

# Vulnerabilidad y riesgo climático para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en Colombia

## Una propuesta metodológica para su análisis

Mauricio Espitia, Juliana Durán Prieto, Stephanie Tye, Juan Camilo Peña, Diego Grajales, Jimena Gómez, Carolina Useche

### CONTENIDO

Introducción .....	3
Metodología .....	4
Resultados y discusión.....	14
Conclusiones .....	26
Apéndices .....	27
Acronimos y siglas.....	32
Notas finales.....	33
Referencias bibliográficas.....	35
Agradecimientos.....	40
Sobre la autoría.....	40
Acerca de WRI Colombia .....	40

*Los documentos de trabajo contienen investigaciones preliminares, análisis, hallazgos y recomendaciones. Se difunden para fomentar el debate oportuno y la retroalimentación crítica, así como para influir en el debate continuo sobre temas emergentes.*

**Citación sugerida:** Espitia, M., Durán, J., Tye, S., Peña, J., Grajales, D., Gómez, J., Useche, C. 2025. "Vulnerabilidad y riesgo climático para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en Colombia: una propuesta metodológica para su análisis". Documento de trabajo. Bogotá: WRI Colombia. DOI: <https://doi.org/10.46830/wriwp.24.00013>

### Puntos destacados

- Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) son parte integral de la transición y seguridad energética en Colombia, pero enfrentan desafíos climáticos crecientes, como sequías e irregularidad de las lluvias, que afectan el servicio ecosistémico de regulación hídrica en los territorios donde operan. Esto repercute directamente en la disponibilidad y estabilidad de los caudales de los ríos que las abastecen.
- Se propone una metodología replicable y adaptable a las realidades de diferentes PCH del país, que permita evaluar los riesgos climáticos mediante indicadores de sensibilidad, capacidad de adaptación y amenaza, considerando el recurso hídrico como elemento expuesto.
- Fortalecer la generación, acceso y calidad de la información climatológica, hidrológica, socioeconómica y operativa de estas hidroeléctricas, en términos de escala, actualidad y cobertura; permitirá una planificación y ejecución más precisa y eficaz de acciones frente al cambio climático por parte del sector, las entidades territoriales y otros actores clave en el entorno de la operación hidroeléctrica de pequeña escala.
- El Gobierno nacional, actores territoriales y las empresas privadas del sector hidroeléctrico tienen un rol clave en el liderazgo de procesos de fortalecimiento de capacidades y gobernanza territorial para garantizar la sostenibilidad y resiliencia de las PCH a largo plazo.

---

## Resumen ejecutivo

### Sobre este documento de trabajo

Este estudio surge por solicitud del Gobierno de Colombia, a través del Ministerio de Minas y Energía, para avanzar hacia la transición energética y en cumplimiento de los compromisos del Acuerdo de París; con el fin de promover una generación hidroeléctrica menos vulnerable al cambio climático y establecer una metodología común para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo climático de las PCH en Colombia, replicable y adaptable a distintos contextos territoriales.

La metodología se ajusta a los lineamientos establecidos en el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático (PIGCCme 2050) y los informes AR5 y AR6 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), permitiendo al sector privado comprender los riesgos físicos del cambio climático y promover acciones de adaptación en sus operaciones. También brinda insumos al sector público para que la planificación energética de las PCH, se articule con la gestión territorial y la protección de cuencas hídricas, asegurando el suministro de agua, el funcionamiento de las centrales y el bienestar de las comunidades locales.

En este contexto, la metodología considera dos escalas de análisis (empresarial y de entorno) y cinco etapas clave con indicadores de sensibilidad, adaptación y amenaza adaptados a proyectos de PCH en Colombia. La metodología se aplicó al proyecto Cantayús como caso de estudio para ilustrar su uso, identificar limitaciones y ofrecer recomendaciones para actores públicos y privados. Este estudio no constituye un pronunciamiento técnico, no refleja la posición de la empresa propietaria, ni incluyó verificación formal de la información, por lo que sus resultados deben entenderse en el marco de una aplicación metodológica exploratoria.

### Hallazgos principales

- En Colombia, pese al incremento de los proyectos tipo PCH en el territorio nacional, los estudios que se conocen sobre evaluación de los riesgos climáticos e hidroclimáticos para la generación hidroeléctrica se focalizan más en los grandes embalses, debido a políticas y marcos regulatorios que impulsan la inversión en estos proyectos.
- Existen pocos estudios de caso de PCH que identifiquen de forma específica los desafíos para potenciar su modelo de producción energética local y distribuida, a partir de la evaluación de su vulnerabilidad y riesgo climático en sus contextos territoriales. Por ello, es necesario avanzar en este tipo de análisis para garantizar la sostenibilidad de la hidroenergía de pequeña escala en el país, como un pilar clave de su matriz energética.
- La metodología de vulnerabilidad y riesgo climático desarrollada en este estudio se establece como un marco de referencia para las PCH en Colombia. Gracias a su naturaleza flexible y adaptativa, esta metodología es replicable en diversos proyectos PCH a nivel nacional. Su objetivo es orientar las acciones que las empresas del sector deben tomar en materia de adaptación al cambio climático.

## Introducción

### Vulnerabilidad y riesgo climático del sector hidroeléctrico en el contexto colombiano

El Sexto Informe (AR6) del IPCC advierte que América Latina y el Caribe enfrentan condiciones climáticas severas, alta vulnerabilidad y limitada capacidad de adaptación (Pörtner et al. 2022). En este contexto, Colombia es uno de los países más expuestos al cambio climático, por lo que la adaptación constituye una prioridad nacional (IDEAM et al. 2017). El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC, Gobierno de Colombia 2016), define acciones estratégicas y evidencia los impactos derivados de fenómenos como El Niño, La Niña-Oscilación del Sur-ENOS y los ciclos tropicales, responsables de pérdidas humanas y económicas (Pabón y Montealegre 2017; IDEAM 2023; IEA 2023).

Los cambios extremos del ciclo hídrico afectan el abastecimiento de agua, el saneamiento y la salud pública; además de generar conflictos por el uso del recurso entre las comunidades y las instituciones encargadas de su gestión (Pabón 2010). No obstante, más allá de los eventos extremos, las variaciones sostenidas en lluvia, temperatura y caudales también generan presiones significativas sobre los sistemas de abastecimiento y sobre la gestión territorial del recurso hídrico (Unfried et al. 2022).

Estas alteraciones repercuten directamente en el sector eléctrico colombiano, altamente dependiente de la hidroelectricidad (Arango-Aramburo et al. 2019). Aunque algunos estudios proyectan un aumento de la precipitación (Paz et al. 2019), otros advierten reducciones significativas en la capacidad de generación (IPCC 2007; Herrera-Carmona et al. 2014). Las zonas más afectadas serían Antioquia, Caldas, Cauca, Cundinamarca, Huila y Nariño, pertenecientes a la macrocuenca Magdalena-Cauca, fuente principal de energía del país (Herrera-Carmona et al. 2014).

El sector hidroeléctrico, que provee cerca del 70 por ciento de la energía nacional (OLADE 2019), enfrenta tres impactos críticos derivados del cambio climático:

**1. La reducción extrema de lluvias y otras variaciones como cambios progresivos en la precipitación ocasionan caídas en los caudales y un descenso a niveles críticos de los embalses, disminuyendo la operatividad del sistema hidroeléctrico en el país** (IDEAM et al. 2017). Esta disminución en los embalses, sumada a un uso intensivo de fuentes subterráneas por parte de la población y sectores como el agrícola o el de la salud, puede intensificar la presión sobre los recursos hídricos. Esto se traduce en una mayor competencia por el agua, tanto para la generación energética como para otros usos prioritarios (Parry et al. 2007).

**2. Las variaciones en los niveles de los ríos, causadas por la reducción de glaciares y el aumento de la precipitación, generan comportamientos hidrológicos impredecibles que afectan la eficiencia y seguridad del sector hidroeléctrico; ya que la disminución de caudales o el incremento de inundaciones dificultan la planificación, operación y mantenimiento de las centrales.** En los últimos 50 años, el área glaciaria colombiana se ha reducido un 70 por ciento, con una pérdida anual del 3 al 5 por ciento (Ceballos et al. 2024). El país cuenta con seis glaciares altamente sensibles a la falta de precipitación y al aumento de la temperatura, especialmente durante los fenómenos de El Niño, como los que se han presentado en el país. Un ejemplo de ello es la pérdida de cinco metros de espesor que experimentó el glaciar Santa Isabel entre 2015 y 2016 (IDEAM et al. 2017). De continuar esta tendencia, se estima que los nevados podrían desaparecer en tres o cuatro décadas, afectando el recurso hídrico para la generación eléctrica.

Entre 1988 y 2012, el IDEAM (2023) registró 13.577 eventos de inundación asociados al fenómeno de La Niña, presentándose el mayor número en 2011 (13 por ciento del total). Estas inundaciones produjeron daños en la infraestructura, interrupciones operativas y aumento de los costos de mantenimiento y gestión, dificultando la planificación y seguridad de los sistemas hidroeléctricos.

