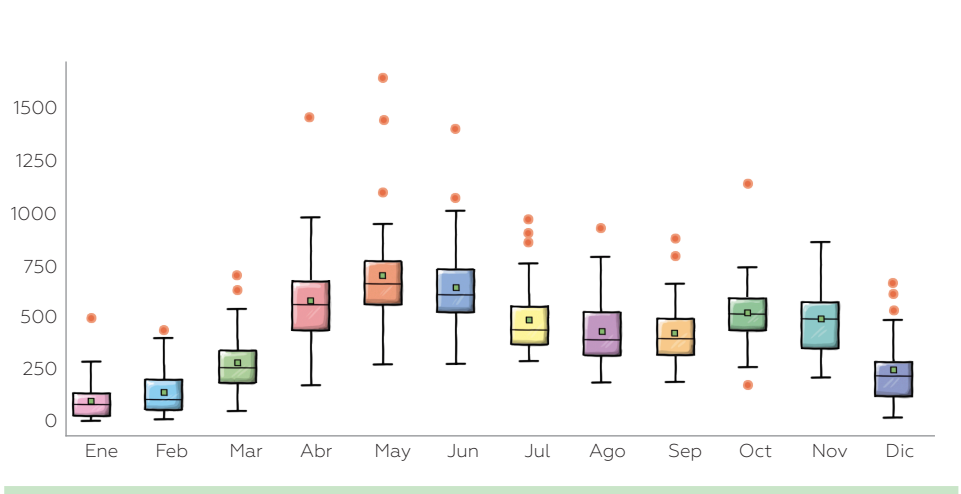


Figura 7. Diagrama de caja de bigotes de precipitación para la estación Acacias (350110020)



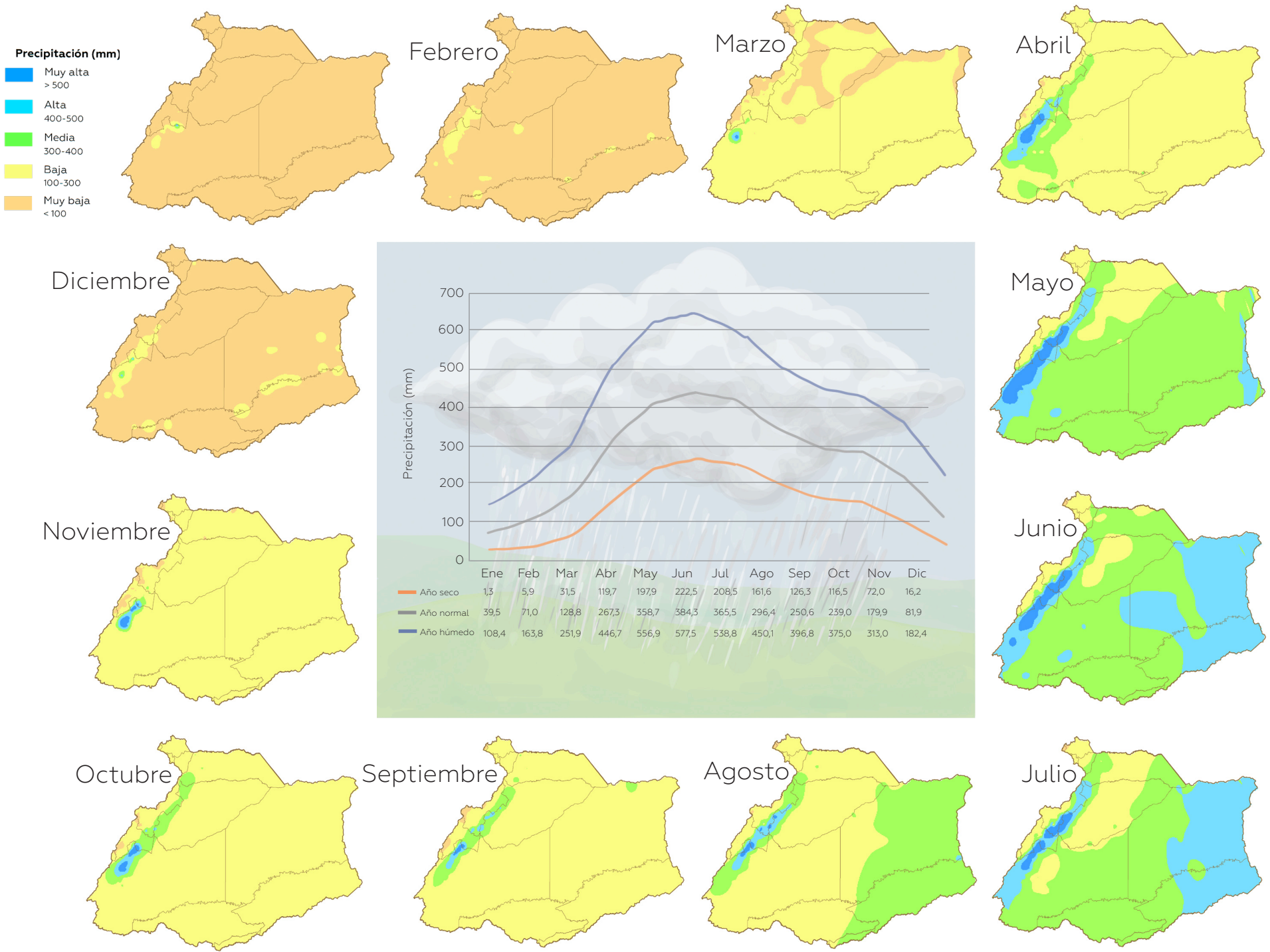
PASO 4 Generación del análisis estadístico en el tiempo y en el espacio para entender cómo se comportan las variables.

Debido a la baja densidad de estaciones y escasez de información climática en el área de estudio, la caracterización se limitó solamente a las variables de precipitación y temperatura. Para esto se realizó una depuración de las estaciones, tomando como criterio que estas dispusieran de un periodo de registro mayor 15 años y que la cantidad de datos faltantes no superara el 30% de los datos del total de registro, dando un total de 227 estaciones. La distribución espacial de las variables de precipitación (figura 8) y temperatura (figura 9) se llevó a cabo mediante la metodología de kriging.

Precipitación

La distribución de la precipitación (figura 8) logra evidenciar como el sector de mayor pluviosidad, está situado a lo largo de la cordillera oriental colombiana, concentrándose especialmente en la zona centro suroccidental de la cuenca del río Orinoco. Esta característica se presenta en mayor medida por la influencia del paso de la Zona de Confluencia InterTropical (ZCIT) sobre el territorio colombiano; esto también indica que este sector se ve alimentado de lluvias orográficas por la cadena montañosa, dando lugar a mayores precipitaciones hacia los 1.500 metros sobre el nivel del mar. Este fenómeno es de carácter predominante convectivo de las lluvias tropicales, donde las zonas más bajas reciben menos lluvia debido a que se benefician poco del ascenso orográfico y porque están afectadas por la evaporación de las lluvias que caen desde la base de las nubes. Ante esta situación, la humedad relativa decrece, causando disminución de la precipitación en las montañas altas (Velez et al. 2000)⁵.

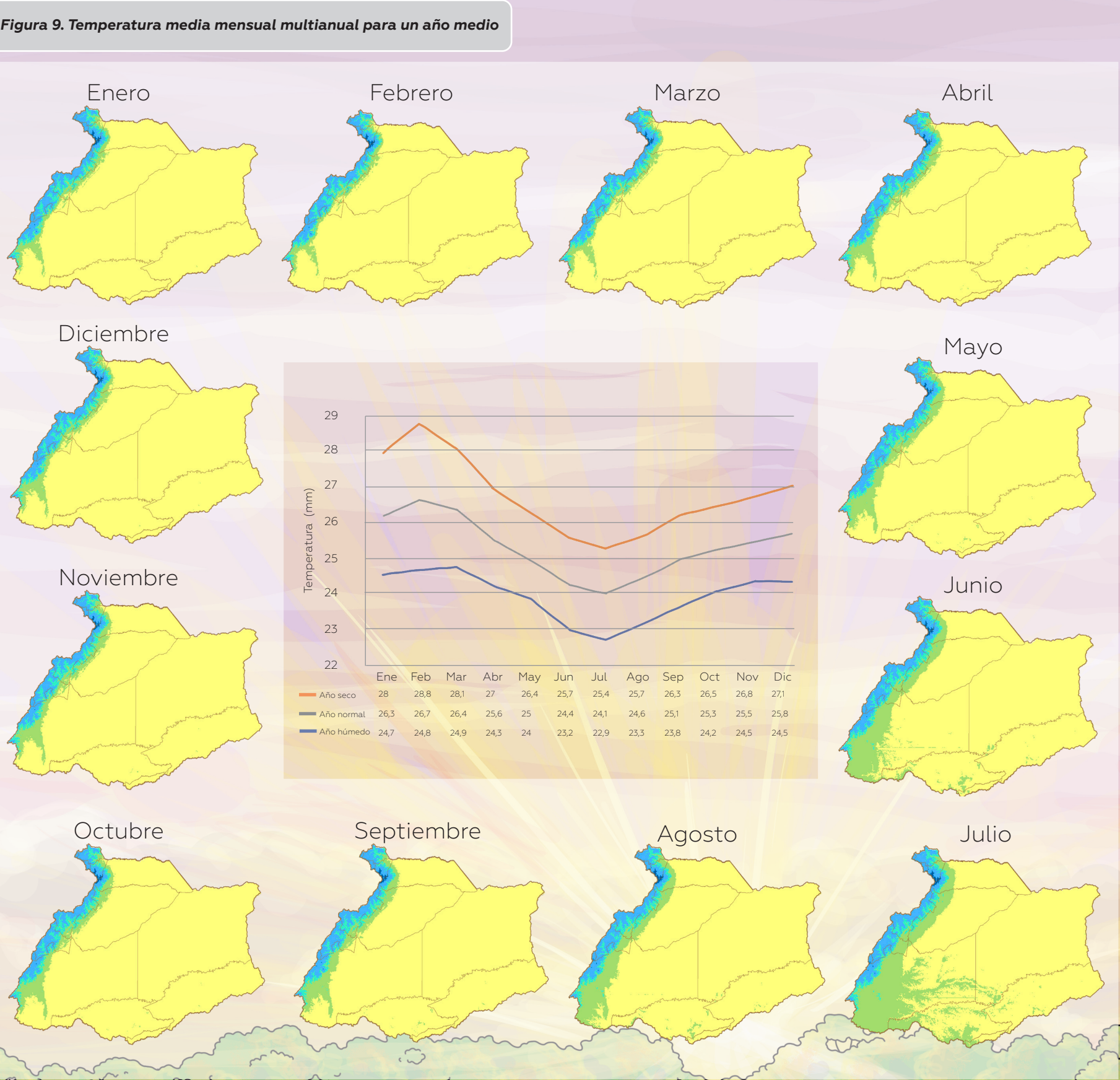
Figura 8. Precipitación media mensual multianual para un año medio



Temperatura

Dado que la temperatura posee una correlación directa con la elevación, los campos de temperatura media mensual multianual para la cuenca del río Orinoco en Colombia, fueron contruidos a partir de regresiones lineales con ayuda del modelo de elevación digital y de los promedios mensuales multianuales de las estaciones analizadas (59 en total).

