



Consultoría No. 2-02-26200-1571-2022

Evaluación de la disminución de la superficie Amazónica y sus afectaciones sobre las precipitaciones en el páramo y el sistema Chingaza de abastecimiento del agua para la ciudad de Bogotá

INFORME: 001

PRODUCTO 1: Revisión bibliográfica, metodológica y levantamiento de la línea base



UNIVERSIDAD

Bogotá, D.C., mayo 30 de 2023

HOJA DE CONTROL

LISTA DE DISTRIBUCIÓN

Dependencia	Número de copias
EAAB – ESP	1
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería – Julio Garavito	1

ÍNDICE DE MODIFICACIONES

N° Revisión	Sección modificada	Fecha de modificación	Observaciones
1. Versión 7.0	Todo el documento	Mayo de 2023	Se ajustó en función con las observaciones remitidas por la EAAB.

ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

Contrato:		2-02-26200-1571-2022	
Duración:		8 meses	
Firma del acta de inicio:		16 de febrero de 2023	
Título del documento:		Informe_Producto1_Consolidado_v7	
Aprobación	Vo. Bo. Ingeniero ejecutor	Nombre:	Guillermo Hernández
		Firma:	
		Fecha:	Mayo 30 de 2023
	Vo. Bo. Coordinador técnico	Nombre:	Dr. Gerald Augusto Corzo Pérez
		Firma:	
		Fecha:	Mayo 30 de 2023
	Vo. Bo. Director de la consultoría	Nombre:	Dr. Germán Ricardo Santos Granados
		Firma:	
		Fecha:	Mayo 30 de 2023

Tabla de Contenido

Resumen	13
Introducción	17
1 Objetivos	19
2 Revisión bibliográfica y metodológica.....	20
2.1 Balances hidrológicos y climatología del sistema Amazónico.....	20
2.1.1 Revisión bibliográfica	20
2.1.2 Balances mensuales y anuales con datos ERA5.....	24
2.2 Análisis de coberturas y usos del suelo en el Amazonas (Deforestación)	29
2.2.1 Estado del arte	29
2.2.2 Revisión literaria de metodología de análisis de cambios de uso de Suelo ...	31
2.3 Estudios de dinámica atmosférica en el Amazonas.....	34
2.3.1 Principios teóricos del transporte de humedad en la atmósfera.....	34
2.3.2 Estado del arte	38
2.3.3 Modelo atmosférico.....	40
2.3.4 Identificación de Variables Relacionadas al transporte de Humedad	41
2.3.5 Estimación Local de Fuentes de Humedad (Balance Hídrico Atmosférico) ...	44
2.3.6 Identificación y Caracterización de los Ríos Atmosféricos.....	45
2.3.7 Identificación de las Trayectorias de Humedad y Viento (Retro trayectorias)	50
2.3.8 Análisis Fenómenos Climáticos Globales.....	51
2.4 Revisión de literaria del sistema Chingaza	52

2.4.1	Resultados	53
3	Análisis de información disponible.....	56
3.1	Información hidroclimatológica	56
3.1.1	Datos globales	56
3.1.2	Datos ERA5 (ECMWF).....	56
3.1.3	Datos Chingaza (EAAB).....	65
3.2	Coberturas y usos del suelo	81
3.2.1	Productos existentes.....	81
3.2.2	Análisis de las coberturas del suelo en el Amazonas.	83
4	Avances componente SIG.....	86
4.1	Procedimiento general	87
4.2	Elementos del sistema de información	88
	Conclusiones	89
	Recomendaciones	91
	Bibliografía.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Localización de la cuenca amazónica.....	21
Figura 2.2. Regímenes de precipitación en 11 grandes cuencas del Amazonas.....	23
Figura 2.3. Comparación de estudios sobre balances hidrológicos en la cuenca del Amazonas	24
Figura 2.4. Promedios mensuales de precipitación en la región amazónica entre 1980–2022	26
Figura 2.5. Promedios mensuales de evaporación en la región amazónica entre 1980–2022	27
Figura 2.6. Promedios mensuales de escorrentía en la región amazónica entre 1980–2022	28
Figura 2.7. Promedio de Precipitación e IVT (vectores) en DJF (a) y JJA (b). Promedios estimados de ECMWF’s ERA5 desde 1980 a 2009.....	40
Figura 2.8. Aplicación de modelo de retro trayectoria lagrangiano acoplado condiciones de terreno (Precipitación Evaporación) y atmosféricas (Viento, Humedad, Presión)	51
Figura 2.9: Resultados de búsqueda Scopus. Palabra clave: Chingaza	52
Figura 3.1. Delimitación de la zona de estudio en función del PNN Chingaza	65
Figura 3.2. Cuadrante para análisis de datos climatológicos ERA5–Land.....	66
Figura 3.3. Estaciones de precipitación y caudales para la zona de Chingaza	68
Figura 3.4. Sector río Chuza	70
Figura 3.5. Registro de caudales – estación Monterredondo de la EAAB	71
Figura 3.6. Registro de precipitación – estación Chuza Campamento de la EAAB	72
Figura 3.7. Sector quebradas.....	73
Figura 3.8. Registro de caudales quebrada Cortadera. Estación Pozo 1 – Qda. Cortadera de la EAAB.....	74

Figura 3.9. Registro de caudales quebrada Palacios. Estación Pozo 2 – Qda. Palacios de la EAAB	74
Figura 3.10. Registro de caudales quebrada Piedras Gordas. Estación Pozo 3 – Piedras Gordas de la EAAB	75
Figura 3.11. Registro de caudales quebrada Horqueta. Estación Pozo 4 – Qda. Horqueta de la EAAB	76
Figura 3.12. Sector río Guatiquía	77
Figura 3.13. Captación de agua y medición sobre el río Guatiquía	78
Figura 3.14. Registro de caudales diarios. Estación San José de la EAAB – río Guatiquía...	78
Figura 3.15. Registro de caudales diarios. Estación El Whisky de la EAAB – río Guatiquía..	79
Figura 3.16. Registro de caudales diarios. Estación Leticia de la EAAB – río Guatiquía	79
Figura 3.17 Cuenca del Amazonas-Clasificación MODIS GEE.	84
Figura 3.18 Porcentaje de área por cada cobertura de suelo en la cuenca del Amazonas. ...	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Deforestación en la Amazonía por país entre 2001 y 2020	30
Tabla 2.2. Artículos de investigación y/o reportes clasificados para el presente estudio	53
Tabla 3.1 Bases de datos ERA5 y ERA5–Land	58
Tabla 3.2 Datos ECMWF – ERA5	60
Tabla 3.3 Datos ECMWF – ERA5 Land	62
Tabla 3.4. Descripción general del producto ERA5–Land	66
Tabla 3.5. Estaciones hidrológicas EAAB–ESP en el sistema Chingaza.....	69
Tabla 3.6. Estaciones de precipitación EAAB–ESP en el sistema Chingaza.....	69
Tabla 3.7 Descripción general del producto MODIS	82
Tabla 3.8. Clasificación de coberturas 5 de MODIS.....	83
Tabla 4.1. Fuentes de información usadas para el desarrollo del componente SIG	86
Tabla 4.2. Procedimiento de análisis	87
Tabla 4.3. Elementos del modelo de datos geográfico.....	88

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ALOS	Advanced Land Observation Satellite
ANA	Agencia Nacional de Aguas de Brasil
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CAMELS	Catchment Attributes and MEteorology for Large-sample Studies
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – ESP
ECMWF	European Centre for Medium–Range Weather Forecasts
ERA5	Producto de reanálisis de ECMWF
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEE	Google Earth Engine
HBV	Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
IVT	Índice de transporte de Vapor de Agua
IWV	Índice de Vapor de Agua
LAI	Leaf Area Index
LANDSAT	Satélite de la NASA y del servicio geológico de los Estados Unidos
MGB	Modelo de Grandes Bacias
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MERRA	Modern–Era Retrospective analysis for Research and Applications
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NetCDF	Network Common Data Form

PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
PNN	Parque Nacional Natural
RAISG	Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada
STRM	Shuttle Radar Topography Mission
ZCIT	Zona de Confluencia Intertropical (ITCZ en inglés)

GLOSARIO

<p>ALOS PALSAR</p>	<p>ALOS PALSAR es uno de los múltiples recursos cartográficos disponibles dentro de los productos del satélite ALOS (Advanced Land Observation Satellite) de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), que adquirió imágenes radar entre 2006 y 2011. ALOS también conocido como DAICHI, lleva a bordo tres sensores: el PRISM para imágenes pancromáticas, el radar de apertura sintética PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) y el radiómetro AVNIR. Los instrumentos a bordo han suministrado los DEM multitemporales además de otros productos SAR que están disponibles para descarga en diversas resoluciones, formatos y niveles.</p>
<p>ASTER</p>	<p>ASTER (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) es un esfuerzo cooperativo entre la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón METI. En 1999 el instrumento se lanzó a bordo del satélite TERRA de la NASA. El objetivo principal de la misión ASTER es mejorar el entendimiento de los procesos a escala local y regional que ocurren sobre o cerca de la superficie de la tierra y en la atmósfera inferior, incluyendo la interacción superficie-atmósfera.</p>
<p>CAMELS-BR</p>	<p>Este conjunto de datos abarca series de tiempo diarias de caudales observados de 3679 medidores, así como también forzamiento meteorológico (precipitación, evapotranspiración y temperatura) para 897 cuencas seleccionadas. También incluye 65 atributos que cubren una gama de variables topográficas, climáticas, hidrológicas, de cobertura terrestre, geológicas, del suelo y de intervención humana, así como indicadores de calidad de datos. Para facilitar las comparaciones con cuencas de otros países, los datos siguen los mismos estándares que los conjuntos de datos anteriores CAMELS (Catchment Attributes and METeorology for Large-sample Studies) para los Estados Unidos, Chile y Gran Bretaña. CAMELS-BR (Brasil) complementa los otros conjuntos de datos de CAMELS proporcionando datos para cientos de cuencas en los trópicos y la selva amazónica.</p>
<p>CHIRPS</p>	<p>Las primeras investigaciones se centraron en combinar modelos de mejora de la precipitación inducida por el terreno con datos de estación interpolados. Más recientemente, los nuevos recursos de observaciones satelitales, como las estimaciones de precipitación basadas en cuadrículas satelitales de la NASA y la NOAA, se han aprovechado para construir climatologías de precipitación en cuadrículas de alta resolución (0,05°). Cuando se aplican a campos de precipitación basados en satélites, estas climatologías mejoradas pueden eliminar el sesgo sistemático, una técnica clave en la producción del conjunto de datos CHIRPS desde 1981 hasta casi el presente.</p>
<p>ECMWF</p>	<p>Es el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo. Es un instituto de investigación y operación que produce predicciones meteorológicas numéricas globales y otros datos para los estados miembros de la Unión Europea. El ECMWF tiene una de las instalaciones de supercomputadoras y archivos de datos meteorológicos más grandes del mundo. El ECMWF ayuda a la Organización Meteorológica Mundial (WMO,</p>

	por su sigla en inglés) a la implementación de sus programas y capacitaciones.
ERA5	ERA5 es la quinta generación de reanálisis atmosférico del clima global que cubre el período desde enero de 1940 hasta el presente. Es producido por el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S) en ECMWF y proporciona estimaciones horarias de una gran cantidad de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas. Los datos cubren la Tierra en una cuadrícula de 31 km y resuelven la atmósfera utilizando 137 niveles desde la superficie hasta una altura de 80 km.
GEE	Google Earth Engine combina un catálogo de varios petabytes de imágenes satelitales y conjuntos de datos geospaciales con capacidades de análisis a escala planetaria. Los científicos, investigadores y desarrolladores usan GEE para detectar cambios, mapear tendencias y cuantificar diferencias en la superficie de la Tierra. GEE ahora está disponible para uso comercial y sigue siendo gratuito para uso académico y de investigación.
HBV	HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdeling) es un modelo hidrológico desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para la simulación de escorrentía y pronóstico. La primera ejecución exitosa, con una primera versión del modelo hidrológico HBV, se llevó a cabo en 1976 (Bergstron 1976). HBV es un modelo de balance hídrico, determinístico, conceptual y con requerimientos moderados de información que describe los principales procesos de ciclo hidrológico a escala diaria.
JETSTREAM	Regiones o trayectos de altas velocidades a niveles de viento geostrófico
MGB	Es un modelo hidrológico distribuido desarrollado por el Instituto de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS). El modelo fue desarrollado para emplearse en grandes cuencas, generalmente mayores a 1000 km ² . Este modelo utiliza datos de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y presión atmosférica para calcular los caudales de los ríos en una cuenca hidrográfica.
MODIS	Es un sensor basado en satélites que se utiliza para medir la tierra y el clima. Hay dos sensores MODIS en órbita terrestre: uno a bordo del satélite Terra (EOS AM), lanzado por la NASA en 1999; y uno a bordo del satélite Aqua (EOS PM), lanzado en 2002. MODIS ahora ha sido reemplazado por VIIRS, que se lanzó por primera vez en 2011 a bordo del satélite Suomi NPP. Los instrumentos MODIS capturan datos en 36 bandas espectrales que varían en longitud de onda de 0,4 μm a 14,4 μm y en diferentes resoluciones espaciales (2 bandas a 250 m, 5 bandas a 500 m y 29 bandas a 1 km). Juntos, los instrumentos toman imágenes de toda la Tierra cada 1 o 2 días. Están diseñados para proporcionar mediciones en la dinámica global a gran escala, incluidos los cambios en la cubierta de nubes de la Tierra, el balance de radiación y los procesos que ocurren en los océanos, en la tierra y en la atmósfera inferior.
MERRA	El conjunto de datos de análisis retrospectivo de la era moderna para investigación y aplicaciones (MERRA) se publicó en 2009. Se basa en una versión del sistema de asimilación de datos atmosféricos GEOS-5 que se congeló en 2008. Los datos de MERRA abarcan el período de 1979 a febrero de 2016 y se produjeron en una cuadrícula de 0,5°x0,66° con 72 capas. MERRA se utilizó para impulsar reanálisis independientes de la superficie terrestre (MERRA-Land) y aerosoles atmosféricos (MERRAero).

Modelo	Es una representación matemática o conceptual de una colección de una o más variables independientes y sus interacciones predichas que los investigadores usan para tratar de explicar un fenómeno. En este documento el resultado de los modelos será puesto en scripts de programación que permitirán la simulación y representación de la información.
SENTINEL-2	La misión Copernicus SENTINEL-2 comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita heliosíncrona, en fase de 180° entre sí. Su objetivo es monitorear la variabilidad en las condiciones de la superficie terrestre y su amplio ancho de franja (290 km) y tiempo de (10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones sin nubes, lo que da como resultado 2-3 días en latitudes medias) apoyará el seguimiento de los cambios en la superficie de la Tierra
STRM	SRTM recolectó datos topográficos sobre casi el 80% de la superficie terrestre de la Tierra, creando el primer conjunto de datos casi global de elevaciones terrestres. La carga útil del SRTM constaba de dos antenas de radar, una ubicada en la bahía de carga útil del transbordador y la otra instalada en el extremo de un mástil de 200 pies que se extendía desde la bahía de carga útil. Cada conjunto de radar SRTM contenía dos tipos de paneles de antena: banda C y banda X. Los datos de radar de banda C se utilizaron para crear mapas topográficos casi globales de la Tierra llamados Modelos de elevación digital (DEM).
Río atmosférico (AR)	Un río atmosférico (AR por sus siglas en inglés), es una banda larga y estrecha de transporte de humedad concentrada en la atmósfera, el cual, es responsable de llevar grandes cantidades de vapor de agua hacia diferentes latitudes y longitudes a escala global. Estos fenómenos pueden producir eventos de precipitación intensa cuando interactúan con la tierra, provocando inundaciones, deslizamientos de tierra y otros impactos hidrológicos.
ZCIT	La Zona de Convergencia Intertropical corresponde a la región del planeta en donde confluyen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur. Esta zona, también conocida como Frente Intertropical, se caracteriza por ser una franja de baja presión constituido por corrientes de aire ascendente, donde convergen grandes masas de aire cálido y húmedo provenientes del norte y del sur de la zona intertropical.

Resumen

El presente informe contiene los resultados del primer producto del contrato de consultoría 2–02–26200–1571–2022 constituido entre la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB–ESP y la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito – UECIJG cuyo objeto es la *“Evaluación de la disminución de la superficie Amazónica y sus afectaciones sobre las precipitaciones en el páramo y el sistema Chingaza de abastecimiento del agua para la ciudad de Bogotá”*.

Este estudio busca evaluar las posibles repercusiones de la deforestación en el Amazonas sobre la región de Chingaza en Colombia, haciendo una evaluación pragmática y primaria de los componentes y procesos que influyen las variables que interactúan en el proceso. Estos componentes o procesos se pueden resumir en las corrientes de vientos a diferentes elevaciones, el transporte del vapor integrado de agua que provee información de la lluvia, la forma como los cambios de presión pueden estar relacionados con las corrientes, los procesos hidrológicos que interactúan con la atmósfera y por último las variables que hacen cambiar el ciclo hidrológico del Amazonas a gran escala.

En principio se explorarán correlaciones y determinarán los niveles de variaciones y sus posibles relaciones con estadísticas de series de tiempo. Los datos de ERA5 serán usados para estimar valores de patrones atmosféricos y humedad en la atmósfera como indicador de los transportes. Esto implícitamente nos puede dar indicios sobre la influencia estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) como una base de la dirección de ríos voladores y las corrientes de chorro para entender la relación entre la hidrología del Amazonas y la forma como varía el valor integrado de vapor de agua (IWV).

En la representación de las variables hidrológicas se explorará usar al máximo datos de modelos disponibles y de información de percepción remota para entender cómo la hidrología ha venido variando con los cambios atmosféricos. En esto último, se puede describir de muchas maneras el cómo el bosque amazónico y su ciclo hidrológico pueden influenciar este fenómeno.

La metodología empleada incluye una revisión bibliográfica exhaustiva y la recopilación de datos relevantes, seguidos de un análisis de modelos matemáticos disponibles del clima y la

hidrología. Esta investigación dará los primeros pasos para entender si es necesario evaluar los cambios en el clima y el ciclo hidrológico en el Amazonas, y por lo mismo explorar los posibles casos donde estos afectan la biodiversidad y los ecosistemas en la región de Chingaza.

Durante los primeros dos meses del proyecto, se realizó una revisión de la literatura y se recopilaron datos sobre deforestación, ZCIT, hidrología y meteorología en la región de estudio. Posteriormente, se utilizarán resultados abiertos de modelos climáticos y el análisis hidrológico para simular y estudiar el impacto de la deforestación en el Amazonas y su impacto sobre la región de Chingaza. Los resultados de este estudio proporcionarán información valiosa para tomadores de decisiones, partes interesadas y el público en general, ayudando a desarrollar principios básicos de estrategias adecuadas para enfrentar los desafíos asociados con la deforestación en el Amazonas y su impacto en la región de Chingaza.

El primer producto de este estudio consiste en la revisión bibliográfica de fuentes de datos, descripción de la región, simulaciones básicas con modelos de estudios previos, caracterización de las diferencias entre las cuencas del Amazonas. Como complemento se hizo una exploración de las metodologías con que han sido utilizadas en otros estudios para establecer una línea base climática e identificar áreas prioritarias en las que se necesita información adicional.

A su vez, el informe presenta la recopilación de la metainformación disponible y de la base de datos creada con ella. Esta base de datos incluye la información de vientos y variables fundamentales que permiten describir de una manera básica la dinámica de vientos y humedad. Con respecto a la deforestación se hizo un estudio histórico de cobertura y uso del suelo con dos metodologías que fueron elaboradas y usadas como referencia para cuantificar las variaciones de la deforestación en términos espacio-temporales. Por último, se empezó a identificar la línea base del sistema de abastecimiento Chingaza para determinar las dinámicas de los cambios en el ciclo hidrológico.

Los resultados de esta primera etapa se resumen en:

1. Las investigaciones previas en Colombia no son concluyentes y presentan información base de como la hidrología de la región ha venido cambiando. Los balances hídricos en la Amazonía se caracterizan por la interacción compleja entre la precipitación, la evapotranspiración y el flujo de agua en los ríos. Los estudios más recientes sobre la

relación entre la hidrología y la deforestación en la Amazonía indican que la deforestación puede tener consecuencias significativas en los procesos hidrológicos, como la reducción de la evapotranspiración, lo que puede resultar en cambios en los patrones de precipitación y un aumento en el escurrimiento de agua. Estos cambios, a su vez, pueden afectar tanto la disponibilidad como la calidad del agua en la región, lo que puede tener implicaciones en la biodiversidad y los ecosistemas locales, así como en la vida y el sustento de las comunidades locales y las poblaciones indígenas.

2. El modelo hidrológico de la región MGB, que es reportado en revistas de alto prestigio ha demostrado que sus valores de calibración permiten tener representaciones certeras de la forma como la hidrología de la región representa el fenómeno de lluvia escorrentía. Pero al mismo tiempo notamos que los datos de la región pueden ser de mayor utilidad al poder representar las variaciones del uso de suelo implícitamente en sus valores, y que el modelo MGB no contempla. Por lo mismo también se revisaron datos de percepción remota y estos serán usados para determinar información más realista de los cambios. Esto incluirá información de humedad del suelo, evapotranspiración y, por último, los datos de cambios de cobertura serán usados en el modelo hidrológico HBV para determinar los cambios hidrológicos de una manera más dinámica.
3. En el componente de la representación de la deforestación, se encontraron datos precisos de la agencia nacional brasileña que delimita en *shapefiles* las regiones en varios periodos. También se logró documentar con varios productos de percepción remota y tener las series de tiempo de los porcentajes de variación de la cobertura en los últimos 10 años, teniendo en cuenta dos estados (deforestado y no deforestado). También se analizaron los conceptos de múltiples usos de suelos con información de la FAO para determinar las regiones y comparar todos los resultados. Con base en los resultados, se usarán varias series de tiempo debido a la necesidad de mirar no solo condiciones binarias, pero también condiciones multiclases de uso de suelo.
4. En la definición de las fórmulas de transporte del uso del agua, se logró revisar la literatura y extraer las formulaciones matemáticas de los transportes de humedad. También se desarrollaron fórmulas que permiten crear algoritmos para seguir las direcciones principales.

5. En la región de Chingaza se hicieron análisis del sistema y se concluyó sobre la importancia de la variación de los procesos de evapotranspiración como indicadores directos de las lluvias efectivas para el sistema de abastecimiento. Además, se trabajó con los datos y se logró hacer una representación básica del sistema y una corrección de datos faltantes para apoyar a la EAAB en el futuro con varios procesos de corrección y de actualización de información.
6. El sistema de información que es realmente parte del último entregable, se definieron límites, resoluciones, y por último se incorporaron todas las fuentes de datos de Brasil, ERA5 y los datos disponibles de varias agencias colombianas que analizan la región. Por último, el sistema se puso en línea en un servidor *cloud* y será la base para los análisis básicos de balances de agua y como herramienta de descarga de datos para los investigadores durante los próximos meses. Este sistema SIG será incorporado en los sistemas de la EAAB como son ESRI y SIRH.