**3. La erosión en las cuencas hidrográficas representa un reto para el sector hidroeléctrico, ya que genera la acumulación de sedimentos en sus infraestructuras, reduciendo su eficiencia y afectando la seguridad energética.** En Colombia, la erosión avanza a un ritmo de 2.000 hectáreas por año, agravada por el cambio climático (Gobierno de Colombia 2018; Arévalo 2000; IEA 2021). Los sedimentos generados desestabilizan estructuras, aumentan la turbidez del agua y pueden causar inoperancia de los sistemas, con efectos negativos sobre el consumo doméstico, la productividad agropecuaria y la disponibilidad de alimentos, generando impactos económicos y sociales significativos (Tumbare 2013; Annandale et al. 2016; Li-Ting 2025).

Para enfrentar estos retos, el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del Sector Minero Energético (PIGCCme 2050) plantea cuatro ejes estratégicos para la adaptación orientados a la infraestructura resiliente, la planificación sectorial a corto y largo plazo, la gestión del entorno mediante la coordinación público-privada y el fortalecimiento de la información para una adaptación basada en evidencia científica (CIAT y Ministerio de Minas y Energía 2021).

## El importante papel de las hidroeléctricas de pequeña escala en Colombia

A pesar de que el cambio climático desafía la seguridad energética de Colombia, impactando la disponibilidad del recurso hídrico, el país ha optado por impulsar proyectos de pequeña escala conocidos como Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) (UPME 2013). El Gobierno nacional clasifica a estas centrales como Fuentes No Convencionales de Energía Renovables (FNCER) (Caja 1).

Las políticas y marcos regulatorios como la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021 (Congreso de la República 2014; Congreso de la República 2021), entre otros (leyes, decretos y resoluciones), junto con el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (Congreso de la República 2023), han facilitado la inversión en las FNCER, al ofrecer un soporte legal claro, incentivos tributarios y lineamientos para diversificar la matriz energética, mejorar el acceso a electricidad y reducir la dependencia de fuentes fósiles (Morales et al. 2015). Además, sobre las PCH, su tamaño reducido, bajo costo y facilidad de operación han incentivado su desarrollo en el país (UPME 2013).

Actualmente, las PCH representan el 5,2 por ciento (1.076 MW) de la matriz eléctrica colombiana, y se prevé un aumento de 1.796 MW en los próximos años (XM 2024). Dado que el 65 por ciento del territorio se ubica en Zonas No Interconectadas (ZNI), este crecimiento puede mejorar el acceso a energía limpia y apoyar la descentralización del sistema energético, impulsando un modelo bajo en carbono. Sin embargo, el sector enfrenta diferentes problemáticas, especialmente las relacionadas con los impactos del cambio climático, que afectan directamente la operación de las PCH en el país.

### Caja 1 | ¿Qué es una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH)?

Las PCH son instalaciones sin embalse que generan energía a partir del flujo de ríos y arroyos, con capacidad menor a 50 MW (Ley 2294 de 2023). Son ideales para electrificar Zonas No Interconectadas (ZNI) y pueden cubrir total o parcialmente la demanda de varios municipios en la zona interconectada. Pueden operar bajo el esquema de autogeneración, suministrando electricidad para consumo propio, o inyectando excedentes al Sistema Interconectado Nacional (SIN), regulado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y el Ministerio de Minas y Energía.

*Fuente:* UPME et al. 2015, Resolución Creg No. 038 de 2018 (CREG 2018), Resolución Creg No. 135 de 2021 (CREG 2021a), Resolución CREG No 174 de 2021 (CREG 2021b); Resolución CREG No 086 de 1996 (CREG 1996) y su modificación por la Resolución CREG No 096 de 2019 (CREG 2019).

A la fecha no se conocen ejercicios de evaluaciones específicas sobre la vulnerabilidad y el riesgo climático de las PCH en Colombia. Aunque el PIGCCme 2050 ofrece un marco de referencia, no incluye indicadores para analizar estos proyectos a nivel local, limitándose a orientar la formulación de indicadores de capacidad de adaptación por parte de las empresas. En consecuencia, no hay estudios de caso con indicadores aplicados al sector de PCH.

## Metodología

WRI diseñó una metodología estándar para analizar la vulnerabilidad y el riesgo climático en la generación hidroeléctrica de pequeña escala en Colombia, alineada con las recomendaciones del IPCC (Caja 2) y el PIGCCme 2050. Su objetivo es ofrecer un marco flexible y adaptable a distintos contextos del sector público y privado, que facilite la obtención de resultados concretos y medibles.

### Caja 2 | Marco conceptual del IPCC para evaluar vulnerabilidad y riesgo climático

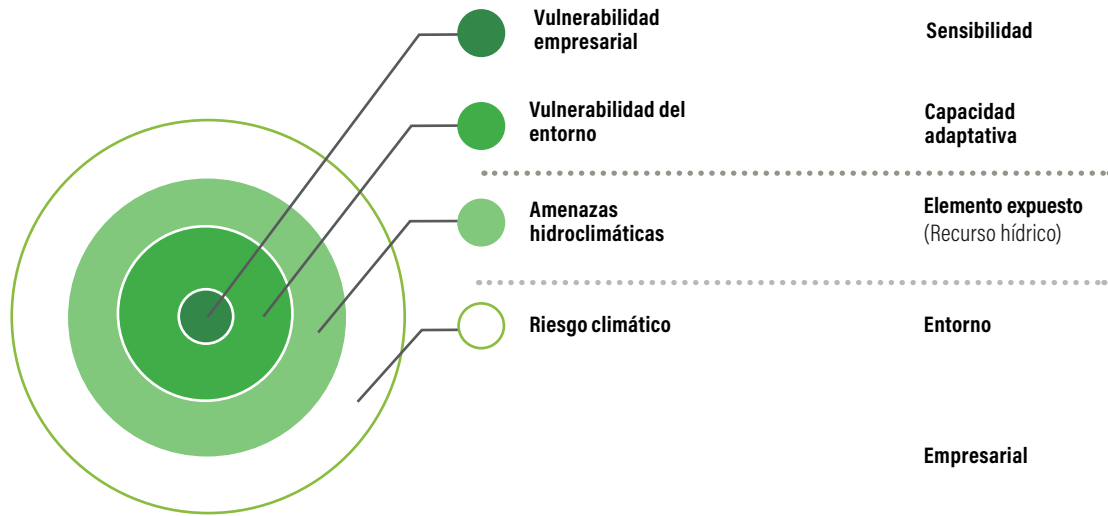
El IPCC (AR5) define el riesgo climático como la interacción entre amenazas climáticas y vulnerabilidad. Las amenazas climáticas son eventos o tendencias climáticas que pueden causar efectos adversos sobre los sistemas naturales y humanos, y abarcan eventos extremos como sequías, fuertes lluvias y olas de calor, así como cambios progresivos en las normales climáticas. La vulnerabilidad se define como la propensión o predisposición de un sistema a ser afectado de manera adversa por el cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y considera tres elementos:

- la sensibilidad o susceptibilidad al daño;
- la capacidad de adaptación para hacer frente y adaptarse a los potenciales daños; y
- la amenaza, como el grado en que un sistema está expuesto a factores climáticos específicos, tales como cambios en las temperaturas, precipitaciones, fenómenos meteorológicos extremos, entre otros.

Por lo tanto, un sistema puede ser vulnerable a ciertas amenazas en el territorio y no a otras.

*Fuente:* elaboración propia a partir de Field et al. 2014 y Unfried et al. 2022.

Figura 1 | Escalas de análisis a considerar para evaluar vulnerabilidad y riesgo climático en PCH



Nota: el recurso hídrico es el elemento expuesto y el riesgo climático una función de la sensibilidad, capacidad adaptativa y amenaza de la escala empresarial y de entorno.  
Fuente: elaboración propia.

Esta metodología en su enfoque propone dos (2) escalas de análisis (Figura 1):

### Escala de análisis 1 - Vulnerabilidad y riesgo climático en el entorno

Para entender cómo las dinámicas territoriales en torno al agua influyen la operación de las PCH, se definieron indicadores de vulnerabilidad y riesgo climático del entorno, de acuerdo con el PIGCCme 2050, integrados al análisis de vulnerabilidad y riesgo climático de la generación hidroeléctrica de pequeña escala a nivel territorial.

### Escala de análisis 2 - Vulnerabilidad y riesgo climático empresarial

A escala empresarial, se analiza la vulnerabilidad y el riesgo climático de la operación hidroeléctrica mediante indicadores que identifican condiciones de riesgo en las PCH, como una herramienta clave para la toma de decisiones para la adaptación del sistema frente al cambio climático.

### Hoja de ruta para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo climático en PCH

Con el propósito de establecer una hoja de ruta de trabajo bajo los dos enfoques mencionados, a continuación se realiza una descripción de cada una de las etapas requeridas para establecer un análisis de vulnerabilidad y riesgo climático para el sector hidroeléctrico de pequeña escala:

### Etapa 1: revisión bibliográfica

Antes de analizar metodológicamente la vulnerabilidad y riesgo climático, es clave revisar fuentes bibliográficas para identificar el contexto climático del área y los estudios existentes sobre riesgos y vulnerabilidad en territorios con proyectos de tipo PCH.

En el desarrollo de este estudio, se realizó la revisión de investigaciones sobre vulnerabilidad y riesgo climático en Colombia, especialmente sobre la gestión del agua y su relación con dimensiones sociales, económicas y ambientales.

De esta revisión se identificaron indicadores de amenaza, vulnerabilidad y riesgo climático, que sirvieron para construir la batería de indicadores de la metodología. Un resumen de los estudios clave se presenta en el Apéndice A.