De los campos generados, se encontró que la temperatura en la mayoría de la Orinoquia colombiana, varía entre los 23 y los 29°C, siendo menor en las épocas más lluviosas (junio y Julio) y mayor en las épocas de sequía (enero y febrero). Se observó que más del 85% del área posee valores de temperatura superiores a los 25°C. Solamente en el costado occidental de la cuenca, sobre cordillera oriental, se presentan temperaturas inferiores a los 25°C siendo cada vez menores a media que aumenta la elevación sobre el nivel del mar, como se puede notar en la figura 9.



3.2 Demandas de agua

En el presente estudio, el análisis de las demandas de agua se enfocó solamente en el consumo humano y el derivado de las actividades que realizan los habitantes. El agua demandada por los ecosistemas y la biodiversidad, no fue cuantificada en este estudio.

Siguiendo las metodologías planteadas por el Estudio Nacional del Agua (ENA)⁸, se calcularon las demandas agrícola, pecuaria, doméstica, hidrocarburos y minera. Las demandas institucionales e industriales fueron consideradas dentro de la demanda doméstica, asociada a la información de las cabeceras municipales, y la demanda del sector hidroeléctrico, no fue considerada debido a que es un sector poco representativo en la región. A continuación se describen los insumos empleados y se consolidan los resultados de la demanda. La información detallada puede ser consultada en el documento que describe el componente de demanda⁹.

3.2.1 Uso del agua en la región

El inventario de la extensión, localización, tipo, transformaciones y usos de los diferentes sectores hidrodependientes, se efectuó a partir de información secundaria, obtenida de las diferentes entidades de carácter público gubernamental, las cuales se detallan en el documento componente de demanda⁹, así como también de las asociaciones y gremios de los distintos sectores. En general, la información hallada para cada uno de los diferentes sectores fue actualizada; sin embargo, la mayor parte de estos datos se encontró a nivel municipal, por ello los análisis se llevaron a cabo en este nivel.

Demanda sector agrícola

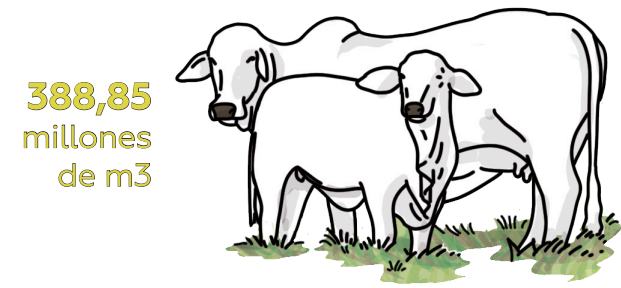
Para este sector se recopilaron datos relacionados con el área sembrada, rendimientos y producción de los principales cultivos permanentes y transitorios que tienen presencia en la Orinoquia colombiana. Las entidades en la cuales se encontró información de mayor relevancia correspondieron al Ministerio de Agricultura, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y el Instituto Colombiano agropecuario (ICA). En estas, se hallaron estudios del sector agropecuario como son las Encuestas Nacionales Agropecuarias (ENA) y las Evaluaciones Agropecuarias municipales (EVA) para el año 2015. De acuerdo con los registros de la evaluación agropecuario del 2015, cerca de 115 los cultivos que tienen presencia en la región. En total son 1402,26 millones de metros cúbicos de agua que demanda el sector agrícola en la Orinoquia colombiana anualmente.



Demanda sector pecuario

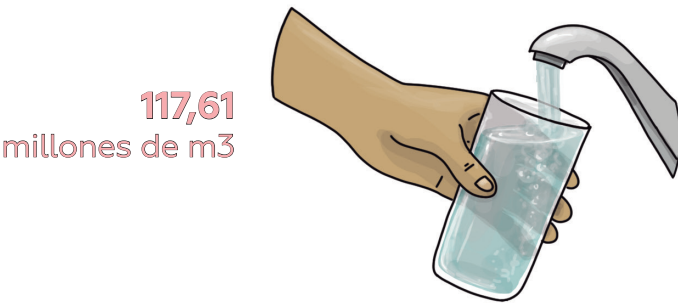
Los estudios consultados donde se encontró información consolidada concerniente al sector pecuario, fueron: Los Anuarios Estadísticos Agropecuarios, las Encuestas Nacionales Agropecuarias, las Estadísticas del Sector Pecuario, las Evaluaciones Agropecuarias, los Censos Pecuarios Nacionales, los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas, los Planes y Esquemas de Ordenamiento Territorial, los Boletines Mensuales de los diferentes asociaciones y gremios del sector pecuario.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la cría, levante y manteniendo de los bovinos consume cerca del 56% del agua en este sector, siendo los departamentos de Casanare y Meta los mayores demandantes de agua, con una participación del 33,5% y 29,0% respectivamente. En total son 388,85 millones de metros cúbicos de agua que demanda el sector agrícola en la Orinoquia colombiana anualmente.



Demanda sector doméstico

La cantidad de habitantes por cabecera municipal, así como también, de los diferentes asentamientos territoriales que tienen lugar en cada uno de los departamentos que constituyen la Orinoquia colombiana, obedeció a la principal información recopilada para este sector. El Censo Nacional llevado a cabo en el año 2005 por el DANE, es el estudio más reciente del cual se tiene conocimiento completo del tamaño de la población nacional colombiana. En total, la demanda estimada del sector doméstico en la región, es de 117,61 millones de metros cúbicos de agua, siendo el Meta el principal consumidor del recurso hídrico (41,1%), seguido por Casanare (14,6%) y Arauca (11,5%).



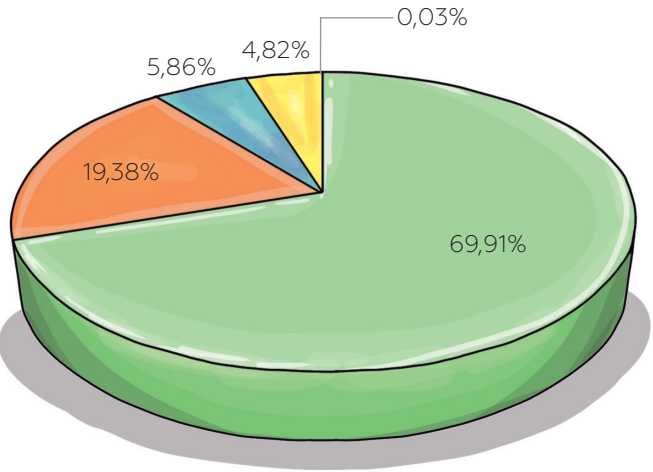
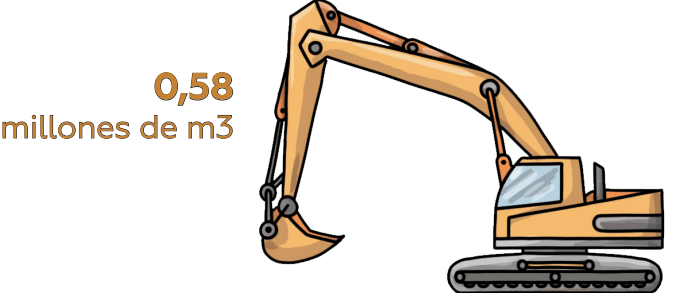
Demanda sector hidrocarburos

La principal fuente que se utilizó para la obtención de información sobre hidrocarburos, fue la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). De esta se logró consolidar información distribuida espacialmente, correspondiente a las áreas en exploración, explotación y áreas disponibles para uso en la industria de los hidrocarburos para el año 2017. La demanda total estimada para el sector de hidrocarburos en sus etapas de producción, transporte y refinamiento fue de 96,65 millones de metros cúbicos, concentrándose principalmente en los departamentos de Casanare, Meta y Arauca.



Demanda sector minero

Para reunir los datos de este sector se consultaron instituciones como: Ministerio de Minas y Energía, la Agencia Nacional de Minería, el DANE, el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) y la Unidad de Planeación Minero energética (UPME). De esta última, se adquirió la distribución espacial de los títulos mineros presentes y vigentes en todo el país hasta el año 2014 y las solicitudes mineras en este mismo año. Por otra parte, también se logró adquirir del SIAC información de los títulos mineros registrados hasta del 2012. Según las estimaciones, en total este sector presenta una demanda de 0,58 millones de metros cúbicos de agua, concentrada principalmente en el departamento de Boyacá.



8. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: Ideam: 452 pp.
9. The Nature Conservancy (2017). Componente de demanda. Landscape planning for agro-industrial expansion in a large, well-preserved savanna: how to plan multifunctional landscapes at scale for nature and people in the Orinoquia region, Colombia. Bogotá D.C.

3.3 Lo que controla la dinámica del agua

3.3.1 Los procesos hidrológicos analizados

Los procesos hidrológicos que se consideraron relevantes para la construcción del modelo matemático hidrológico, fueron la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía directa, la infiltración y percolación, la interacción río-planicie, el caudal subterráneo y la extracción de demandas subterránea y superficial.

Estos procesos fueron escogidos de acuerdo con las condiciones biofísicas observadas en la Orinoquia colombiana y el alcance de modelación mensual. Las características geológicas y los registros de caudal en la región, sugieren la existencia de posibles flujos de aguas subterráneas, los cuales pueden llegar a ser considerables, permitiendo de esta forma la existencia de caudales bases considerable en épocas de estiaje. Esta hipótesis surge de observar cómo gran parte de la región se encuentra constituida por depósitos aluviales y rocas sedimentarias, que se caracterizan por presentar una alta porosidad y una gran capacidad de almacenamiento de agua.

