

# Entrega Final Proyecto SIG PROGRAMACIÓN SIG - 2027945

Leydi Catherine Corredor, Laura Ximena Clavijo, Nicole Franco León.

2 de marzo de 2025

## **Análisis de la amenaza a sequía en escenarios históricos y actuales de transformación de las coberturas naturales en cuencas aledañas al PNN Chingaza**

### **1. Introducción**

En los últimos 20 años del presente siglo, los eventos de sequía han afectado gravemente a 79 ciudades del mundo (Zhang et al., 2019). Por esta razón se proyecta que la población urbana mundial que enfrenta escasez de agua aumentará de 933 millones, el 33 % en 2016 a 1693-2373 millones de personas, lo que representará entre el 35 y el 51 % de la población urbana mundial en 2050. Esto representa que las grandes ciudades (población  $\geq 1$  millón) expuestas a escasez de agua puede aumentar de 193 (37 %) a 292 (56 %) (Dabrowska et al., 2023). Particularmente las condiciones de sequía pasan frecuentemente desapercibidas hasta que la escasez de agua se vuelve severa y los impactos adversos en el ambiente y la sociedad se hacen evidentes. En el caso de la ciudad de Bogotá, la situación crítica por el agua y el nivel de los embalses ha llevado a que la administración distrital tome medidas de restricción en el uso del líquido[1]. Si bien el abastecimiento de agua de la ciudad está integrado por tres sistemas: Chingaza, Tibitoc y Sumapaz, el 70 % de la captación del agua para el distrito proviene del sistema Chingaza[2]. La infraestructura principal de este sistema está localizado en el centro del Parque Nacional Natural Chingaza, con una extensión de 2.118 ha., abarcando el 2,89 % del

Parque, pero de la totalidad del área protegida depende el funcionamiento de la regulación hídrica y por ende el abastecimiento (Peña, 2019).

De los ecosistemas naturales en el Parque Nacional Natural Chingaza el principal es el bosque andino abarcando alrededor del 41.2 % del parque, mientras el páramo tiene aproximadamente el 33 % del total del área protegida (PNN, 2016), estos ecosistemas se localizan en el vertiente oriental de la cordillera oriental. Los ecosistemas de páramo y bosques andinos son fundamentales para la regulación hídrica debido a la capacidad de los suelos y la vegetación para retener, almacenar y regular flujos de agua, por ello cumplen una importante función ecológica, social y económica (Díaz-Granados Ortiz et al., 2005). En el páramo la evapotranspiración es baja y la capacidad de retención de agua por las plantas es alta, además la captación de la precipitación horizontal o niebla por la parte de la vegetación es un factor determinante del rendimiento hídrico presente en estos hidrosistemas (Díaz-Granados Ortiz et al., 2005). Por su parte, los bosques andinos regulan los caudales en el tiempo por un lado por la interceptación de la lluvia por el dosel y transpiración de los árboles necesaria para su crecimiento, por otro lado almacenan agua en el subsuelo soltándose de manera regular a los cauces y disminuyendo la escorrentía, protegiendo el suelo y previniendo la erosión (Bonnesoeur et al., 2019). Adicionalmente, el efecto del relieve en la vertiente oriental sobre la distribución de la precipitación, genera bandas de nubosidad a lo largo del gradiente altitudinal y marcados contrastes entre vertientes. (Álvarez-Rodríguez, 2011). La humedad que se descarga en esta vertiente, proviene del Amazonas y se desplaza por acción de los vientos alisios, que al encontrar la barrera orográfica favorece el desarrollo de la lluvia orográfica, que resulta en mayores precipitaciones y humedad relativa (Poveda et al., 2006). Dada esta dinámica el análisis de las condiciones de sequía requieren de su comprensión a un nivel mayor de la cuenca.

Dada la función determinante de estos ecosistemas, las transformaciones de las coberturas naturales inciden de manera contundente en la oferta natural de agua, estos cambios generados en los ecosistemas del PNN Chingaza, pero también los que se producen en los ecosistemas contiguos, afectan la disponibilidad de agua en términos de flujo y calidad (Peña, 2019). Si bien la pérdida de coberturas natural afecta procesos hidrológicos clave como la evapotranspiración, captación y retención, y en general en la capacidad de un paisaje en su conjunto para proveer servicios ecosistémicos, aún es necesario

realizar evaluaciones sobre la escala y la tasa de esos cambios, y los consiguientes efectos a niveles de cuenca (Birhanu et al., 2019). En este contexto este trabajo final busca identificar y caracterizar los factores de incidencia en el cambio de la cobertura natural en las subzonas hidrográficas adyacentes al Parque Nacional Chingaza. Para determinar los procesos de cambio de uso de suelo se utilizaran imágenes satelitales principalmente del programa Landsat, mediante un análisis multitemporal, y con ello identificar la dinámica de pérdida y ganancia de la cobertura vegetal que permitan catalogar el nivel de amenaza. Este análisis también contempla el uso del conjunto de datos multitemporales y multispectrales del programa Landsat, para realizar análisis cualitativos y cuantitativos de los déficits de agua del suelo y el estrés hídrico, para lo cual se cuenta con una diversidad de índices (Zhu et al., 2024). Entre estos, el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) (Tucker, 1979), es de los más evaluados (Gardiya Weligamage et al., 2025). El NDVI se basa en la relación de las bandas roja e infrarroja cercana derivadas de sensores satelitales ópticos, Tucker (1979) encontró que el NDVI estaban altamente correlacionadas con la acumulación de materia seca total herbácea durante un período de observación.

## **2. Marco Conceptual**

### **2.1. Áreas Protegidas:**

Las áreas protegidas cumplen la particularidad de conservar la biodiversidad y poder proporcionar servicios ecosistémicos de control, regulación y recreación (Shlisky, et al., 2007). La declaración de áreas protegidas en la actualidad es una de las estrategias difundidas a nivel global y fue promovida en el siglo XX, después de que Estados Unidos estableciera parques y reservas nacionales. El éxito de establecer estrategias de conservación está en la representación taxonómica a diferentes escalas; En Colombia existen algunas evaluaciones regionales y a nivel local. En la región andina podemos encontrar 29 áreas protegidas, en las que la mayoría de las aves son endémicas y están amenazadas. En las áreas protegidas, principalmente las ubicadas en la región andina, son refugio de una alta diversidad de aves.

## **2.2. Sistemas de Parques Nacionales Naturales:**

Los sistemas de Parques Nacionales Naturales de Colombia desde 2013 hasta 2018, han venido realizando trabajo en la rendición de cuentas en las áreas protegidas donde se presentan las acciones, avances, proyectos ejecutados y los siguientes retos. Dentro de la metodología del plan de manejo de los parques Nacionales Naturales en el 2010, se declaró que deberían tener un plan de manejo dentro de un periodo de 5 años (Ley 2372, 2010).