Con todo lo anterior, se ha logrado avanzar positivamente en todas las metas del primer entregable y a la vez cubrir pasos importantes para los próximos entregables.

Introducción

La región de Chingaza en Colombia es de vital importancia para la ciudad de Bogotá, ya que provee gran parte del suministro de agua para la capital y sus alrededores. La conservación y gestión adecuada de los recursos hídricos en esta región es esencial para garantizar el bienestar y la sostenibilidad de cerca de 10 millones de personas, un poco más del 20% de la población colombiana. Sin embargo, factores externos como la deforestación en el Amazonas pueden tener repercusiones significativas en el ciclo hidrológico y el clima de Chingaza, poniendo en riesgo su capacidad para seguir abasteciendo a la creciente población de Bogotá y sus municipios aledaños.

Comprender las contribuciones atmosféricas en el ciclo hidrológico de las cuencas que son fuente de suministro de agua para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá es fundamental para la planificación y gestión adecuadas de los recursos hídricos en la ciudad. Una mejor comprensión de estos procesos ayudará a formalizar y mejorar el conocimiento de los procesos hidrológicos en la región, evitando ideas erróneas sobre la generación y distribución del agua.

La Amazonía desempeña un papel crucial en el ciclo hidrológico global, siendo un importante contribuyente a la evapotranspiración y a la formación de nubes. La humedad generada en la región es transportada por corrientes atmosféricas, como ríos atmosféricos (voladores) y corrientes en chorro (jetstreams), afectando los patrones de precipitación y el clima en áreas distantes. Estudiar la sensibilidad de la hidrología en la Amazonía y sus regiones receptoras de humedad a los cambios en la deforestación es fundamental para comprender y predecir las posibles implicaciones en los sistemas hídricos y climáticos.

Desde una perspectiva científica, el enfoque debe centrarse en la cuantificación de la relación entre la deforestación y las variaciones en las corrientes de humedad atmosférica, así como en los cambios en los patrones de precipitación en áreas afectadas directa e indirectamente por la deforestación amazónica. El análisis de series temporales de datos climáticos, de uso del suelo y de cobertura vegetal, junto con la aplicación de modelos hidrológicos y atmosféricos, permitirá evaluar la sensibilidad del sistema a la deforestación que se presenta en la Amazonía y ofrecer

una visión más precisa de los posibles impactos sobre las precipitaciones en el páramo de Chingaza.

La identificación de regiones con mayor sensibilidad a la deforestación puede guiar la implementación de estrategias de conservación y manejo sostenible del territorio, minimizando los riesgos y asegurando la resiliencia de los ecosistemas y las comunidades que dependen de estos recursos hídricos y climáticos. La disminución de la cubierta forestal en el Amazonas puede afectar estos fenómenos y modificar la cantidad y distribución de precipitaciones, con consecuencias potencialmente perjudiciales para áreas como Chingaza.

Dada la importancia de Chingaza para la seguridad hídrica de la sabana de Bogotá y la creciente preocupación por el impacto de la deforestación en el Amazonas, es imperativo llevar a cabo un estudio que evalúe las posibles repercusiones de estos cambios en el ciclo hidrológico y en el clima de Chingaza. Para abordar este desafío, el proyecto se dividirá en dos fases iniciales, presentadas en este primer informe:

Fase 1: Revisión bibliográfica y recopilación de datos sobre la deforestación en el Amazonas, la hidrología y meteorología de la región de Chingaza y la relación entre la deforestación en la Amazonía, los ríos voladores y los *jetstreams*.

Fase 2: Análisis preliminar del impacto de la deforestación en el Amazonas sobre la posición e intensidad de la Zona de Convergencia Intertropical y cómo podría afectar la dirección y velocidad de los vientos en la región de Chingaza.

Este primer informe se centrará en la síntesis y el análisis de los datos y la literatura recopilados en las Fases 1 y 2, proporcionando una base sólida para futuros estudios que examinen más a fondo las posibles repercusiones de la deforestación en el Amazonas en la región de Chingaza, las contribuciones atmosféricas en el ciclo hidrológico y las medidas necesarias para enfrentar estos desafíos.

1 Objetivos

Para este informe se busca el cumplimiento de los siguientes objetivos:

- Revisión bibliográfica de estudios realizados sobre el sistema de abastecimiento Chingaza haciendo énfasis en las metodologías utilizadas y en la caracterización hidroclimatológica de la zona de estudio identificando áreas y cuencas de interés.
- Revisión de estudios en los que se evidencia las relaciones entre la deforestación de la región Amazónica y los impactos sobre las precipitaciones en la región andina colombiana.
- Recopilar y sistematizar la información hidroclimatológica medida en tierra por las redes de medición establecidas por la EAAB–ESP y el IDEAM. Así mismo, se reporta la información proveniente de sensores remotos que será utilizada para el desarrollo de la consultoría.
- Revisar las diferentes metodologías utilizadas para analizar el cambio de cobertura de suelo en la cuenca del Amazonas, identificando las ventajas y limitaciones de estas.
- Identificar los principales desafíos al análisis de cambio de cobertura de suelo en la cuenca del Amazonas, proponer una metodología para llevar a cabo este estudio y proporcionar recomendaciones para mejorar la precisión y la fiabilidad de los resultados obtenidos.
- Realizar un análisis del comportamiento de la precipitación y los caudales diarios para la zona de estudio a escala diaria, mensual y anual.
- Establecer y proponer una metodología para la caracterización, identificación y evaluación de los patrones de transporte de vapor de agua y ríos atmosféricos para el sistema Amazonia – Chingaza.

2 Revisión bibliográfica y metodológica

En este capítulo se presenta un resumen de la revisión bibliográfica y metodológica que sirven de base y sustento científico para el planteamiento de las hipótesis que buscan ser solucionadas durante la presente consultoría. La revisión se realiza utilizando cuatro (4) áreas fundamentales de interés:

- Estimación de balances hidrológicos y comportamiento climatológico de la cuenca Amazónica.
- Análisis de coberturas y usos del suelo para la región Amazónica.
- Estudios de la dinámica atmosférica de la región Amazónica y su influencia sobre el sistema Chingaza.
- Análisis climático e hidrológico del sistema Chingaza.

Para cada uno de los anteriores tópicos se presenta el resultado de la revisión bibliográfica, así como los principales aspectos metodológicos utilizados y que servirán de base para el presente estudio.

2.1 Balances hidrológicos y climatología del sistema Amazónico

Los balances hidrológicos se llevan a cabo a nivel mensual y anual para realizar una caracterización hidrológica de la cuenca, además se expone la distribución espacial de las variables hidrológicas.

2.1.1 Revisión bibliográfica

La Amazonia con 7,4 millones de km², representa el 5% del área continental mundial, y cubre extensiones de Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guyana, Guyana Francesa, Perú, Surinam y Venezuela. La cuenca del río Amazonas es la más grande del mundo, con un promedio de 230.000 m³/s, que corresponde aproximadamente al 20% del agua dulce de la superficie terrestre mundial (Cepal y Patrimonio Natural, 2013), Figura 2.1.

Además de ayudar a controlar las emisiones de carbono a la atmósfera, la Amazonía apoya en gran medida al ciclo hidrológico de la zona suramericana. Se cree que la humedad proveniente de la evapotranspiración de sus bosques permite cargar las nubes, que al ser transportadas por los vientos alisios del sur-este, van a precipitar lluvias a distancias muy lejanas de la misma Amazonía.

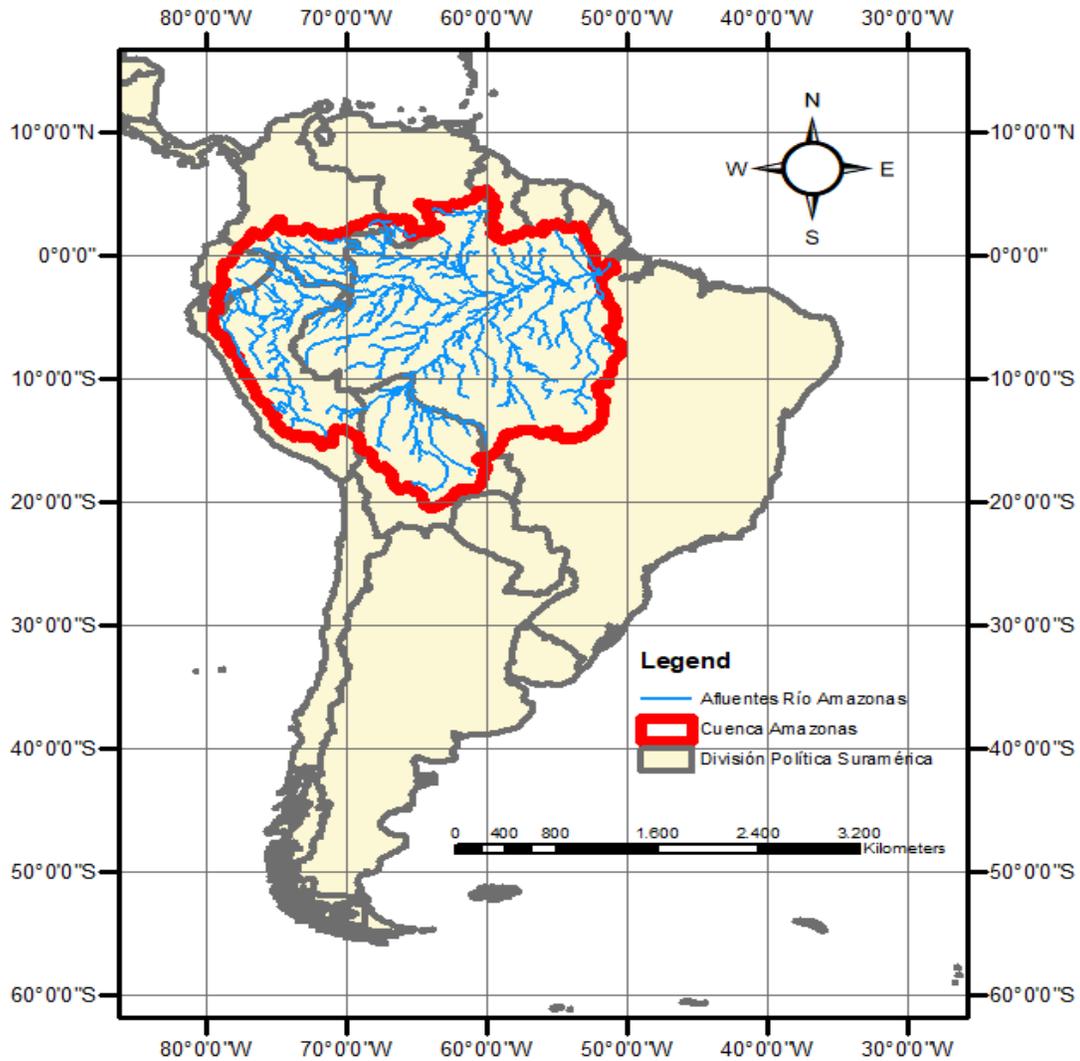


Figura 2.1. Localización de la cuenca amazónica.

Por su localización cercana a la línea ecuatorial, sus bosques reciben radiación constante doce horas al día; por lo tanto, sus temperaturas son cálidas y sostenidas, oscilando entre 20°C y 40°C, acompañados con un alto contenido de humedad.

La Amazonia colombiana representa más de 40% del territorio colombiano. Está conformada por la cordillera de los Andes y llanuras que se extienden hacia el oriente, hasta las fronteras con Brasil, Perú, Ecuador y Venezuela; compartiendo con estos países la Selva Amazónica. El clima que caracteriza esta región es templado, con temperaturas promedio de 24°C, aunque en temporadas secas rondan los 29°C; mientras que en períodos lluviosos baja la temperatura hasta los 21°C. Los meses más lluviosos se presentan entre mayo y junio, por otro lado, los meses de diciembre y enero son los más secos. La región amazónica también es una de las más húmedas de Colombia con un 88% de humedad. (La Región Amazónica, 2020).

Los avances en las estimaciones de precipitación de RS (sensores remotos) han permitido la caracterización de las distribuciones espaciales y temporales de la lluvia a escalas locales y regionales sobre la cuenca del Amazonas y proporcionan registros lo suficientemente largos como para evaluar las tendencias de las precipitaciones en las últimas décadas (Fassoni-Andrade et al., 2021). Según lo mencionado anteriormente, la precipitación promedio anual en la cuenca del Amazonas se estimó en 2.200 mm/año.

Principalmente por su gran extensión, los regímenes de precipitación en la cuenca difieren de una región a otra en términos del patrón estacional, y en una escala más local, los regímenes de lluvia son altamente variables (Fassoni-Andrade et al., 2021). En la siguiente figura se observa que el régimen anual para 11 grandes cuencas del Amazonas para el periodo de 1981-2009 difiere entre el norte y el sur. El gráfico de barras se basa en conjuntos de datos HOP y las líneas magenta se basan en CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data).

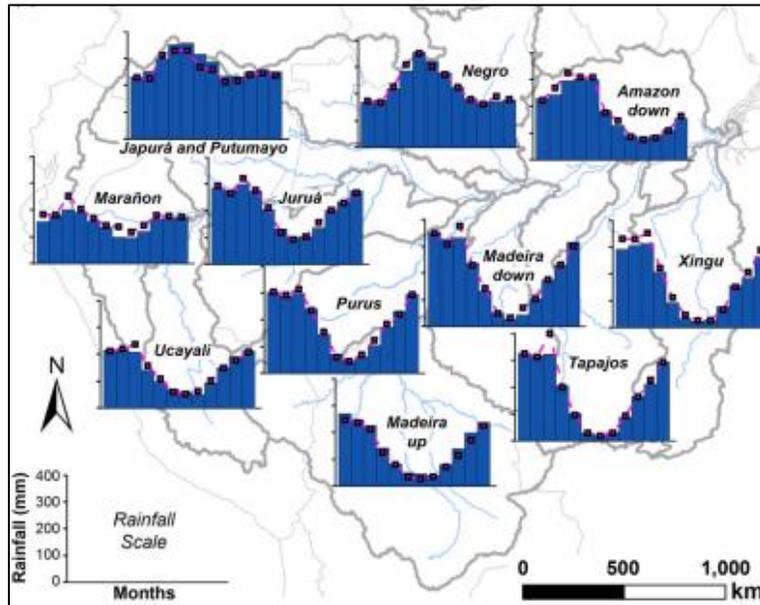


Figura 2.2. Regímenes de precipitación en 11 grandes cuencas del Amazonas

Fuente: Fassoni–Andrade et al., 2021.

Según estudio de (Builes-Jaramillo & Poveda, 2018), los valores del balance hidrológico para las diferentes variables se muestran a continuación en la Figura 2.3, que compara el balance de agua superficial, balance de agua atmosférica y desequilibrio entre estudios previos y los resultados obtenidos para los conjuntos de datos utilizados en el estudio mencionado.

Table 1
Comparison Between Previous Studies of Surface Water Balance (SWB), Atmospheric Water Balance (AWB) and Imbalance, and the Results Obtained for the Data Sets Used in the Present Study

Surface water balances (SWB)	<i>P (mm yr⁻¹)</i>	<i>E (mm yr⁻¹)</i>	<i>R (mm yr⁻¹)</i>	<i>P-E-R (mm yr⁻¹)</i>
<i>Previous studies (period)</i>				
Salazar (2004) (1961–1990)	2,189	1,248	940	1
Marengo (2004) (1970–1999)	2,117	1,570	1,059	-511
Carmona (2015) (1982–2008)	2,266	1,189	1,163	-86
<i>Present study sources P-E-R (period)</i>				
GPCC-ORCHIDEE-HYBAM (1979–2008)	2,225	1,062	965	197
GPCC-MPI-HYBAM (1982–2008)	2,225	1,181	965	78
GPCC-GLEAM-HYBAM (1984–2007)	2,225	1,248	965	11
GPCC-MODIS-HYBAM (2000–2008)	2,225	1,289	965	-30
Era-Interim (1979–2012)	2,190	1,301	939	-51
Mean value	2,218	1,216	960	41
Atmospheric water balances (AWB)	<i>P (mm yr⁻¹)</i>	<i>E (mm yr⁻¹)</i>	<i>C (mm yr⁻¹)</i>	<i>P-E-C (mm yr⁻¹)</i>
<i>Previous studies (period)</i>				
Zeng (1999) (1985–1993)	2,044	1,679	292	73
Costa and Foley (1999) (1976–1996)	2,322	1,384	905	33
Marengo (2004) (1970–1999)	2,117	1,570	511	36
<i>Present study sources P-E-C (period)</i>				
GPCC-ORCHIDEE-ERA (1979–2008)	2,225	1,062	810	353
GPCC-MPI-ERA (1982–2008)	2,225	1,181	810	234
GPCC-GLEAM-ERA (1984–2007)	2,225	1,248	810	167
GPCC-MODIS-ERA (2000–2008)	2,225	1,289	810	125
Era-Interim (1979–2012)	2,190	1,301	810	78
Mean value	2,218	1,216	810	191
Imbalances between SWB and AWB	<i>C (mm yr⁻¹)</i>	<i>R (mm yr⁻¹)</i>	<i>R-C (mm yr⁻¹)</i>	<i>I (%)</i>
<i>Previous studies</i>				
Zeng (1999)	292	1,095	803	(-73)
Costa and Foley (1999)	905	937	32	(-3)
Marengo (2004)	511	1,058	547	(-51)
<i>Present study sources (C-R)</i>				
(ERA-HYBAM)	810	965	155	(-16)
(ERA-ERA)	810	939	129	(-14)

Figura 2.3. Comparación de estudios sobre balances hidrológicos en la cuenca del Amazonas

Fuente: (Builes-Jaramillo & Poveda, 2018)

Para el balance hidrológico (que se refiere al balance de agua superficial), en el estudio se estimaron los valores medios anuales de 2.218 mm para precipitación, 1.216 mm para evapotranspiración y 960 mm para escorrentía.

2.1.2 Balances mensuales y anuales con datos ERA5

Inicialmente se descargaron series históricas de los promedios mensuales en formato NetCDF, los cuales son conjuntos de datos contenidos en celdas de resolución de 0.25° en ERA5, que se combinan entre latitudes y longitudes formando una región rectangular. Los datos se descargaron para distintas variables hidrológicas como la precipitación, la evaporación y la escorrentía. Para la presente investigación se estableció el periodo de descarga y análisis de estas variables desde enero de 1980 hasta diciembre de 2022. También se definieron los límites de la región rectangular con las siguientes coordenadas de frontera: 5.5° Norte, -20.5° Sur, -80° Oeste y -50° Este. Como

producto de la descarga, se obtuvo un archivo “.nc” por cada variable con los promedios mensuales del periodo establecido en la región definida, es decir tres archivos, que se procesaron mediante códigos en Python para graficar los promedios mensuales y medias totales anuales de las variables a través de la región amazónica y así caracterizar la cuenca en su hidrología. A continuación, se muestran las gráficas obtenidas de promedios mensuales y anuales para cada variable.

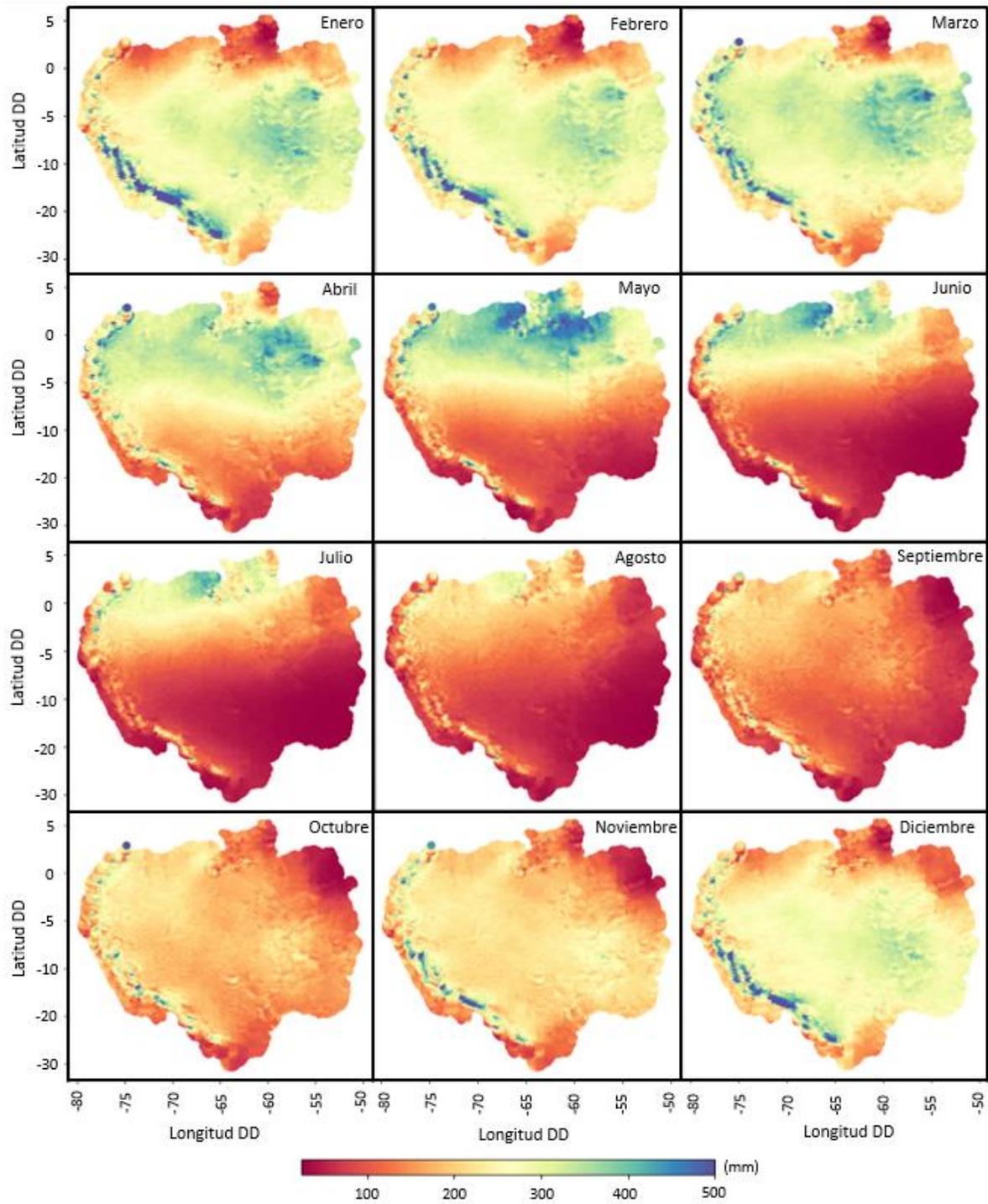


Figura 2.4. Promedios mensuales de precipitación en la región amazónica entre 1980–2022