Por otra parte, las pendientes inferiores al 10%, las amplias secciones transversales de los cauces de 0,5 a 2 kilómetros y la notable presencia de áreas inundables, evidencian la presencia de interacciones bidireccionales entre los ríos y las llanuras inundables; si se suman a esto, los fuertes regímenes de precipitación de más de 550 milímetros en un mes, no es difícil pensar

que durante un periodo de caudal alto, comúnmente en los meses de mayo y junio, se presenten desbordes en los cauces, gracias a las bajas pendientes, generando inundaciones de gran extensión en las planicies, por lo que la inclusión de éstas interacciones en la estimación de la oferta hídrica es fundamental.

La notable presencia de sectores como el agrícola, minero, doméstico, pecuario y de hidrocarburos, hacen que también sea necesario considerar las extracciones de agua de carácter superficial y subterráneo que estos realizan. No obstante, dada la mínima información a la que se tiene acceso y los pocos estudios existentes a las escalas espaciales consideradas, resulta difícil su representación de manera acoplada con el modelo, por lo que al considerarse, se requiere realizar de una manera simplificada.

Los procesos hidrológicos analizados en la dinámica del agua en la Orinoquia colombiana fueron los siguientes:

- 1

Precipitación
 El agua que ingresa en modo de lluvia.
- 2

Evapotranspiración
 El agua que se pierde por la acción del sol y la transpiración de las plantas y del suelo.
- 3

Escorrentía directa
 El agua que escurre por la superficie del terreno y que no se infiltra, sino que se va directamente a las quebradas y ríos, gracias a la acción de la gravedad y la pendiente.
- 4

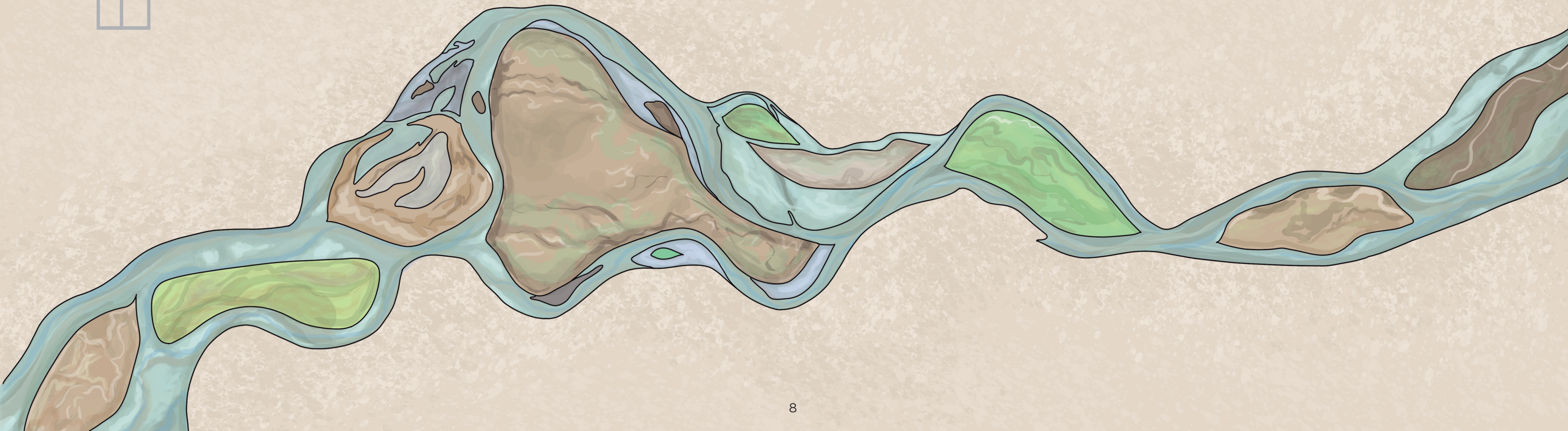
Agua infiltrada y percolada
 El agua que no escurre inmediatamente, sino que pasa a través de la superficie del suelo y se mueve hacia el interior de la tierra.
- 5

Interacción-Río Planicie
 El agua que se mueve del río hacia las planicies inundables en épocas de lluvia y el agua que se mueve de las planicies hacia el río cuando han pasado las crecientes.
- 6

Caudal subterráneo
 Parte del agua de un río, que proviene del almacenamiento de agua en el suelo cuando este está saturado.
- 7

Extracción de aguas superficiales
 El agua que es tomada de ríos, quebradas y lagos, para la realización de cualquier actividad.
- 8

Extracción de aguas subterráneas
 El agua subterránea que es tomada para la realización de cualquier actividad.



3.3.2 La selección del modelo que permite comprender la dinámica del agua

Conceptualización

Partiendo de los procesos hidrológicos descritos en el numeral anterior, se identifica que los que componen el proceso lluvia-escorrentía, tienen lugar a escalas subdiarias, por lo que la representación de los mismos de forma matemática, implica la implementación de modelos concebidos a resoluciones similares; sin embargo, el alcance temporal del presente estudio se limitó a resoluciones mensuales, por lo que muchos procesos hidrológicos pueden ser simplificados y otros omitidos. De acuerdo con esto, se considera en primera instancia que los subprocesos de mayor relevancia que intervienen en el proceso lluvia-escorrentía son: la evaporación, la transpiración y la precipitación.

En lo que respecta a la disponibilidad hídrica, si bien la extracción de agua por parte de los sectores hidrodependientes no es un proceso hidrológico natural propiamente dicho, resulta ser un factor relevante en la estimación de la misma, por lo que su consideración en el modelo hidrológico es necesaria.

De otra parte, dada la extensión que presenta la cuenca del Orinoco en Colombia y las necesidades particulares del proyecto, se consideró que el modelo debía permitir realizar modificaciones a su código fuente, previendo la inclusión de nuevos procesos o interacciones en un futuro. Además, producto de las limitaciones de información, se planteó que el modelo debía tener una estructura sencilla y de baja complejidad en sus ecuaciones, así como también, presentar un requerimiento mínimo de información para su construcción y funcionamiento.

Identificación de los modelos hidrológicos a emplear

Se realizó una revisión de distintos modelos hidrológicos reportados en la literatura. Resultado de ello, el modelo WEAP sobresale entre los demás por su capacidad para representar los aportes de agua subterránea al caudal de los ríos, la interacción río-planicie, así como también la inclusión de demandas. Sin embargo, el modelo presenta una estructura informática cerrada y unos tiempos de ejecución extensos para áreas del tamaño de la cuenca del Orinoco en Colombia.

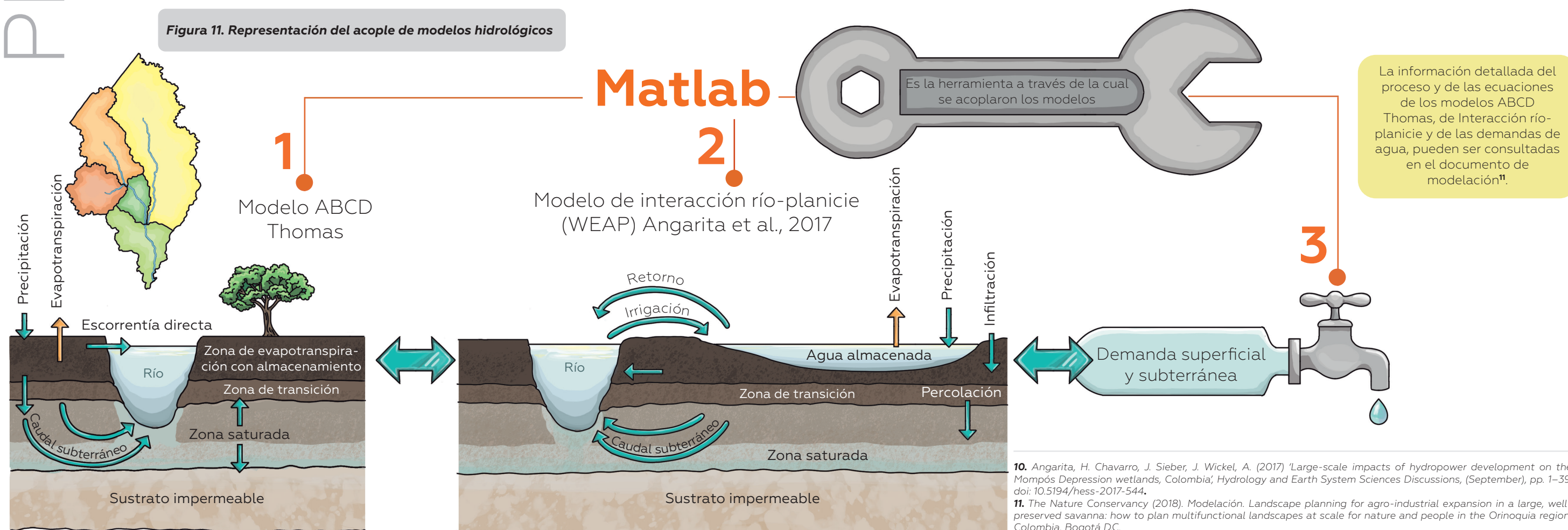
Aparte del WEAP, los modelos propuestos por Thorthwaite (2 parámetros) y ABCD de Thomas (4 parámetros) resultan ser buenos candidatos a seleccionar. Ambos modelos se encuentran en la capacidad de reproducir flujos y almacenamientos en el suelo, siendo solo el ABCD de Thomas capaz de reproducir las interacciones con las zonas profundas del suelo y de representar los aportes de agua subterránea al caudal de los ríos. En todo caso, ninguno de los dos incluye extracciones de agua por demanda.

En vista que ninguno de los modelos de manera individual cumple a cabalidad con las condiciones propuestas en el modelo conceptual, se optó por realizar un acoplamiento entre los mismos y realizar su codificación, empleando como motor de cálculo hidrológico el modelo ABCD de Thomas; no obstante, para suplir la deficiencia de la interacción del río con la planicie, se acopló el módulo que posee el WEAP (Angarita et al. 2017)¹⁰. En lo que respecta a demanda, se incluyeron las expresiones matemáticas empleadas para la caracterización hidrológica de los sectores hidrodependientes.

Estructura del modelo hidrológico empleado

El modelo planteado fue programado en MATLAB versión 2016a con un enfoque funcional de tal forma que sea fácil la inclusión de nuevas rutinas. Este proceso integró los tres modelos que se representan en la figura 11.

Figura 11. Representación del acople de modelos hidrológicos



3.3.3 Configuración del modelo

A partir de la información procesada, se realizó la configuración del modelo. Esta se llevó a cabo empleando las series de precipitación y evapotranspiración depuradas y complementadas, de las estaciones meteorológicas seleccionas. También se consideraron las series de demanda, establecidas mediante la caracterización hidrológica de los sectores hidrodependientes, dejando éstas constantes en el tiempo y distribuidas en las unidades hidrológicas.