### Etapa 2: análisis del entorno

Es clave analizar el contexto del territorio y su área de influencia para los proyectos PCH, pues sus condiciones específicas guían la identificación de la vulnerabilidad y riesgo climático. El PIGCCme 2050 señala que la gestión del entorno hidroeléctrico es un componente estratégico de la adaptación al cambio climático. La gestión del entorno implica el desarrollo de acciones para la conservación de las cuencas hídricas, la biodiversidad y el fortalecimiento territorial, considerando que los impactos acumulativos de múltiples PCH pueden generar alteraciones significativas en ecosistemas, recursos hídricos y comunidades locales (Athayde et al. 2019a, 2019b). Esto requiere la participación de todos los actores del territorio,

incluyendo a las comunidades y al sector empresarial, y destaca la importancia de acciones de gobernanza interinstitucional como un componente clave.

Para lograr este propósito se requiere analizar la información disponible, su calidad y escala para definir la mejor estrategia de evaluación de vulnerabilidad y riesgo climático según la realidad del territorio. Los instrumentos subnacionales sobre gestión del agua y planificación territorial<sup>1</sup> son cruciales, ya que aportan datos sobre diagnóstico, usos, disponibilidad y calidad del recurso; información esencial para la toma de decisiones estratégicas en contextos de cambio climático.

### Etapa 3: desarrollo y revisión del marco metodológico

Definir un marco metodológico para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo climático es clave para que las evaluaciones sean precisas y aplicables a contextos específicos. Debe integrar exposición, sensibilidad, capacidad adaptativa y amenaza, adaptándolos a sectores críticos como el energético. Esto permite ajustar indicadores, incorporar nuevos datos científicos, estandarizar metodologías y comparar resultados entre regiones o estudios, guiando decisiones informadas y fortaleciendo la resiliencia frente al cambio climático.

El IPCC se ha consolidado como la principal referencia global para entender los impactos, vulnerabilidades y riesgos asociados al cambio climático. Sus informes y guías metodológicas proporcionan un marco robusto y científicamente validado para evaluar la vulnerabilidad y riesgo climático.

### Etapa 4: definición y priorización de indicadores de capacidad de adaptación, sensibilidad y amenaza

Al tratarse de una metodología estándar, se propone una batería de indicadores estratégicos para evaluar vulnerabilidad y riesgo climático para proyectos de tipo PCH.

Esta propuesta presenta tres grupos de indicadores:

- El primero analiza amenazas hidroclimáticas según la exposición del territorio a variaciones climáticas (temperatura, precipitación), y escenarios futuros, evaluando riesgos para la actividad energética y el entorno hidroeléctrico.
- El segundo aborda la sensibilidad considerando las dinámicas del agua y la operatividad de las plantas hidroeléctricas ante eventos climáticos, así como la influencia de factores ambientales y sociales que pueden incrementar su exposición y respuesta frente al cambio climático.

- El tercero evalúa la capacidad de adaptación, abarcando la gobernanza, la planificación territorial, la generación eléctrica y los aspectos de equidad y género.

Para la selección de los indicadores se establecieron seis elementos estructurales que deben tenerse en cuenta a la hora de proponer una batería de indicadores para evaluar sensibilidad, capacidad de adaptación y amenaza, tal como se describe a continuación:

- **Nombre del indicador:** describe o identifica claramente la variable que pretende analizar.

Los indicadores propuestos en este estudio son el producto de un trabajo articulado con el Ministerio de Minas y Energía, y con empresas del sector y del gremio que las acoge, el Centro de Estudios de la Energía Renovable y el Agua (CEERA); así como resultado de la revisión bibliográfica de indicadores empleados en estudios de vulnerabilidad y riesgo climático relacionados con gestión del recurso hídrico (Apéndice A).

- **Escala:** describe la unidad de análisis, definida desde el componente espacial o geográfico como región, municipio<sup>2</sup>, vereda<sup>3</sup>, cuenca hidrográfica, o desde su componente organizacional como empresa.
- **Definición:** establece o describe el indicador desde sus límites y características propias.
- **Causalidad:** describe cómo una determinada condición o acción produce una consecuencia específica.
- **Referencia:** se citan como referencias estudios científicos u otras fuentes que respaldan las hipótesis detrás de las relaciones de causalidad para cada indicador.
- **Fuente de información:** describe el origen de los datos, referente a la entidad responsable que los produce y el documento en que se consolidan.

Una PCH deberá priorizar los indicadores que esta batería ofrece de forma informada, considerando las capacidades técnicas, financieras y económicas de las empresas, así como la disponibilidad y calidad de la información accesible para un análisis de vulnerabilidad y riesgo climático. La selección también dependerá del modelo de negocio de la PCH, ya que los indicadores de sensibilidad y capacidad de adaptación de la escala empresarial construidos se orientan, principalmente, a proyectos de autogeneración con venta de excedentes al SIN o que participan directamente en el mercado mayorista de energía<sup>4</sup>. En este contexto, si se presentan eventos hidrome-

teológicos extremos, como sequías o crecientes, que afecten la disponibilidad hídrica y, por tanto, la generación eléctrica, la empresa puede enfrentar pérdidas económicas significativas.

Para priorizar indicadores se sugiere un juicio de expertos que evalúe la viabilidad y prioridad según cuatro criterios: a) aplicabilidad a la PCH según su modelo de negocio; b) disponibilidad de información; c) nivel de importancia; y d) posibilidad de ser replicable<sup>5</sup>.

Respecto al primer criterio, se revisaron indicadores en recursos bibliográficos (Apéndice A) para seleccionar los aplicables al sector. Para el criterio de disponibilidad, se recomienda evaluar calidad, vigencia, temporalidad (mínimo 20 años para análisis de amenaza) y escala de la información, según la unidad de análisis (microcuenca, cuenca, municipio, etc.) del proyecto PCH.

Los criterios descritos se usan para definir indicadores mínimos de sensibilidad, capacidad de adaptación y amenaza, integrables al análisis de vulnerabilidad y riesgo climático en PCH. Para su priorización, se recomienda calificar cada indicador de 1 (no prioritario) a 5 (muy prioritario), según los cuatro criterios mencionados (Figura 2).

Al final de este proceso se requiere sumar todos los puntajes obtenidos para los 4 criterios. Los indicadores con mayor calificación son los que deben ser seleccionados para incluirlos dentro del análisis de vulnerabilidad y riesgo climático.

## Etapa 5: evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo climático

Analizar la vulnerabilidad y el riesgo al cambio climático requiere un enfoque integral que considere dos aspectos fundamentales siguiendo las directrices del IPCC AR5:

- Amenaza hidroclimática en función de la exposición del territorio.
- Vulnerabilidad (relación entre la sensibilidad y capacidad de adaptación).

Basado en este marco metodológico, la evaluación de vulnerabilidad y riesgo climático integra las siguientes fases:

**1. Definición del sistema de estudio y sus límites geográficos.** Esto implica identificar el sistema de estudio, en este caso, la generación de energía hidroeléctrica de pequeña escala en una cuenca particular, la cual debe ser delimitada geográficamente y ser considerada como la unidad hidrológica de análisis<sup>6</sup>.

**2. Evaluación de amenaza hidroclimática de la PCH en función de la exposición del territorio,** recopilando y analizando información climática y ambiental relevante, incluidos históricos y proyecciones de caudales, precipitación, temperatura, cambios de normales climáticas y eventos extremos; ajustados a escenarios de cambio climático en la unidad hidrológica priorizada.

**3. Análisis de la sensibilidad.** En esta fase se identifican las características intrínsecas del sistema, que determinan cómo será afectado por los impactos de un clima cambiante, en

Figura 2 | **Criterios de priorización de indicadores de vulnerabilidad al cambio climático para la generación hidroeléctrica de pequeña escala**

	MUY PRIORITARIO	PRIORITARIO	PRIORIDAD MEDIA	BAJA PRIORIDAD	NO ES PRIORITARIO
	1	2	3	4	5
Aplicabilidad para el sector	Es muy relevante en el sector	Es relevante en el sector	Es complementario en el sector	Podría o no estar en el sector	No se requiere en el sector
Disponibilidad de información	Se cuenta con excelentes insumos para su desarrollo	Existen insumos de buena calidad para su desarrollo	Los insumos están, pero tienen falencias para su desarrollo	Casi no existe información para su desarrollo	No existe información para desarrollarlo
Nivel de importancia	Es muy importante para el estudio	Es necesario para el estudio	Es complementario en el estudio	Podría o no estar en el estudio	No se requiere en el estudio
Posibilidad de réplica	Es replicable	Es replicable con baja incertidumbre	Es replicable con incertidumbre media	Difícilmente replicable	No es replicable

Fuente: elaboración propia.

relación con los recursos vulnerables en el territorio, como la disponibilidad de agua para la operación hidroeléctrica y su incidencia sobre la infraestructura.

**4. Análisis de la capacidad de adaptación** que evalúa los recursos técnicos, económicos, sociales e institucionales para enfrentar impactos climáticos, considerando estrategias existentes, políticas públicas y el grado de organización de los actores involucrados.

**5. Análisis de riesgo climático e impactos potenciales** para identificar la interacción entre amenaza hidroclimática, sensibilidad y capacidad de adaptación, determinando puntos críticos a nivel empresarial que requieran atención inmediata y áreas en el territorio con mayor resiliencia frente a los impactos.