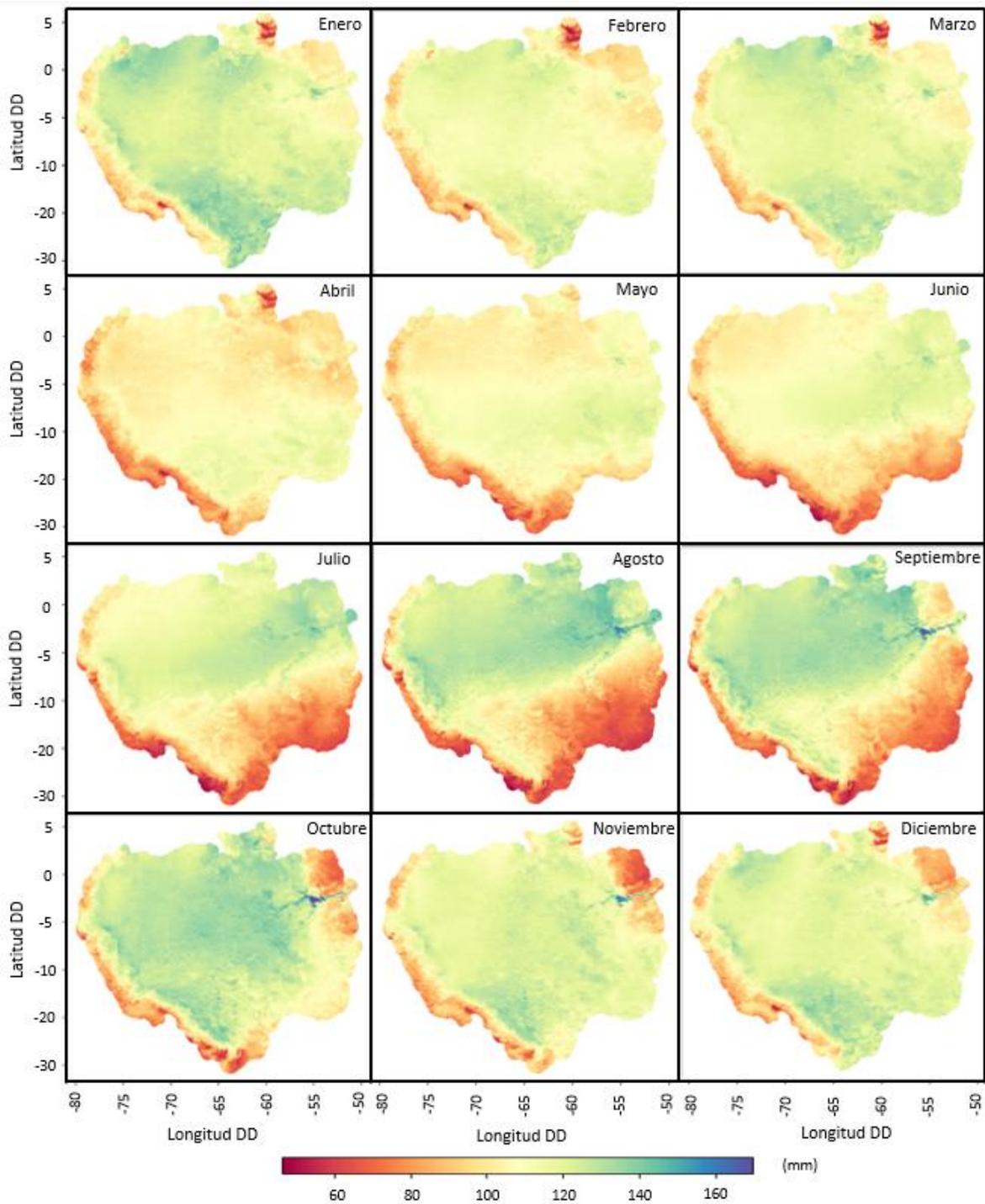


Figura 2.5. Promedios mensuales de evaporación en la región amazónica entre 1980–2022

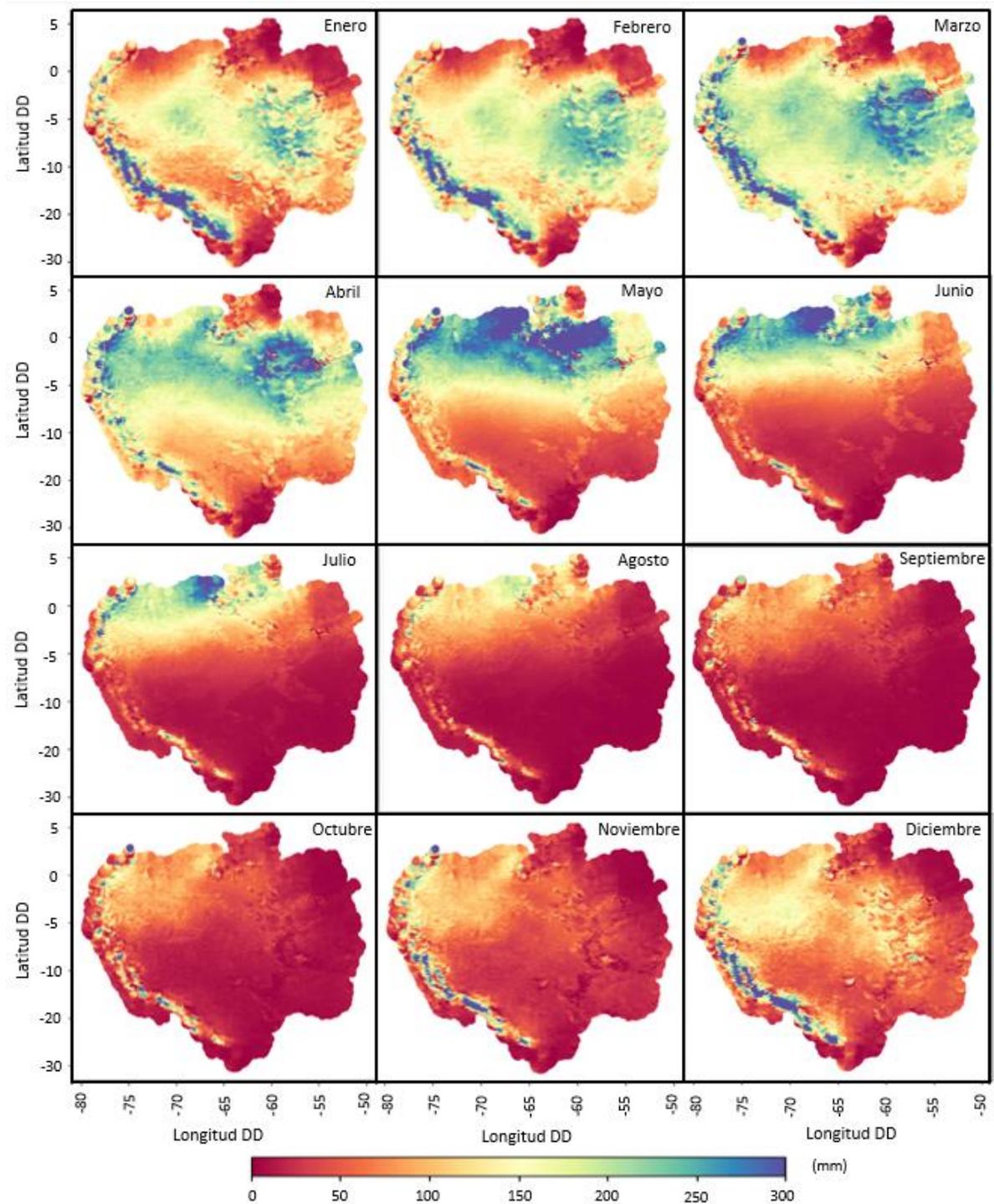


Figura 2.6. Promedios mensuales de escorrentía en la región amazónica entre 1980–2022

2.2 Análisis de coberturas y usos del suelo en el Amazonas (Deforestación)

La cuenca del Amazonas es una de las regiones más importantes del mundo en términos de biodiversidad. Sin embargo, la deforestación ha sido una de las mayores amenazas para la región ya que implica cambios significativos en la vegetación que juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico.

Cuando se talan grandes extensiones de bosque, se reduce la capacidad de la vegetación para retener y liberar agua, lo que puede generar graves consecuencias para la región, incluyendo sequías e inundaciones. Además, los efectos pueden extenderse más allá del área que abarca la cuenca del Amazonas afectando otros ecosistemas.

En este contexto, el estudio de cómo el cambio de coberturas de suelo y la deforestación impactan el ciclo hidrológico de la región cobra gran importancia para desarrollar estrategias de conservación y manejo de los recursos naturales.

Por lo anterior, para llevar a cabo un buen estudio es fundamental realizar una revisión del estado del arte. En este capítulo se presenta el resumen de investigaciones previas que se han llevado a cabo en el tema, identificando tipo de datos, limitaciones y metodologías que permitan contextualizar el trabajo dentro una literatura científica existente que sirva como guía para esta investigación.

2.2.1 Estado del arte

La cuenca del Amazonas es una de las áreas naturales más importantes del planeta, ya que esta alberga la mayor parte de la biodiversidad del mundo y desempeña un papel fundamental en la regulación del clima global. Sin embargo, en las últimas décadas, la región ha experimentado una pérdida significativa de su cobertura forestal debido a actividades humanas como la agricultura, la ganadería, la minería, entre otras.

Según lo indicado por (Salgado, n.d.) más de la mitad de la Amazonía (52%) presenta síntomas y efectos causados por la actividad antrópica. Las áreas con una alta probabilidad de deterioro se localizan en el sureste de la Amazonía brasileña, el oeste de la colombiana y la zona

central de Bolivia, especialmente relacionadas con procesos de deforestación, cambios de uso de suelo y quemas.

La deforestación en la cuenca del Amazonas ha llevado a un aumento en la emisión de gases de efecto invernadero, a la disminución de la biodiversidad y ha alterado el ciclo hidrológico regional y global. Por lo tanto, el estudio de cambio de coberturas de suelo en esta cuenca es fundamental para comprender los procesos que alteran el medio ambiente en distintas regiones del mundo. En este estudio en particular, se busca comprender cómo la deforestación en la cuenca del Amazonas afecta las precipitaciones en Chingaza, Colombia.

Según (Kimbrough, 2002) se calcula que aproximadamente el 13.2% del ecosistema de la selva amazónica ha desaparecido a causa de la deforestación y otros factores. Esto equivale a más de 85 millones de hectáreas, prácticamente la décima parte del tamaño de Estados Unidos.

Por otra parte, teniendo en cuenta los datos recopilados por el estudio de la RAISG, se puede observar que la Amazonía ha perdido casi el 9% de sus bosques entre el año 2001 y el 2020. En la Tabla 2.1 se muestra el área que ha sido deforestada en cada país que conforma la cuenca del Amazonas en el período de tiempo mencionado.

Tabla 2.1. Deforestación en la Amazonía por país entre 2001 y 2020

Deforestación en la Amazonía por país, entre 2001 y 2020		
Países que comparten la Amazonía	Deforestación de 2001 a 2020 (Ha)	Pérdida de bosque con respecto al año 2000
Brasil	44.003.100	10.76%
Bolivia	3.923.900	8.35%
Perú	2.980.600	4.08%
Colombia	2.300.400	5.21%
Ecuador	623.200	6.14%
Venezuela	292.500	0.74%
Suriname	68.900	0.50%
Guyana	41.800	0.22%
Guyane Française	23.700	0.29%
Amazonía	54.258.100	8.70%

Fuente: (Zanon, 2023)

Los datos presentados son preocupantes ya que los bosques desempeñan un papel fundamental en el transporte y equilibrio de la humedad a nivel regional. Esto se ha analizado en relación con la teoría de la “bomba biótica” (Makarieva et al., 2013; Makarieva & Gorshkov, 2007).

Esta teoría argumenta que el vapor de agua que se produce a través de la evapotranspiración de los bosques se convierte en energía potencial disponible para impulsar los vientos y mantener las precipitaciones en las masas continentales boscosas. Por lo tanto, si se interrumpe el transporte de humedad y el reciclaje de precipitaciones debido a la deforestación en zonas críticas, se podría iniciar un proceso de secado que desestabilizaría aún más las regiones boscosas de la Amazonía que están en la dirección del viento (Marengo et al., 2018).

Este tema cobra importancia debido a la alarmante velocidad con la que se está produciendo la deforestación en la cuenca del Amazonas, por lo que comprender estos impactos es crucial para asegurar la sostenibilidad de la región.

Una forma de comprender este fenómeno es modelando cómo el cambio de cobertura del suelo afecta el ciclo hidrológico, de esta manera se puede tener una idea de la disponibilidad de agua y con ello la supervivencia de los ecosistemas y de aquellas especies que dependen de él.

2.2.2 Revisión literaria de metodología de análisis de cambios de uso de Suelo

Comprender los efectos del cambio en la cobertura del suelo en el clima requiere el uso de diversas metodologías y herramientas de análisis. Estos enfoques permiten evaluar la evolución de las coberturas del suelo y su relación con el cambio climático, a menudo mediante el uso de información satelital obtenida de plataformas como MODIS, Landsat o Sentinel-2 (Mu & Jones, 2022).

El proceso generalmente comienza con la adquisición de imágenes ráster en diferentes momentos de tiempo, en nuestro caso, los cambios en la deforestación utilizando datos de MODIS. A continuación, se clasifican las áreas según la cobertura y el uso del suelo, diferenciando las características naturales de la superficie terrestre de las actividades humanas y su relación con el territorio.

En algunos casos, se emplea una clasificación supervisada utilizando el método *Random Forest* para separar la cobertura terrestre en clases como bosque y no bosque (Brovelli et al., 2020). La clasificación supervisada requiere la selección de datos de entrenamiento representativos y homogéneos para cada clase, utilizando a menudo la plataforma Google Earth Engine (GEE) y el muestreo estratificado.

En un estudio reciente, Lin et al. (2023) reprocesaron el conjunto de datos del índice de área foliar (LAI por su sigla en inglés) utilizando una clasificación de MODIS GEE y evaluaron su rendimiento en modelos de simulación del cambio en la superficie terrestre. El conjunto de datos reprocesados mejoró significativamente la precisión de los valores de LAI en comparación con versiones anteriores de MODIS.

Tras la clasificación, se realiza un análisis estadístico para determinar el cambio porcentual de área de cada tipo de cobertura a lo largo del tiempo. Estos resultados se comparan con series de tiempo de variables hidrológicas, como precipitación, evaporación y escorrentía superficial, para detectar fluctuaciones y anomalías climáticas relacionadas con el cambio de cobertura del suelo.

Guimberteau et al. (2017) utilizaron datos satelitales de cobertura del suelo para generar escenarios futuros de cambio en la región y predecir los efectos en la evapotranspiración, el escurrimiento y los flujos de agua en cuencas como la del Amazonas. Estos estudios revelan la importancia de las interacciones biosfera-atmósfera en la estimación de la pérdida de bosque y el cambio de vegetación natural a sabana.

La investigación demuestra que la deforestación puede alterar patrones de precipitación y evapotranspiración (Llopart et al., 2018). Estos resultados enfatizan la importancia de incluir el proceso de deforestación en las simulaciones de cambio climático y destacan la necesidad de seguir monitoreando y analizando los cambios en la cobertura del suelo utilizando datos de percepción remota como MODIS.

El análisis de cambio de deforestación mediante información de percepción remota es una técnica ampliamente utilizada para monitorear y evaluar la pérdida de bosques en diferentes escalas espaciales y temporales. Existen diversas metodologías y tipos de satélites que pueden utilizarse para llevar a cabo este análisis. A continuación, se describen y analizan los pasos generales que se siguen en el análisis de cambio de deforestación utilizando datos de percepción remota:

1. Selección del tipo de satélite. La elección del satélite adecuado depende de factores como la resolución espacial y temporal requerida, la disponibilidad de datos y la capacidad para penetrar la cubierta de nubes. Ejemplos de satélites comúnmente

utilizados para el monitoreo de la deforestación incluyen Landsat, Sentinel-2, MODIS y satélites de radar como Sentinel-1 o ALOS PALSAR.

2. Adquisición de imágenes satelitales para el área y el período de estudio de interés. Es importante seleccionar imágenes que sean representativas de las condiciones de la cubierta forestal y que tengan una calidad adecuada (por ejemplo, baja cobertura de nubes).
3. Preprocesamiento de las imágenes satelitales para corregir errores radiométricos y geométricos, y para ajustar las diferencias en la resolución espacial y espectral entre imágenes de diferentes satélites o fechas.
4. Clasificación de las imágenes satelitales en diferentes clases de cobertura terrestre, como bosques, pastizales, áreas urbanas y cuerpos de agua. Esto se puede hacer mediante clasificación supervisada o no supervisada utilizando algoritmos como clasificación de máxima verosimilitud, árboles de decisión, redes neuronales o máquinas de vectores de soporte, entre otros.
5. Cálculo del cambio en la cobertura forestal comparando las clasificaciones de la cobertura terrestre en diferentes momentos en el tiempo. Esto puede implicar el uso de técnicas como la detección de cambios post-clasificación, la clasificación bitemporal o la clasificación multitemporal.
6. Validación de los resultados de la clasificación y el análisis de cambio de deforestación utilizando datos de referencia independientes, como información de campo, fotografías aéreas o datos de otros sensores remotos.
7. Análisis y presentación de los resultados del cambio de deforestación en términos de tasas y patrones espaciales de deforestación, identificando áreas de interés y tendencias a lo largo del tiempo.

Las metodologías pueden variar en función de los siguientes factores:

- Resolución espacial y temporal de los datos de percepción remota utilizados.
- Enfoque de clasificación (supervisado o no supervisado) y algoritmo seleccionado.

- Métodos de detección de cambios (post-clasificación, clasificación bitemporal, clasificación multitemporal).
- Criterios y umbrales utilizados para definir la deforestación.
- Disponibilidad y calidad de los datos de referencia para la validación.

2.3 Estudios de dinámica atmosférica en el Amazonas

Los ríos atmosféricos son principalmente, grandes masas de agua transportadas por los vientos y responsables de la regulación hidrológica regional. En este estudio del estado del arte se enuncia la importancia de su estudio en torno a la asegurabilidad hídrica translocal y cómo el sistema dinámico atmosférico presenta fluctuaciones en función de la variabilidad climática y cambios en la superficie. Comprender la dinámica y el impacto transfronterizo que estos cuerpos de agua gaseosos tienen en cuanto al desarrollo y asegurabilidad hídrica sostenible, permite generar instrumentos para la toma de decisiones y aprovechamiento de los recursos hídricos integralmente. Davidson (Davidson et al. 2012), presentó perspectivas exhaustivas sobre la transición atmosférica en la Amazonia debido al continuo cambio en el uso de la tierra y perturbaciones estacionales de la dinámica planetaria. En particular, mostró los impactos del ciclo hidrológico con sus grandes cantidades de agua y energía recicladas en las biomásas y los ecosistemas que dependen o están ligados a este sistema (Machado et al., 2018).

A continuación, se presentan los fundamentos teóricos y la propuesta metodológica para analizar la relación entre la Cuenca del Amazonas y el sistema de abastecimiento Chingaza de forma integradora.

2.3.1 Principios teóricos del transporte de humedad en la atmósfera

Para estudiar la dinámica atmosférica e identificar los ríos atmosféricos y las corrientes en chorro en la región del Amazonas y sus posibles flujos hacia Colombia usando ERA5, se siguieron los siguientes pasos:

1. **Selección del período de estudio:** Definir el período de tiempo en el que se desea investigar la dinámica atmosférica, teniendo en cuenta los meses del año en los que los ríos atmosféricos y las corrientes en chorro pueden influir en Colombia.
2. **Análisis espacial y temporal:** Procesar y analizar los datos de ERA5 en función del espacio y el tiempo para identificar patrones en la dinámica atmosférica y su variabilidad estacional y anual.
3. **Transporte de masa en la Atmósfera:** Dentro de los procesos de transporte asociados a masas de aire y humedad se identifican dos principalmente, las corrientes de chorro o *jetstreams* los cuales se identifican como regiones o trayectos de altas velocidades a niveles de viento geostrófico y los *ríos atmosféricos* los cuales son corredores con alto porcentaje de humedad advectiva transportada a niveles de circulación troposférico bajo y medio (1000 hPa a 500 hPa) principalmente. A continuación, se presenta en detalle la identificación de estos dos fenómenos de transporte:

- **Identificación de ríos atmosféricos (ríos voladores):** Para identificar ríos atmosféricos se analiza la humedad atmosférica integrada en columna (IWV, por sus siglas en inglés) y la convergencia de humedad en niveles bajos de la troposfera. Los ríos atmosféricos generalmente se caracterizan por tener valores altos de IWV y una estructura elongada en la dirección de los vientos predominantes.
- **Identificación de corrientes en chorro (jetstreams):** Se analiza la velocidad del viento en diferentes niveles de presión para identificar las corrientes en chorro. Estas corrientes son bandas estrechas de vientos fuertes en la troposfera superior, y generalmente se pueden identificar al observar velocidades de viento superiores a un cierto umbral (por ejemplo, 30 m/s) en niveles de presión de aproximadamente 200 hPa a 300 hPa.

4. Corrientes de chorro y ríos atmosféricos se relacionan con la hidrología

Tanto las **corrientes de chorro** como los **ríos atmosféricos** pueden tener impactos significativos en el ciclo hidrológico de diferentes maneras. Sin embargo, es probable que los ríos

atmosféricos, a menudo denominados "ríos voladores", tengan un impacto más directo e inmediato en cuencas hidrográficas pequeñas y grandes, incluida la Amazonía.

Los ríos atmosféricos son regiones relativamente estrechas en la atmósfera que transportan grandes cantidades de vapor de agua a largas distancias, principalmente desde los trópicos hacia latitudes más altas. A menudo, provocan fuertes precipitaciones cuando encuentran tierra, influyendo en el ciclo hidrológico de cuencas hidrográficas tanto pequeñas como grandes.

Por otro lado, las corrientes de chorro (*jetstreams*) son corrientes de aire de alta altitud y rápido movimiento que pueden influir en los sistemas meteorológicos y los patrones climáticos a una escala más amplia e indirecta. Pueden afectar la formación y el movimiento de sistemas de alta y baja presión, que a su vez pueden afectar los patrones de precipitación y el ciclo hidrológico en cuencas hidrográficas.

En general, aunque ambos fenómenos pueden influir en el ciclo hidrológico, los ríos atmosféricos están más directamente asociados con el transporte de humedad y la precipitación en cuencas hidrográficas pequeñas y grandes como la Amazonía.

La hidrología se relaciona con los ríos atmosféricos y las corrientes de chorro

La hidrología de una región puede influir en la trayectoria y el volumen de ríos atmosféricos (ríos voladores) y corrientes en chorro a través de varios mecanismos. Estos mecanismos involucran la evapotranspiración, las características de la superficie terrestre y los patrones meteorológicos locales. Sin embargo, hay diferencias importantes entre los ríos atmosféricos y las corrientes en chorro en términos de su formación, comportamiento y sensibilidad a los cambios hidrológicos.

Evapotranspiración: El proceso por el cual el agua se transfiere de la tierra a la atmósfera a través de la evaporación del suelo y las superficies del agua y la transpiración de las plantas. En regiones con abundante vegetación y cuerpos de agua, se producen altas tasas de evapotranspiración, liberando humedad en la atmósfera. Esta humedad puede contribuir a la formación e intensificación de los ríos atmosféricos, que transportan vapor de agua a largas distancias. Por otro lado, las corrientes de chorro están impulsadas principalmente por gradientes de temperatura y están menos influenciadas directamente por la evapotranspiración.