Es importante mencionar que, los Estudios Nacionales del Agua (ENA) de los años 2010 y 2014, muestran que cerca del 5% de la demanda total por parte de los sectores, es suplida mediante extracción de aguas subterráneas, cuyos resultados se basan en los reportes de licencias concedidas por parte de las autoridades ambientales. Sin embargo, es posible que esta cifra sea mayor, debido a las captaciones ilegales o no reportadas a las autoridades. En este contexto para la configuración del modelo, se tomó el porcentaje de agua subterránea extraída como un parámetro efectivo de calibración, variándolo solamente en el rango del 0% al 30%.

3.3.4 Calibración y validación del modelo

Para la calibración del modelo, se empleó el método heurístico de Shuffled Complex Evolution propuesta por Duan, Gupta and Sorooshian (1993)¹² usando un total de 57 estaciones de caudal, cuya distribución se presenta en la figura 12.

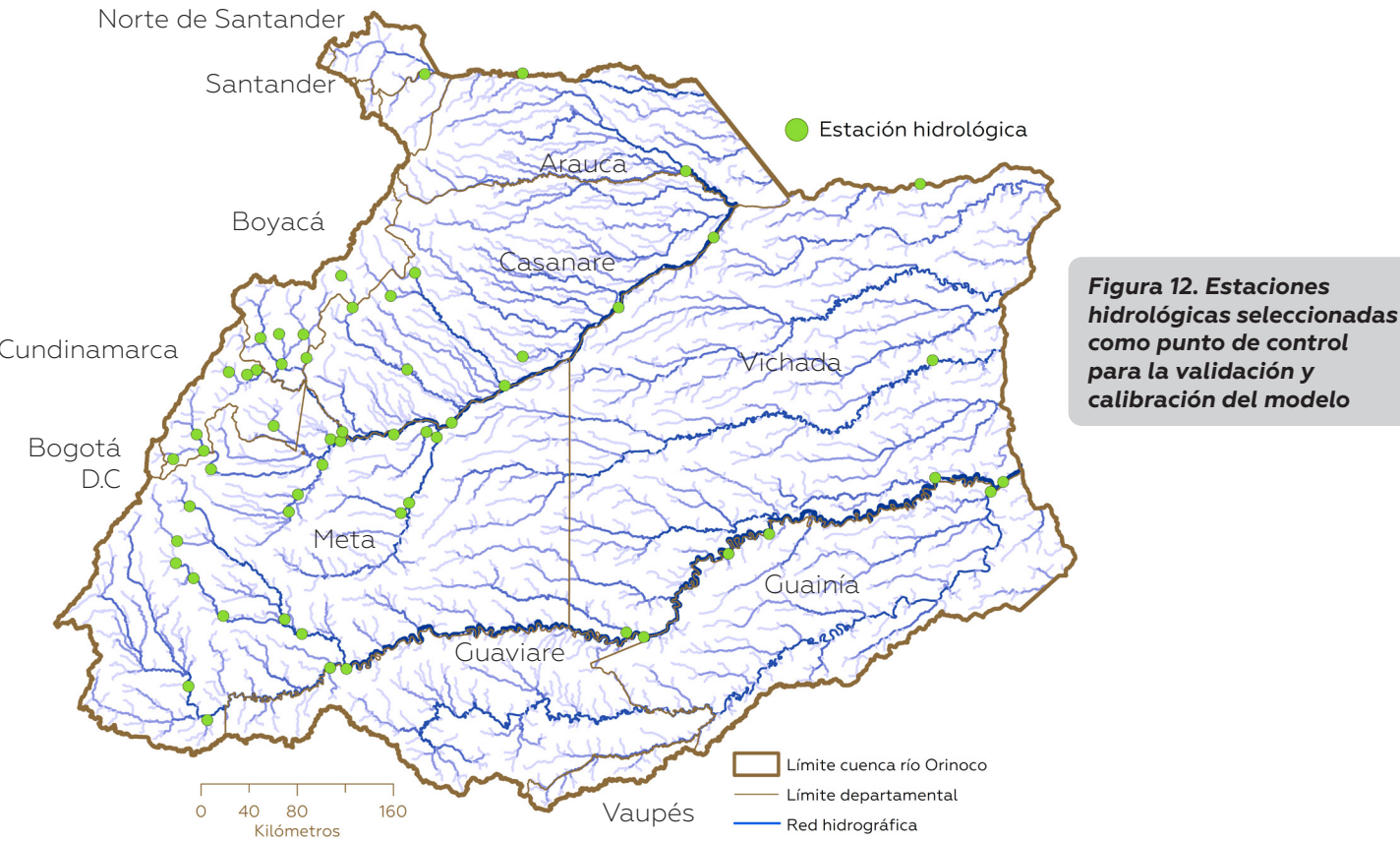


Figura 12. Estaciones hidrológicas seleccionadas como punto de control para la validación y calibración del modelo

Se analizaron las series y los datos anómalos detectados fueron removidos de las mismas, sin embargo, a éstas no se les realizó complementación ya que se incurría en un error, obligando al modelo a representar datos que no son reales. Además, la modelación hidrológica, por si sola se constituye como una metodología de complementación basada en los procesos hidrológicos que tienen lugar en una unidad hidrológica.

12. Duan, Q. Y., Gupta, V. K. and Sorooshian, S. (1993). 'Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization', Journal of Optimization Theory and Applications, 76(3), pp. 501–521. doi: 10.1007/BF00939380.
13. Arnold, J. Bigner, R. Moriasi, D. N. Van Liew, M. et al. (2007). 'Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation', American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50(23351), pp. 885–900.

El tradicional enfoque de utilizar el 70% de los datos para calibrar y el 30% para validar, fue el utilizado en éste estudio. No obstante, en las estaciones que no se contó con series lo suficientemente extensas, no se realizó validación, utilizando la totalidad de datos para la calibración.

Evaluación del desempeño del modelo hidrológico empleado

A partir de la revisión de literatura se determinó que la métrica que mejor responde a las preguntas de desempeño del modelo es el coeficiente de Nash-Sutcliffe. Cuando este coeficiente toma un valor de 1 se considera que la calibración del modelo fue perfecta. Los rangos para evaluar el nivel de ajuste con esta métrica se presentan en la tabla 1.

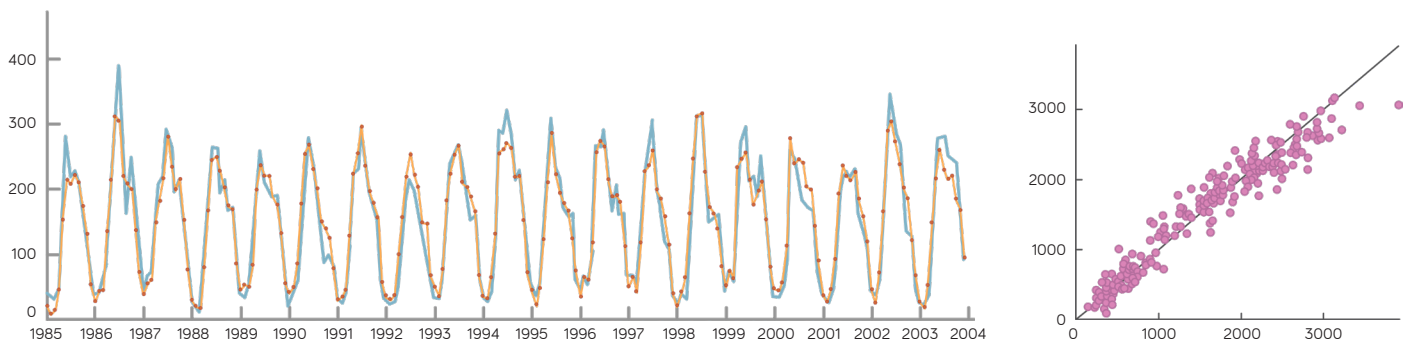
Tabla 1. Rangos para evaluar el desempeño de los modelos con el Nash-Sutcliffe. Fuente: Arnold et al., 2007¹³

Desempeño	Nash	Desempeño	Nash
Muy bueno	0,75<Nash<1	No muy buena	0,25<Nash<0,5
Bueno	0,65<Nash<0,75	Deficiente	Nash<0,25
Aceptable	0,5<Nash<0,65		

El esquema de calibración presentó buenos resultados al momento de su ejecución, en más del 85 % de las estaciones seleccionadas como puntos de calibración, la métrica de desempeño principal tuvo valores superiores a 0.6, lo que de antemano implica que la mayor parte los resultados obtenidos se consideran aceptables según la tabla 1.

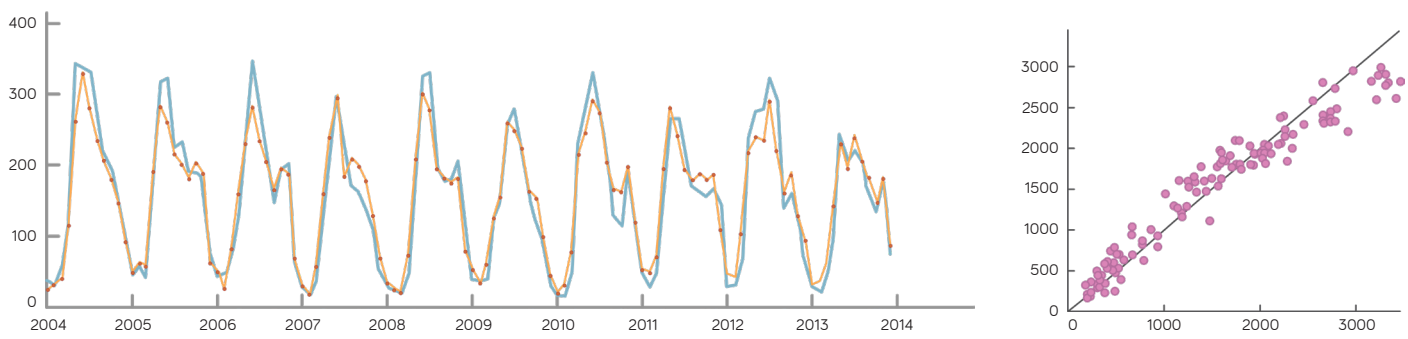
En la Figura 13, se presentan los resultados gráficos de la calibración, en el punto de control establecido por la estación Cabuyaro [35107030], que presentó un Nash – Sutcliffe de 0,90; este valor refleja la capacidad que posee el modelo para reproducir la dinámica del régimen hidrológico en el área de drenaje aportante a este punto de control; además de esto, también expresa el nivel de precisión que presenta el modelo, estimando los valores en cada una de las etapas del régimen hidrológico. La línea azul representa los caudales reales y la línea naranja los caudales simulados por el modelo; en la gráfica de la derecha se ve una serie de puntos que indican una alta correlación entre los valores observados y los valores simulados.