**6. Los resultados** se presentan mediante mapas, tablas y reportes, para guiar estrategias de adaptación y mitigación empresariales y territoriales, priorizando acciones según su urgencia y viabilidad para una gestión sostenible del agua.

Para avanzar con los análisis de las fases 2 a 6, es necesario realizar los cálculos correspondientes que permitan obtener como resultado la vulnerabilidad y riesgo climático del sistema bajo análisis. A continuación, se describe este proceso metodológico.

## Metodología de cálculo

La sensibilidad, capacidad adaptativa y amenaza se calculan sumando los indicadores de cada componente, sin promediar, mediante ponderación porcentual por pesos<sup>7</sup> que totaliza 100%, como se ilustra en la siguiente ecuación de ejemplo para la sensibilidad:

$$S_b = \sum_{i=1}^n (V_{r_i} \times X\%_i)$$

Donde:

**S<sub>b</sub>**: Sensibilidad al cambio climático.

**Vr<sub>1</sub>, 2...n**: indicadores propuestos y seleccionados de acuerdo con la escala de análisis y la disponibilidad.

**X%**: Corresponde al peso porcentual según criterios de importancia del indicador para el sector y territorio, con base en la metodología de “juicio de expertos”.

Los pesos para cada indicador se definen a través de un juicio expertos, donde se debe decidir si un indicador influirá más, o menos, que los demás.

Tabla 1 | Rangos de capacidad adaptativa, sensibilidad y vulnerabilidad

Nº	Rango	Capacidad adaptativa	Sensibilidad	Vulnerabilidad
1	≤1,5	Muy baja (5)	Muy baja (1)	Muy baja (1)
2	1,51<x≤2,51	Baja (4)	Baja (2)	Baja (2)
3	2,51<x≤3,51	Media (3)	Media (3)	Media (3)
4	3,51<x≤4,51	Alta (2)	Alta (4)	Alta (4)
5	>4,51	Muy Alta (1)	Muy Alta (5)	Muy Alta (5)

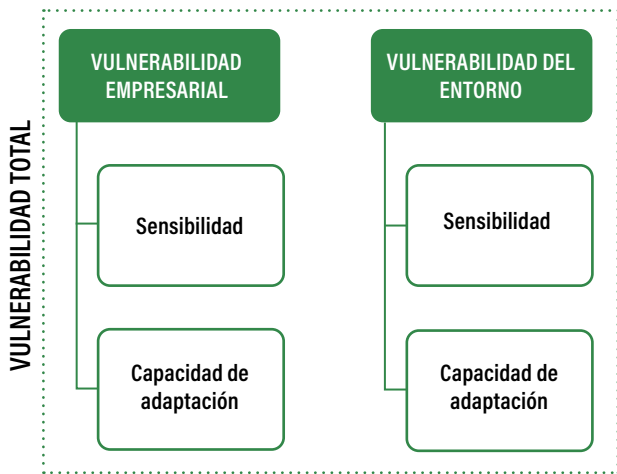
Fuente: elaboración propia a partir de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCNCC) (IDEAM et al. 2017).

Tabla 2 | Interacción de variables para el cálculo de la vulnerabilidad al cambio climático

Vulnerabilidad	Capacidad Adptativa					
	5	4	3	2	1	
Sensibilidad	1	3	3	2	1	1
	2	4	3	3	2	1
	3	4	4	3	3	2
	4	5	4	4	3	3
	5	5	5	4	4	3

Fuente: elaboración propia a partir de la TCNCC (IDEAM et al. 2017).

Figura 3 | Relación de la vulnerabilidad total para una PCH considerando las dos escalas del análisis, empresarial y del entorno



Fuente: elaboración propia.

		Empresarial				
		5	4	3	2	1
Entorno	Vulnerabilidad	5	4	3	2	1
	1	3	3	2	1	1
	2	4	3	3	2	1
	3	4	4	3	3	2
	4	5	4	4	3	3
5	5	5	4	4	3	

Tabla 3 | Interacción de la vulnerabilidad y amenaza por cambio climático

		Amenaza por cambio climático				
		5	4	3	2	1
Vulnerabilidad	Riesgo climático	5	4	3	2	1
	1	3	3	2	1	1
	2	4	3	3	2	1
	3	4	4	3	3	2
	4	5	4	4	3	3
5	5	5	4	4	3	

Fuente: elaboración propia.

Cada indicador se obtiene mediante métodos estadísticos de estandarización de datos. Para el caso, se empleó el algoritmo de Natural Breaks de Jenks (1967), para definir rangos que permiten comparar sensibilidad, capacidad de adaptación y amenaza (Tabla 1). Se propone usar una distribución uniforme de cinco rangos y asignar un color a cada uno, facilitando un análisis integrado y visual rápido de los resultados.

La vulnerabilidad se determina relacionando sensibilidad y capacidad de adaptación (Tabla 2), asignando niveles según los rangos establecidos. No es un cálculo estrictamente matemático, sino una evaluación cualitativa basada en criterios combinados.

Las diferentes variables deben correlacionarse para un análisis integral de la unidad hidrológica y la PCH, considerando la operación de la planta y las condiciones del entorno (Figura 3).

Una vez obtenida la vulnerabilidad total, se analiza la exposición frente a la amenaza hidroclimática para determinar el riesgo climático, como se muestra en la Tabla 3.

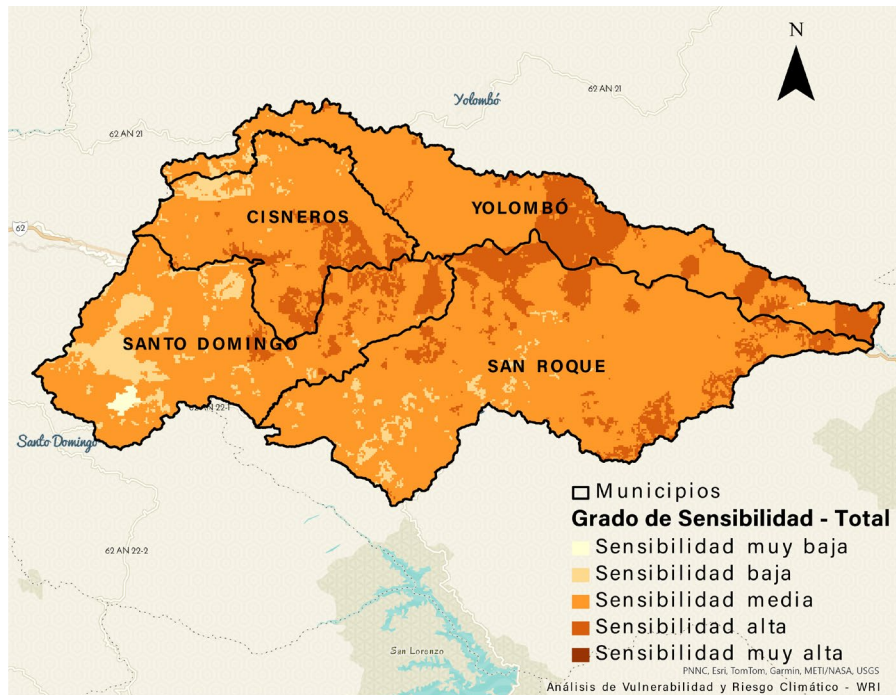
Como complemento a lo anterior, la incorporación de mapas (Caja 3) permite visualizar claramente los datos y detectar áreas más expuestas y sensibles al cambio climático bajo distintos escenarios (RCP 4.5 y 8.5)<sup>8</sup>, considerando variables como temperatura y precipitación (Caja 4 y 5).

Con la integración de información climática, hidrológica, socioeconómica y de uso del suelo, los mapas muestran patrones de riesgo como alta frecuencia de eventos extremos o reducción de recursos hídricos; facilitando la priorización de medidas de adaptación. De igual forma, los mapas permiten presentar información compleja de manera accesible como apoyo a la planificación y toma de decisiones basadas en evidencia.

### Caja 3 | Ejemplos de mapas elaborados en un análisis de vulnerabilidad y riesgo climático para proyectos de tipo PCH

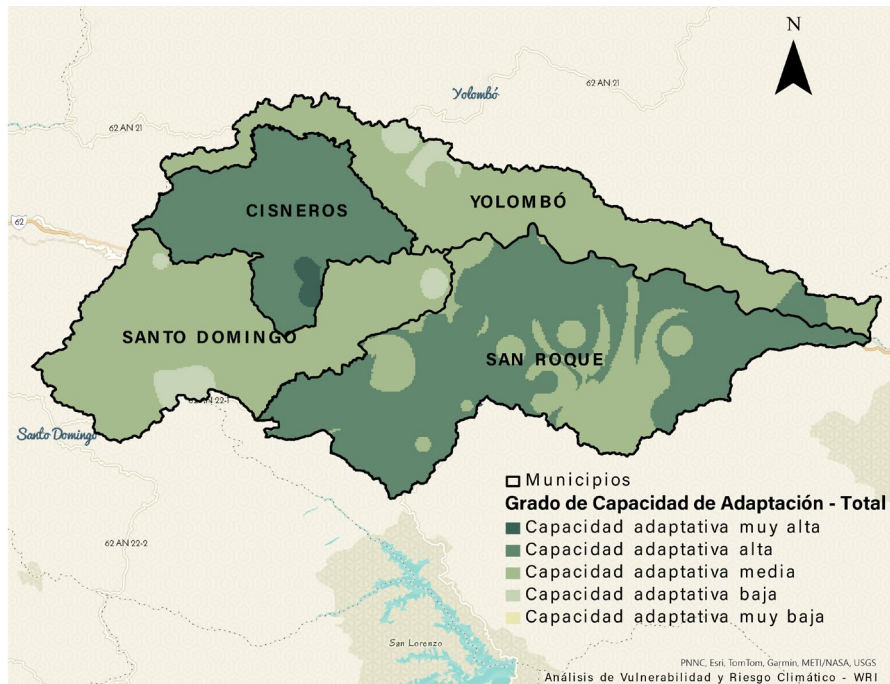
Estos mapas se elaboraron para la cuenca del río Nus (Nororiente de Antioquia, Colombia) e ilustran su sensibilidad total (3.A.), capacidad de adaptación total al cambio climático (3.B.) y amenaza total al cambio climático (3.C.), a partir del cálculo consolidado de algunos de los indicadores presentados en este estudio.