El plan de manejo del Parque Nacional Natural Chingaza indica que en 1992 Lopez y Villarreal, realizaron la clasificación de las coberturas vegetales del Parque, donde se pudieron establecer 6 tipos de coberturas: Parque Natural, Reserva Natural, Área Natural Única, Santuario de Flora, Santuario de Fauna y Vía Parque, siendo crucial para el marco base, para las posteriores investigaciones y planes de manejo. (Pedraza, et al., 2020)

El Parque Natural se define como “Área de extensión que permita su autorregulación ecológica y cuyos ecosistemas en general no han sido alterados sustancialmente por la explotación u ocupación humana y donde las especies vegetales, animales, complejos geomorfológicos y manifestaciones históricas o culturales tienen valor científico, educativo, estético y recreativo nacional y para su 30 Conflictos socioambientales derivados de la declaración del PNN Chingaza (PNN) en zonas de producción campesina perpetuación se somete a un régimen adecuado de manejo” (Congreso Nacional de la República de Colombia, 1974).”

El PNN Chingaza, provee una zona de amortiguación para los servicios ecosistémicos, además de proveer agua a más de 10 millones de personas en la capital del país y varios municipios aledaños. Es clave en la áreas de conservación por tener ecosistemas estratégicos en tierras altas y de gran regulación para la macrocuenca del río Orinoco, además de prestar sus servicios para las comunidades indígenas y campesinas que habitan cerca a la zona.

## **2.3. Cambio de Cobertura vegetal:**

Los cambio de Cobertura vegetal son una dinámica que pueden presentar las coberturas vegetales dados por diferentes agentes de cambio tanto

antropogénicos como naturales, los cuales pueden afectar la estructura y composición de la especie, cambios en la conectividad ecológica del paisaje, resiliencia de las especies, pérdida de nutrientes del suelo. Entre los naturales podemos encontrar los incendios forestales que han ejercido un cambio fundamental en el paisaje y el mantenimiento de diversas especies vegetales. (He et al. 2016). La ocurrencia de estos factores corresponden a interacciones con el clima, adaptación de las especies y la susceptibilidad de los ecosistemas. Dentro de las actividades humanas, uno de los agentes más influyentes es el cambio climático, la introducción de especies exóticas alterando la dinámica del ecosistema y actividades agrícolas. (Daibes et al. 2019)

## **2.4. Nivel de exposición:**

El nivel de exposición de acuerdo con la Ley 1523 de 2012 hace referencia a la presencia de personas, servicios ambientales, recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su ubicación pueden llegar a ser afectados por la manifestación de una amenaza.

## **2.5. Amenaza:**

La amenaza, es un peligro latente de algún evento ya sea físico o de origen natural (IDIGER,2018) y que se presente de una manera severa que pueda causar una pérdida de vidas, así como daños, lesiones, pérdida de bienes. La susceptibilidad de la vegetación fue excluida como componente de la amenaza y se incluye en la vulnerabilidad, así como la incorporación de la exposición, como una condiciona para la estimación de la amenaza, al ser un fenómeno extremo y se convierte en amenaza.

## **2.6. Vulnerabilidad:**

La vulnerabilidad, susceptibilidad o fragilidad física, social , ambiental que tiene una comunidad a ser afectada o de sufrir cambios efectos adversos en caso de evento físico peligrosos presente. La vulnerabilidad es vista como la reducción del riesgo de desastres se relaciona con la fragilidad, susceptibilidad y falta de resiliencia de los sistemas expuestos dadas sus condiciones socio-ecológicas. (McMillan, 2020). En la vulnerabilidad se tiene en cuenta la vulnerabilidad institucional, patrimonial, poblacional, territorial, infraestructura y economía. En muchos casos la vulnerabilidad se presenta para

evaluarla ante eventos como incendios forestales.

$$RIESGO = AMENAZA * VULNERABILIDAD$$

$$VULNERABILIDAD = EXPOSICION \\ (SUSCEPTIBILIDAD/RESILIENCIA)$$

Ecuación 1. Ecuación para el riesgo por Vulnerabilidad. (DIGER,2005)

## **2.7. Ciclo hidrológico:**

El ciclo hidrológico puede sustraerse en cuatro importantes fases, aguas subiendo (inundación) aguas altas (punto máximo del caudal del agua), aguas bajando(descenso) y aguas bajas (sequías). El régimen hidrológico durante el flujo de lluvias y posteriormente en el verano sobre una cuenca hidrográfica, ha construido un factor ambiental de importancia para la estructuración de comunidades y en el funcionamiento de los sistemas de ríos y planicies de inundación. (Agudelo,2015)

## **2.8. Estrés hídrico en las plantas:**

Las plantas a lo largo de la evolución han podido desarrollar diferentes propuestas y adaptaciones que les permiten sobrevivir a condiciones de constante déficit hídrico, por ello también responder a un estrés hídrico sujeto a nivel molecular y celular. Una de las principales respuestas al estrés hídrico son las modificaciones de la expresión en la genética de enzimas antioxidantes y de proteínas. (Frujii et al., 2007).

# **3. Objetivos**

## **3.1. General**

Determinar los niveles de amenaza por sequía dedica a las transformaciones históricas y escenarios actuales de transformación de las coberturas naturales en cuencas aledañas al PNN Chingaza

### **3.2. Específicos**

Caracterizar los patrones de Cambio de cobertura en los últimos años en las cuencas aledañas al PNN Chingaza.

Identificar el nivel de exposición y susceptibilidad de las coberturas naturales a la amenaza por sequía en las cuencas aledañas al PNN Chingaza

Clasificación de información continua a partir de una red de puntos verdaderos

## **4. Metodología:**

### **4.1. Área de estudio**

El área de estudio abarca cinco subzonas hidrográficas aledañas y de influencia directa en el Parque Nacional Natural (PNN) Chingaza: los ríos Guatiquía, Humea, Guacavía, Guavio y Guayuriba, todos ubicados en el departamento del Meta (Figura 1). Dentro de esta área se encuentra el PNN Chingaza, así como una parte del Parque Nacional Natural Sumapaz y otras áreas de protección regional. Al reconocer la importancia del componente biótico en estos procesos, se delimitará el área de estudio a partir de la zonificación hídrica, tomando las subzonas hídricas que entran en contacto o adyacentes con el PNN Chingaza. Además, el área de estudio incluye subregiones correspondientes a la vertiente oriental de la Cordillera Oriental, lomerío y el piedemonte.