Figura 13. Series de caudales observados y simulados en la estación 35107030 para el periodo de calibración



Posteriormente, se realizó el análisis para el periodo de validación en la estación Cabuyaro [35107030], encontrando que el modelo reafirmó las bondades anteriormente descritas, obteniendo un Nash – Sutcliffe de 0,89 como se muestra en la figura 14, donde se pueden comparar las gráficas del caudal observado y el simulado.

Figura 14 Series de caudales observados y simulados en la estación 32107030 para el periodo de validación



3.3.5 El agua en la región

Gracias al esquema de modelación utilizado, el modelo hidrológico propuesto para la Orinoquia colombiana, permite representar cualquier variable que se incorpore dentro del balance hídrico (precipitación, temperatura, demanda por sector, escorrentía, etc.), para todo el periodo de análisis o valores agregados como promedios multianuales por mes o por año.

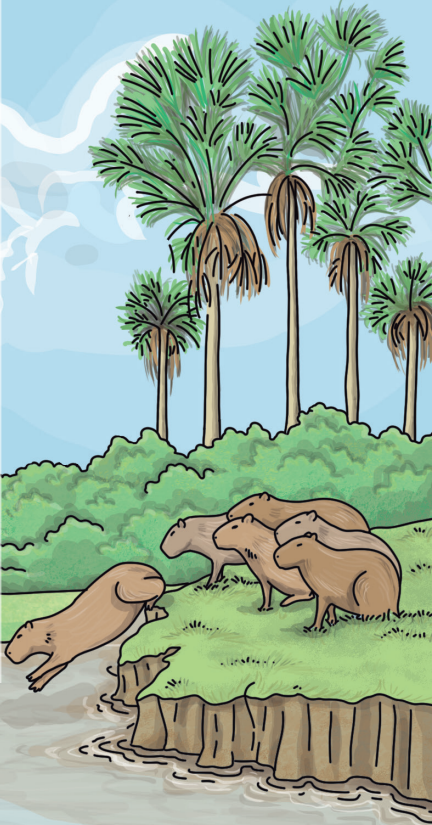
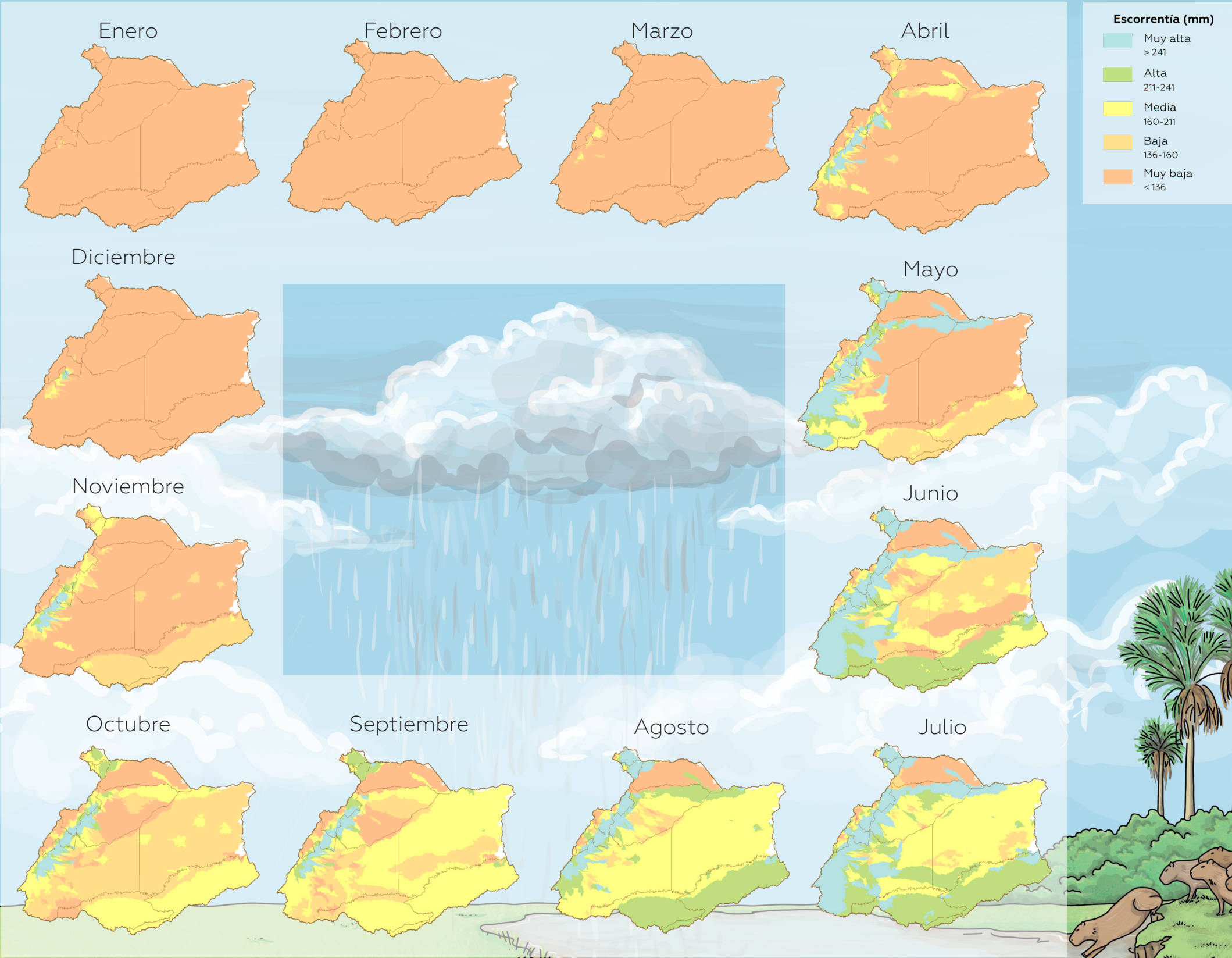
Uno de los primeros resultados obtenidos, es la escorrentía superficial o escorrentía directa. Esta es el agua que escurre por la superficie del terreno y que no se infiltra en ningún momento, sino que se va directamente a las quebradas y ríos formando sus caudales, gracias a la acción de la gravedad y a la pendiente. La escorrentía también se puede expresar en milímetros por unidad de superficie, como se representa en la figura 15, que exhibe un comportamiento similar al de la precipitación, donde los mayores escurrimientos se encuentran cerca de los 1.500 metros sobre el nivel del mar, en el sector occidental de la región, en la vertiente oriental de la cordillera Oriental colombiana.

Esta particularidad se debe a que, las nubes que provienen de las zonas más bajas, gracias a la evaporación, cuando se encuentran con el piedemonte e inician el ascenso orográfico, generan lluvias. Esto ocasiona que, por encima de los 1.500 metros sobre el nivel del mar, a medida que se asciende, disminuya la humedad del aire, por tanto, la cantidad de lluvia, generando menores escurrimientos de agua. Este proceso determina un papel muy importante para los bosques localizados en el piedemonte, en la regulación del ciclo hidrológico y la protección del suelo.

A nivel mensual, se logra observar el comportamiento unimodal del régimen hidrológico, donde los meses de diciembre a abril, resultan ser las épocas más secas, mientras que los meses restantes, resultan ser los de mayor oferta hídrica, especialmente en junio y julio.

Es fundamental que, en la construcción de los planes de ordenamiento productivo y escenarios de expansión, el agua sea un eje central de estudio, como un recurso limitante para el desarrollo y un componente fundamental a tener en cuenta en la planificación del territorio.

Figura 15. Escorrentía media mensual multianual en milímetros



3.4 Algunos escenarios para evaluar posibles futuros en cuanto al uso del agua.

3.4.1 Los escenarios empleados

Gracias a que el modelo permite hacer análisis tanto para toda la región, como para las unidades hidrológicas que la componen o para alguna porción del territorio en particular, se presentan a continuación los resultados de análisis de escenarios para la subregión conformada por los departamentos de Meta, Casanare, Arauca y Vichada, la cual comprende el 71% de toda la cuenca del Orinoco en Colombia. En las figuras 16 a la 20, se representan los cambios del caudal base generados para cada escenario, donde los tonos naranja más intensos indican las áreas con mayor y los verdes con menor afectación. A partir de ello, se puede concluir que los escenarios del Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes) Orinoquia y tendencia histórica, podrían ser los menos impactantes sobre el recurso hídrico. La información detallada sobre el proceso de construcción y análisis de los escenarios puede ser consultada en el documento *Minimising the loss of biodiversity and ecosystem services in an intact landscape under risk of rapid agricultural development*¹⁴.

Tendencia histórica

Descripción:

Se definen los objetivos de expansión proyectando la tendencia actual hasta el año 2030. Para las proyecciones, se utilizó el paquete de pronóstico en R para ajustar un modelo exponencial suave de estado de espacio a cada uno de los sectores (Ganadería, aprovechamiento forestal, palma de aceite, arroz y soya). El área histórica sembrada o la tierra utilizada a lo largo del tiempo para cada producto se derivó de información del Ministerio de Agricultura.

Objetivos finales:

Los objetivos definidos fueron: 7.151 km2 de palma de aceite, 1.488 km2 de arroz, 541.668 km2 de aprovechamiento forestal, 142 km2 de soya y 673 km2 de pastos para ganadería.

Plan maestro 2016

Descripción:

Se utilizaron los objetivos de expansión definidos por el Plan Maestro, una iniciativa que busca maximizar las tierras subutilizadas para la agricultura. Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2016)¹⁵.

Objetivos finales:

Se definieron los objetivos de expansión como áreas de tierras adecuadas, citadas en el Plan Maestro, lo que equivale al 91% de toda la región de estudio fuera de áreas protegidas. Esto es 36.822 km2 de agricultura (divididas en partes iguales entre arroz y soya), 46.967 km2 de ganadería, 24.207 km2 de aprovechamiento forestal y 43.532 km2 de cultivos agroforestales (asignados a palma de aceite).