Características de la superficie terrestre: La naturaleza de la superficie terrestre de una región, incluida su cobertura vegetal, uso del suelo y topografía, puede afectar los patrones meteorológicos locales y, a su vez, influir en la trayectoria y el volumen de los ríos atmosféricos y las corrientes en chorro. La deforestación puede provocar cambios en los patrones meteorológicos locales, alterando la circulación del viento y afectando el transporte de humedad en la atmósfera. Los ríos atmosféricos son más sensibles a estos cambios, ya que están directamente relacionados con el transporte de humedad, mientras que las corrientes en chorro están influenciadas más por los gradientes de temperatura a gran escala y los patrones de circulación globales.

Patrones meteorológicos locales: El clima regional y los patrones meteorológicos pueden influir en la trayectoria y el volumen de los ríos atmosféricos y las corrientes en chorro. La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es un ejemplo de un patrón meteorológico que puede afectar a ambos fenómenos, pero los ríos atmosféricos están más directamente influenciados por la posición y la fuerza de la ZCIT debido a su asociación con la actividad convectiva y la precipitación. Las corrientes en chorro, aunque afectadas por la ZCIT, están más influenciadas por los gradientes de temperatura a gran escala y los patrones de circulación globales.

En resumen, aunque tanto los ríos atmosféricos como las corrientes en chorro están influenciados por la hidrología de una región, los ríos atmosféricos son generalmente más sensibles a los cambios hidrológicos, como las tasas de evapotranspiración y las características de la superficie terrestre. Comprender estas diferencias e interacciones puede ayudar a los investigadores a predecir y evaluar los posibles impactos de los cambios hidrológicos en la trayectoria y el volumen de los ríos atmosféricos y las corrientes en chorro. Estos impactos pueden tener implicaciones importantes en la distribución de la precipitación y la disponibilidad de agua en diversas escalas, desde cuencas pequeñas hasta regiones más amplias como la Amazonía. Por lo tanto, es crucial considerar estos procesos en estudios de cambio climático y en la gestión de recursos hídricos a nivel local y regional.

Estudio de la conexión entre ríos atmosféricos, corrientes en chorro y flujos hacia Colombia: Se analiza la dirección y magnitud de los ríos atmosféricos y las corrientes en chorro en relación con su posible influencia en Colombia. Se realiza el análisis de compositores o de

eventos extremos para comprender cómo estos fenómenos afectan la dinámica atmosférica y la transferencia de humedad hacia Colombia en determinados meses del año.

Validación y comparación con observaciones: Se comparan los resultados obtenidos con los datos observados (por ejemplo, datos de precipitación, estaciones meteorológicas) para validar y mejorar la comprensión de los ríos atmosféricos, corrientes en chorro y flujos hacia Colombia en el contexto de la región amazónica.

Análisis de tendencias y cambios futuros: Se investigan las tendencias históricas y las proyecciones futuras de la dinámica atmosférica, los ríos atmosféricos y las corrientes en chorro en la región del Amazonas, utilizando modelos climáticos y escenarios de cambio climático, para comprender cómo estos fenómenos podrían verse afectados en el futuro.

2.3.2 Estado del arte

El transporte de humedad en la atmósfera desempeña un papel importante en el mantenimiento del equilibrio energético, de humedad y momento en la Tierra y tiene una estrecha asociación con los extremos hidrometeorológicos (por ejemplo, fuertes lluvias e inundaciones). (Nayak & Villarini, 2017, Lu & Hao, 2017; Lu & Lall, 2017). La identificación y caracterización de los patrones los transportes de humedad atmosférica asociados a estos extremos siguen convencionalmente dos enfoques principales. El Lagrangiano, rastreando el movimiento de un gran número de partículas de aire húmedo mediante diferentes modelos de trayectoria (Najibi et al., 2017, Stohl et al., 2005) y el análisis híbrido Euleriano–Lagrangiano, mediante la identificación de ríos atmosféricos (Shields et al., 2018) el cual permite una visualización más detallada de los fenómenos dinámicos observados.

Identificación de los Ríos Atmosféricos

Los ríos Atmosféricos se definen como "un corredor largo, estrecho y transitorio de fuerte transporte horizontal de vapor de agua que suele estar asociado a una corriente en chorro de bajo nivel por delante del frente frío de un ciclón extratropical" (AMS, 2017).

Estudios anteriores han desarrollado técnicas para la identificación objetiva de los Ríos Atmosféricos basadas en umbrales de intensidad y/o geometría. Estas técnicas han facilitado la investigación de las características e impactos de las corrientes de humedad atmosféricas en

varias regiones de latitudes medias. El método más sencillo se basa en la determinación de umbrales de los valores de viento a baja altura y de vapor de agua integrado sin tener en cuenta explícitamente la geometría del objeto (Neiman et al., 2009; Dettinger, 2011; Ralph et al., 2013).

Este tipo de método es útil para estudiar las recaladas de AR en áreas pequeñas y locales y puede aprovechar mejor las observaciones in situ de alta calidad de sitios individuales. El segundo tipo de método se basa en la preselección de una determinada sección transversal en la región de interés y el seguimiento de las características espaciales en un campo relacionado con la humedad que interseca la sección transversal mientras satisface un conjunto de criterios de longitud/orientación e intensidad del objeto (Lavers et al., 2011; Lavers et al., 2012; Nayak et al., 2014; Gao et al., 2015).

Aspectos del transporte de humedad en Colombia y Sur América

La mayor parte del continente sudamericano se encuentra en latitudes tropicales y subtropicales. A lo largo de la costa occidental, la cordillera de los Andes se extiende a lo largo de un intervalo latitudinal considerable como característica topográfica dominante. Sus grandes altitudes suponen una barrera para el flujo zonal de baja y media troposfera. Esta barrera al flujo zonal desvía el flujo climatológico del este de mar a tierra cuando entra en el continente desde el Atlántico ecuatorial, formando un canal meridional de transporte de humedad de norte a sur entre 850 y 700 hPa (Gimeno et al., 2012) que suministra humedad para las precipitaciones en zonas pobladas del sureste y sur de Sudamérica.

Cuando se intensifica, este flujo de humedad de norte a sur caracteriza al chorro de bajo nivel sudamericano (Vera et al. 2006).

En otras palabras, estas corrientes importantes de humedad propician cambios en la dinámica hidrológica superficial, particularmente en la precipitación y evaporación. Esto explicado en dos mecanismos, primero, la evaporación de agua a escala local que aporta humedad a la atmósfera o la humedad arrastrada a la región desde otros lugares. La circulación atmosférica arrastra vapor de agua a lugares distantes. El transporte de humedad a un lugar depende de la dinámica de la atmósfera y de la disponibilidad de fuentes de humedad. La formación de precipitación depende de este transporte, así como de la interacción con las características topográficas. La advección de humedad y la precipitación resultante son fenómenos complejos.

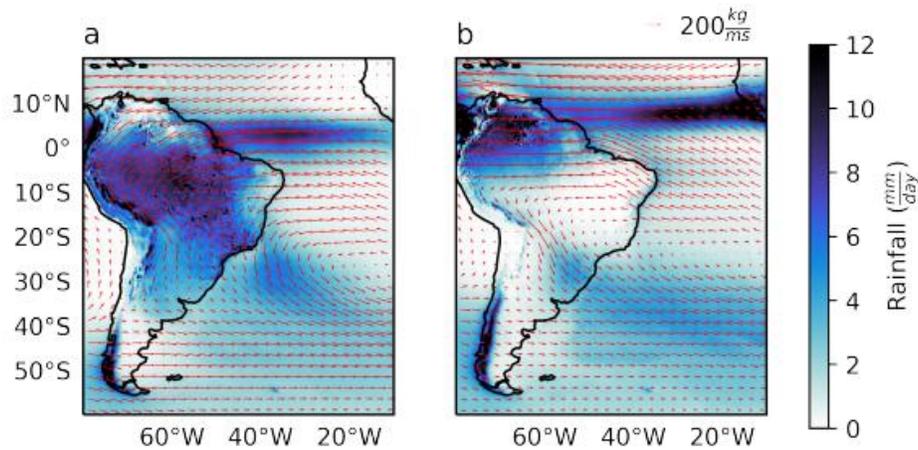


Figura 2.7. Promedio de Precipitación e IVT (vectores) en DJF (a) y JJA (b). Promedios estimados de ECMWF's ERA5 desde 1980 a 2009.

Fuente: Tomado de Pérez et al, 2020

Durante el verano austral, el aumento del flujo de calor sensible procedente de la superficie terrestre y del calor latente liberado por la convección amazónica, junto con el desplazamiento estacional de la ZCIT hacia el sur, intensifican el transporte de humedad del mar a la tierra, caracterizando la fase húmeda del Sistema Monzónico Sudamericano (Marengo et al. 2012). El flujo de humedad del noreste se desvía hacia el sureste después de cruzar el Amazonas, suministrando humedad para el sureste y el sur de Sudamérica (Zemp et al., 2014). Este mayor aporte de humedad en verano coincide con mayores precipitaciones, sobre todo en el centro y sureste de Brasil.

2.3.3 Modelo atmosférico

El análisis del transporte de vapor de agua atmosférico a escala regional se ha llevado a cabo durante muchos años y se han realizado numerosos estudios para estimar el balance de humedad en la atmósfera y su dinámica de transporte como río atmosférico. A continuación, se presenta el esquema metodológico para el análisis de los patrones de humedad, caracterización de río atmosférico y su teleconectividad (esto también aplica a los jetstreams).

2.3.4 Identificación de Variables Relacionadas al transporte de Humedad

Humedad específica: Es la cantidad de vapor de agua por unidad de masa de aire y es una medida directa de la cantidad de humedad en la atmósfera.

Presión de vapor: Es la presión ejercida por el vapor de agua en la atmósfera y está relacionada con la concentración de moléculas de agua en el aire.

Temperatura: La temperatura del aire influye en la capacidad del aire para contener vapor de agua. A medida que la temperatura aumenta, la capacidad del aire para retener vapor de agua también aumenta.

Viento: La dirección y velocidad del viento son cruciales para el transporte de humedad en la atmósfera. Los patrones de viento pueden influir en la distribución de la humedad y, por lo tanto, en las precipitaciones en diferentes regiones.

Flujo de vapor de agua integrado (Integrated Vapor Transport, IVT): Es una medida que combina la humedad específica y la velocidad del viento en toda la columna atmosférica y representa la cantidad de vapor de agua transportado en la atmósfera. Es un indicador útil para rastrear el transporte de humedad y los ríos atmosféricos.

Precipitación: La precipitación es una variable clave relacionada con la humedad en la atmósfera, ya que indica la cantidad de agua que se libera de la atmósfera y llega a la superficie terrestre.

Evapotranspiración: Es el proceso de transferencia de agua desde la superficie terrestre a la atmósfera a través de la evaporación y la transpiración de las plantas. La evapotranspiración es una fuente importante de humedad en la atmósfera y puede influir en el transporte de humedad.

Al estudiar estas variables en conjunto, es posible obtener una comprensión más completa del transporte de humedad en la atmósfera y cómo este proceso puede verse afectado por cambios en la hidrología, el clima y la cobertura del suelo.

Utilizamos la humedad específica integrada verticalmente en el rango de presión de 1000 hPa a 300 hPa (Aproximadamente 8-15 km), correspondiente a la troposfera, para representar los

transportes de humedad en la atmósfera. Esto nos permite evaluar tanto temporal como espacialmente los flujos de humedad donde ocurren la mayor parte de los procesos meteorológicos y de interacción con la superficie terrestre. Se determinan de la siguiente manera:

a. Estimación del transporte de vapor de agua integrado (IVT):

El Transporte Integrado de Vapor (IVT) es una medida de la cantidad de vapor de agua que se transporta horizontalmente en la atmósfera. Se calcula utilizando los flujos de vapor de agua horizontal integrados verticalmente. El IVT se encuentra teniendo en cuenta los componentes del viento horizontal (u y v) y la humedad específica (q) en cada nivel de presión. El IVT se calcula mediante las siguientes ecuaciones (Ecuación 2.1, Ecuación 2.2 y Ecuación 2.3):

$$IVTv = \frac{1}{g} \int_{1000}^{300} Vqdp \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$IVTu = \frac{1}{g} \int_{1000}^{300} Uqdp \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$IVT = \sqrt{(IVTu)^2 + (IVTv)^2} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

- **IVT_u y IVT_v** son las componentes del transporte de humedad integrado en las direcciones: zonal (este-oeste) y meridional (norte-sur) de IVT.
- **u y v** son las componentes de la velocidad del viento en las direcciones zonal y meridional, respectivamente.
- **q** es la humedad específica.
- **dp** es el cambio de presión en cada nivel de presión.
- **g** es la aceleración debida a la gravedad (aproximadamente 9.81 m/s²).
- La integral se toma en el rango de niveles de presión de interés (por ejemplo, de 1000 hPa a 300 hPa para la troposfera).

El IVT se utilizará para estudiar el transporte de humedad en la atmósfera, lo cual es crucial para comprender los patrones de precipitación, los ríos atmosféricos y el ciclo hidrológico. También se usará para evaluar el potencial de eventos extremos de precipitación e inundaciones.

Para calcular el IVT utilizando los datos de reanálisis ERA5, se necesita la humedad específica (q), el componente del viento zonal (u) y el componente del viento meridional (v) en varios niveles de presión.

Es importante aclarar que en este estudio se usan los datos de ERA5 que están disponibles a través de Copernicus Climate Data Store (CDS) y se pueden acceder mediante su API o interfaz web. Se desarrolló un código para obtener los datos automáticamente, y para calcular el IVT usando las ecuaciones anteriores.

b. Estimación del vapor de agua en columna (IWV):

El Vapor de Agua Integrado (IWV, por sus siglas en inglés) es una medida que cuantifica la cantidad total de vapor de agua presente en una columna vertical de la atmósfera.

Para estimar el IWV, se integra la humedad específica (q) a lo largo de todos los niveles de presión de la columna atmosférica. La ecuación para calcular el IWV entendida como el contenido de vapor de agua en el tiempo, expresado en kg/m^2 equivale al Agua Precipitable Total (Ecuación 2.4).

$$IWV = \frac{1}{g} \int_{1000}^{300} q dp \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde IWV es el vapor de agua integrado, q es la humedad específica, dp es el cambio de presión entre niveles de presión adyacentes y g es la aceleración debida a la gravedad.

Los datos de ERA5, que incluyen la humedad específica en varios niveles de presión, se utilizan para calcular el IWV. Estos son los pasos usados para calcular el IWV utilizando los datos de ERA5:

- Se obtuvieron los datos de humedad específica (q) en diferentes niveles de presión (por ejemplo, de 1000 hPa a 300 hPa) de ERA5 para el área del Amazonas.
- Se calculó el cambio de presión (dp) entre niveles de presión adyacentes.

- Se aplicó la ecuación del IWV para integrar la humedad específica (q) a lo largo de todos los niveles de presión en la columna atmosférica, teniendo en cuenta el cambio de presión (dp) y la aceleración debida a la gravedad (g).
- Una vez se calculó el IWV, se analizó la distribución espacial y temporal del vapor de agua en la atmósfera y su relación con fenómenos meteorológicos y climáticos.

2.3.5 Estimación Local de Fuentes de Humedad (Balance Hídrico Atmosférico)

La ecuación del balance hídrico atmosférico representa la conservación de la masa de agua en la atmósfera. La ecuación tiene en cuenta diferentes componentes como la precipitación, la evaporación y el transporte horizontal de vapor de agua. En una forma simplificada, la ecuación del balance hídrico atmosférico se puede escribir como:

$$\nabla \cdot \mathbf{Q} = P - E$$

Ecuación 2.5

Donde:

P representa la precipitación, que es el proceso por el cual el vapor de agua atmosférico se condensa y cae a la superficie de la Tierra como lluvia, nieve u otras formas de precipitación.

E es la evaporación, que es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se libera a la atmósfera. La evaporación incluye tanto la evaporación superficial de los cuerpos de agua y el suelo, como la transpiración de la vegetación.

Q es el vector de flujo de vapor de agua horizontal, que representa el transporte horizontal de vapor de agua en la atmósfera. **La divergencia de Q, ($\nabla \cdot \mathbf{Q}$)**, indica que el flujo de vapor de agua se transporta lejos o hacia un lugar en particular. Una divergencia positiva significa que hay una pérdida neta de vapor de agua (se transporta hacia afuera de la ubicación), mientras que una divergencia negativa implica una ganancia neta (se transporta más hacia adentro de la ubicación).

La ecuación de balance de vapor de agua atmosférico esta descrita como (Peixoto and Oort 1992).

$$\frac{dW}{dt} = -\nabla Q + E - P$$

Ecuación 2.6

El cual $\frac{dW}{dt}$, representa el contenido de humedad atmosférico o IWW. $-\nabla Q$, representa la divergencia de la integral vertical de los flujos de humedad o $-\nabla IVT$. E y P representa Evaporación y Precipitación.

Este modelo, proporciona una estimación del balance medio de agua para una columna de aire que se extiende desde la superficie hasta la parte superior de la atmósfera en una región determinada.

Las zonas en las que hay un exceso de evaporación con respecto a la precipitación, donde $E - P > 0$, son regiones fuente de humedad en las que los flujos de humedad atmosférica divergen, de lo contrario flujos de humedad convergen son regiones sumidero de humedad.

2.3.6 Identificación y Caracterización de los Ríos Atmosféricos

Un río atmosférico (AR) es una banda larga y estrecha de transporte de humedad concentrada en la atmósfera, responsable de llevar grandes cantidades de vapor de agua desde los trópicos hacia latitudes más altas. Estos fenómenos pueden producir eventos de precipitación intensa cuando interactúan con la tierra, provocando inundaciones, deslizamientos de tierra y otros impactos hidrológicos. Para identificar un río atmosférico, se siguen los siguientes pasos:

1. Obtener datos atmosféricos: Se reúnen datos atmosféricos, como humedad específica, campos de viento (tanto zonal como meridional) y altura geopotencial en diferentes niveles de presión. Conjuntos de datos de reanálisis como ERA5, MERRA-2 o NCEP/NCAR son fuentes útiles para esta información.
2. Calcular el Transporte Integrado de Vapor (IVT): Se calcula el IVT integrando el producto de la humedad específica y los vectores de viento horizontal en toda la columna atmosférica, típicamente desde 1000 hPa hasta 300 hPa. Esto proporcionará una medida del transporte horizontal de humedad en la atmósfera.

3. Identificar valores altos de IVT: Se analiza el campo de IVT y se localizan las regiones con valores altos de IVT, que indican un transporte intenso de humedad. El umbral para valores altos de IVT puede variar según la región y los objetivos del estudio. Por ejemplo, un umbral común para la costa oeste de América del Norte es de 250 kg/m*s.
4. Examinar la continuidad espacial: Se verifica la continuidad espacial en las regiones de IVT alto, asegurándose de que estas áreas formen estructuras alargadas y coherentes que se asemejen a ríos en la atmósfera.
5. Analizar la persistencia temporal: Se investiga la persistencia temporal de los ríos atmosféricos identificados. Los AR generalmente duran varias horas hasta unos días, por lo que es esencial rastrear su desarrollo y movimiento a lo largo del tiempo.
6. Estudiar la estructura vertical: Se examina la estructura vertical del transporte de humedad dentro de los ARs identificados. Los ARs suelen presentar una estructura bien definida, con un chorro de bajo nivel que transporta humedad desde los trópicos.
7. Investigar las condiciones meteorológicas asociadas: Se analizan las condiciones meteorológicas relacionadas con los ARs, como la precipitación y la nubosidad. Los ARs a menudo están asociados con eventos de precipitación intensa cuando llegan a tierra.

Siguiendo estos pasos, se pueden identificar los ríos atmosféricos y estudiar sus características, impactos y posibles cambios en el clima.

La identificación de las masas de humedad cuya connotación de magnitud y tamaño permite identificar importantes corrientes de vapor de agua que reflejan la contribución de regiones fuentes y sumidero, estableciendo la interconexión del sistema atmosférico dinámico. Para ello se tendrá en cuenta los siguientes criterios:

Establecer Umbrales de segmentación: Establecer un umbral para los ríos atmosféricos (ARs) en la región Amazónica implica considerar las características climáticas e hidrológicas únicas del área. Para esto se analizaron procedimientos y se decidió realizar estos pasos:

Analizar la climatología: Se comienza analizando la climatología de la región amazónica, centrándose específicamente en la media y la variabilidad del IVT (Transporte Integrado de Vapor). Comprender la climatología regional ayudará a determinar un umbral adecuado para los ARs en el área.

Seleccionar un umbral basado en percentiles: Un enfoque común es seleccionar un umbral basado en un cierto percentil de valores de IVT. Por ejemplo, elegir el percentil 85 o 90 puede proporcionar una estimación conservadora de ARs. Sin embargo, el percentil específico dependerá de los objetivos de su estudio y las características de la región amazónica.

Considerar la estacionalidad: La región amazónica tiene una estación seca y húmeda distintas. Al establecer un umbral, es esencial considerar la estacionalidad y ajustar el umbral en consecuencia. Es posible que se necesite un umbral más alto durante la temporada de lluvias, cuando hay un mayor transporte de humedad y eventos de precipitación.

Evaluar los métodos de segmentación: Se pueden utilizar varios métodos de segmentación para identificar ARs, como métodos basados en contornos, técnicas de procesamiento de imágenes (por ejemplo, etiquetado de componentes conectados) o algoritmos de aprendizaje automático. La elección del método de segmentación debe considerar las características espaciales y temporales de la región amazónica, así como los objetivos de su estudio. Aquí se usará la información de experiencias en las publicaciones usadas para las dinámicas de lluvias y de sequías presentadas en Corzo et al. 2011.

Evaluar los impactos de los ARs: Se investigan los impactos hidrológicos y meteorológicos asociados con los ARs en la región amazónica, como precipitaciones extremas, inundaciones y deslizamientos de tierra. Esta información puede ayudar a refinar el umbral y el enfoque de segmentación, asegurando que capture los eventos más relevantes.

Validar el umbral y la segmentación: Se valida el umbral y la segmentación comparando los ARs identificados con eventos de precipitación observados y otros fenómenos meteorológicos relevantes en la región. Este proceso de validación ayudará a garantizar que el umbral y el método de segmentación elegidos sean adecuados para capturar ARs en la región amazónica.

Al considerar la climatología regional, la estacionalidad y los impactos de los ARs, se puede determinar un umbral adecuado y un método de segmentación para identificar ríos atmosféricos

en la región Amazónica. Los métodos elegidos deben validarse con datos observados para garantizar su precisión y relevancia en las características hidrológicas y meteorológicas de la región.

Delimitación: Durante el periodo de identificación del Río Atmosférico se usaran intervalos de tiempo a través del campo IVT (Vapor integrado transportado) cada 6 horas (0000, 0600, 1200 y 1800 UTC), se empleará el percentil 85% para segmentar eventos que por magnitud igualen o excedan dicha condición, y por forma longitud superior a 1000 km. Dichos parámetros son sujetos a evaluación dependiendo de la influencia de factores dinámicos que alteren la condición de transporte como ZCIT.