Para la selección de la información del Parque Nacional Natural Chingaza, se descargó la capa oficial del Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP), a partir de este insumo se seleccionó por atributo y se almacenó dentro de una variable denominada Chingaza. Paralelamente, se identificaron las Subzonas aledañas al área de interés y se estableció el Área de Estudio, las cuales se seleccionaron y guardaron en una variable para posteriores operaciones

### **4.2. Transformaciones de las Coberturas del suelo**

Con el área de estudio delimitada se estipula la temporalidad a trabajar, al incluir factores climáticos se identifica que obedeciendo los regímenes de eventos y de estudio, 30 años brindará la suficiente variabilidad teniendo en

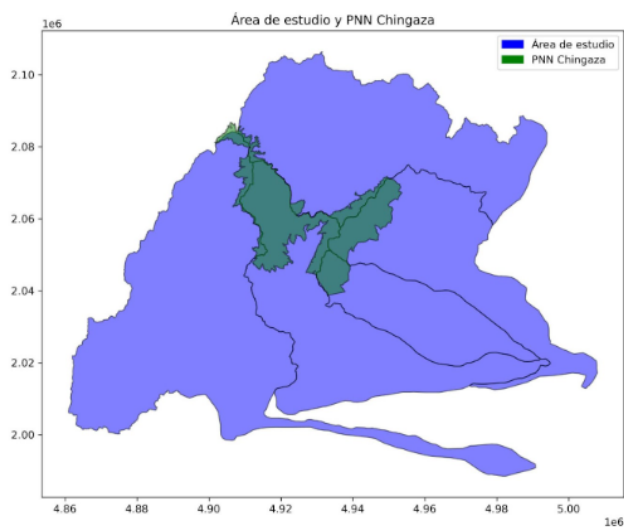


Figura 1: Área de estudio

Figura 2: Subzonas hidrográficas en el área de estudio de influencia al PNN Chingaza.

```
[4]: AE.loc[:, ['NOM_ZH', 'NOM_SZH']]
```

```
[4]:
```

	NOM_ZH	NOM_SZH
0	Meta	Río Guatiquía
1	Meta	Río Humea
2	Meta	Río Guacavía
3	Meta	Río Guavio
4	Meta	Río Guayuriba



cuenta los ciclos. Pero para este caso solo se utilizó una temporalidad de 2021-2023. Los datos utilizados en este estudio incluyen imágenes satelitales Landsat 8 obtenidas por Google Earth Engine.

### **4.3. Descarga de datos Raster:**

Para la descarga de Datos se realizó a través de Google Earth Engine y las múltiples librerías que contienen “Earth Engine Data Catalog”, y se utilizó imágenes “USGS Landsat 8 Collection” desde el año 2021 hasta el 2023.

### **4.4. Corine Land Cover:**

Para ello se utilizaron algunos datos tipo vector que se encontraron en Colombia en Mapas”de los que se obtienen datos de la clasificación de la cobertura en nivel 1, nivel 2 y nivel 3 de la metodología de Corin Land Cover.

Para estimar el cambio en la cobertura, es necesario procesar cada uno de los rásteres mediante el conteo de píxeles, lo que permite calcular las áreas correspondientes a cada tipo de cobertura. Este análisis estadístico se lleva a cabo utilizando herramientas como Raster Statisticsz, más específicamente, a través de la biblioteca Rasterio.

En segundo lugar, estima el nivel de amenaza inducido por los cambios en las coberturas, especialmente el área de coberturas naturales, con base en matrices de cambio y el indicador NDVI. Por último, se estima la asociación entre las áreas y dos factores complementarios, a saber, estrés hídrico y recarga de acuíferos. Una explicación detallada de estos pasos se ilustra en la Figura 3.

### **4.5. Datos de estrés hídrico por sequía hidrológica**

Para evaluar las posibles amenazas de sequía en distintos tipos de coberturas del suelo, especialmente en las coberturas naturales, se emplea información hidrológica sobre la dinámica de caudales obtenida a partir del modelo de Análisis Hidrológico desarrollado por Nogales et al. (2012) en su estudio “Hydrological Modeling for Multifunctional Landscape Planning in the Orinoquia Region of Colombia”.

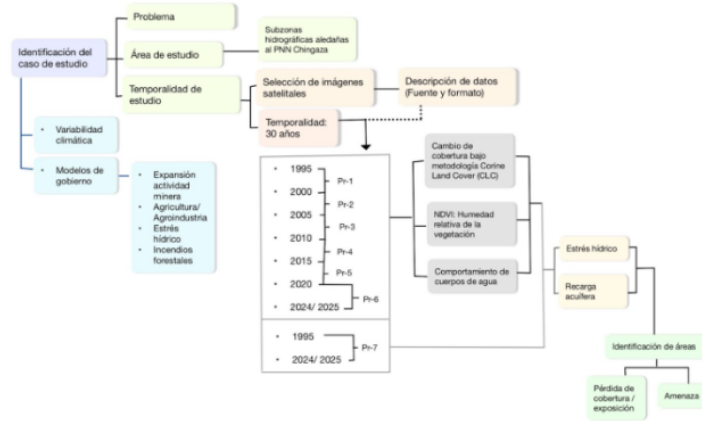


Figura 3: Diagrama de flujo trabajo propuesta proyecto final.

En este estudio, la unidad de análisis del modelo son las Unidades de Análisis Hidrológico (UAH), que representan el área de interacción entre la cuenca superficial y el acuífero subterráneo, es decir, la misma unidad hidrogeológica. El modelo estima el proceso lluvia-escorrentía mediante el cálculo de la precipitación, la evapotranspiración y la recarga, lo que permite determinar la escorrentía directa y los cambios en el almacenamiento del agua según su uso. Asimismo, incorpora el modelo de interacción entre el río y la llanura de inundación, así como los procesos antrópicos relacionados con la extracción de agua subterránea y superficial para actividades como la agricultura, la ganadería, el consumo doméstico, la explotación de hidrocarburos y la minería.

A partir de este análisis, los autores generaron el cálculo de los caudales en cuatro escenarios de transformación del uso del suelo para la región de la Orinoquia colombiana, los cuales se tendrán en cuenta en los análisis y son los siguientes:

**Escenario 1** Puede considerarse como “seguir como siempre”, lo que representa una expansión modesta que se genera de manera óptima en términos de maximizar los beneficios agrícolas. Define una expansión del 1,51 % de la palma aceitera, del 0,12 % del arroz, del 0.08 % de la silvicultura y del 0.04 % de la soja.