Figura 16. Cambio del caudal en el escenario tendencia histórica

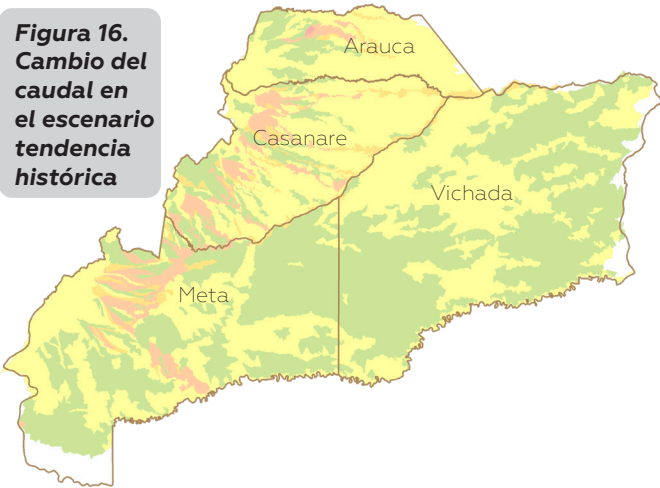


Figura 17. Cambio del caudal en el escenario Plan Maestro

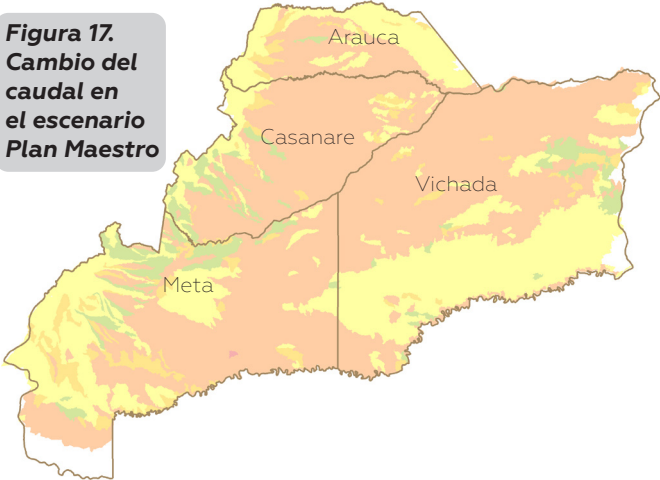


Figura 18. Cambio del caudal en el escenario agricultura intensiva

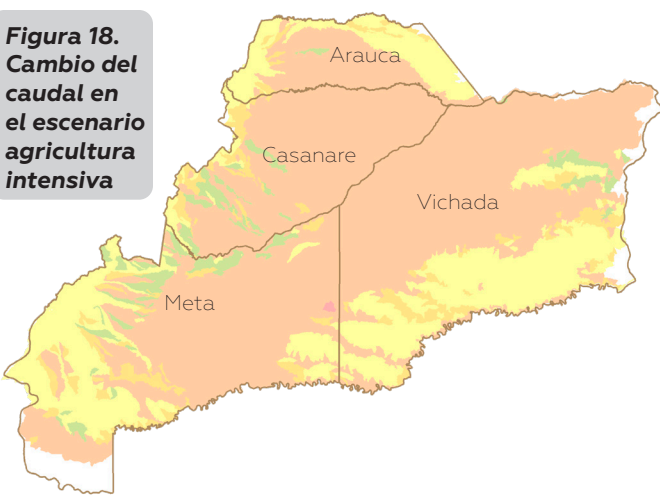


Figura 20. Cambio del caudal en el escenario Conpes de la Orinoquia

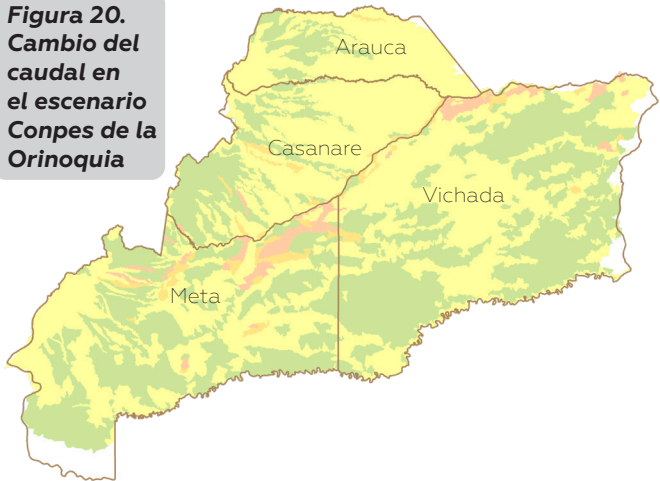
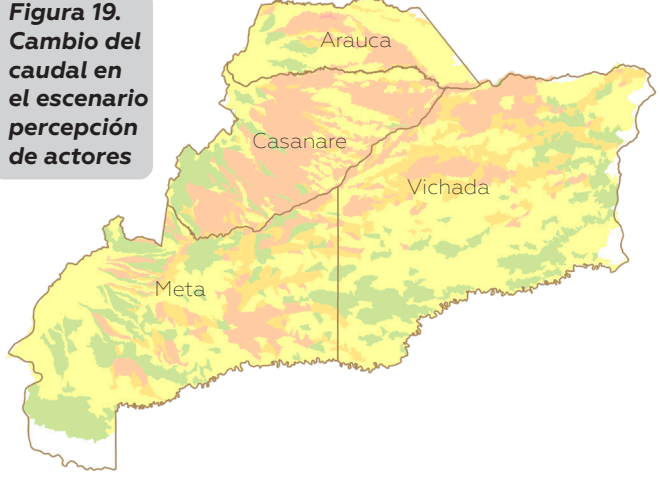


Figura 19. Cambio del caudal en el escenario percepción de actores



Agricultura intensiva

Descripción:

La frontera agrícola cubre el 75,26% (186.381 km2) del área de estudio total. En este escenario, se asume que en cualquier lugar dentro de la frontera agrícola es posible la expansión.

Objetivos finales:

Se establecieron los objetivos de expansión como el área total cubierta por la frontera agrícola dividida en partes iguales entre las 5 actividades productivas básicas (Ganadería, aprovechamiento forestal, palma de aceite, arroz y soya). Los objetivos finales fueron 37.276 km2 de expansión de cada actividad productiva.

Conpes de la Orinoquia

Descripción:

Si bien el Plan Nacional de Desarrollo 2018 no establece objetivos de desarrollo específicos para la Orinoquia, el documento de política publicado por el Consejo Nacional de Política Económica y Social Conpes 3797¹⁶ detalla la Fase 1 del Plan Nacional de Desarrollo 2014 que apunta a 7.800 km2 de expansión agrícola dentro de la Altillanura.

Objetivos finales:

Se explora un escenario donde la expansión ocurre principalmente en la Altillanura: se dividen los 7800 km2 de manera equitativa entre las actividades productivas básicas (Ganadería, aprovechamiento forestal, palma de aceite, arroz y soya), lo que equivale a una expansión de 1.560 km2 cada uno.

Percepción de actores

Descripción:

Utilizando grupos focales, se desarrolló un escenario en el que se pretende reflejar la percepción de los actores. La soya y el arroz son los productos favoritos de los pequeños agricultores. La palma de aceite y los cultivos forestales comerciales, son los productos preferidos para las empresas más grandes, que se dirigen a áreas más rurales con poca infraestructura. El futuro de la industria ganadera en la región se centra en la intensificación, a través de la incorporación de más cabezas de ganado.

Objetivos finales:

Se evidenció en los grupos focales que no habían objetivos de expansión explícitos para ningún grupo. Por lo tanto, se establecieron como objetivos para este escenario, permitir que un total del 20% del paisaje se convierta en agricultura, lo que equivale a 10.205 km2. Esta área es dividida en partes iguales, entre los cinco productos básicos (Ganadería, aprovechamiento forestal, palma de aceite, arroz y soya) con los criterios para reflejar la impresión de los actores.

14. Alvarez, S. Beyer, H. Da Silva, M. Etter, A. Forero, G. Grantham, H. Hyman, G. Nogales, J. Rogéliz, C. Simmonds, J. Walschburger, T. Watson, J. Williams, B. (2020). *Minimising the loss of biodiversity and ecosystem services in an intact landscape under risk of rapid agricultural development*.

15. Departamento Nacional de Planeación (2016). *Plan maestro de la Orinoquia*.

16. Consejo Nacional de Política Económica y Social (2014). *Política para el desarrollo integral de la Orinoquia: Altillanura-Fase 1. N° 3797*.

3.5 Ejemplos de aplicación del modelo a otras escalas

El modelo hidrológico desarrollado para la región de la Orinoquia, también fue implementado en territorios de menor tamaño, como el departamento del Meta y la cuenca del río Ariari, siguiendo todos los procesos y etapas metodológicas. A través de estos ejercicios, se pudo validar la aplicación del mismo, a diferentes escalas espaciales. A continuación se dan a conocer algunos resultados de estos ejercicios.

3.5.1 Resultados de disponibilidad hídrica en la cuenca del río Ariari.

La cuenca del río Ariari es un territorio de 1.137.822 hectáreas, localizado al suroccidente del departamento del Meta y representa el 3,3% de toda la cuenca del río Orinoco en Colombia, como se muestra en la figura 21. Es un territorio de gran importancia por la producción de alimentos y la oferta de agua. En cuanto a la disponibilidad hídrica o esorrentía neta, se determinó para la región del Ariari en los cauces de los ríos Ariari y Güejar, un caudal acumulado medio anual multianual entre los 90 y los 729 metros cúbicos por segundo, además de una disponibilidad hídrica mínima de 2 metros cúbicos por segundo en algunos de los caños que conforman la red hidrográfica en esta zona. La información detallada de este ejercicio, puede ser consultada en el documento Descripción Hidrológica y Climática del área a declarar Bosque de los Guayupes en el departamento del Meta, Colombia¹⁷.