Cálculo de características morfológicas del Río Atmosférico:

Para calcular las características de un río atmosférico (AR, por sus siglas en inglés), es necesario analizar diversas variables meteorológicas y características espaciales. Aquí están los pasos para estimar las características clave de los AR:

Recolección de datos: Se usarán los datos meteorológicos obtenidos de ERA5. En esto los valores del transporte de vapor de agua integrado verticalmente (IVT) o el vapor de agua integrado (I WV), los componentes del viento (u y v) y la precipitación serán incluidos en una base de datos local.

Calcular IVT: Calcule el IVT utilizando los componentes horizontales del viento (u y v) y la humedad específica (q) en diferentes niveles de presión:

$$IVT_u = \int (u * q) dp$$

$$IVT_v = \int (v * q) dp$$

$$IVT = \sqrt{IVT_u^2 + IVT_v^2}$$

Identificar ríos voladores (AR): Utilizando un umbral predefinido, en este caso se usará el percentil 85 o 90 de los valores de IVT, y una extensión espacial definida por las regiones donde el IVT supera el umbral y cumple con los criterios espaciales.

Segmentación: Se aplican técnicas de segmentación, como métodos basados en contornos, técnicas de procesamiento de imágenes (por ejemplo, etiquetado de componentes conectados) o algoritmos de aprendizaje automático para identificar y delinear AR individuales.

Calcular características de AR: Para cada AR identificado, se calculan características clave como:

- **Longitud y anchura:** Se miden las dimensiones espaciales del AR utilizando los límites identificados.
- **Orientación:** Se determina el ángulo entre el eje principal del AR y una dirección de referencia (por ejemplo, el norte).
- **Transporte de vapor de agua integrado (IVT):** Se calcula el IVT promedio dentro del AR.
- **Vapor de agua integrado (IWV):** Calcule el IWV promedio dentro del AR.
- **Componentes del viento:** Calcule los componentes promedio del viento (u y v) dentro del AR.
- **Precipitación:** Analice las tasas de precipitación dentro y aguas abajo del AR.
- **Seguimiento de AR a lo largo del tiempo:** Realice un seguimiento de la evolución de los AR analizando sus características a lo largo del tiempo. Esto proporcionará información sobre su ciclo de vida, duración y movimiento.
- **Analizar impactos de AR:** Se investigan los impactos hidrológicos y meteorológicos asociados con los AR, como precipitaciones extremas, inundaciones y deslizamientos de tierra. Esta información ayudará a comprender las implicaciones de los AR en las regiones afectadas.

Siguiendo estos pasos, se puede calcular las características de los ríos atmosféricos y obtener información sobre su estructura, comportamiento y posibles impactos en el medio ambiente y la

sociedad. Las métricas geométricas permiten identificar rasgos similares entre los eventos observados, propiedades como Área, Longitud, Centroides y el análisis espaciotemporal permite generar un diagnóstico del Rio Atmosférico. Donde posteriormente mediante la unión consecutiva de los centroides, se extrae su trayectoria, orientación (θ) y dirección.

$$\theta = a \tan^2(IVTu, IVTv) \quad \text{Ecuación 2.7}$$

2.3.7 Identificación de las Trayectorias de Humedad y Viento (Retro trayectorias)

El concepto de la retro trayectoria se ha introducido desde el punto de vista de medición atmosférica para cuantificar la distribución y el alcance del intercambio biosfera-atmósfera en sus alrededores, lo que contribuye a la variabilidad de las concentraciones de compuestos impulsados por los vientos (Gloor et al., 2001). Sin embargo, también tiene la posibilidad de mejorar la descripción de los patrones de movimiento de masas de aire en un contexto dinámico multipartícula. Esto, es posible mediante las aplicaciones de modelos de descripción de trayectoria lagrangiano (Ecuación 2.8) propuesta por (Stohl 1996) empleando los datos del viento y esquemas numéricos para su implementación en sistemas de parcelas o grillas.

En un modelo lagrangiano, las concentraciones de aire se calculan sumando pequeños elementos de aire de volumen "cero", denominados "partículas", que son arrastrados por una celda de la cuadrícula o grilla a lo largo de su trayectoria.

$$X(t - 1) = X(t) + 0.5\Delta t * V(t) \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Este, incluye una aproximación tri dimensional para describir la posición de la partícula $X(x, y, z, t)$ (latitud, longitud, altitud) en función de la cantidad de materia evaluada en las fronteras de la región deseada. Este enfoque asume que la atmosfera esta homogéneamente dividida en elementos finitos de masa constante (Stohl and James, 2004). El movimiento de la partícula es interpolado espacial y temporalmente como se puede ver en la figura a continuación.

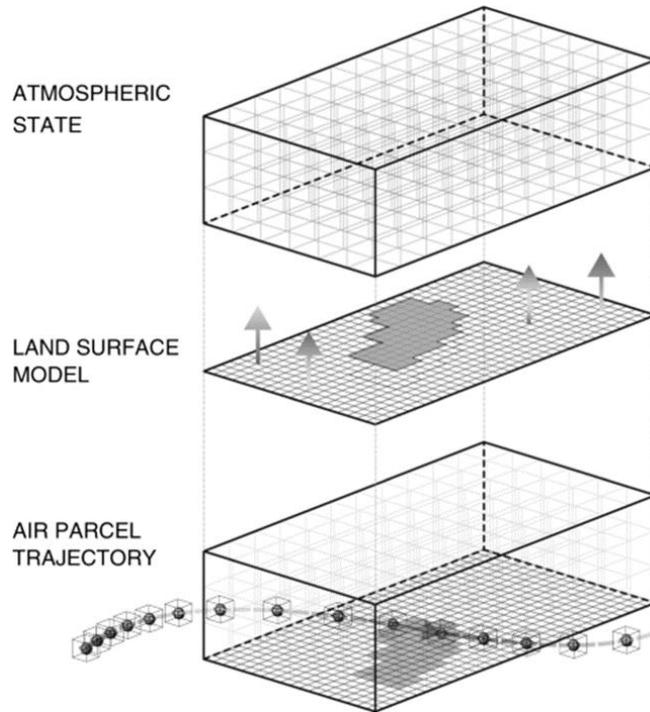


Figura 2.8. Aplicación de modelo de retro trayectoria lagrangiano acoplando condiciones de terreno (Precipitación Evaporación) y atmosféricas (Viento, Humedad, Presión)

Fuente: Retomado de (Cosgrove, A 2018)

Para rastrear la humedad hacia delante o hacia atrás desde una región determinada, que puede tener cualquier forma y escala (celda de cuadrícula, cuenca, región), suponemos que la composición de la humedad dentro de la superficie y la atmósfera para cada celda de cuadrícula sigue siendo la misma. Esto implica que, en cada cuadrícula, la fracción marcada de precipitación es linealmente proporcional a la fracción marcada de evapotranspiración y a la fracción marcada de humedad transportada.

2.3.8 Análisis Fenómenos Climáticos Globales

Una vez determinada la caracterización de los flujos de humedad, aire atmosférico, se desarrolla un análisis holístico de la relación de la circulación normal con patrones globales como Zona de confluencia Intertropical, Fenómeno del Niño y Niña. Evaluando así su relación, tendencias y afectaciones en los aportes de humedad del sistema amazónico a Chingaza.

Finalmente, se estructurarán modelos de previsión y pronóstico para evaluar escenarios de interés.

2.4 Revisión de literatura del sistema Chingaza

La revisión bibliográfica se basa en la búsqueda de estudios científicos realizados sobre el Parque Nacional Natural Chingaza (PNN–Chingaza). Este PNN se encuentra ubicado en la cordillera oriental de los Andes, al noreste de Bogotá y está conformado por 11 municipios, 7 de Cundinamarca: Fómeque, Choachí, La Calera, Guasca, Junín, Gachalá y Medina, y 4 municipios del Meta: San Juanito, El Calvario, Restrepo y Cumaral. Sus ecosistemas predominantes son los bosques altoandinos, subandinos y páramos.

Para la revisión bibliográfica y metodológica de estudios previos sobre el PNN Chingaza y el sistema de abastecimiento de agua para la ciudad de Bogotá y los municipios aledaños, se realizó una búsqueda en las siguientes bases de datos científicas: Scopus, Scielo y Google Academic. Para cada una de las bases de datos se utilizaron las siguientes palabras clave: *Chingaza*, *Sistema de abastecimiento EAAB* y *Páramos andinos*. El periodo utilizado para la búsqueda se estableció entre los años 2000 y 2023. Utilizando combinaciones entre las palabras clave, en la base de datos Scopus se obtuvieron 42 documentos, en su gran mayoría artículos de investigación, Figura 2.9.

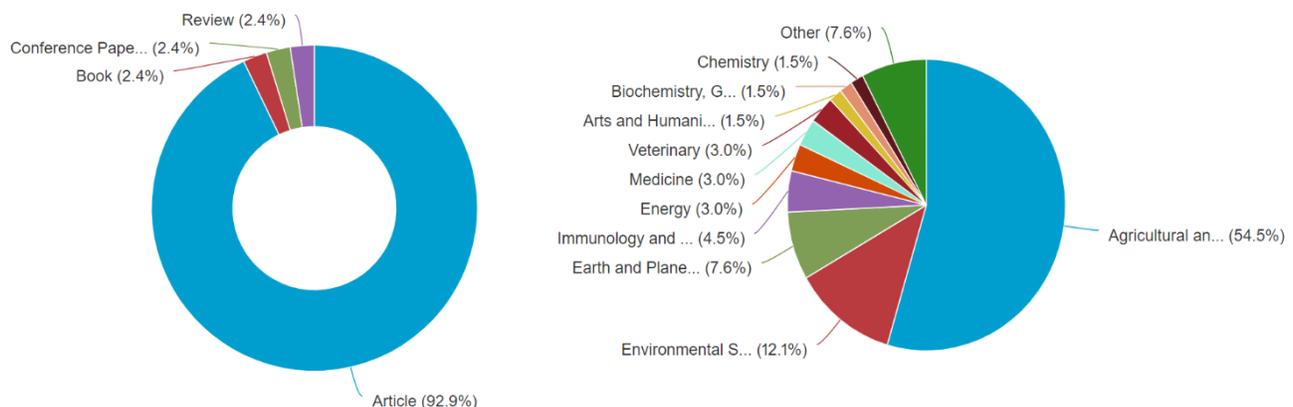


Figura 2.9: Resultados de búsqueda Scopus. Palabra clave: Chingaza

Para realizar un enfoque adecuado de los artículos se descartaron aquellos categorizados en áreas del conocimiento como química, veterinaria, medicina, inmunología, etc. El mismo procedimiento se utilizó para la base de datos Scielo–Colombia y Google Academics donde se seleccionaron documentos de interés entre artículos, reportes y tesis a nivel de maestría y doctorado.

Establecidos los filtros descritos, se identificaron artículos científicos que tuviesen relación con estudios donde se analizaran condiciones hidrológicas, climatológicas y de cambio climático para la zona de interés. Así, la revisión total se concentró en los artículos de investigación que se resumen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Artículos de investigación y/o reportes clasificados para el presente estudio

Año	Título	Autores	Revista
2020	Future climate change renders unsuitable conditions for paramo ecosystems in Colombia.	Cresso, M., Clerici, N., Sanchez, A., Jaramillo, F.	Sustainability (Switzerland) 12(20),8373, pp. 1-13
2017	Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes.	Cárdenas, M.F., Tobón, C., Buytaert, W.	Hydrological Processes 31(24), pp. 4440-4449
2016	Hydrological modelling with TOPMODEL of Chingaza paramo, Colombia.	Gil, E.G., Tobón, C.	Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín 69(2), pp. 7919-7933
2016	Ecohydrology of paramos in Colombia: vulnerability to climate change and land use	Cárdenas, M. F.	PhD. Thesis. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.
2011	Contrasting two catchments with hydrological modelling in the Guatiquia river basin, paramo Chingaza, Colombia	Jaramillo, R.	MSc. Thesis. University of Twente.

Fuente: elaboración propia

2.4.1 Resultados

Los artículos y documentos citados reportan las siguientes conclusiones científicas:

- Al analizar la tendencia y variabilidad de las condiciones hidrológicas y climáticas, no se evidencian cambios en los patrones identificables en los datos de precipitación anual. Por otra parte, es evidente un aumento de temperatura observado en la estación San Juanito a 1800 msnm. La media anual de la temperatura media diaria aumentó de

14.5 °C en 1994 a 17.0 °C en 2009, teniendo un potencial considerable impacto en los sistemas naturales y una evidencia de cambio climático sobre la zona de estudio, (Gil & Tobón, 2016a).

- Al analizar el cambio en la cobertura del suelo, no se observa ningún cambio significativo en el área de influencia del parque nacional Chingaza y otras reservas forestales. Esto en contraste con el resto de la cordillera de los Andes donde la deforestación y la pérdida de hábitat es un gran problema, (Jaramillo, 2011a).
- En dos de los estudios referenciados se utilizó el modelo hidrológico TOPMODEL en el que los caudales máximos simulados coincidieron con la mayoría de las series observadas, indicando que el modelo identifica correctamente la relación existente entre los eventos de precipitación y la escorrentía generada. No obstante, se resalta que existe un número considerable de lagunas y zonas de almacenamiento que dificultan los procesos de modelación, (Jaramillo, 2011a).
- El modelo hidrológico TOPMODEL fue aplicado en un estudio posterior al ecosistema de páramo en la cuenca del río Chucua. Nuevamente el modelo hidrológico logró representar adecuadamente la relación entre lluvia y caudal, ya que el conjunto de parámetros obtenidos tuvo una explicación física y generaron flujos de predicción con una alta eficiencia (coeficientes Nash–Sutcliffe mayores a 0.75), (Gil & Tobón, 2016a).
- En uno de los estudios referenciados se demostró que los valores de los parámetros del modelo se mantienen relativamente estables en el tiempo, e indican que la descarga de agua desde el subsuelo es el proceso dominante en este tipo de cuencas, (Gil & Tobón, 2016a).
- Uno de los estudios presentados genera aportes en el entendimiento de los aportes de agua estimados a través de la precipitación oculta en los páramos colombianos estudiados oscilaron entre 120 y 212 mm/año; sin embargo, los patrones temporales y espaciales son muy variables, no sólo entre páramos sino también dentro de los sitios en cada páramo. Los resultados aquí indican que la precipitación oculta en estos ecosistemas tropicales de alta montaña es un fenómeno complejo, variable y difícil de entender, (Cárdenas et al., 2017a).

Este resumen se puede concluir que el resultado del análisis de las tendencias y variabilidades de las condiciones hidrológicas y climáticas en la zona de estudio evidenció un aumento en la temperatura media diaria, pero sin cambios significativos en los patrones de precipitación y cobertura del suelo (Gil & Tobón, 2016b). La modelación hidrológica con TOPMODEL demostró ser eficiente, aunque con desafíos debido a la presencia de lagunas y zonas de almacenamiento (Jaramillo, 2011b). La precipitación oculta en los páramos colombianos es un fenómeno complejo y difícil de entender (Cárdenas et al., 2017b). En resumen, aunque no se observaron cambios significativos en la precipitación y la cobertura del suelo, el aumento en la temperatura y la complejidad de los procesos hidrológicos enfatizan la importancia de continuar investigando y monitoreando estos fenómenos para mejorar la adaptación al cambio climático y la gestión de los recursos hídricos en la región.

3 Análisis de información disponible

En el presente capítulo se hace un resumen y caracterización de la información climática e hidrológica recopilada para el desarrollo del proyecto. Se hace énfasis en los distintos datos globales que existen y han sido desarrollados con fines de análisis climáticos mundiales, así como las bases de datos locales y regionales de mediciones terrestres que sirven de sustento para la estimación de la incertidumbre.

3.1 Información hidroclimatológica

3.1.1 Datos globales

Con el fin de realizar la identificación y caracterización de los patrones dinámicos atmosféricos relacionados con el transporte de humedad y su teleconectividad al sistema Amazonas-Chingaza, información de percepción remota como información en terreno (estaciones locales) son tenidas en cuenta para dicho fin.

La información y calidad de la misma es presentada a continuación:

3.1.2 Datos ERA5 (ECMWF)

A continuación, se presenta una descripción de los datos ECMWF-ERA5 que serán empleados a lo largo de la presente consultoría. El periodo de descarga de datos corresponde al comprendido entre el 01/01/1980–31/12/2022 a resoluciones horarias y mensuales. Actualmente, los productos ERA se clasifican en las siguientes familias de datos:

- **ERA5** es una base de datos de reanálisis (combinación de datos satelitales incorporados en un modelo meteorológico y validaciones usando información terrestre) desde 1940 a una resolución espacial de 0.25°. Esta base de datos contiene observaciones a nivel atmosférico, así como cerca de la superficie terrestre. El modelo atmosférico ERA5 se combina con un modelo de superficie terrestre y un modelo de olas.

- **ERA5.1** es una repetición de ERA5 para los años 2000 a 2006, que se produjo para mejorar el sesgo estratosférico inferior evidente en ERA5 durante este período. El comportamiento de ERA5 en la mayor parte de la troposfera es similar al de ERA5.1.
- **ERA5–Land** es un conjunto de datos sobre la superficie terrestre desde 1950 producido con una resolución más alta (0.1°) que ERA5 y forzado por los parámetros atmosféricos de ERA5 con corrección de lapso de tiempo.

Para el caso de la presente consultoría se utilizarán las familias ERA5 y ERA5–Land. Estas familias de datos contienen una clasificación secundaria en relación con la resolución temporal y para distintos niveles de presión en la troposfera (se referencian en inglés):

- ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present
- ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present
- ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present
- ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1940 to present

Para la familia ERA5–Land se incluyen los siguientes sets de datos:

- ERA5-Land hourly data from 1950 to present
- ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present

Debido a que los datos se presentan únicamente a resolución horaria y mensual se hace necesario realizar agrupaciones para la representación a escala diaria. Para cada uno de los sets de datos se seleccionaron las variables de interés. La información se resume en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1 Bases de datos ERA5 y ERA5–Land

Base de datos	ERA5 hourly data on pressure levels
Sistema de proyección	Grilla latitud–longitud
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	0.25° x 0.25° (Reanálisis)
Cobertura vertical	1000 hPa a 1 hPa
Resolución vertical	37 niveles de presión atmosférica
Cobertura temporal	1940 al presente
Resolución temporal	Horaria

Base de datos	ERA5 hourly data on single levels
Sistema de proyección	Grilla latitud–longitud
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	0.25° x 0.25° (Reanálisis)
Cobertura temporal	1940 al presente
Resolución temporal	Horaria

Base de datos	ERA5 monthly averaged data on pressure levels
Sistema de proyección	Grilla latitud–longitud
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	0.25° x 0.25° (Reanálisis)
Cobertura vertical	1000 hPa a 1 hPa
Resolución vertical	37 niveles de presión atmosférica
Cobertura temporal	1940 al presente
Resolución temporal	Mensual

Base de datos	ERA5 monthly averaged data on single levels
Sistema de proyección	Grilla latitud–longitud
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	0.25° x 0.25° (Reanálisis)
Cobertura temporal	1940 al presente
Resolución temporal	Mensual

Base de datos	ERA5–Land hourly data
Sistema de proyección	Grilla latitud–longitud
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	0.1° x 0.1° (Reanálisis)
Cobertura vertical	Hasta 2 m encima de la superficie
Cobertura temporal	1950 al presente
Resolución temporal	Horaria

Base de datos	ERA5–Land monthly averaged data
Sistema de proyección	Grilla latitud–longitud
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	0.1° x 0.1° (Reanálisis)
Cobertura vertical	Hasta 2 m encima de la superficie
Cobertura temporal	1950 al presente
Resolución temporal	Horaria

Tabla 3.2 Datos ECMWF – ERA5

Nivel	Variable	Unidad	Descripción	Resolución Espacial (Grados)	Resolución Temporal
Único (Single)	Precipitación Total (<i>total precipitation</i>)	m	Este parámetro no incluye la niebla, el rocío ni las precipitaciones que se evaporan en la atmósfera antes de llegar a la superficie de la Tierra. Este parámetro se acumula durante un periodo de tiempo determinado que depende de los datos extraídos. Para el reanálisis promediado mensualmente y los miembros del ensemble promediados mensualmente, el periodo de acumulación es de 1 día	0.25	Horaria/Mensual
Único (Single)	Evaporación Total (<i>evaporation</i>)	m	Este parámetro es la cantidad acumulada de agua que se ha evaporado de la superficie de la Tierra, incluida una representación simplificada de la transpiración (de la vegetación), en vapor en el aire por encima. Este parámetro se acumula durante un periodo de tiempo determinado que depende de los datos extraídos.	0.25	Horaria/Mensual
Único (Single)	Escorrentía (<i>Runoff</i>)	m	Parte del agua procedente de las precipitaciones, del deshielo o de la profundidad del suelo se queda almacenada en el suelo. En caso contrario, el agua se escurre, bien por la superficie (escorrentía superficial), o por debajo del suelo (escorrentía subsuperficial). La suma de ambas se denomina escorrentía.	0.25	Horaria/Mensual

Nivel	Variable	Unidad	Descripción	Resolución Espacial (Grados)	Resolución Temporal
Único (<i>Single</i>)	Temperatura (<i>2m temperature</i>)	K	Este parámetro es la temperatura del aire a 2 m por encima de la superficie de la tierra, el mar o las aguas interiores. La temperatura a 2m se calcula interpolando entre el nivel más bajo del modelo y la superficie terrestre, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas.	0.25	Horaria/Mensual
Niveles de presión (<i>Pressure levels</i>) 100 hPa – 1000 hPa	Contenido de vapor de agua en columna			0.25	Horaria/Mensual
Niveles de Presión (<i>Pressure levels</i>) 100 hPa – 1000 hPa	Humedad Especifica (<i>specific humidity</i>)	kg/kg	Este parámetro es la masa de vapor de agua por kilogramo de aire húmedo. La masa total de aire húmedo es la suma del aire seco, el vapor de agua, el líquido de las nubes, el hielo de las nubes, la lluvia y la nieve caída.	0.25	Horaria/Mensual
Niveles de Presión (<i>Pressure levels</i>) 100 hPa – 1000 hPa	Viento Componente Meridional (<i>U-component of wind</i>)	m/s	Este parámetro es la componente Norte del viento. Es la velocidad horizontal del aire que se desplaza hacia el norte. Un signo negativo indica que el aire se desplaza hacia el Sur.	0.25	Horaria/Mensual

Nivel	Variable	Unidad	Descripción	Resolución Espacial (Grados)	Resolución Temporal
Niveles de presión (<i>Pressure levels</i>) 100 hPa – 1000 hPa	Viento Componente Zonal (<i>V-component of wind</i>)	m/s	Este parámetro es la componente Este del viento. Es la velocidad horizontal del aire que se desplaza hacia el Este. Un signo negativo indica que el aire se desplaza hacia el Oeste.	0.25	Horaria/Mensual
Niveles de presión (<i>Pressure levels</i>) 100 hPa – 1000 hPa	Viento Componente Vertical (<i>vertical velocity</i>)	m/s	Este parámetro es la velocidad del movimiento del aire en dirección ascendente o descendente. La velocidad vertical puede ser útil para comprender la dinámica a gran escala de la atmósfera, incluidas las zonas de movimiento ascendente/ascenso (valores negativos) y de movimiento descendente/subsidencia (valores positivos).	0.25	Horaria/Mensual

Tabla 3.3 Datos ECMWF – ERA5 Land

Nivel	Variable	Unidad	Descripción	Resolución Espacial (Grados)	Resolución Temporal
Único (<i>Single</i>)	Precipitación Total (<i>total precipitation</i>)	m	Este parámetro no incluye la niebla, el rocío ni las precipitaciones que se evaporan en la atmósfera antes de llegar a la superficie de la Tierra. Este parámetro se acumula durante un periodo de tiempo determinado que depende de los datos extraídos. Para el reanálisis promediado mensualmente y	0.10	Horaria/Mensual

Nivel	Variable	Unidad	Descripción	Resolución Espacial (Grados)	Resolución Temporal
			los miembros del ensemble promediados mensualmente, el periodo de acumulación es de 1 día		
Único (Single)	Evaporación Total (<i>evaporation</i>)	m	Este parámetro es la cantidad acumulada de agua que se ha evaporado de la superficie de la Tierra, incluida una representación simplificada de la transpiración (de la vegetación), en vapor en el aire por encima. Este parámetro se acumula durante un periodo de tiempo determinado que depende de los datos extraídos.	0.10	Horaria/Mensual
Único (Single)	Evapotranspiración Potencial (<i>potential evapotranspiration</i>)	mm	La evapotranspiración potencial corresponde a la aplicación del modelo FAO–Penman Monteith utilizando los datos climatológicos reportados por ERA5–Land. Esta base de datos fue desarrollada por la Universidad de Bristol (UK) para el periodo 1981–2022.	0.10	Horaria/Diaria
Único (Single)	Escorrentía (<i>Runoff</i>)	m	Parte del agua procedente de las precipitaciones, del deshielo o de la profundidad del suelo se queda almacenada en el suelo. En caso contrario, el agua se escurre, bien por la superficie (escorrentía superficial), o por debajo del suelo (escorrentía subsuperficial). La suma de ambas se denomina escorrentía.	0.10	Horaria/Mensual
Único (Single)	Temperatura (<i>2m temperature</i>)	K	Este parámetro es la temperatura del aire a 2 m por encima de la superficie de la tierra, el mar o las aguas interiores. La temperatura a 2m se calcula interpolando	0.10	Horaria/Mensual

Nivel	Variable	Unidad	Descripción	Resolución Espacial (Grados)	Resolución Temporal
			entre el nivel más bajo del modelo y la superficie terrestre, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas.		