**Escenario 2** Representa la visión de los pequeños agricultores, ganaderos y la industria agrícola en la región de la Orinoquia colombiana. Este escenario estableció que el 14,27 % del paisaje se convertiría en agricultura dividiendo el área equitativamente entre los cinco productos básicos (palma aceitera, arroz, silvicultura, soja y pastos para el ganado).

**Escenario 3** Representa la visión del gobierno colombiano descrita en el Plan Maestro ( DNP, 2016 ), que busca maximizar la tierra subutilizada para la agricultura. Este escenario propone una expansión del 10,61 % de la agricultura (que se dividirá equitativamente entre arroz y soja), el 13,53 % de la ganadería, el 6,97 % de la silvicultura y el 12,54 % de los cultivos agroforestales (asignados a la palma aceitera).

**Escenario 4** Representa una visión extrema en la que toda la frontera agrícola está ocupada incluso si es un área protegida. Este escenario propone un 53,68 % de expansión de toda la actividad productiva (palma aceitera, arroz, forestación, soja y pasturas para ganadería).

#### 4.6. Niveles de intensidad de la sequía (reducción del caudal)

Características de la distribución espacial de Estrés hídrico por sequías hidrológicas: Se presentará la distribución espacial de la dinámica de caudales analizadas en las Unidades de Análisis Hidrológico, y los niveles de intensidad en el déficit mediante la siguiente clasificación:

##### **Niveles de intensidad**

*Déficit de -15 % y -30: Débil*

*Déficit de -30 % y -45 %: Moderado*

*Déficit de más del -45 %: Severo*



Para definir el conjunto de datos de entrenamiento se determinarán principalmente en función de las características de cada objeto con firma espectral que respaldaron las reglas de decisión **para asignar clases**.

Esto se llevará a cabo mediante la creación de una red de puntos de control que permita verificar la precisión de las coberturas asignadas. A partir de esta red, se utilizarán herramientas como SciPy y Random Forest para realizar una clasificación supervisada, lo que facilitará identificar, comparar y analizar las coberturas.

#### **4.9. Integración de información y análisis de amenaza**

Tras obtener los mapas de niveles de intensidad del déficit hídrico, NDVI y de coberturas del suelo para el año 2025, se aproximó a la amenaza por sequía en el área de estudio.

### **5. Resultados**

#### **5.1. Estrés hídrico por sequía (Dinámica de caudales)**

El cambio en los caudales máximos para cada escenario se ilustra en la Figura 4. La dinámica de los caudales varía desde una disminución del 100 % hasta un aumento del 100 % o más de 100) en cada UAH para los cuatro escenarios evaluados.

Se observa que, en todos los escenarios, la media es negativa, lo que indica que la mayoría de las unidades hidrológicas presentan una reducción en el caudal (Figura 5). El escenario 1 muestra las mayores disminuciones, mientras que la mayor variabilidad se registra en los escenarios 1 y 4.

La distribución espacial de la dinámica de los caudales en las Unidades de Análisis Hidrológico (UAH) y los niveles de intensidad del déficit se ilustran en la Figura 6. En esta, se consideran los siguientes niveles de intensidad:

Niveles de intensidad del déficit:

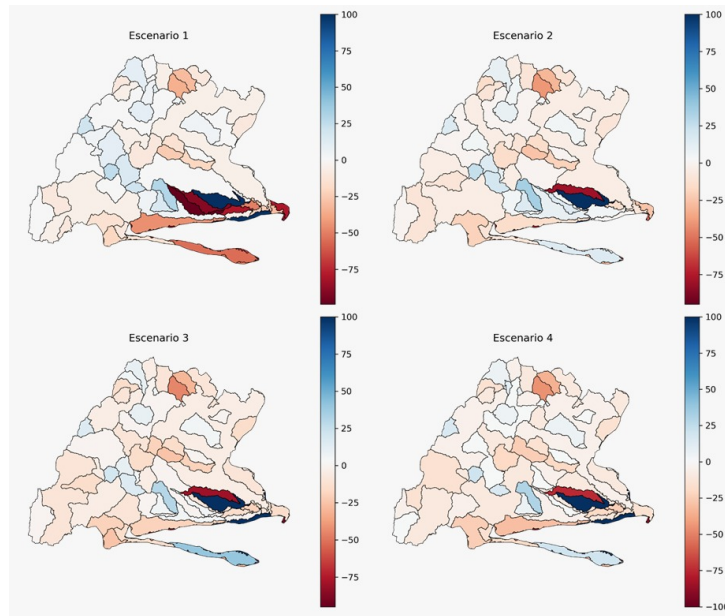


Figura 5: Dinámica de disminución o aumento de los caudales en el área de estudio.

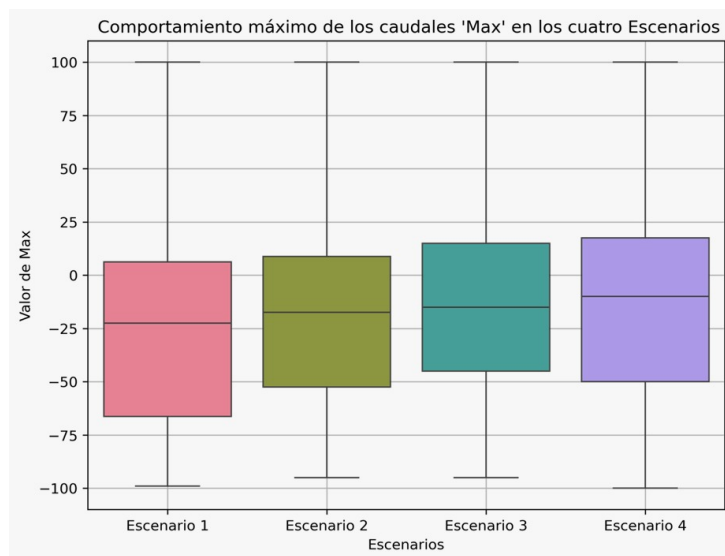


Figura 6: Descripción de la dinámica de los caudales mediante gráficos de caja y bigotes correspondiente a cada uno de los escenarios.