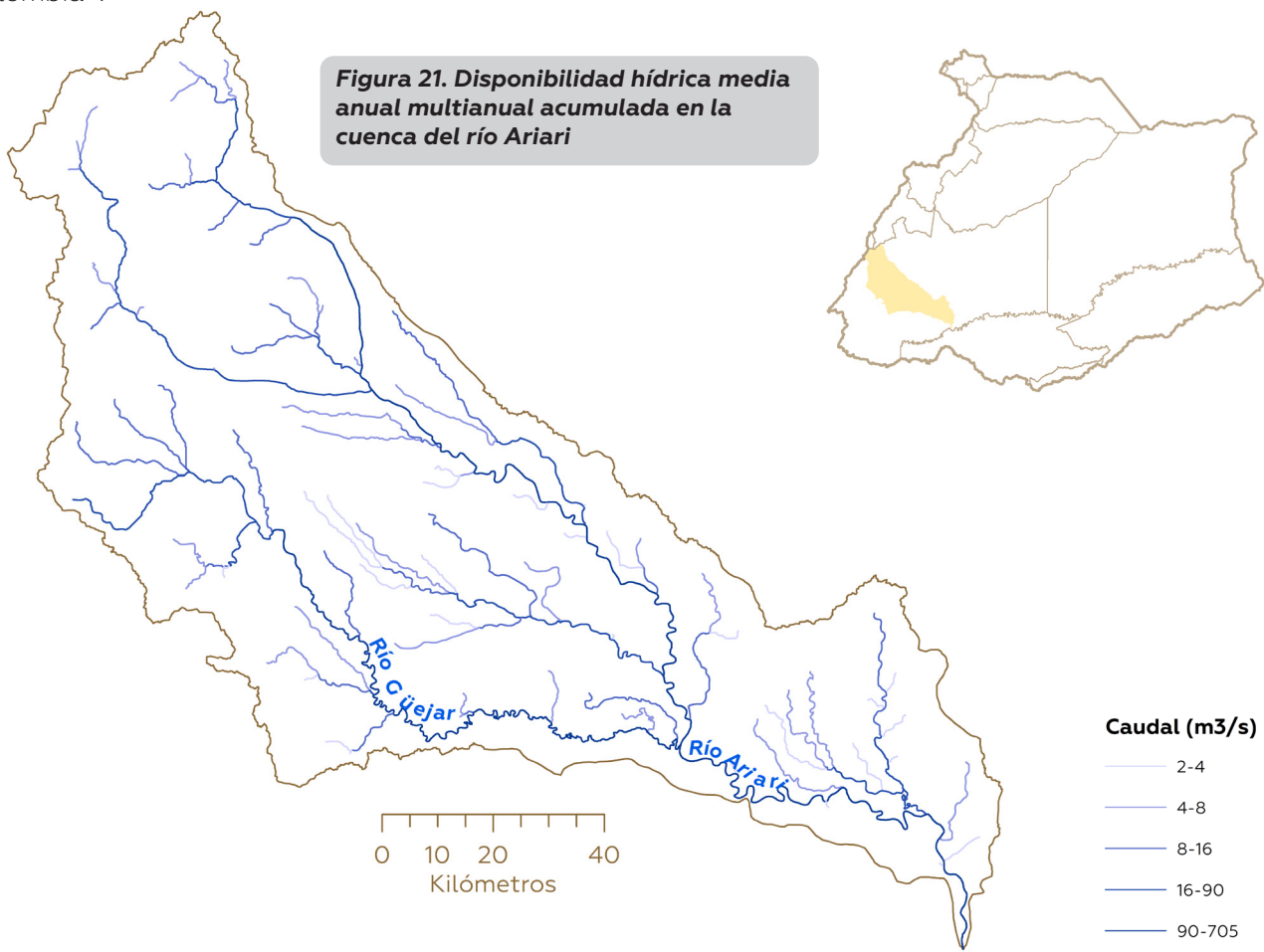


Figura 21. Disponibilidad hídrica media anual multianual acumulada en la cuenca del río Ariari

17. The Nature Conservancy (2017). Análisis de disponibilidad hídrica para el departamento del Meta con énfasis en la región del Ariari, Colombia. Bogotá D.C.
18. Cormacarena, C. A. R. Del A. De La M., Ecopetrol, & ISD, I. Para La S. Del D. (2010). Plan De Ordenamiento Y Manejo De La Cuenca Hidrográfica Del Río Guayuriba. Meta.
19. The Nature Conservancy (2017). Descripción Hidrológica y Climática del área a declarar Bosque de los Guayupes en el departamento del Meta, Colombia. Bogotá D.C.

3.5.2 Rendimiento hídrico en el área de Bosque de los Guayupes

El Bosque de los Guayupes es un área natural en buenas condiciones de conservación y poca intervención humana, ubicada en el departamento del Meta, sobre el piedemonte llanero (figura 22), al interior de las cuencas de los ríos Guayuriba, Metica y Ariari, que comprende 35.500 hectáreas, en un gradiente altitudinal entre los 1.000 y 3.650 metros sobre el nivel del mar. Este bosque que representa el 0,1% de la cuenca del Orinoco en Colombia, permite la conectividad de los ecosistemas de alta montaña y las partes bajas. Además, es un área de alta importancia para el mantenimiento de los recursos hídricos, debido a que en ésta se encuentran los nacimientos del río Manzanares, del río Sardinata y la quebrada Las Blandas, fuentes abastecedoras del acueducto del casco urbano de Acacías y de cerca del 80% de los acueductos rurales existentes en la cuenca del río Guayuriba, según la Corporación para el desarrollo sostenible de la Macarena (Cormacarena et al. 2010)¹⁸.

En cuanto al cálculo de la oferta hídrica de esta área, si bien es cierto, no se desarrollaron todos los pasos del modelo hidrológico por limitaciones de información, se calculó el promedio del caudal generado por área aferente entre las estaciones Caseteja Delicias (35027210) y Puente Carretera Guayuriba (35027140), entre 50 a 60 metros cúbicos por segundo aproximadamente. Esta información fue de gran importancia como soporte para el proceso de declaratoria en el año 2018 del Parque Natural Regional Bosque de los Guayupes, el cual comprende una extensión de 18.218 hectáreas dentro del área de estudio. Más información puede ser consultada en el documento elaborado por TNC en el año 2017¹⁹.

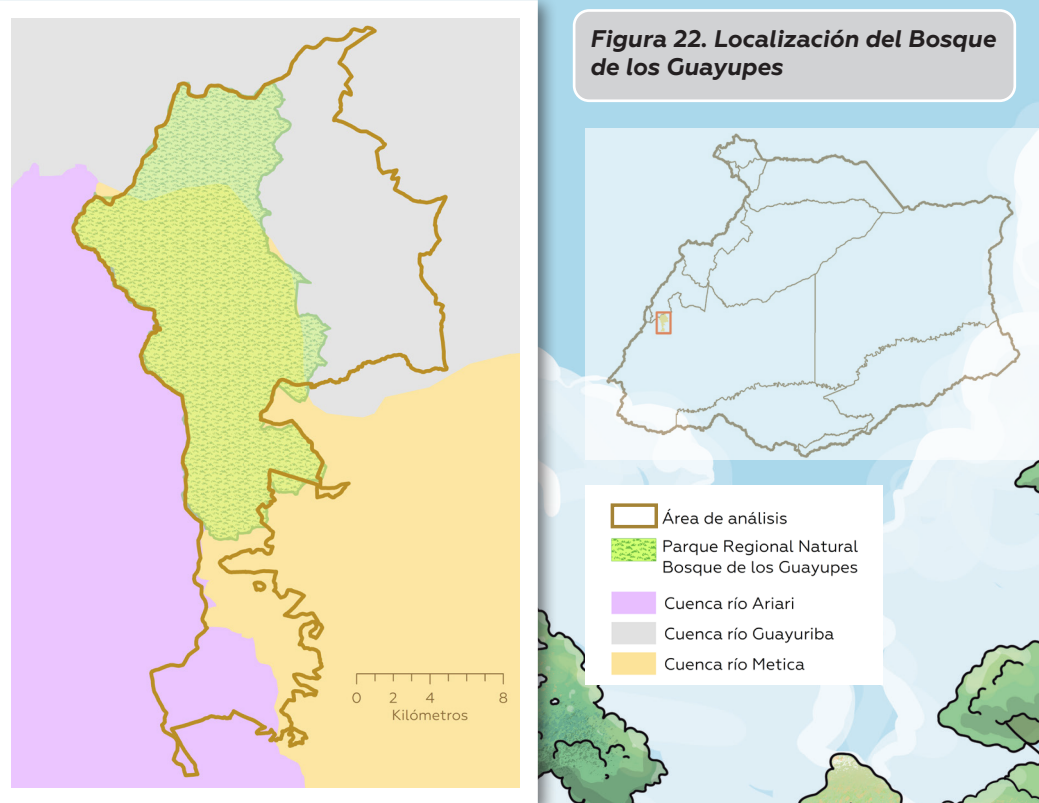


Figura 22. Localización del Bosque de los Guayupes

4 Manejo de los resultados generados

A continuación se describen algunos aspectos importantes a tener en cuenta en relación con manejo de la información y el uso de los resultados generados a partir del estudio elaborado:

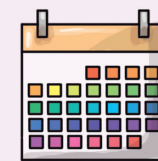
- ➔ El modelo hidrológico desarrollado, por sí solo no resuelve el alcance de un proceso de ordenamiento del territorio, pero sí constituye un insumo que puede apoyar la toma de decisiones teniendo como componente fundamental el recurso hídrico.
- ➔ Dadas las características de este modelo, para sacar un mayor provecho de esta información y desarrollar este tipo análisis, siempre se requiere de un equipo multidisciplinario, como los que se conforman para los procesos de ordenamiento territorial.
- ➔ Este equipo debe tener la capacidad de usar los resultados del modelo e integrarlos a los demás componentes del ordenamiento y ayudar a su comprensión por parte de los tomadores de decisiones.
- ➔ En el caso de que se quieran realizar algunas adaptaciones del modelo, incorporando nuevos datos, se requiere de profesionales especializados con conocimientos en hidrología y modelación. Además, los entes territoriales pueden apoyarse en las autoridades ambientales de orden nacional y regional y los institutos de investigación, al momento de incorporar este tipo de resultados en sus procesos de planificación y ordenamiento.
- ➔ Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, este documento presenta los resultados de una forma amigable y sintetizada para facilitar su entendimiento general, pero al momento de usar los resultados, es necesario remitirse a todos los insumos y productos específicos generados, los cuales se listan en la última página del presente documento.

Las características del modelo empleado para la cuenca del río Orinoco en Colombia



1

Requiere poca información para su construcción, en comparación con otros modelos.



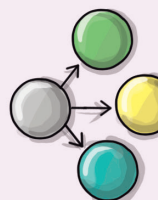
2

Emplea información diaria, pero la resolución temporal de los resultados es mensual. Por ello, genera representaciones espaciales de la disponibilidad hídrica y de variables de interés en un análisis dinámico en tiempo a nivel mensual.



3

Presenta un esquema de modelación acumulativa, el cual incluye la interacción existente entre el río y la planicie, así como también integra la estimación de demandas hídricas generadas por los diferentes sectores hidro-dependientes, encontrándose en la capacidad de discriminar las zonas de extracción de las mismas (superficial y subterránea).