3.1.3 Datos Chingaza (EAAB)

En el presente numeral se especifican las principales bases de datos utilizadas para la caracterización hidroclimatológica del sistema de abastecimiento Chingaza. Para los análisis espaciales se determinó inicialmente la delimitación mostrada en la Figura 3.1.

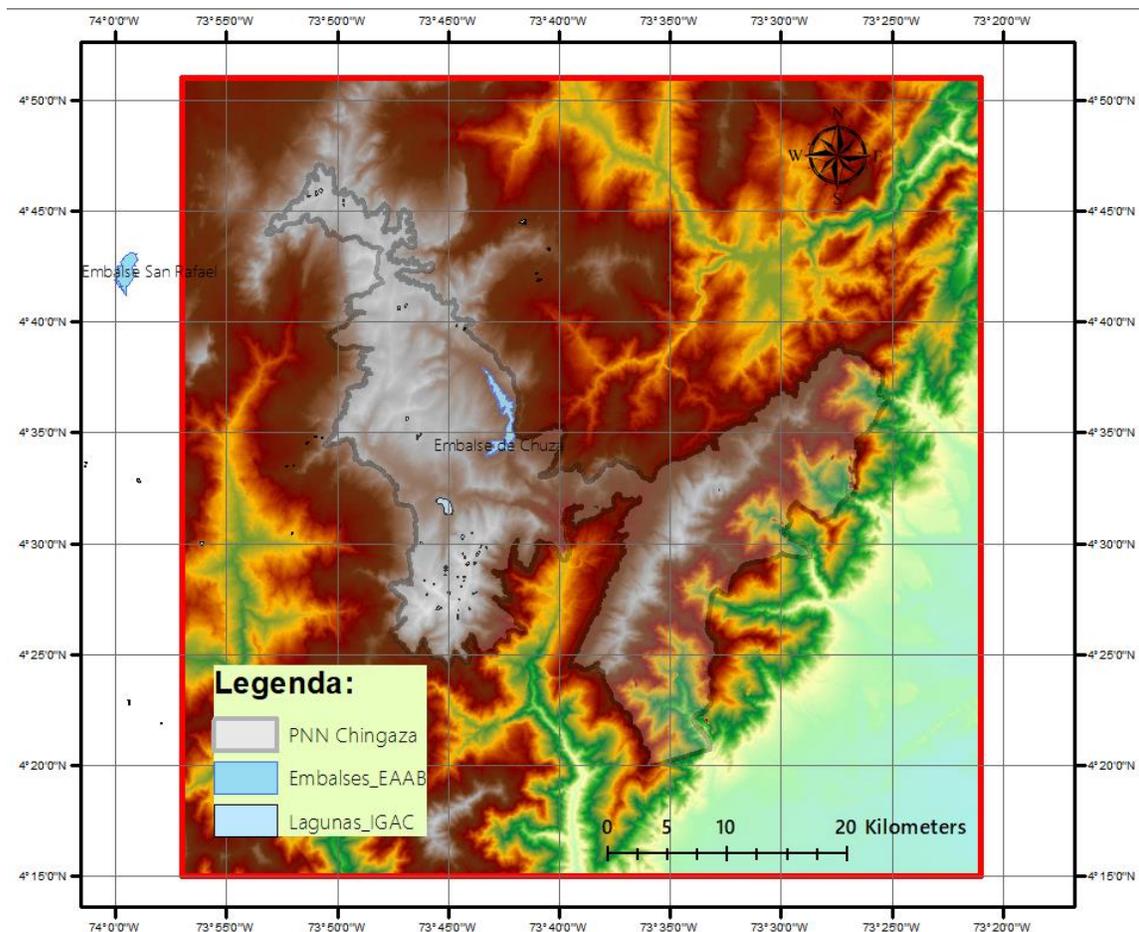


Figura 3.1. Delimitación de la zona de estudio en función del PNN Chingaza

Como se observa, la delimitación se determinó usando como referente el polígono perteneciente al Parque Nacional Natural Chingaza y tomando como base una resolución espacial de 0.1° con el fin de utilizar la base de datos ECMWF.

Esta base de datos es generada por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (CEPMPM, o ECMWF por sus siglas en inglés European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) la cual es una organización intergubernamental independiente integrada por 21 estados miembros europeos y 13 Estados asociados.

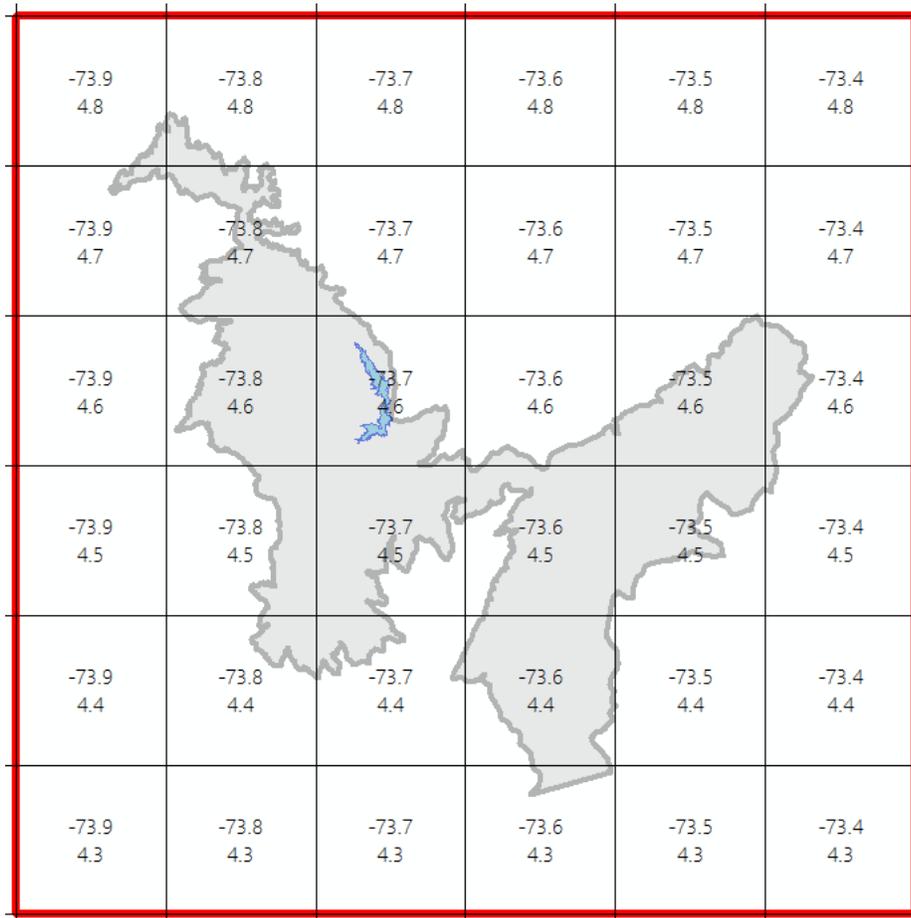


Figura 3.2. Cuadrante para análisis de datos climatológicos ERA5–Land

Una de las bases de datos generada por ECMWF es ERA5–Land la cual es un conjunto de datos de reanálisis que proporciona una visión coherente de la evolución de las variables terrestres durante varias décadas con una resolución mejorada en comparación con ERA5, Tabla 3.4. Para la zona de Chingaza se delimitó el cuadrante mostrado en la Figura 3.2.

Tabla 3.4. Descripción general del producto ERA5–Land

Tipo de datos:	Cuadrícula
Sistema de proyección:	Cuadrícula regular latitud–longitud
Cobertura horizontal:	Global
Resolución horizontal:	0.1° x 0.1°
Cobertura vertical:	2m por encima de la superficie del suelo
Temporalidad:	Desde enero de 1950 hasta el presente
Resolución temporal:	Horaria

Fuente: <https://cds.climate.copernicus.eu/>

La base de datos referenciada se utilizó para la descarga de información a resolución horaria (posteriormente agregada a escala diaria) e información mensual. A continuación, se describen las variables utilizadas:

- Precipitación total (m): corresponde a la cantidad total de agua (líquida y sólida) que cae sobre la superficie terrestre. Es la suma de la precipitación a gran escala (aquella generada por patrones climáticos a gran escala como valles y frentes fríos). En la base de datos se identifica como “*Total precipitation*”.
- Evaporación total (m): cantidad acumulada de agua que se ha evaporado de la superficie de la Tierra, incluida una representación simplificada de la transpiración (de la vegetación). En la base de datos se identifica como “*Total evaporation*”.
- Escorrentía superficial (m): Parte del agua de la lluvia o de la nieve que se derrite y no es almacenada en el suelo y escurre sobre la superficie. En la base de datos se identifica como “*Surface runoff*”.

Para el caso de la EAAB, la base de datos utilizada corresponde a los registros de precipitación y caudales diarios registrados por la EAAB–ESP para la zona de Chingaza, Figura 3.3.

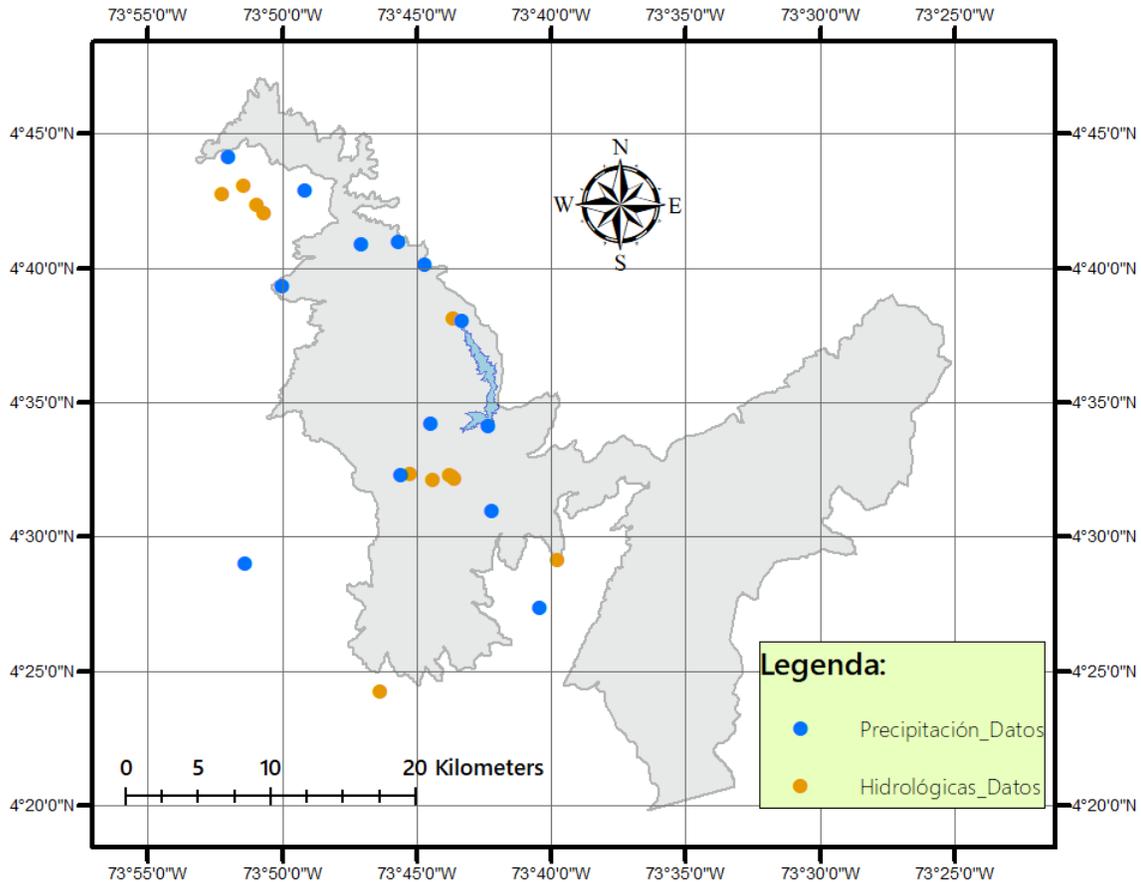


Figura 3.3. Estaciones de precipitación y caudales para la zona de Chingaza

Como se observa, se cuenta con un total de 14 estaciones con registros de precipitación y 12 con registros de caudal diario. Las principales características de las estaciones se resumen en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

Para los datos de precipitación se tomó como referencia el periodo comprendido entre 01/01/1952 hasta el 31/12/2022. Para los datos de caudal se tomó el periodo de referencia comprendido entre 01/01/1966 hasta el 31/12/2022. Para cada una de las series se realizó un análisis de homogeneidad, identificación de datos atípicos, identificación de periodos con datos ausentes (meses con registros inferiores a 20 datos), así como diversas inconsistencias en los registros como acumulación de precipitación, periodos con cambios significativos en la media y datos inconsistentes.

Tabla 3.5. Estaciones hidrológicas EAAB–ESP en el sistema Chingaza

Código	Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Municipio
3502708	QDA. Piedras Gordas – Pozo 3	4.72	-73.86	2950	La Calera
3502726	QDA. Cortadera – Pozo 1	4.70	-73.84	2962	La Calera
3502727	QDA. Horqueta – Pozo 4	4.71	-73.87	2980	La Calera
3502728	QDA. Palacios – Pozo 2	4.71	-73.85	3005	La Calera
3502745	R. Sta. Barbara – La Escandalosa	4.40	-73.77	2250	Fómeque
3503701	R. La Playa – Boquerón	4.54	-73.73	3140	Fómeque
3503704	R. Guatiquía – San José	4.54	-73.75	3180	Fómeque
3503710	R. Guatiquía – San Luis	4.64	-73.73	2950	Fómeque
3503716	R. Guatiquía – Leticia	4.54	-73.74	3030	Fómeque
3503047	R. Guatiquía – El Whisky	4.49	-73.66	NA	Fómeque
3503099	R. Guatiquía – Canal Caudal Ecológico	4.54	-73.73	NA	Fómeque
3503702	R. Chuza – Monterredondo	4.54	-73.73	2990	Junín

Fuente: SIG EAAB–ESP

Tabla 3.6. Estaciones de precipitación EAAB–ESP en el sistema Chingaza

Código	Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Municipio
2120128	Palacios Guasca	4.71	-73.82	3760	La Calera
3502038	Laguna Marranos	4.66	-73.83	3090	La Calera
3502040	Palacios El Angulo	4.74	-73.87	3500	La Calera
3503012	Cuchilla Golillas	4.57	-73.74	3350	Junín
3503013	Chingaza Rionegro	4.48	-73.86	3450	Fómeque
3503014	Chuza Campamento	4.63	-73.72	3100	Junín
3503018	Laguna Seca	4.68	-73.78	3620	Fómeque
3503035	San José	4.52	-73.70	3463	Fómeque
3503510	Chingaza Campamento	4.54	-73.76	3250	Fómeque
3503511	Chuza Presa Golillas	4.57	-73.71	3008	Junín
3503512	San Juanito Meta	4.46	-73.67	2020	Fómeque
3506040	Barajas	4.67	-73.74	3500	Junín
3506041	La Cascada	4.68	-73.76	2220	Junín

Fuente: SIG EAAB–ESP

Con el fin de caracterizar los procesos lluvia–escorrentía que se presentan en la zona de estudio se establecieron sectores hidrológicos que representan un interés particular para la operación del sistema de abastecimiento.

El primer sector identificado corresponde a los aportes directos de agua provenientes del río Chuza al embalse de Chuza, Figura 3.4. Este sector cuenta con medición directa de las afluencias en la estación Monterredondo, Figura 3.5. Esta estación cuenta con registros desde el año 1966

con una media histórica de 3.95 m³/s. La estación cuenta con dos periodos sin registro entre 1970–1983 y entre 1988–1990.

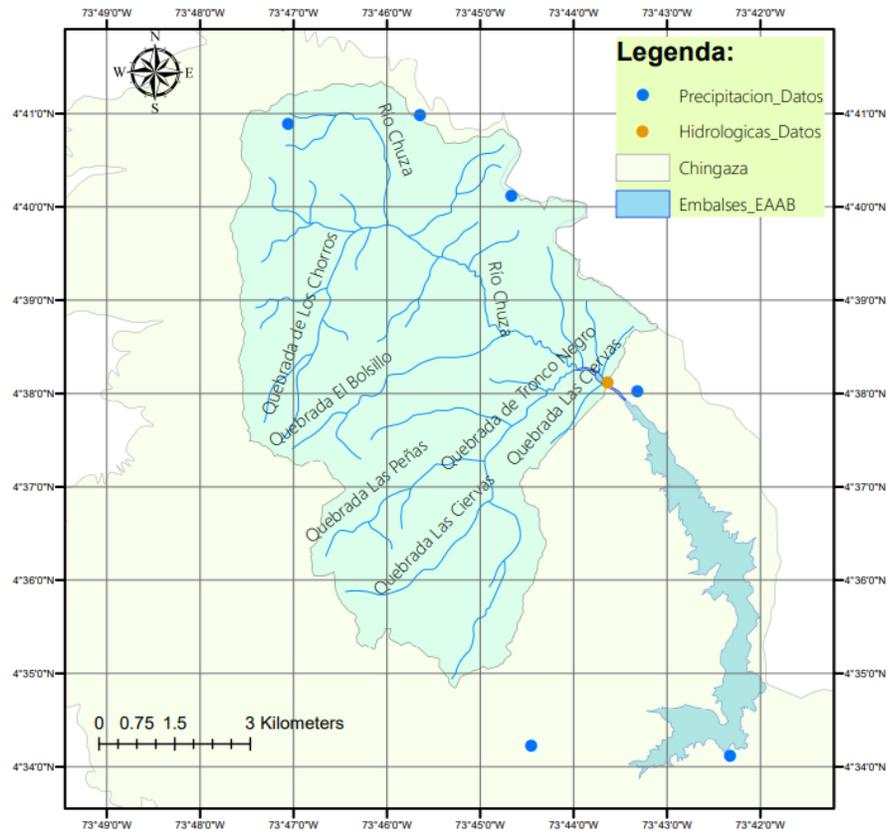


Figura 3.4. Sector río Chuza

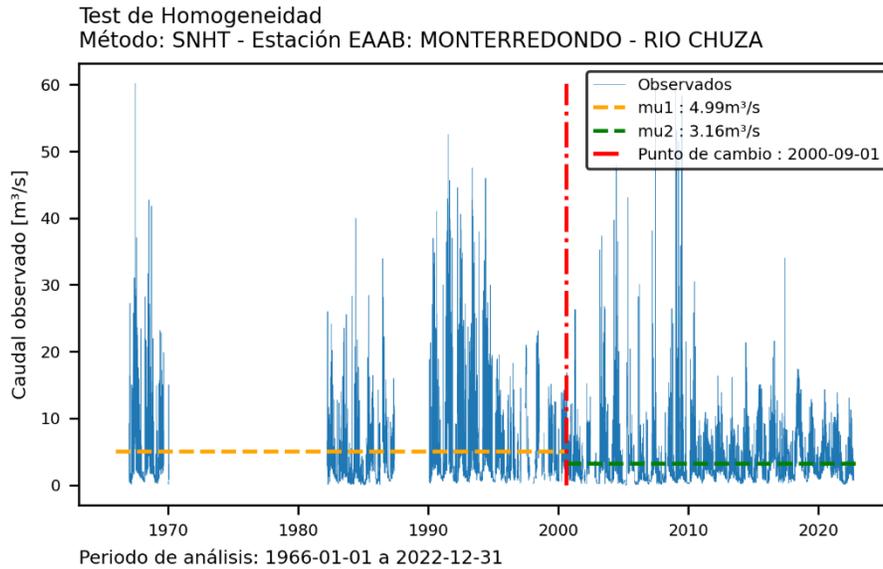


Figura 3.5. Registro de caudales – estación Monterredondo de la EAAB

Así mismo, este sector hidrológico cuenta con registros de precipitación en su parte alta con las estaciones Laguna Seca (3503018), La Cascada (3506041), Barajas (3506040) y Chuza Campamento (3503014). Sin embargo, por problemas de consistencia en las series se consideró la estación Chuza Campamento como representativa para la caracterización de la precipitación, Figura 3.6.