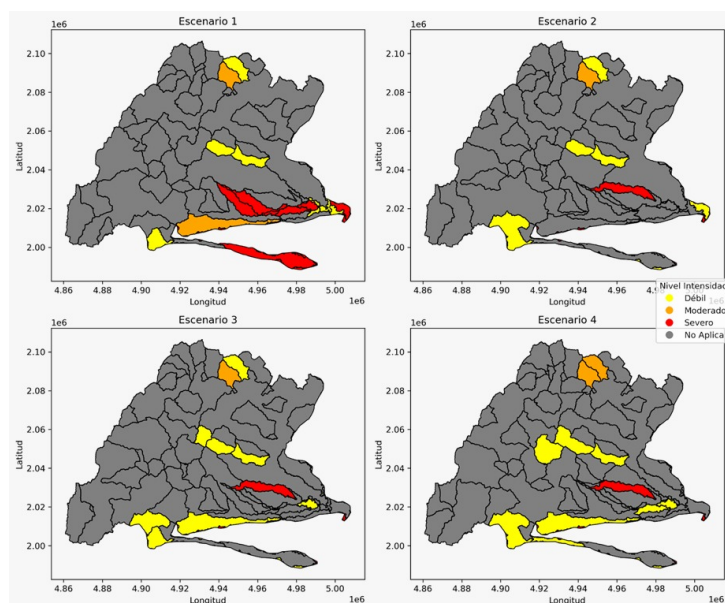


Figura 7: Niveles de intensidad de reducción de los caudales en cada uno de los cuatro escenarios.

**Débil:** Reducción entre -15 % y -30 %

**Moderado:** Reducción entre -30 % y -45 %

**Severo:** Reducción superior al -45 %

En el **escenario 1**, tres unidades hidrológicas presentan un déficit débil, dos muestran un nivel moderado y diez experimentan una reducción severa del caudal.

En el **escenario 2**, tres unidades hidrológicas registran una disminución débil, tres presentan un déficit moderado y siete tienen una reducción severa del caudal.

En el **escenario 3**, seis unidades muestran una disminución severa del caudal, mientras que tres presentan un déficit moderado y otras tres un déficit débil.

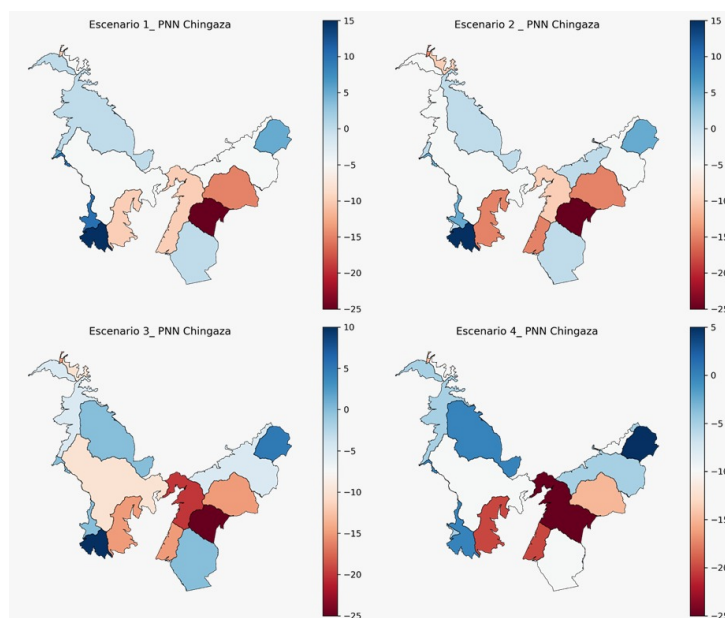


Figura 8: Dinámica de disminución o aumento de los caudales en el área protegida PNN Chingaza.

Finalmente, en el **escenario 4**, siete unidades presentan una reducción severa del caudal, tres registran un déficit débil y dos un déficit moderado. Siendo este el escenario mas crítico por sequía. La mayoría de estas unidades se encuentran en el paisaje del piedemonte, en los cuatro escenarios, siendo este paisaje el más afectado por la reducción del caudal.

En el área protegida del PNN Chingaza, el cambio en los caudales máximos de las Unidades de Análisis Hidrológico dentro del parque muestra que la mayor disminución en todos los escenarios alcanza un -25 % (Figura 7). Si bien la reducción del caudal en el área protegida es menor en comparación con otras zonas, el sector más afectado dentro del parque es el ala oriental. Según la clasificación por nivel de intensidad, estas áreas registran una disminución débil.



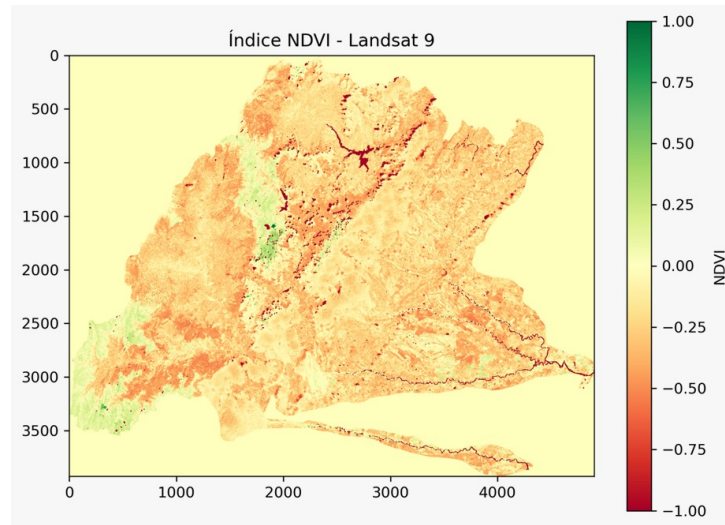


Figura 9: Valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para el área de estudio con una imagen de febrero de 2025.

## 5.2. Caracterización de la distribución espacial del NDVI para el año 2025

Para esta caracterización, primero se obtuvieron los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), los cuales corresponden a una imagen del área de estudio para el año 2025 (Figura 8). Este índice se basa en la combinación de la baja reflexión de la luz en visible roja, por lo tanto, alta absorción en esta longitud de onda, y la alta reflexión en el infrarrojo, lo que indica una mayor actividad fotosintética y, por lo tanto, una mayor cantidad y densidad de vegetación verde. Un NDVI cercano a 1 refleja una mayor actividad fotosintética, o verdor de la vegetación.

La disminución en los valores del NDVI puede deberse a variaciones naturales, como las diferentes etapas del desarrollo de las plantas, o a condiciones de estrés que afectan su metabolismo, como la sequía. Por ello, se presenta la distribución de frecuencias del NDVI, según las categorías definidas por Vergara (2020), se ilustra en la Figura 9.