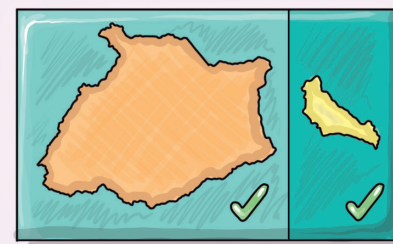
4

Se encuentra en la capacidad de evaluar escenarios futuros, por ejemplo, de cambio climático, cambios de coberturas de la tierra y usos del suelo, expansiones poblacionales, entre otros.



5

Ha sido calibrado y validado de manera exitosa, mostrando la capacidad de representar los procesos de interés en el área de estudio, asociados a condiciones climáticas, demandas, usos del suelo, interacción río-planicie y balance hídrico.



6

Presenta un desempeño satisfactorio tanto para toda la región de la Orinoquia, como para subregiones como el departamento del Meta y la región del Ariari.

Todas estas características hacen de éste análisis, una valiosa herramienta para la planificación y toma de decisiones en temas relacionados con el recurso hídrico.

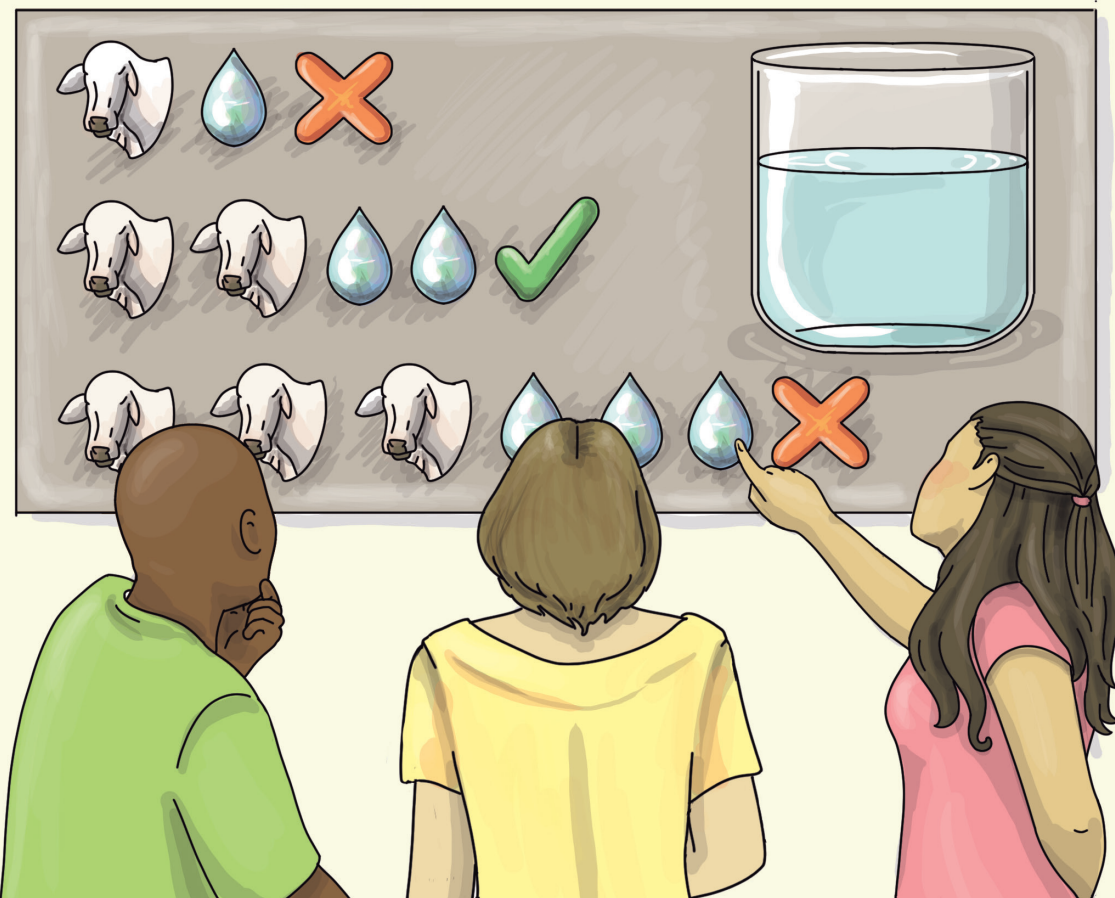
5 Apropiación y uso de la información

Usos de la información generada

El análisis de la dinámica del agua puede ser un insumo clave para los ejercicios de planeación del desarrollo y de ordenamiento territorial, apoyando la toma de decisiones alrededor del agua, en relación con:

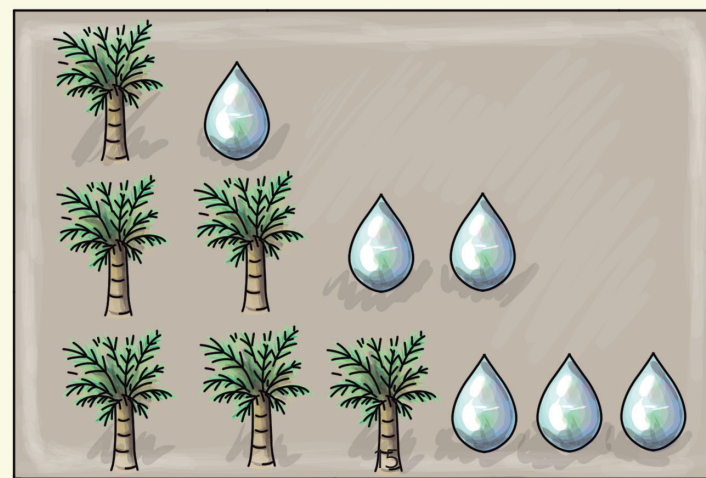
- Planes de Desarrollo (PD).
- Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (Pomca)
- Planes de Gestión Ambiental Regional (PGAR)
- Planes de ordenamiento territorial (POD, POT, PBOT, EOT).
- Planes de Ordenamiento Productivo y Social de la Propiedad Rural (POPSR)
- Planes de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET).
- Zonas de Interés de Desarrollo Rural, Económico y Social (Zidres).

También puede aportar al diseño y evaluación de políticas, programas y proyectos relacionados con disponibilidad y uso del agua, desarrollo rural, áreas protegidas, seguridad alimentaria, sectores productivos, centros urbanos, gestión de ecosistemas, entre otros.



Productos generados por este estudio para la cuenca del río Orinoco en Colombia

- Modelo de Elevación Digital (DEM) de 12,5 m de resolución espacial, corregido.
- Red hidrográfica ajustada.
- Delimitación de unidades de respuesta hidrológica.
- Caudales de nivel mensual de cada una de las unidades de respuesta hidrológica.
- Datos climatológicos procesados de: Precipitación, temperatura, humedad relativa, brillo solar.
- Series de evapotranspiración estimada para las unidades de respuesta hidrológica.
- Cálculo de la demanda de agua de los sectores agrícola, pecuario, humano, minero e hidrocarburos, espacializados en las unidades hidrológicas.
- Simulación de escenarios.



Referencias

Alvarez, S. Beyer, H. Da Silva, M. Etter, A. Forero, G. Grantham, H. Hyman, G. Nogales, J. Rogéliz, C. Simmonds, J. Walschburger, T. Watson, J. Williams, B. (2020). Minimising the loss of biodiversity and ecosystem services in an intact landscape under risk of rapid agricultural development.

Angarita, H. Chavarro, J. Sieber, J. Wickel, A. (2017) 'Large-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia', *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, (September), pp. 1–39. doi: 10.5194/hess-2017-544.

Arnold, J. Bigner, R. Moriasi, D. N. Van Liew, M. et al. (2007). 'Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation', *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(23351), pp. 885–900.

Chandola, V., Arindam, B. & Vipin, K., (2007). Outlier detection: A survey. Technical Report Department of Computer Science and Engineering.

Consejo Nacional de Política Económica y Social (2014). Política para el desarrollo integral de la Orinoquia: Altillanura-Fase 1. N° 3797.

Correa, H. D. Ruiz, S. L. y Arévalo, L. M. (eds) (2005). Plan de acción en biodiversidad de la cuenca del Orinoco – Colombia / 2005 - 2015 – Propuesta Técnica. Bogotá D.C.: Corporinoquia, Cormacarena, I.A.v.H, Unitrópico, Fundación Omacha, Fundación Horizonte Verde, Universidad Javeriana, Unillanos, WWF - Colombia, GTZ – Colombia. 273 p.

Departamento Nacional de Planeación (2016). Plan maestro de la Orinoquia.

Domínguez, C. (1998). La gran cuenca del Orinoco, Colombia Orinoco. Fondo FEN Colombia, Bogotá.

Duan, Q. Y., Gupta, V. K. and Sorooshian, S. (1993). 'Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization', *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76(3), pp. 501–521. doi: 10.1007/BF00939380.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: Ideam: 452 pp.

Organización Meteorológica Mundial (2011). Guía de prácticas climatológicas Edición de 2011.

The Nature Conservancy, (2017). Informe 1: Componente de oferta. Landscape planning for agro-industrial expansion in a large, well-preserved savanna: how to plan multifunctional landscapes at scale for nature and people in the Orinoquia region, Colombia. Bogotá D.C.

The Nature Conservancy, (2017). Informe 2: Componente de demanda. Landscape planning for agro-industrial expansion in a large, well-preserved savanna: how to plan multifunctional landscapes at scale for nature and people in the Orinoquia region, Colombia. Bogotá D.C.

The Nature Conservancy, (2017). Análisis de disponibilidad hídrica para el departamento del Meta con énfasis en la región del Ariari, Colombia. Bogotá D.C.

The Nature Conservancy, (2017). Descripción Hidrológica y Climática del área a declarar Bosque de los Guayupes en el departamento del Meta, Colombia. Bogotá D.C.

The Nature Conservancy, (2018). Informe 4: Modelación. Landscape planning for agro-industrial expansion in a large, well-preserved savanna: how to plan multifunctional landscapes at scale for nature and people in the Orinoquia region, Colombia. Bogotá D.C.

The Nature Conservancy, (2020). Ruta metodológica para el análisis de la dinámica del agua en el territorio. Integración de la oferta y la demanda para la modelación y simulación de escenarios. Bogotá D.C.

Velez, J., Poveda, G. & Mesa, O., (2000). Balances Hidrológicos de Colombia Universidad Nacional, ed., Medellín.

Los documentos pueden ser consultados escaneando el código QR o accediendo al vínculo:

<https://n9.cl/1ntd>