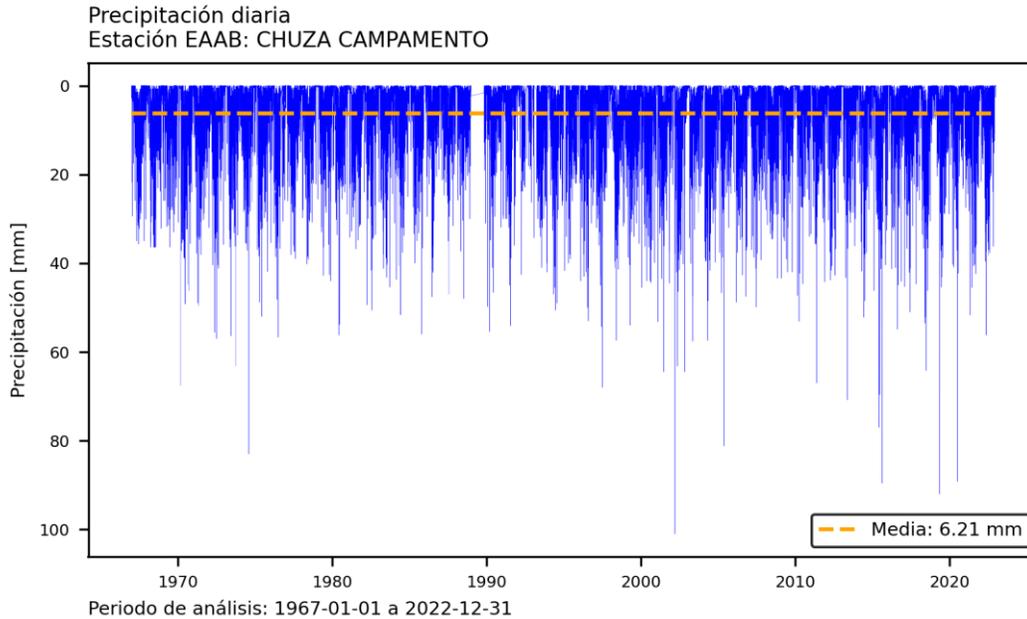


Figura 3.6. Registro de precipitación – estación Chuza Campamento de la EAAB

El segundo sector corresponde a los aportes de las quebradas Cortadera, Palacio, Piedras Gordas y Horqueta, Figura 3.7. Estos aportes se generan de manera directa sobre el túnel que conecta el embalse de Chuza con el embalse San Rafael donde se ubica la planta de tratamiento Francisco Wiesner.

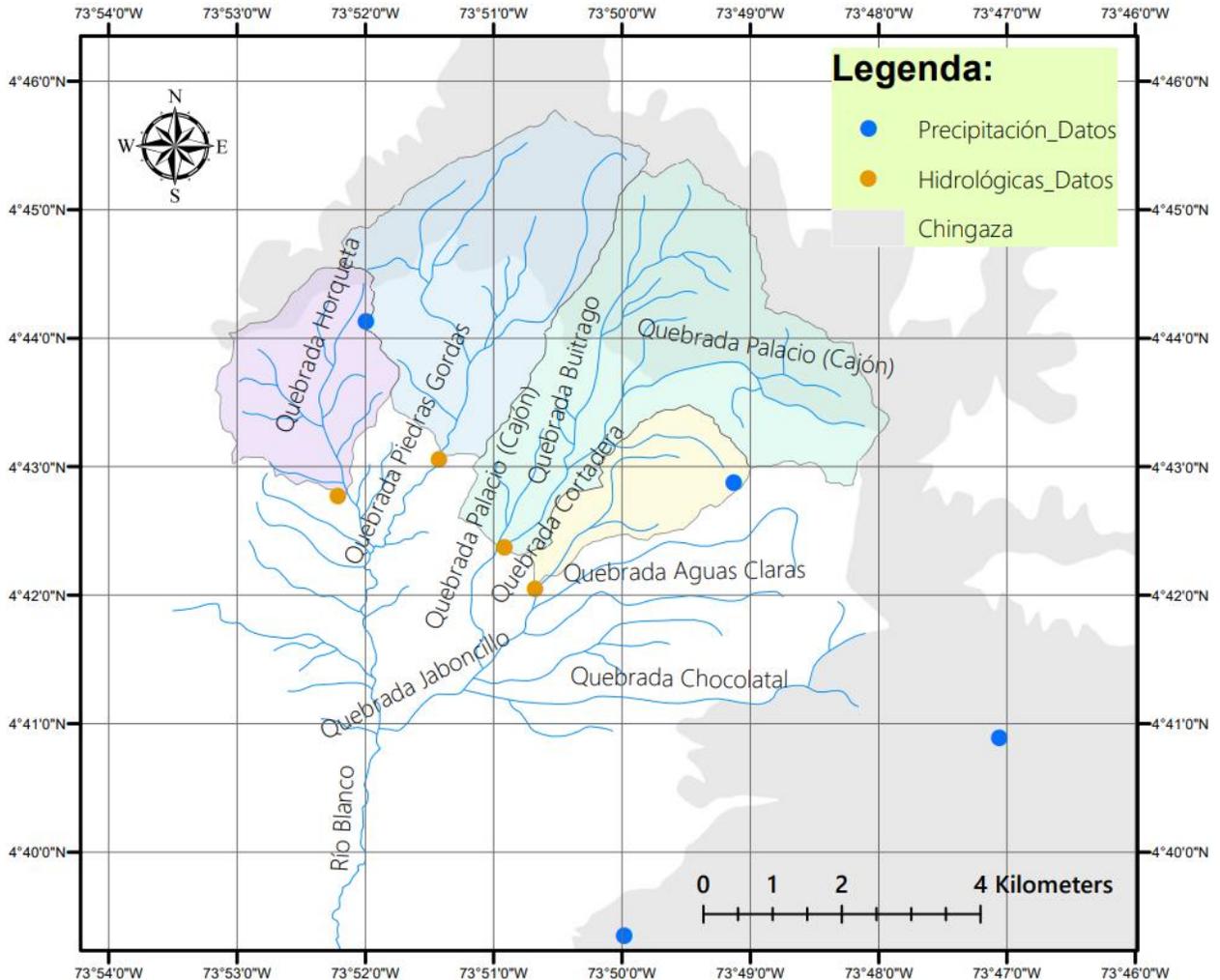


Figura 3.7. Sector quebradas

Este segundo sector analizado se encuentra controlado a través de la medición de caudal en cada una de las quebradas aportantes al sistema, Figura 3.8 a Figura 3.11. Así mismo, se cuenta con registros de precipitación provenientes de las estaciones Palacios El Angulo (3502040) y Palacios Guasca (2120128) ubicadas en la parte alta de la cuenca sobre la quebrada Horquetas y Cortadera respectivamente.

Test de Homogeneidad
Método: SNHT - Estación EAAB: POZO 1 - QDA. CORTADERA

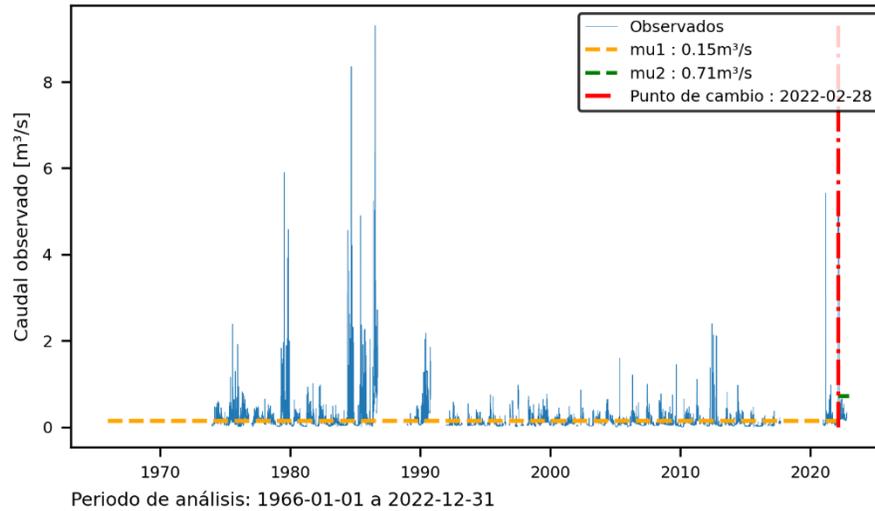


Figura 3.8. Registro de caudales quebrada Cortadera. Estación Pozo 1 – Qda. Cortadera de la EAAB.

En la quebrada Cortadera se presenta un periodo de registro entre los años 1975–1990 caracterizado por la presencia de caudales altos. Posterior al año 1990 hasta finales de 2018 se registra un cambio significativo en la media. La estación registra un caudal medio histórico de $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$, Figura 3.8.

Test de Homogeneidad
Método: SNHT - Estación EAAB: POZO 2 - QDA. PALACIOS

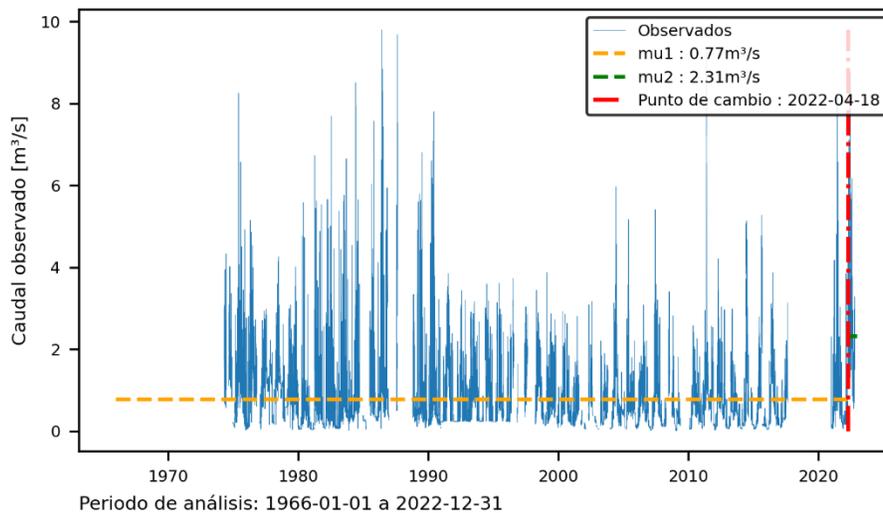


Figura 3.9. Registro de caudales quebrada Palacios. Estación Pozo 2 – Qda. Palacios de la EAAB

Para la estación ubicada sobre la quebrada Palacios se presenta un caudal medio histórico de $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$ con un periodo consistente de registros en el periodo 1975–2018, Figura 3.9.

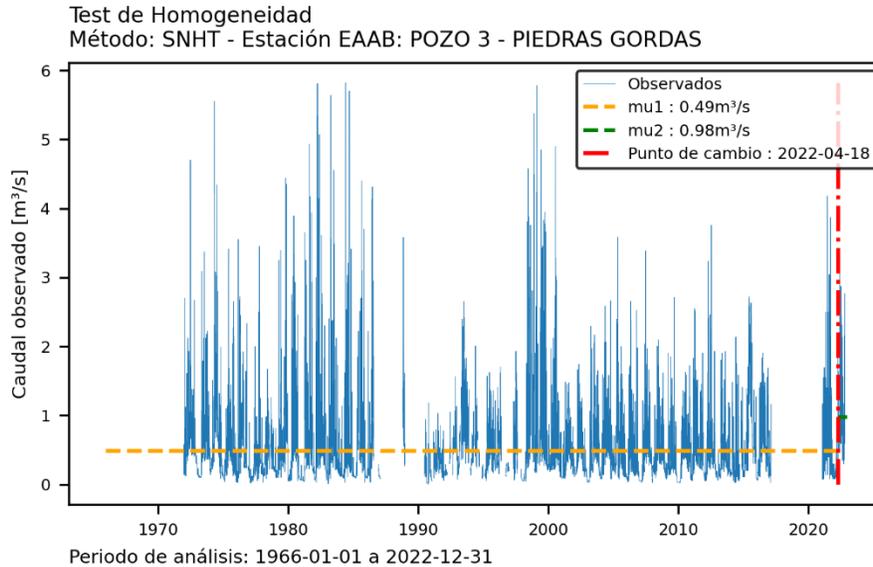


Figura 3.10. Registro de caudales quebrada Piedras Gordas. Estación Pozo 3 – Piedras Gordas de la EAAB

Para la quebrada Piedras Gordas se cuenta con registros entre el año 1971 a 1989. Posterior al año 1990 existe un periodo consistente de información hasta el año 2018. El caudal medio histórico registrado corresponde a $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$, Figura 3.10.

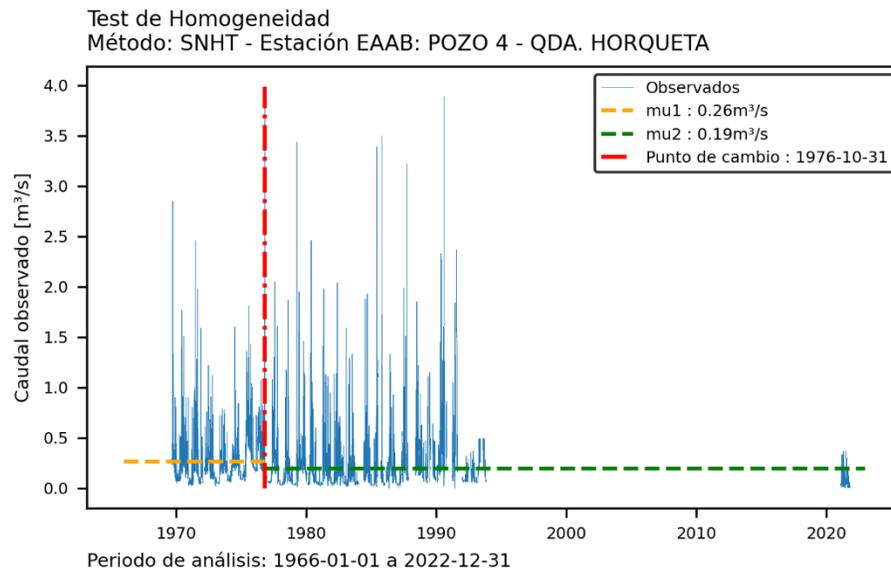


Figura 3.11. Registro de caudales quebrada Horqueta. Estación Pozo 4 – Qda. Horqueta de la EAAB

El último sector de análisis corresponde a los aportes generados desde el río Guatiquía al sistema de abastecimiento, Figura 3.12.

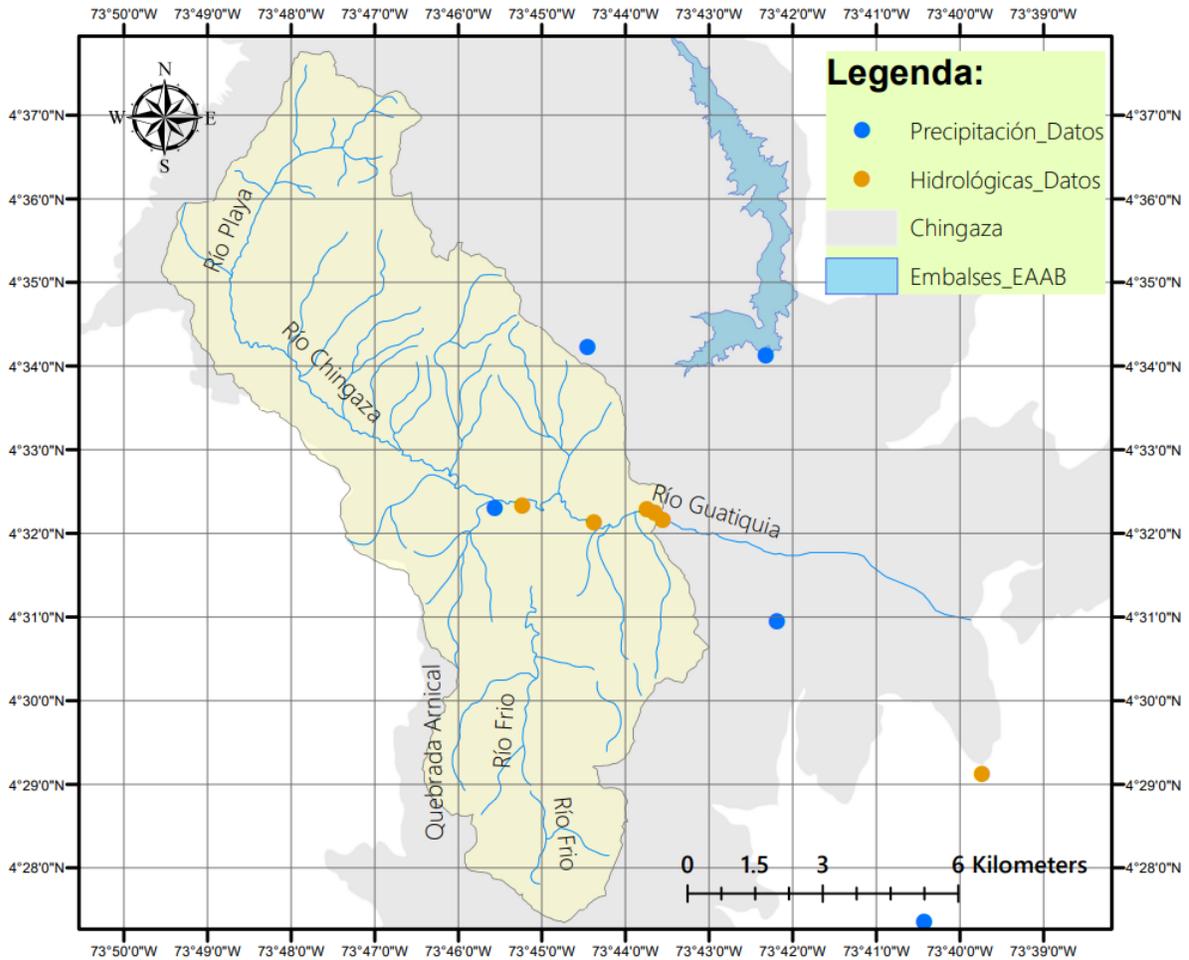


Figura 3.12. Sector río Guatiquía

Este sector cuenta con 4 estaciones de medición sobre el río y 3 estaciones de precipitación circundantes. Estas estaciones registran caudales antes del túnel de captación y posteriormente para el control del caudal ecológico. En la Figura 3.13 se muestra en detalle la ubicación de las estaciones. Aguas arriba se encuentra la estación San José, donde se cuenta con un registro continuo de caudales desde el año 1966 con una media histórica de 5.04 m³/s, Figura 3.14.

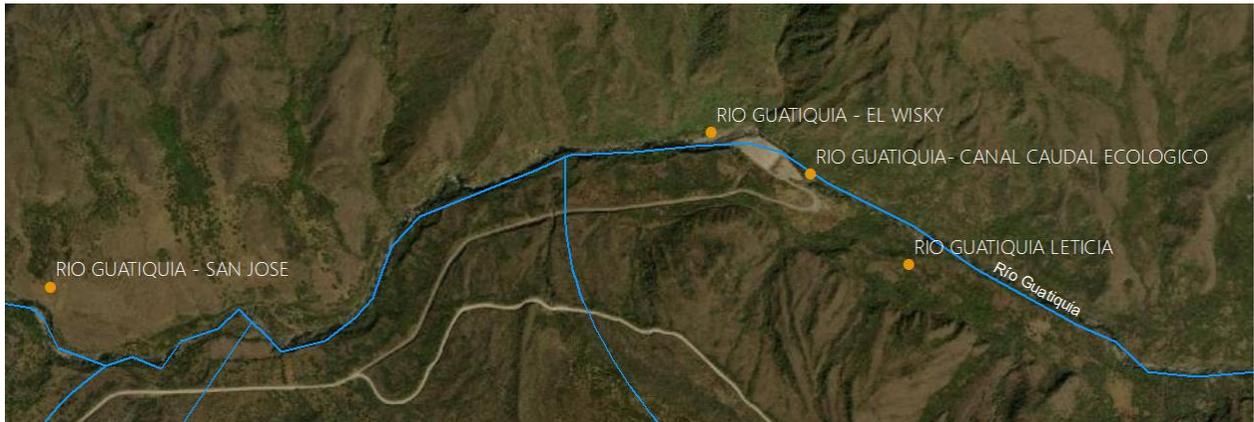


Figura 3.13. Captación de agua y medición sobre el río Guatiquía

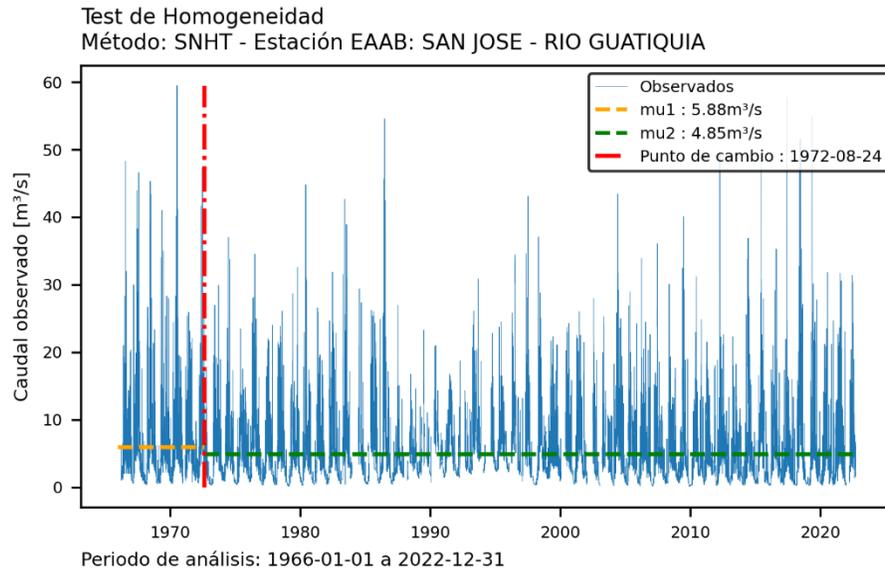


Figura 3.14. Registro de caudales diarios. Estación San José de la EAAB – río Guatiquía

Posterior a la estación San José, se ubica la estación El Whisky justo antes de la estructura de derivación de caudal hacia el túnel que alimenta el embalse de Chuza. Esta estación tiene registros de caudal desde el año 2008 con un caudal medio histórico de 5.62 m³/s, 0.58 m³/s por encima al registrado en la estación San José, Figura 3.15. Luego de la captación se cuenta con la estación Leticia ubicada aguas abajo donde se registra un caudal medio de 3.49 m³/s. Sin embargo, la estación tiene problemas de homogeneidad con un primer periodo de registro entre 1970–1983 y un periodo desde el año 2008 con un cambio significativo en la media, Figura 3.16.