Obteniéndose los siguientes resultados:

*Vegetación escasa: 10069707 píxeles*

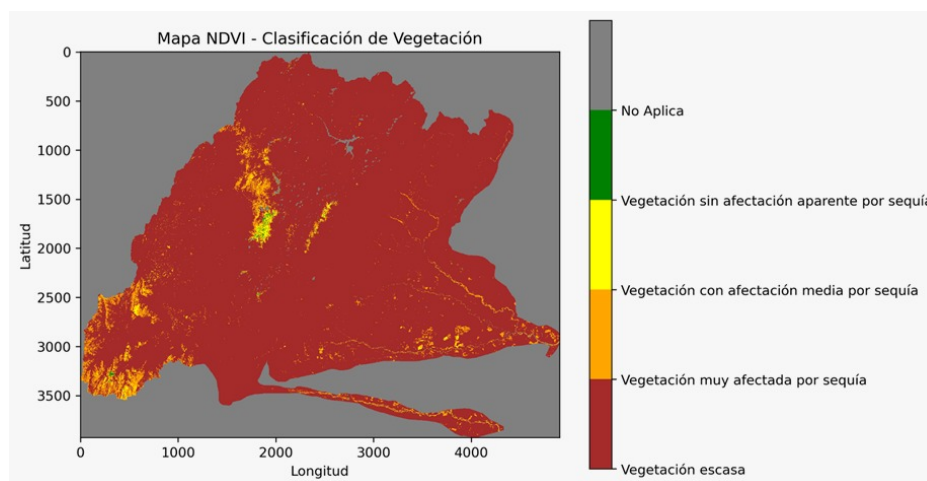


Figura 10: Categorías de afectación a la vegetación por sequía con base en el cálculo del NDVI según la categorización propuesta por Vergara (2020).

*Vegetación muy afectada por sequía: 400409 píxeles*

*Vegetación con afectación media por sequía: 70106 píxeles*

*Vegetación sin afectación aparente por sequía: 17390 píxeles*

La mayor parte del área de estudio corresponde a vegetación escasa, seguida de zonas con vegetación muy afectada por la sequía.

### 5.3. Análisis de Cobertura Terrestre usando Imágenes Landsat 8 y Aprendizaje Automático

Para la descarga de datos de imágenes satelitales con GEE, se corrió el siguiente código

```
// Cargar la colección de imágenes
var dataset = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
.filterDate('2021-12-01', '2023-12-31')
.filterBounds(ZN) // Filtrar por la zona de interés ZN
```

```

    .filterMetadata('CLOUD_COVER','less_than', 40);
// Función para enmascarar nubes usando QA_PIXEL
function maskClouds(image) {
    // Extraer la banda QA_PIXEL
    var qa = image.select('QA_PIXEL');

    // Bitmask para nubes y cirros
    var cloudBit = 1 << 3; // Nube diluida
    var cloudShadowBit = 1 << 4; // Nube
    var cirrusBit = 1 << 5; // Cirro

    // Crear una máscara para píxeles libres de nubes
    var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBit).eq(0)
        .and(qa.bitwiseAnd(cloudShadowBit).eq(0))
        .and(qa.bitwiseAnd(cirrusBit).eq(0));

    // Aplicar la máscara
    return image.updateMask(mask);
}

// Aplica la máscara de nubes y los factores de escala a la colección de imágenes
function applyScaleFactorsAndMask(image) {
    var imageMasked = maskClouds(image); // Enmascara las nubes
    var opticalBands = imageMasked.select('SR_B.*').multiply(0.0000275).add(-0.2);
    var thermalBands = imageMasked.select('ST_B.*').multiply(0.00341802).add(149.0);
    return imageMasked.addBands(opticalBands, null, true).toFloat()
        .addBands(thermalBands, null, true).toFloat();
}

// Aplica la máscara y los factores de escala a la colección de imágenes
dataset = dataset.map(applyScaleFactorsAndMask);

// Calcula la imagen mediana de la colección
var medianImage = dataset.min(); // Usamos min() como lo pediste en lugar de medi

// Crea una visualización para las bandas Verde, Roja y NIR
var visualization = {
    bands: ['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2'], // Verde, Roja, NIR

```

```

    min: 0.0,
    max: 0.3,
  };

  // Mosaico de la imagen de la mediana para el área de interés
  var mosaicImage = medianImage.clip(ZN);

  // Centra el mapa en el área de interés ZN
  Map.centerObject(ZN, 8); // Centra el mapa en el área ZN con nivel de zoom 8

  // Visualiza el mosaico con las bandas Verde, Roja y NIR
  Map.addLayer(mosaicImage, visualization, 'Mosaico (543)'); // Visualización con 1

  // Exporta la imagen a Google Drive
  Export.image.toDrive({
    image: mosaicImage,
    description: 'Mosaico_Landsat_ZN',
    folder: 'GEE_Exports', // La carpeta en Google Drive donde se guardará
    region: ZN,
    scale: 30, // Resolución en metros (de acuerdo con Landsat 8)
    crs: 'EPSG:4326', // Sistema de referencia de coordenadas
    maxPixels: 1e8 // Limitar el número máximo de píxeles para la exportación
  });

```

Posteriormente ello se utilizó los datos vector y se extrae los puntos representativos de la imagen satelital, lo que representa es el centro del objeto geografico.

- Cálculo del Centroide del Polígono

Para representar eficientemente cada área de interés, calculamos el centroide de los polígonos en nuestro shapefile. Esto nos permite trabajar con un solo punto por polígono, facilitando la extracción de información espectral de la imagen satelital y reduciendo la redundancia de datos.

## 5.4. Precision y validación

Para evaluar correctamente el desempeño del modelo, dividimos los datos en dos conjuntos: 80 % de los datos se usaron para entrenar el modelo. 20 %

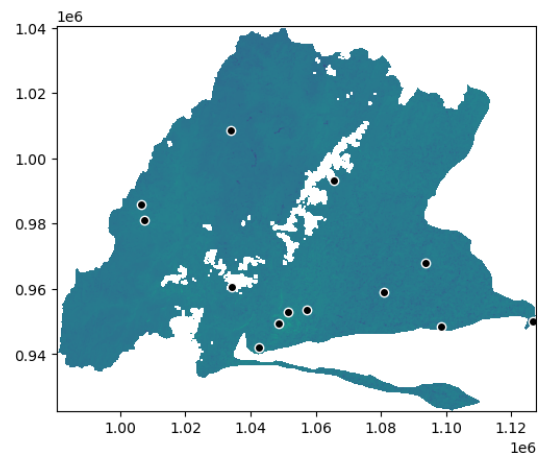


Figura 11: Extraccion de puntos del raster.

	precision	recall	f1-score	support
11	1.00	0.00	0.00	1.0
14	0.00	1.00	0.00	0.0
32	1.00	0.00	0.00	1.0
41	1.00	0.00	0.00	1.0
accuracy			0.00	3.0
macro avg	0.75	0.25	0.00	3.0
weighted avg	1.00	0.00	0.00	3.0

Figura 12: Predicción sobre los datos de prueba.

de los datos se reservaron para validación, con el fin de medir el rendimiento en datos no vistos durante el entrenamiento. La división se realizó con la función `train test split()` de `sklearn`, asegurando que el modelo no estuviera sobreajustado a los datos de entrenamiento.