#### 3A | Mapa de sensibilidad total para la cuenca del río Nus



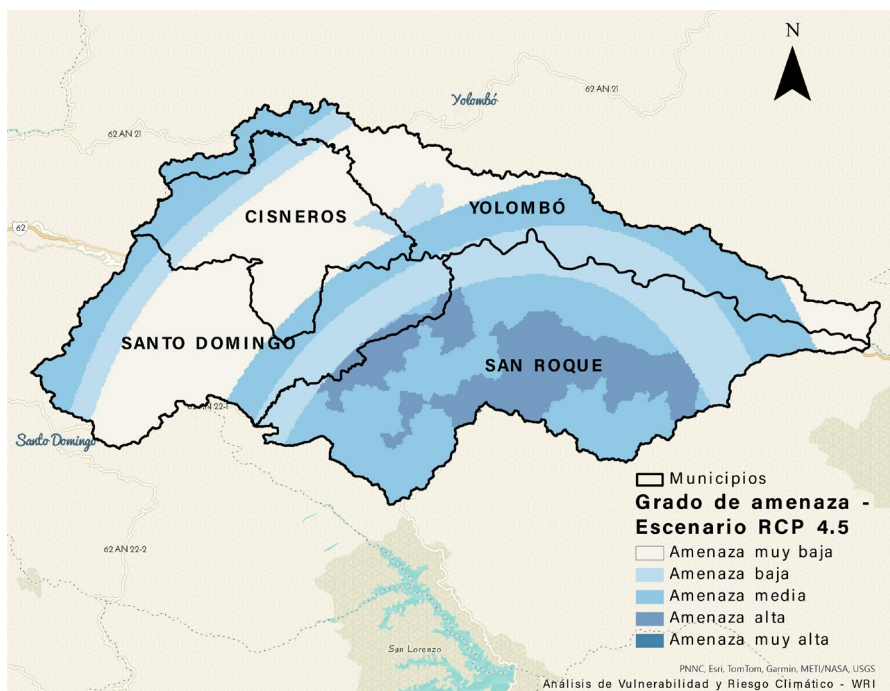
Fuente: elaboración propia.

3B | Mapa de capacidad de adaptación total al cambio climático para la cuenca del río Nus



Fuente: elaboración propia.

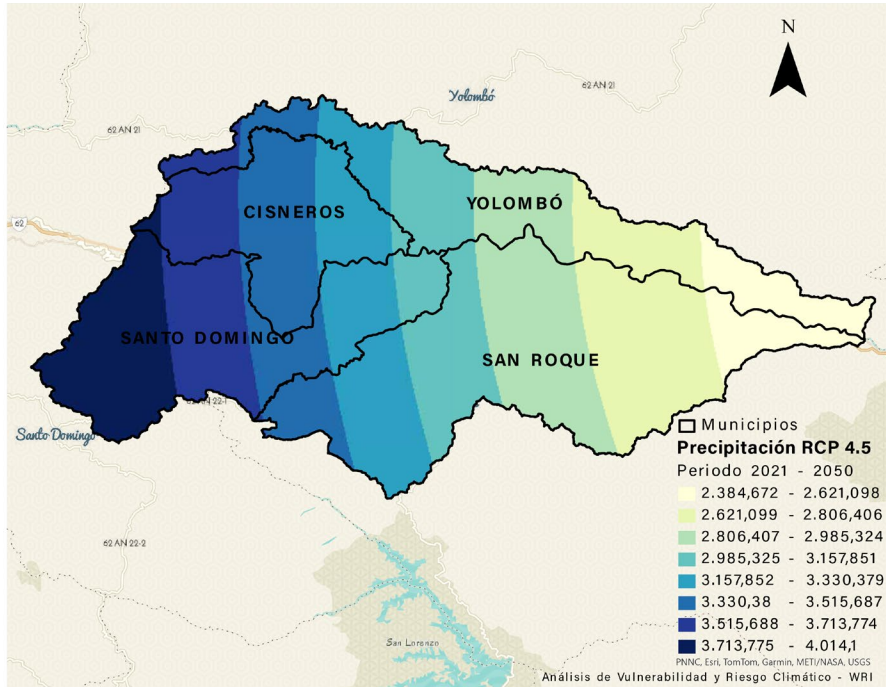
3C | Mapa de amenaza total al cambio climático para la cuenca del río Nus



Fuente: elaboración propia.

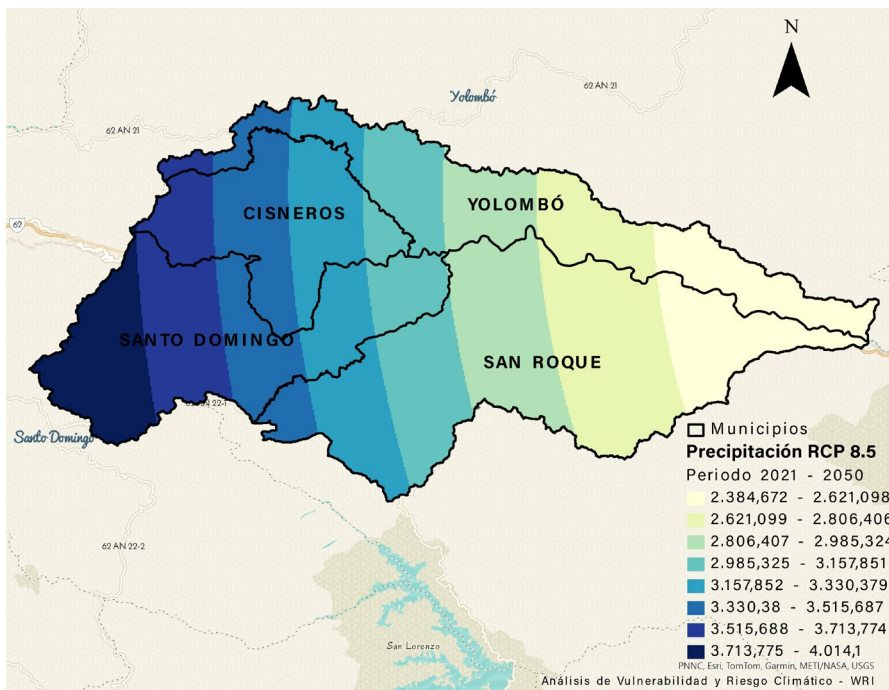
Caja 4 | Precipitación para la cuenca del río Nus bajo escenarios de cambio climático

4A | Distribución espacial de la precipitación para el escenario RCP 4.5 en el período de tiempo 2021-2050



Fuente: elaboración propia.

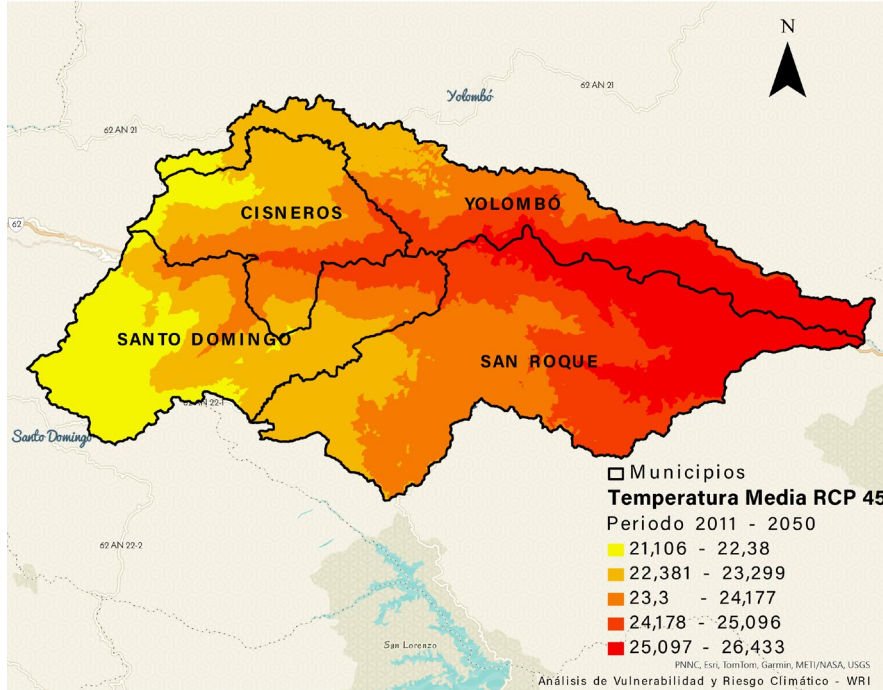
4B | Distribución espacial de la precipitación para el escenario RCP 8.5 en el período de tiempo 2021-2050



Fuente: elaboración propia.