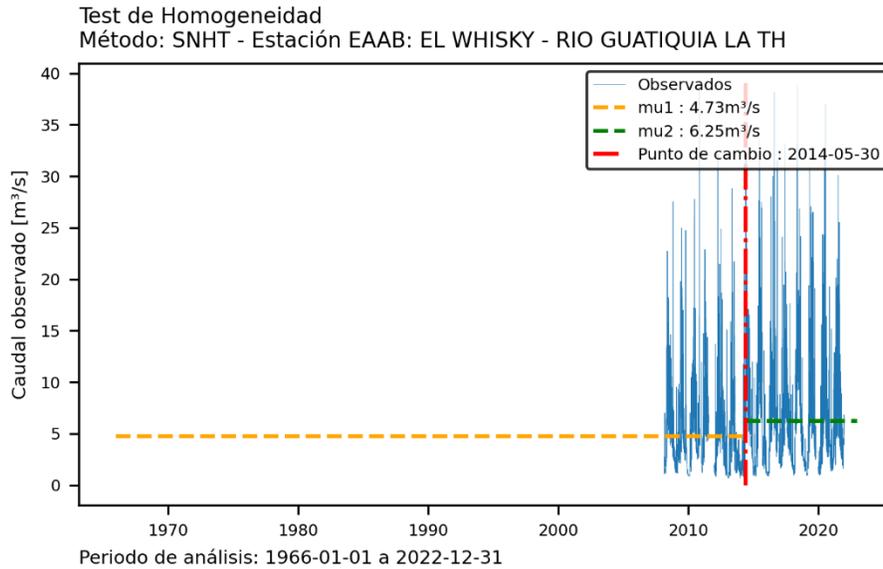


Figura 3.15. Registro de caudales diarios. Estación El Whisky de la EAAB – río Guatiquía

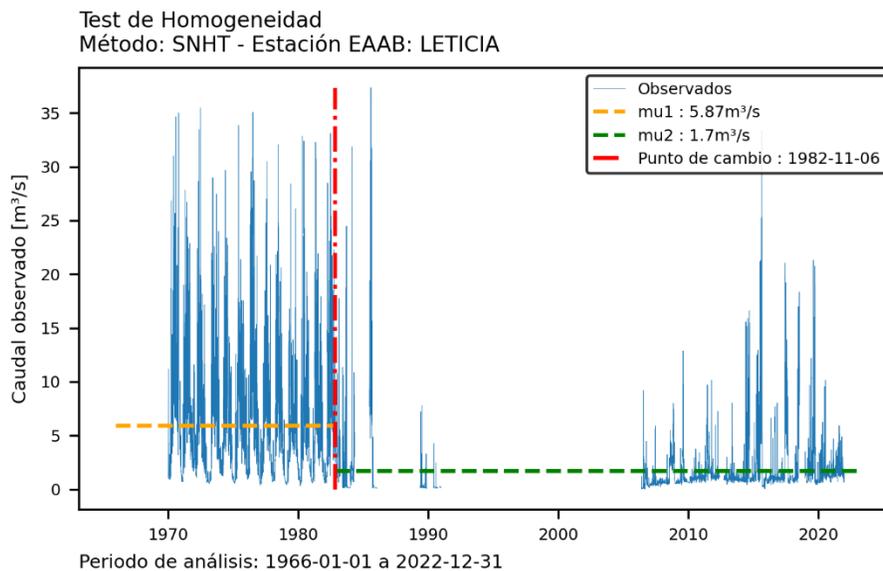


Figura 3.16. Registro de caudales diarios. Estación Leticia de la EAAB – río Guatiquía

A priori y con base en los registros de las estaciones se puede concluir un caudal medio de captación de 2.13 m³/s. En la estructura de captación se cuenta con los registros de una estación que controla el caudal ecológico lateralmente pero no considera las crecientes ocurridas y que si son registradas en la estación Leticia.

3.2 Coberturas y usos del suelo

El uso de plataformas satelitales se ha convertido en una herramienta clave para estudiar el cambio de coberturas de suelo en diferentes partes del mundo. Estas plataformas permiten monitorear de manera sistemática la deforestación lo que resulta fundamental para realizar análisis a gran escala y detectar patrones o tendencias de cómo cambia la vegetación en la región de estudio.

A continuación, se muestran algunas de las plataformas más usadas y la descripción de su resolución espacial y temporal.

3.2.1 Productos existentes

Actualmente, existen múltiples plataformas digitales que proporcionan información satelital con abundante contenido de datos geoespaciales, incluyendo información detallada sobre la cobertura terrestre. Entre los cuales se destacan: MODIS, Landsat, Sentinel y ASTER.

MODIS: Es un instrumento de teledetección a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA. Éste mide la reflexión de la luz solar en la Tierra y la emisión de radiación en la atmósfera obteniendo información sobre la temperatura de la superficie terrestre, la humedad, la vegetación, entre otros parámetros ambientales. La resolución espacial de MODIS es de 250 metros para las bandas espectrales de 1 a 2 y de 500 metros para las de 3 a 7 y su resolución temporal es diaria.

Landsat: Es un satélite de la NASA y del servicio geológico de los Estados Unidos que ha estado en órbita desde 1972. Este instrumento proporciona datos sobre la superficie terrestre en varias bandas espectrales, lo que permite obtener información sobre vegetación, tierra, agua y recursos minerales. La resolución espacial de Landsat-8 es de 30 metros para las bandas espectrales visibles e infrarrojas cercanas y de 90 metros para las de onda larga; su resolución temporal es de 16 días.

Sentinel: Es un conjunto de satélites de teledetección desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) en el marco del programa Copérnico. Estos satélites proporcionan información sobre la superficie terrestre con una resolución de 10 metros para las bandas espectrales visibles e infrarrojas cercanas y de 20 metros para las bandas espectrales de infrarrojo de onda corta.

Sentinel maneja una resolución temporal de 5 días, lo que permite obtener imágenes frecuentes de una misma área.

ASTER: Es un instrumento a bordo del satélite Terra de la NASA que proporciona datos de alta resolución espacial de hasta 15 metros en el espectro visible e infrarrojo mientras que en las bandas espectrales de infrarrojo térmico tiene resolución espacial de 90 metros. ASTER es capaz de adquirir datos diurnos y nocturnos de una misma área cada 16 días.

Teniendo en cuenta las características de las diferentes plataformas satelitales descritas anteriormente, se decidió utilizar las coberturas de suelo de MODIS para esta investigación. Esta elección se basó en varias razones: En primer lugar, MODIS cuenta con mejor resolución temporal y cobertura terrestre. Además, la descarga de información es gratuita y compatible con otras plataformas como Landsat y Sentinel lo que permite combinar información de distintas fuentes.

En el caso de esta investigación, la cuenca del Amazonas tiene un área aproximada de 7.05 millones de kilómetros cuadrados, por lo que una resolución espacial de 500 metros es una buena aproximación. Contar con una resolución más detallada implica tiempos de descarga más largos y una carga computacional muy alta para procesar la información. En resumen, MODIS es una buena plataforma para representar y analizar cambios de coberturas de suelo en grandes extensiones de tierra.

Tabla 3.7 Descripción general del producto MODIS

Tipo de datos	Productos de cobertura terrestre
Sistema de proyección	Proyección sinusoidal
Cobertura horizontal	global
Resolución horizontal	500 metros o 250 metros
Cobertura vertical	Superficie terrestre
Temporalidad	desde el año 2000 hasta el presente
Resolución temporal	Diaria

Fuente: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/index.php>

3.2.2 Análisis de las coberturas del suelo en el Amazonas.

La metodología a seguir para realizar el análisis de cambio de coberturas terrestre en la cuenca del Amazonas es la siguiente:

1. Se descarga la cobertura de suelo anual de la plataforma satelital MODIS, para el periodo desde el 2001 al 2020.
2. Se cargan los ráster a ArcGis Pro y se hace un recorte con el *shapefile* de la cuenca del Amazonas.
3. Con cada ráster se realiza una simbología y reclasificación de valores únicos; clasificando las coberturas de acuerdo con la tabla de coberturas de suelo tipo 5 según MODIS.

Tabla 3.8. Clasificación de coberturas 5 de MODIS.

Value	Color	Description
0	1c0dff	Water Bodies: at least 60% of area is covered by permanent water bodies.
1	05450a	Evergreen Needleleaf Trees: dominated by evergreen conifer trees (>2m). Tree cover >10%.
2	086a10	Evergreen Broadleaf Trees: dominated by evergreen broadleaf and palmate trees (>2m). Tree cover >10%.
3	54a708	Deciduous Needleleaf Trees: dominated by deciduous needleleaf (larch) trees (>2m). Tree cover >10%.
4	78d203	Deciduous Broadleaf Trees: dominated by deciduous broadleaf trees (>2m). Tree cover >10%.
5	dcd159	Shrub: Shrub (1-2m) cover >10%.
6	b6ff05	Grass: dominated by herbaceous annuals (<2m) that are not cultivated.
7	dade48	Cereal Croplands: dominated by herbaceous annuals (<2m). At least 60% cultivated cereal crops.
8	c24f44	Broadleaf Croplands: dominated by herbaceous annuals (<2m). At least 60% cultivated broadleaf crops.
9	a5a5a5	Urban and Built-up Lands: at least 30% impervious surface area including building materials, asphalt, and vehicles.
10	69fff8	Permanent Snow and Ice: at least 60% of area is covered by snow and ice for at least 10 months of the year.
11	f9ffa4	Non-Vegetated Lands: at least 60% of area is non-vegetated barren (sand, rock, soil) with less than 10% vegetation.

Fuente: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MCD12Q1#bands

4. Cada ráster se convierte en polígono para poder procesar mejor la información y se hace una intersección con el *shapefile* de la cuenca del Amazonas nivel 6 para que en todos los ráster estén las 442 subcuencas que se van a analizar.

- Se hace un *dissolve* en cada capa por el atributo que clasifica las coberturas para fusionar la misma cobertura en cada subcuena.



Figura 3.17 Cuenca del Amazonas-Clasificación MODIS GEE.

- Se calcula el área correspondiente a cada cobertura por cada subcuena y se divide en el área total de la subcuena para obtener el porcentaje por cada clasificación.
- Se realiza un *merge* entre las capas y se exporta la tabla de atributos para analizar la información en Python.
- Se hace un análisis estadístico que permita establecer tasas de deforestación, hallar correlaciones entre los cambios de cobertura y establecer el cambio porcentual de área según la clasificación escogida por cada subcuena.

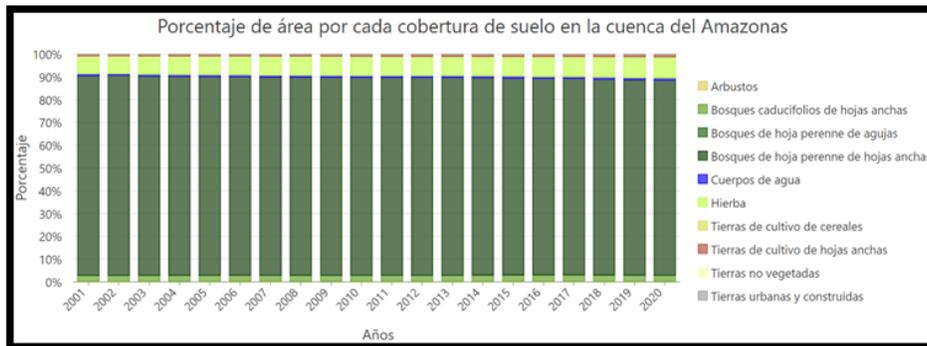


Figura 3.18 Porcentaje de área por cada cobertura de suelo en la cuenca del Amazonas.

9. Una vez obtenido el análisis de coberturas, se buscan correlaciones con las variables hidrológicas a lo largo del mismo período tiempo con el fin de identificar fluctuaciones o anomalías en el ciclo hidrológico que puedan ser atribuidas al cambio de coberturas de suelo en la cuenca del Amazonas.
10. Se realiza una visualización y revisión de resultados.

4 Avances componente SIG

Para el desarrollo de la investigación, es necesario crear, obtener e integrar diferentes conjuntos de datos geográficos y series multitemporales. En la siguiente tabla se presenta un listado de las fuentes utilizadas y su utilidad.

Tabla 4.1. Fuentes de información usadas para el desarrollo del componente SIG

Fuente	Descripción / Utilidad
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito www.escuelaing.edu.co	Definición del límite de las zonas de estudio para el desarrollo de la hidrología terrestre y atmosférica. En esta colección también se incluyen clases de entidad con cobertura zonal y nacional.
Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - ESP www.acueducto.com.co	Definición de elementos del sistema hidrológico de la Empresa con límites de cuencas, subcuencas, subzonas hidrográficas, cuerpos de agua y localización de estaciones. A partir de esta información se define la máscara o límite de análisis local para el desarrollo de la hidrología terrestre, y la identificación de celdas asociadas al modelo atmosférico.
HydroSHEDS www.hydrosheds.org	Esta colección contiene capas geográficas a nivel mundial y es utilizada como insumo base para el desarrollo de investigaciones relacionadas con recursos hídricos. Contiene límite de cuencas, redes de drenaje y cuerpos de agua a diferentes escalas y resoluciones. Dentro de esta colección también se encuentran el modelo digital de elevación STRM y los modelos derivados de relleno de sumideros, reacondicionamiento, direcciones de flujo y acumulación. Esta colección permite delimitar la zona de análisis dentro de la cuenca amazónica, requerida para los análisis espaciotemporales del estudio.
Agencia Nacional de Aguas de Brasil - ANA www.ufrgs.br	Contiene la localización de estaciones en Suramérica integradas al sistema de información hiro-climatológico de la ANA, así como registros de precipitación, caudal y nivel dentro y alrededor de la zona amazónica. A través de estos elementos, se pueden obtener series de datos y las localizaciones de las estaciones para la calibración del modelo hidrológico de grandes cuencas MGB.

<p>CAMELS-BR Catchment Attributes and Meteorology for Large-sample Studies - Brazil doi.org/10.5194/essd-12-2075-2020</p>	<p>Esta colección incluye límites de cuencas hidrográficas adjuntas, localización de estaciones de cierre en cuenca, índices climatológicos, caracterización por subcuenca a diferentes niveles y series de datos de parámetros hidro-climatológicos.</p> <p>A través de esta colección se pueden estudiar diferentes parámetros, analizar tendencias, correlacionar variables y entender su comportamiento espacio temporal.</p>
<p>Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR - Colombia www.car.gov.co</p>	<p>Esta colección contiene la localización de las estaciones activas del sistema de monitoreo y registros de datos mensuales para múltiples parámetros hidro-climatológicos.</p> <p>Estos datos pueden ser utilizados para extender la distribución y cobertura espacial de las variables climatológicas en estudio para su posterior análisis y correlación con datos del modelo atmosférico.</p>

4.1 Procedimiento general

Para la integración de las diferentes colecciones de datos espaciales y registros de series multitemporales, se ha creado una base de datos geográfica que contiene diferentes conjuntos de datos o datasets, clases de entidad y la incorporación de diferentes tablas. El procedimiento general aplicable al presente estudio incluye:

Tabla 4.2. Procedimiento de análisis

1. Creación de estructura de directorios y base de datos espacial en formato ESRI File Geodatabase GDB.gdb.
2. Creación de conjuntos de datos o datasets utilizando el sistema de proyección GCS_WGS_1984.
3. Importación de colecciones de datos geográficos recopilados dentro de conjuntos de datos como clases de entidad.
4. Descarga de registros de estaciones, integración en dataset único e incorporación como tabla de datos.
5. Identificación de series temporales y generación de campos fecha para su representación.
6. Agregación estadística de series temporales a nivel mensual y anual. Integración con clases de entidad.
7. Incorporación de clases de entidad y tablas de resultados producidas en la investigación.
8. Para cada colección se crean mapas dinámicos de representación en ArcGIS Pro y diferentes gráficas de análisis.
9. Publicación de mapas para consumo desde Internet a través de Web Layer.
10. Incorporación de nuevos elementos con actualización de mapas publicados.

4.2 Elementos del sistema de información

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los elementos que componen el modelo de datos geográficos del proyecto.

Tabla 4.3. Elementos del modelo de datos geográfico

Elemento	Descripción
Estructura de directorios	Contiene el árbol de directorios genérico para la administración de los datos espaciales asociados a la investigación, contiene: datasets, dem, gdb, grid, icons, layer, layout, map, projectionfile, refs, shp, src y temp
Diccionario de datos	Libro de Microsoft Excel con la descripción de todos los objetos incluidos en el modelo de datos geográficos. También se incluye el listado y enlaces a mapas publicados, la descripción de los sistemas de proyección geográfica utilizados para el almacenamiento y visualización, además de diagramas de procedimientos generales
Base de datos geográfica	Almacenada en la carpeta gdb en formato ESRI File Geodatabase. Incluye datasets y tablas
Mapas	Almacenados en la carpeta map en formato .mapx y para cada grupo de representación y publicados en maps.arcgis.com como web layer
Scripts	Scripts en Python para extracción y transformación de datos de series multitemporales. https://github.com/rcfdtools/R.GISPython/tree/main/MultipleTableJoin

Conclusiones

Tras la revisión exhaustiva de la literatura, el análisis de datos satelitales y la evaluación de los cambios climáticos en la región de Chingaza y la Amazonía, se puede anotar lo siguiente:

- Este informe ha abordado la recopilación de información y la revisión de la literatura en relación con el comportamiento hidro-climatológico de la Amazonía, el esquema metodológico de los modelos atmosféricos relevantes para el estudio, los cambios de cobertura del suelo y un enfoque de trabajo hidrológico para la región de Chingaza. Se considera que se recolectó la información necesaria y que el esquema de los modelos atmosféricos está definido en gran parte.
- Desde el punto de vista climatológico y posteriores análisis atmosféricos, se presentan los conjuntos de datos procedentes de (1) productos de observación y (2) productos de síntesis fusionados, junto con datos de reanálisis sobre la velocidad del viento y la humedad, con el fin de reducir la incertidumbre y evitando propagación de errores en los modelos. De nuevo, se considera que estos datos son suficientes para las siguientes fases.
- En la caracterización de los ríos atmosféricos, la metodología propuesta y el enfoque presentado, es una agrupación estructurada en función de las necesidades y contexto geográfico de estudio, a lo cual se espera que los resultados obtenidos reflejen de manera más precisa la descripción dinámica del sistema atmosférico y la conexión de las zonas de interés en la consultoría.
- En el desarrollo del sistema de información geográfico, la integración de las colecciones de datos en una única base de datos ha permitido crear vistas integradas de la información espacial recopilada y producida en la investigación, a través de las cuales se han definido y validado los límites geográficos de las zonas de estudio y se ha evaluado el comportamiento espacio temporal de los diferentes parámetros hidro-climatológicos disponibles y recopilados en la cuenca del Amazonas. Por otra parte, la generación de mapas dinámicos multitemporales y gráficos de análisis ha permitido evaluar las

tendencias y relación de las principales variables involucradas en los componentes terrestre y atmosférico.

Recomendaciones

Con base en la revisión del estado del arte realizada, se identificaron algunas recomendaciones que podría contribuir al avance de futuros estudios relacionados con esta investigación. Algunas de estas recomendaciones podrían incluir.

- La selección adecuada de imágenes satelitales es fundamental para abarcar toda el área de interés y contar con una resolución espacial apropiada. La resolución debe ajustarse en función del tamaño de la zona de estudio y la capacidad computacional disponible.
- Es esencial establecer una clasificación precisa de las categorías de cobertura del suelo en función de las variables que se deseen analizar. Plataformas como Google Earth Engine (GEE) pueden facilitar este proceso al ofrecer sugerencias de clasificación basadas en las imágenes descargadas.
- Para un análisis de coberturas de suelo efectivo, es recomendable considerar un período de tiempo amplio y continuo, como, por ejemplo, entre 10 y 20 años. Esto permite comparar las clasificaciones año tras año para identificar los cambios en la cobertura del suelo y determinar su magnitud.
- La calidad y la nubosidad de las imágenes satelitales deben ser tenidas en cuenta para evitar posibles errores en el análisis de los cambios de cobertura del suelo.
- A través de la aplicación de metodologías apropiadas y la evaluación de datos relevantes, este estudio proporciona una base sólida para futuras investigaciones y análisis relacionados con la dinámica de la deforestación y sus efectos en el ciclo hidrológico y los patrones climáticos.

Bibliografía

- Builes-Jaramillo, A., & Poveda, G. (2018). Conjoint Analysis of Surface and Atmospheric Water Balances in the Andes-Amazon System. *Water Resources Research*, 54(5). <https://doi.org/10.1029/2017WR021338>
- Cárdenas, M. F., Tobón, C., & Buytaert, W. (2017a). Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes*, 31(24), 4440–4449. <https://doi.org/10.1002/hyp.11374>
- Cárdenas, M. F., Tobón, C., & Buytaert, W. (2017b). Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrological Processes*, 31(24), 4440–4449. <https://doi.org/10.1002/hyp.11374>
- Cepal y Patrimonio Natural. (2013). *Amazonia posible y sostenible*. Bogotá: Cepal y Patrimonio Natural. https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/amazonia_posible_y_sostenible.pdf
- Fassoni-Andrade, A. C., Fleischmann, A. S., Papa, F., Paiva, R. C. D. de, Wongchuig, S., Melack, J. M., Moreira, A. A., Paris, A., Ruhoff, A., Barbosa, C., Maciel, D. A., Novo, E., Durand, F., Frappart, F., Aires, F., Abrahão, G. M., Ferreira-Ferreira, J., Espinoza, J. C., Laipelt, L., ... Pellet, V. (2021). Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 59, Issue 4). <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>
- Gil, E. G., & Tobón, C. (2016a). Hydrological modelling with TOPMODEL of chingaza páramo, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2), 7919–7933. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>
- Gil, E. G., & Tobón, C. (2016b). Hydrological modelling with TOPMODEL of chingaza páramo, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2), 7919–7933. <https://doi.org/10.15446/rfna.v69n2.59137>
- Jaramillo, R. (2011a). *CONTRASTING TWO CATCHMENTS WITH HYDROLOGICAL MODELLING IN THE GUATIQUIA RIVER BASIN, PARAMO CHINGAZA, COLOMBIA*.

- Jaramillo, R. (2011b). *Contrasting two catchments with hydrological modelling in the Guatiquia river basin, Paramo Chingaza, Colombia.*
- Kimbrough, L. (2002, September 20). *How close is the Amazon tipping point? Forest loss in the east changes the equation.* <https://News.Mongabay.Com/2022/09/How-Close-Is-the-Amazon-Tipping-Point-Forest-Loss-in-the-East-Changes-the-Equation/#:~:Text=Scientists%20warn%20that%20the%20Amazon,Of%20the%20forest%20is%20lost.>
- La Región Amazónica. (2020). *Aspecto físico de la region amazonica.* <https://laregionamazonica.com/aspecto-fisico-de-la-region-amazonica/>
- Llopart, M., Reboita, M. S., Coppola, E., Giorgi, F., da Rocha, R. P., & de Souza, D. O. (2018). Land use change over the Amazon forest and its impact on the local climate. *Water (Switzerland)*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/w10020149>
- Makarieva, A. M., & Gorshkov, V. G. (2007). Hydrology and Earth System Sciences Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. In *Hydrol. Earth Syst. Sci* (Vol. 11). www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1013/2007/
- Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., Sheil, D., Nobre, A. D., & Li, B. L. (2013). Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(2), 1039–1056. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1039-2013>
- Marengo, J. A., Souza, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., Alves, L. M., & Soares, W. R. (2018). Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. In *Frontiers in Earth Science* (Vol. 6). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>
- Salgado, S. (n.d.). *AMAZONÍA BAJO PRESIÓN 2020.* www.amazoniasocioambiental.org
- Zanon, S. (2023, March 21). *Deforestación en la Amazonía: pasado, presente y futuro .* [https://Infoamazonia.Org/Es/2023/03/21/Deforestacion-En-La-Amazonia-Pasado-Presente-y-Futuro/.](https://Infoamazonia.Org/Es/2023/03/21/Deforestacion-En-La-Amazonia-Pasado-Presente-y-Futuro/)