## **6. Discusión**

Si bien se esperaba que las mayores reducciones en el caudal ocurrieran en el escenario 4, este escenario, que representa una visión extrema donde toda la frontera agrícola se expande incluso sobre áreas protegidas, plantea una expansión del 53,68 % de la actividad productiva (palma aceitera, arroz, forestación, soja y pasturas para ganadería). Sin embargo, las reducciones en los caudales fueron similares a las del escenario actual (escenario 1). Esto podría explicarse porque la expansión agrícola proyectada ocurre en áreas de sabana de la Orinoquía, donde las condiciones favorecen la mecanización de los cultivos. No obstante, en todos los escenarios se registran disminuciones del caudal, lo que incrementa la vulnerabilidad de las cuencas aledañas al PNN Chingaza.

### **6.1. Aspectos de vulnerabilidad hídrica en las subzonas hidrográficas del área de estudio**

Según el IDEAM (2019), la subzona hidrográfica (SZH) del río Guatiquía presenta una alta vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH) en condiciones hidrológicas promedio y extremas durante años secos. Esto se debe a la alta presión sobre los recursos hídricos en relación con la oferta disponible, la baja capacidad de regulación y retención del agua, y la erosión hídrica potencial en sus laderas, lo que agrava la vulnerabilidad del sistema hídrico.

Por otro lado, el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del río Guayuriba (2019) indica que, en términos generales, el índice desabastecimiento hídrico (IVH) es bajo tanto en períodos normales como en épocas secas. Sin embargo, en condiciones de sequía, el 56 % de las subcuencas presentan una vulnerabilidad media al desabastecimiento hídrico debido a una regulación deficiente y un uso medio del agua. Además, el 15 % de las subcuencas registran un IVH alto, asociado a una

mayor demanda del recurso.

Según el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2019), la subzona hidrográfica del río Metica (Guamal-Humadea) presenta una alta fragilidad en condiciones de año seco, lo que compromete su capacidad de abastecimiento para los sectores que dependen del recurso. De acuerdo con el POMCA del río Guamal, la cuenca tiene un IVH medio en condiciones hidrológicas de año promedio y seco.

Sin embargo, cinco de sus subcuencas presentan un IVH muy alto en ambas condiciones: Caño Araracuara, Caño Yopo, Caño Albania, Caño Los Pérez y Caño La Sal, siendo estos dos últimos afluentes del río Humadea. Esto indica que la cuenca media y baja del río Guamal es especialmente vulnerable, y su fragilidad aumenta durante los meses de estiaje.

## **6.2. Impacto de la expansión agrícola en la vulnerabilidad hídrica**

Además de los factores que incrementan la vulnerabilidad hídrica, la intensidad de la sequía y las reducciones del caudal superiores al 15 % hacen que el escenario 4 sea el más crítico. En este sentido, una expansión de la frontera agrícola impactaría negativamente estas cuencas y, en consecuencia, al PNN Chingaza, ya que todos estos sistemas están interconectados.

A pesar de este escenario extremo, el PNN Chingaza, gracias a la conservación de sus bosques y páramos, presenta una disminución máxima del 25 % en los caudales. Esto demuestra que el área protegida actúa como un amortiguador, reduciendo los efectos negativos del cambio en el uso del suelo. Sin embargo, aún se vería afectada por estas transformaciones de la cobertura natural.

## **6.3. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y dinámica de la vegetación**

Los resultados del NDVI muestran la presencia de vegetación herbácea, cuya actividad fotosintética responde a la disponibilidad de agua. Es importante destacar que en el fenómeno de sequía tanto los factores naturales y antropogénicos influyen sobre los ecosistemas tienen un impacto significativo

en las variaciones del NDVI, contribuyendo a la heterogeneidad espacial en los cambios de la vegetación.

Según Li et al. (2022), la variabilidad en el NDVI refleja diferencias espaciales en los factores que afectan la vegetación. Desde esta perspectiva, la heterogeneidad espacial es clave para comprender la dinámica de la vegetación, ya que permite identificar con mayor precisión los efectos de distintos factores en cada subzona hidrográfica. Este enfoque proporciona información valiosa sobre cómo un fenómeno como la sequía influye en los cambios de la vegetación, permitiendo una comprensión más integral de la interacción entre los factores ecológicos y el entorno local (Kumar et al., 2023; Li et al., 2022).

#### **6.4. Validación del Modelo con Matriz de Confusión**

Para evaluar el rendimiento del modelo, se generó una matriz de confusión, comparando las clases reales (y test) con las predichas (y pred):

1. Se calculó la matriz de confusión con `confusion matrix()` con la librería de `sklearn`. 2. Se visualizó la matriz con `seaborn.heatmap()`, permitiendo identificar qué clases fueron correctamente clasificadas y cuáles presentaron errores. 3. Se obtuvieron métricas de precisión, incluyendo exactitud, precisión, recall y F1-score, utilizando `classification report()` de `sklearn`.

A partir de lo anterior se detectó que en la matriz de confusión observamos que algunas clases no fueron correctamente predichas, lo que indica que el modelo necesita más datos o ajustes en los parámetros.

### **7. Bibliografía:**

Agudelo E. 2015. Bases científicas para contribuir a la gestión de la pesquería comercial de bagres (Familia Pimelodidae) en la Amazonia Colombiana y sus zonas de frontera. Tesis Doctoral Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals - ICTA, Universitat Autònoma de Barcelona

Álvarez-Rodríguez J. 2011. Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos. Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética. E.T.S.I. Caminos,



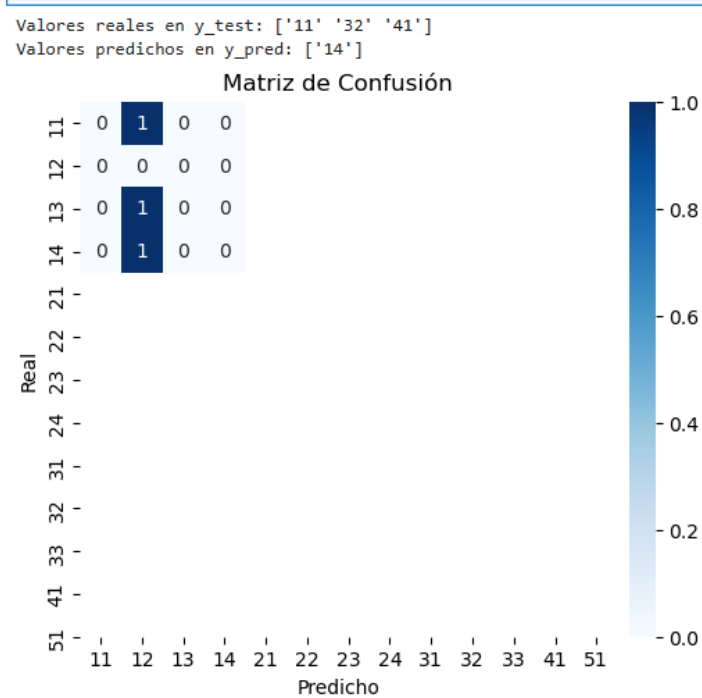


Figura 13: Matriz de Confusion

Canales y Puertos [Tesis].