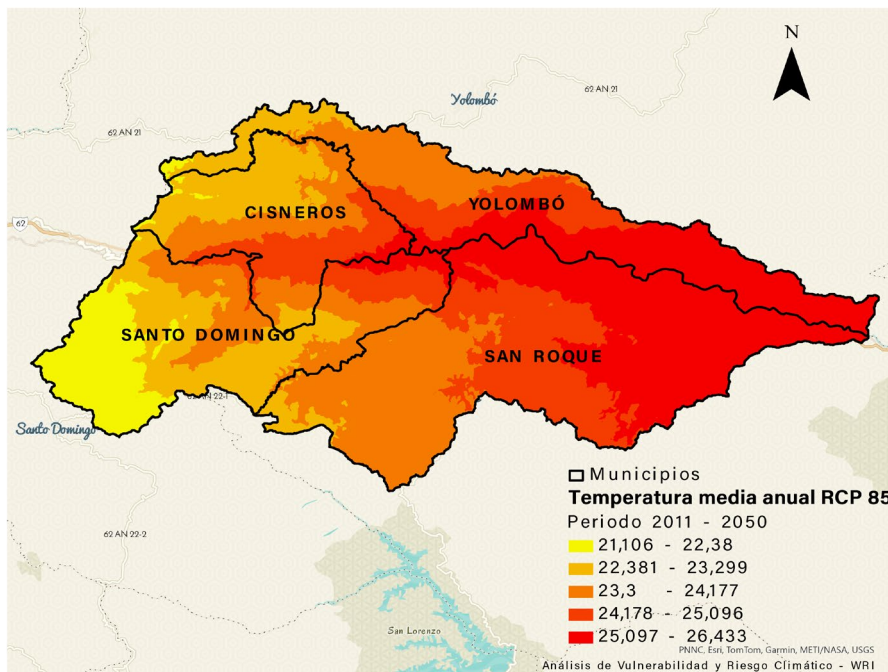
Caja 5 | **Temperatura media observada anual para la cuenca del río Nus bajo escenarios de cambio climático**

5A | **Temperatura media anual para el escenario RCP 4.5 en el período de tiempo 2021-2050**



Fuente: elaboración propia con base en CORDEX (2019).

5B | **Temperatura media anual para el escenario RCP 8.5 en el período de tiempo 2021-2050**



Fuente: elaboración propia con base en CORDEX (2019).

## Resultados y discusión

### Batería de indicadores de sensibilidad, capacidad de adaptación y amenaza

Una batería de indicadores de amenaza, sensibilidad y capacidad de adaptación permite evaluar la vulnerabilidad de un proyecto PCH frente a los impactos del cambio climático, considerando la interacción de factores naturales y socioeconómicos en el territorio.

### Indicadores de amenaza

Los indicadores de la Tabla 4 se centran en el recurso hídrico como elemento expuesto y evalúan posibles cambios futuros según los escenarios climáticos disponibles (ej. RCP o SSP), en el área de influencia del proyecto.

Tabla 4 | Indicadores de amenaza

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIAS	FUENTE DE INFORMACIÓN
Reducción de la oferta hídrica para los escenarios de cambio climático disponibles	Cuenca	La oferta hídrica permite establecer el posible grado de afectación que se tendrá en materia de disponibilidad de agua para el desarrollo de múltiples actividades, entre ellas, la generación eléctrica bajo los escenarios de cambio climático disponibles.	Cuanto más se afecta la oferta hídrica por los cambios esperados en los escenarios de cambio climático, mayor será la amenaza bajo los escenarios de cambio climático disponibles	Muy bajo Bajo Medio Alto Muy alto Crítico	Yeste et al. 2021; Secci et al. 2022.	Balance Hídrico Nacional (IDEAM 2019). Red Hidrometeorológica Nacional (IDEAM 2025). Estudio Nacional del Agua (ENA) 2022 (IDEAM 2023). Escenarios de Cambio Climático de la Cuarta Comunicación de Colombia (IDEAM 2024).
Aumento en la temperatura y disminución de la precipitación para los escenarios de cambio climático disponibles	Cuenca	Las variaciones esperadas en temperatura y humedad bajo los escenarios de cambio climático disponibles, son consideradas como amenazas dependiendo de su magnitud. Su análisis es fundamental para anticiparse y reducir al máximo las posibles afectaciones sobre la cuenca hidrográfica.	Cuanto más se aumente la temperatura y se reduzca la precipitación, mayor será la amenaza bajo los escenarios de cambio climático disponibles.	Muy bajo Bajo Medio Alto Muy alto Crítico	García-Valdecasas et al. 2024; Nandikanti et al. 2024.	Red Hidrometeorológica Nacional (IDEAM 2025). Escenarios de Cambio Climático de la Cuarta Comunicación de Colombia (IDEAM 2024).
Aumento en la precipitación para los escenarios de cambio climático disponibles	Cuenca	La precipitación es una variable climática que afecta el desarrollo de múltiples actividades, por lo que se considera una amenaza cuando su variación es significativa.	Cuanto más aumente la precipitación, mayor será la amenaza bajo los escenarios de cambio climático disponibles.	Muy bajo Bajo Medio Alto Muy alto Crítico	Cui et al. 2024; Palomino-Lemus et al. 2024.	Red Hidrometeorológica Nacional (IDEAM 2025). Escenarios de Cambio Climático de la Cuarta Comunicación de Colombia (IDEAM 2024).
Generación de energía hidroeléctrica bajo los escenarios de cambio climático disponibles	Empresa	Las condiciones climáticas futuras determinarán las condiciones para la generación de energía hidroeléctrica como eventos amenazantes.	Cuanto mayor sea la reducción en la generación de energía hidroeléctrica bajo los escenarios de cambio climático disponibles, mayor será la amenaza para la generación de energía hidroeléctrica.	Muy bajo Bajo Medio Alto Muy alto Crítico	García et al. 2024; World Bank 2022; UNIDO y ICSHP 2022; Papadopoulos y Skoulikaris 2021	Empresa Escenarios de Cambio Climático de la Cuarta Comunicación de Colombia (IDEAM 2024).

Fuente: elaboración propia.

### Indicadores de sensibilidad del entorno

En el contexto de las PCH, la Tabla 5 presenta indicadores para evaluar la sensibilidad del entorno a los impactos del cambio climático. Estos reflejan la manera en que factores

como la precipitación y temperatura, el acceso al agua, y los cambios en las coberturas de la tierra afectan la operación de las PCH y la vulnerabilidad de las comunidades locales.

Tabla 5 | **Indicadores de sensibilidad del entorno de la operación hidroeléctrica de una PCH**

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	CAUSALIDAD	DEFINICIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Eventos: Inundaciones	Municipio	Cuanto mayor sea el número de eventos de inundación, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Evalúa la tendencia de la ocurrencia de inundaciones que puede exacerbarse con el cambio climático.	Número de eventos de inundaciones en los últimos 20 años.	Heinrich-Mertsching et al. 2023; Tomás et al. 2022; Xian et al. 2020.	Red Hidrometeorológica Nacional (IDEAM s.f.).
Eventos: Sequías atmosféricas	Cuenca	Cuanto mayor sea el número de eventos de inundación, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Evalúa la tendencia de la ocurrencia de sequías que puede exacerbarse con el cambio climático. Las sequías atmosféricas son eventos climáticos caracterizados por la persistente falta de humedad, o una disminución significativa de la humedad en la atmósfera sobre un área geográfica específica.	Número de eventos de sequías en los últimos 20 años.	Kim et al. 2024; IDEAM 2023; López y Hernández 2022; Buras et al. 2020.	Red Hidrometeorológica Nacional (IDEAM s.f.).
Eventos: Precipitaciones extremas	Cuenca	Cuanto mayor sea el número de eventos de precipitaciones extremas, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Evalúa la tendencia de la ocurrencia de lluvias extremas que puede exacerbarse con el cambio climático. Las precipitaciones extremas hacen referencia a las lluvias que sobrepasan el promedio multianual de manera tal que puedan materializar eventos adversos asociados a la ocurrencia de este evento.	Número de eventos de lluvias extremas (SPI) en los últimos 20 años. SPI = Índice Estandarizado de Precipitación.	Aceves-Navarro et al. 2024; IDEAM 2023; Fauer y Rust 2023; Zhong et al. 2022.	Red Hidrometeorológica Nacional (IDEAM s.f.).
Índice de aridez	Cuenca	Cuanto mayor sea la disminución de la precipitación y mayor la evapotranspiración potencial, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Evalúa las condiciones naturales de aridez, midiendo el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región, permitiendo la identificación de áreas con aridez.	Altamente deficitario de agua. Deficitario de agua. Moderado a deficitario de agua. Moderado. Moderado a excedentes de agua. Excedentes de agua. Altos excedentes de agua.	García-Ramírez et al. 2023.	Estudio Nacional del Agua (ENA) (IDEAM 2023).
Escorrenría anual (Año seco)	Cuenca	Cuanto más disminuyan las precipitaciones y aumenten las temperaturas, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Valora el estado actual de la escorrenría.	Escorrenría anual (mm/año)	Comisión Nacional del Agua (Conagua) 2024; Red de Agua de la Universidad Autónoma Metropolitana (Red-AgUAM) 2023.	Estudio Nacional del Agua (ENA) (IDEAM 2023).

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	CAUSALIDAD	DEFINICIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Índice uso del agua	Cuenca	Cuanto mayor sea la demanda hídrica en la cuenca hidrográfica, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Este índice corresponde a la relación entre la demanda hídrica y la oferta natural.	Muy Bajo Bajo Medio Alto Muy alto Crítico	Puente Miranda et al. 2023; Valencia-Rojas et al. 2014.	Estudio Nacional del Agua (ENA) (IDEAM 2023).
Índice de regulación y retención hídrica (IRH)	Cuenca	Cuanto menor sea la regulación hídrica, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Capacidad que tiene una unidad hidrológica para regular el agua (sin intervención antrópica). El índice proporciona información clave sobre la resiliencia del territorio ante eventos hidrometeorológicos extremos, ayudando a identificar áreas críticas que requieren conservación y restauración para garantizar una gestión sostenible del agua en un contexto de cambio climático.	Muy bajo Bajo Medio Alto Muy alto Crítico	Magnier et al. 2024; González y Rodríguez 2023; Valencia-Rojas et al. 2014.	Estudio Nacional del Agua (ENA) (IDEAM 2023).
Dificultades de acceso al agua	Vereda	Cuanto mayor sea la dificultad para acceder al agua, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	A mayor # de UPA (Unidades de Planeación Agropecuaria) con dificultades para acceder al agua, mayor sensibilidad al cambio climático. El propósito de este indicador es medir y cuantificar la exposición de una población a dificultades en el acceso al agua como resultado de cambios en el clima. Al hacerlo, se busca identificar áreas y grupos de población particularmente vulnerables a sequías, inundaciones u otros fenómenos climáticos extremos.	Porcentaje (%) de UPA por vereda en un municipio X con acceso al agua	IDEAM 2023; Larramendi et al. 2019; DANE 2016.	Censo Nacional Agropecuario 2014 (DANE 2016). Estudio Nacional del Agua (ENA) (IDEAM 2023).
Cambio en coberturas de la tierra	Cuenca	Cuanto mayor sea el cambio de las coberturas vegetales, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Evalúa la pérdida o ganancia en coberturas de la tierra.	Tasa de cambio en coberturas de la tierra porcentual en los últimos 10 años	Thornton et al 2023; Sparey et al. 2022	Imágenes satelitales disponibles (imágenes SPOT 5 y SPOT 6).
Área bajo vegetación terrestre y humedales	Municipio / Vereda	La conservación de vegetación acuática en ecosistemas de humedal y de vegetación terrestre aumenta la resiliencia ambiental y la capacidad de adaptación.	Extensión de áreas cubiertas, vegetación terrestre y humedales dentro de una región específica.	Porcentaje (%) de hectáreas con vegetación terrestre y/o humedales, con respecto al porcentaje del área de la cuenca	Corrales-Chaves 2025.	Imágenes satelitales disponibles (imágenes SPOT 5 y SPOT 6).

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	CAUSALIDAD	DEFINICIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Población con mayor sensibilidad al cambio climático	Vereda	Cuanto más joven o mayor es la población, mayor sensibilidad al cambio climático.	Se busca identificar la población más sensible al cambio climático de acuerdo con los rangos de edad de las personas en un territorio.	Porcentaje (%) de la población entre 0 y 14 años de edad y con más de 55 años en zona urbana y rural.	Price et al. 2024; Cáceres y Hilton 2021.	Censo Nacional Agropecuario 2014 (DANE 2016).
Porcentaje total de personas afectadas y damnificadas por fenómenos hidrometeorológicos	Vereda	A mayor porcentaje de población afectada o damnificada por fenómenos hidrometeorológicos, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Este indicador permite evidenciar el grado de sensibilidad que tiene la población ante eventos hidroclimáticos.	Porcentaje de personas afectadas por fenómenos hidrometeorológicos por vereda, respecto del total de la población municipal en los últimos 20 años	Ocha y UNDRR 2023 ; Chavez-Demoulin et al. 2021.	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (OCHA y UNDRR 2025). Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE 2025). Red Hidrometeorológica Nacional (IDEAM 2025).
Crecimiento urbano no planificado	Vereda	A mayor crecimiento urbano no planificado, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Se relaciona la demanda de bienes y servicios ecosistémicos que se requieren para sostener el desarrollo urbano, incrementando de esta manera las presiones sobre la naturaleza.	Porcentaje de vivienda construida sin planificación con respecto al porcentaje total del área urbana planificada en los últimos 20 años.	Hu et al. 2023; Felkner et al. 2022.	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE 2025). Departamento Nacional de Planeación (DNP 2025). POT; PBOT, EBOT.

Fuente: elaboración propia.

### Indicadores de sensibilidad empresarial

En la Tabla 6 se proponen los indicadores empresariales para evaluar la sensibilidad al cambio climático en PCH, según las características particulares de cada proyecto (por ejemplo, si es autogenerador con contrato de venta)<sup>4</sup>, o de acuerdo con sus

compromisos ambientales. Algunos indicadores son especialmente relevantes para empresas con objetivos de reducción de emisiones y carbono neutralidad en sus operaciones.

Tabla 6 | **Indicadores de sensibilidad empresarial**

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Emisiones de GEI como consecuencia de usar energías fósiles ante la indisponibilidad energética renovable	Empresa	Este indicador permite identificar la sensibilidad a la inoperancia por eventos climáticos y su relación con la generación de GEI. Se trata de un indicador de sensibilidad de un riesgo de transición <sup>9</sup> para una empresa. Esto, considerando que en un análisis de riesgo de una PCH no solo se le debe dar importancia a lo que ocurra en el proyecto per se, sino que se debe considerar el riesgo sobre la función del proyecto energético en el sistema.	Cuanto más veces se interrumpa la generación de energía de la PCH por eventos climáticos, mayor será la probabilidad de consumo de combustibles fósiles como fuente de energía secundaria o de respaldo, por lo tanto, mayor será la sensibilidad ante el cambio climático climático.	tCO <sub>2</sub> eq/ KWh no generado por PCH que fuera sustituido por energías fósiles	Mwangi y Ochieng 2023; Grajales 2023; Zapata et al. 2022; Perera et al. 2020; Van Vliet et al. 2016	Empresa

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Pérdidas económicas por falta de venta o gastos extras ante indisponibilidad de generación de la PCH por eventos climáticos	Empresa	Este indicador permite identificar la sensibilidad de la PCH respecto a la afectación financiera que se sufre producto de un evento climático que tenga efectos sobre el caudal hídrico. Para una PCH generadora con contrato o compromisos de entrega pague lo generado, el impacto es la reducción del ingreso. Por otro lado, para una PCH autogeneradora esto ocurre por la necesidad de comprar energía de la red eléctrica si requiere continuar su operación y/o por la no venta de energía excedentaria, como efecto de un evento climático que tenga efectos sobre el caudal hídrico	A menor generación de energía en la PCH, mayores serán las pérdidas económicas, por tanto, mayor será la sensibilidad ante el cambio climático.	Valor perdido: (Pesos COP) (KWh) no generado, o gastado adicionalmente, por evento climático.	Grajales 2023; Zapata et al. 2022; González-Prida y Crespo Márquez 2021; Perera et al. 2020; Van Vliet et al. 2016.	Empresa
Indisponibilidad de generación por limitaciones de caudal (caudales máximos y mínimos)	Empresa	Este indicador permite identificar la cantidad de energía eléctrica no generada como consecuencia de eventos climáticos por la dificultad de usar el agua; ya sea por exceso del recurso al tener crecientes súbitas, o por la presencia de sequías que no permiten el uso de los generadores.	El aumento o disminución de caudales en periodos cortos de tiempo (crecientes súbitas o temporadas de sequía) no permite la generación de la PCH, ya sea por cierre de compuertas para proteger los equipos o por la falta de agua para la generación. Así, frente a indisponibilidad de la generación por limitaciones asociadas al caudal, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	KWh no generado por evento climático.	Grajales 2023; Zapata et al. 2022; Perera et al. 2020; Van Vliet et al. 2016. .	Empresa
Precio que se paga por la compensación de emisiones residuales <sup>10</sup> generadas de indisponibilidad de caudal	Empresa	Este indicador permite calcular los costos de generación de emisiones de CO <sub>2</sub> eq por la no generación de energía de la PCH que la empresa requiere compensar. El proceso de compensación es realizado por las empresas sujetas al impuesto del carbono y por aquellas que tienen certificaciones y/o estrategias de carbono neutralidad, <sup>11</sup> las cuales deben compensar sus emisiones residuales a través de la compra de créditos de carbono.	A menor generación de energía en la PCH causada por indisponibilidad de caudal, se aumentan las emisiones de GEI residuales que la empresa requiere compensar, lo que conlleva a un mayor precio de pago por compensación, por tanto, mayor será la sensibilidad al cambio climático.	Pesos COP/tCO <sub>2</sub> eq generado por la limitación de energía producida por la PCH cuando ocurre indisponibilidad de caudal.	Grajales 2023; Zapata et al. 2022; Perera et al. 2020; González y Sanchez 2019; Van Vliet et al. 2016.	Empresa

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Costo que se paga por fallas en la infraestructura, generadas por sedimentación consecuentes de eventos climáticos	Empresa	Este indicador es clave para entender los efectos que tiene la sedimentación consecuyente de los eventos climáticos sobre la infraestructura hidroeléctrica.	A mayor aumento en el costo y frecuencia de mantenimiento de la infraestructura hidroeléctrica debido al aumento de sedimentos causado por eventos climáticos, mayor será la sensibilidad al cambio climático	Pesos COP invertidos.	Tumbare 2013; Annandale et al. 2016 ; Azrulhisham, y Azri 2019; Skoulikaris 2021.	Empresa

Fuente: elaboración propia.