Peña, Rafael. (2019). Gobernanza del Agua en el Sistema Chingaza: retos del ordenamiento urbano - Regional 1990-2016. [Tesis]. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes.

Birhanu, A., Masih, I., van der Zaag, P., Nyssen, J., y Cai, X. (2019). Impacts of land use and land cover changes on hydrology of the Gumara catchment, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 112, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.006>

Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M. R., Ochoa-Tocachi, B. F., Vanacker, V., Mao, Z., Stokes, A., y Mathez-Stiefel, S.-L. (2019). Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management*, 433, 569-584. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033>

Congreso Nacional de la república de Colombia. Decreto 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. (1974). Recuperado a partir de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma>

Daibes LF, Pausas JG, Bonani N, Nunes J, Silveira FA, Fidelis A. (2019). Fire and Legume Germination in a Tropical Savanna: Ecological and Historical Factors. *Ann. Bot.-London*. 123 (7):1219-1229. doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcz028>

Díaz-Granados Ortiz, M. A., Navarrete González, J. D., y Suárez López, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64-75

Dabrowska, J., Menéndez Orellana, A. E., Kilian, W., Moryl, A., Cielecka, N., Michałowska, K., Policht-Latawiec, A., Michalski, A., Bednarek, A., y Włóka, A. (2023). Between flood and drought: How cities are facing water surplus and scarcity. *Journal of Environmental Management*, 345, 118557. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118557>

Fujii, H., P.E. Verslues y J.K. Zhu. (2007). Identification of two protein kinases required for abscisic acid regulation of seed germination, root growth, and gene expression in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 19, 485-494.

DIRECCIÓN NACIONAL PARA LA PREVENCIÓN Y ATENCIÓN

DE DESASTRES, BANCO MUNDIAL, AGENCIA COLOMBIANA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL, (2005). Guía Ambiental para Evitar, Corregir y Compensar los Impactos de las Acciones de Reducción y Prevención de Riesgos en el Nivel Municipal. Bogotá, Colombia.

IDIGER. (2018). Caracterización general del Escenario de Riesgo Sísmico. Obtenido de <https://www.idiger.gov.co/rsismico>

Gardiya Weligamage, H., Fowler, K., Ryu, D., Saft, M., Peterson, T., y Peel, M. C. (2025). Vegetation as a driver of shifts in rainfall-runoff relationship: Synthesising hydrological evidence with remote sensing. *Journal of Hydrology*, 648, 132389. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132389>

He T, Belcher CM, Lamont B, Lim SL.( 2016). A 350-Million-Year Legacy of Fire Adaptation among Conifers. *J. Ecol.* 104 (2): 352- 63. doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12513>

Kumar, V., Bharti, B., Prasad, H., y Raj, A. (2023). Assessing the interrelation between NDVI and climate dependent variables by using granger causality test and vector auto-regressive neural network model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 131(May), 103428. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103428>

Li, S., Li, X., Gong, J., Dang, D., Dou, H., y Lyu, X.(2022). Quantitative Analysis of Natural and Anthropogenic Factors Influencing Vegetation NDVI Changes in Temperate Drylands from a Spatial Stratified Heterogeneity Perspective: A Case. *Remote Sensing*, 14(3320), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs14143320>

McBreen J. (2016). Regional Assessment on Ecosystem-based Disaster Risk Reduction and Biodiversity in South America. A report for the Resilience through Investing in Ecosystems – knowledge, innovation and transformation of risk management (RELIEF Kit) project. International Union for Conservation of Nature.

PNN-Parques Nacionales Naturales de Colombia, Reformulación Participativa del Plan de Manejo Parque Nacional Natural Chingaza, Bogotá: Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2016.

Pedraza S, Sanchez A, Clerici N, Ospina L, Quintero A, Escobedo FJ. (2020) Perception of conservation strategies and nature's contributions to people around Chingaza National Natural Park, Colombia. *Environmental Conservation*;47(3):158-165. doi:10.1017/S037689292000020X

Poveda, G., Waylen P y Pulwarty R. 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 234: 3 -27

Shlisky A, Waugh J, Gonzalez P, Gonzalez M, Manta M, Santoso H, Alvarado E, Ainuddin A, Rodríguez-Trejo DA, Swaty R, Schmidt D, Kaufmann M, Myers R, Alencar A, Kearns F, Johnson D, Smith J, Zollner, D, Fulks W. (2007). *Fire, Ecosystems and People: Threats and Strategies for Global Biodiversity Conservation*. GFI Technical Report 2007-2. Arlington, VA: The Nature Conservancy

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

Villegas, C. (1977). *Legislación forestal en los países que forman parte del programa IICA-Tropicos*. Turrialba, Costa Rica: Instituto interamericano de Cooperación para la Agricultura - IICA

Zhang, X., Chen, N., Sheng, H., Ip, C., Yang, L., Chen, Y., Sang, Z., Tadesse, T., Lim, T. P. Y., Rajabifard, A., Bueti, C., Zeng, L., Wardlow, B., Wang, S., Tang, S., Xiong, Z., Li, D., y Niyogi, D. (2019). Urban drought challenge to 2030 sustainable development goals. *Science of The Total Environment*, 693, 133536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.342>

Zhu, X., Li, Q., y Guo, C. (2024). Evaluation of the monitoring capability of various vegetation indices and mainstream satellite band settings for grassland drought. *Ecological Informatics*, 82, 102717. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102717>.

EAAAB - Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Captación. [En línea]: <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/captacion>

Decreto que incentiva el consumo responsable del agua en Bogotá: medidas de cuidado, 2024. [En Línea]: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/habitat/raconamiento-de-agua-en-bogota-decreto-334-medidas-de-cuidado>