## Indicadores de capacidad adaptativa del entorno

Para este componente, la Tabla 7 propone indicadores que muestran la capacidad territorial de respuesta ante eventos

climáticos adversos, vinculando gobernanza e instrumentos de política para gestionar el cambio climático.

Tabla 7 | **Indicadores de capacidad adaptativa del entorno**

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Instrumentos de planificación en torno al agua	Municipio / Región	Se refiere a la evaluación de las medidas y estrategias implementadas en un área geográfica específica con el fin de preservar, conservar y gestionar de manera sostenible el recurso hídrico como medida de adaptación al cambio climático.	A mayor avance en la implementación de los instrumentos de planificación en torno al agua, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Porcentaje de avance en la implementación de instrumentos de planificación en torno al agua. La interpretación debe basarse en las siguientes categorías de implementación: Muy baja. Baja Moderada Alta Muy Alta	Bretas et al. 2020; The Nature Conservancy 2019.	Reportes de Corporaciones Autónomas Regionales (CAR). Alcaldías municipales.
Tamaño de predios	Vereda	El tamaño de los predios en el área de influencia de la PCH proporciona un área para desarrollar medidas de adaptación al cambio climático, cuanto más grande su extensión, mayores serán las cantidades de acciones que se podrán implementar.	A mayor tamaño del predio en el área de influencia de la PCH, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Hectáreas promedio de los predios.	Bejarano et al. 2022; Shames y Scherr 2019; Paz et al. 2019.	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC 2025). POMCAS.

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Analfabetismo	Vereda	Evalúa el grado de educación y preparación para tomar decisiones en torno al cambio climático y sus medios de subsistencia.	Cuanto menos analfabeta es la población, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Porcentaje de personas analfabetas por vereda sobre el total de población en el municipio. La alfabetización es entendida como la habilidad de las personas para leer y escribir.	Feinstein y Mach 2019; Esquivel Sarceño 2018; Lutz et al. 2014.	Censo Nacional Agropecuario 2014 (DANE 2016).
Inversión en género y equidad por municipio	Municipio / Vereda	Asignación de recursos financieros y esfuerzos destinados a promover la igualdad de género y la equidad en el ámbito local. La inversión con enfoque de género (GLI por sus siglas en inglés) es una práctica que se vuelve cada día más común y que ha demostrado ser una herramienta útil y de gran impacto para el avance de la igualdad de género.	Cuanto mayor sea la inversión de género y equidad para la población, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Pesos COP/10 k Habitantes	ONU Mujeres 2024; Aguilar Reveleo 2021; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia 2020.	Alcaldías municipales. Mapas de inversión (DNP 2025).
Inversiones en adaptación al cambio climático	Municipio	Mide la cantidad de recursos financieros públicos y privados invertidos en actividades y proyectos de adaptación al cambio climático en un área de estudio o región específica. Representa el compromiso y la capacidad de la entidad territorial para desarrollar acciones concretas que reduzcan la vulnerabilidad y mejoren la resiliencia frente a los impactos climáticos.	A mayor inversión en adaptación al cambio climático, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Pesos COP de inversión pública doméstica (recursos de presupuestos nacionales y subnacionales) y de origen internacional por municipio en los últimos 5 años, de acuerdo con el Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) del financiamiento climático para Colombia.	Banco Interamericano de Desarrollo 2021; Nguyen y Brown 2021; Smith y Jones 2020; Lempert et al. 2018; Brooks y Adger. 2004.	Alcaldías municipales. Mapas de inversión (DNP 2025). Plataforma del Sistema MRV (DNP 2025).
Acciones de adaptación al cambio climático	Municipio	Se refiere a las medidas y estrategias implementadas para reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos ante los efectos reales o esperados del cambio climático. Estas acciones buscan limitar los impactos negativos, reducir las vulnerabilidades y aumentar la resiliencia frente al cambio climático.	A mayor número de acciones de adaptación implementadas, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Número de acciones de adaptación implementadas en territorio.	Banco Interamericano de Desarrollo 2021; Brockway y Dunn 2019; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2016; Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica 2023.	Sistema MRV del Departamento Nacional de Planeación. Alcaldías Municipales. Repositorio de Datos del Banco Interamericano de Desarrollo (ID 2025). Corporaciones Autónomas Regionales (CAR s.f.).

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Índice de eficiencia en el uso del agua	Vereda	El índice de eficiencia en el uso del agua (IEUA) es el valor numérico que califica en una de seis categorías, la relación entre la Huella Hídrica Azul (consumo) generada por los sectores económicos presentes en una subzona hidrográfica, en un periodo de tiempo $t$ y la demanda hídrica (extracción) generada por las actividades humanas.	Cuanto menos ineficiente sea el uso del agua, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Muy bajo Bajo Medio Alto Muy alto Crítico	Bretas et al. 2020; Fernández y Martínez 2020.	Evaluación Regional del Agua (CAR s.f.). Sistema de Información del Recursos Hídrico del IDEAM (SIRH). Estudio Nacional del Agua (ENA) (IDEAM 2023).
Instrumentos de planificación en torno a la gestión del cambio climático	Municipio/ Región	Este indicador evalúa el nivel de progresión del ente territorial para gestionar el cambio climático. Esta progresión se evalúa de manera cualitativa asociada al estado de avance de la implementación de instrumentos de planificación en torno a la gestión del cambio climático que se formulen, con el objetivo de medir la capacidad de adaptación y la respuesta ante la vulnerabilidad relacionada con el cambio climático para una unidad hidrológica priorizada.	A mayor avance en la implementación de los instrumentos de planificación para gestionar el cambio climático, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Porcentaje de avance en la implementación de instrumentos de planificación con incidencia en la gestión del cambio climático en el territorio. La interpretación debe basarse en las siguientes categorías de implementación: Muy Baja Baja Moderada Alta Muy Alta	Brooks y Adger 2004; Lempert et al. 2018.	Plan Nacional de Desarrollo vigente. Alcaldías municipales. Instrumentos de planificación municipal, departamental y regional (POT, PBOT, EOT). Planes de desarrollo locales (municipales, departamentales). Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Territoriales (PIGCCt). Planes locales de adaptación. Planes de gestión del riesgo de desastres (municipales, departamentales).
Pobreza multidimensional municipal	Municipio	Las situaciones adversas por impacto del clima sobre una cuenca tienen un mayor impacto en comunidades con pobreza multidimensional, la cual no se mide solo por los ingresos, sino por múltiples carencias en diferentes áreas del bienestar humano, como la salud, la educación y las condiciones de vida.	A mayor pobreza multidimensional municipal, menor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Porcentaje de hogares pobres por municipio de acuerdo con 15 indicadores de la medida de pobreza multidimensional a nivel municipal establecida por el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia).	CAR-DGOAT et al. 2024; Bejarano et al. 2022; Bretas et al. 2020; DANE 2020; López y Martínez 2020; Charles et al. 2019; World Bank 2009; Cao y Zheng 2016.	Terridata (DNP 2025).

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Capacidad de asociatividad rural	Municipio	Busca definir la capacidad de respuesta de las comunidades rurales para afrontar los retos de un clima cambiante. El indicador evalúa la fortaleza de las redes de cooperación entre los actores rurales (cooperativas, asociaciones gremiales, campesinas, de mujeres, consejos, juntas de acción comunal), y su capacidad como comunidad para organizarse, colaborar y trabajar juntos de manera efectiva para adaptarse a los impactos del cambio climático.	A mayor asociatividad rural, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Actualmente el productor pertenece (o no) a 1 o más de las siguientes asociaciones: a. Cooperativas. b. Gremios. c. Asociación de productores. d. Centros de investigación. e. Organizaciones comunitarias (consejo comunitario, asociación u organización étnica indígena, de mujeres, de ancianos o de jóvenes).	Bravo et al. 2023; CEPAL et al. 2021.	Encuestas y entrevistas locales. Informes socioeconómicos. Entes territoriales. Investigaciones académicas. Censo Nacional Agropecuario 2014 (DANE 2016).

Fuente: elaboración propia

Nota: GLI es el proceso que permite incorporar un análisis de género a la hora de hacer una inversión para asegurar que el capital inyectado no solo genere retornos financieros, sino que también cree resultados positivos para las mujeres como medida de adaptación al cambio climático.

El sistema MRV es gestionado por el Departamento de Planeación Nacional de Colombia (DNP).

## Indicadores de capacidad adaptativa empresarial

Se proponen a continuación una serie de indicadores empresariales (Tabla 8) para calcular la capacidad de respuesta de una PCH frente al cambio climático.

Tabla 8 | **Indicadores de capacidad adaptativa empresarial**

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Tiempo de recuperación ante indisponibilidad de la PCH	Empresa	Cuantificación del tiempo (en minutos) que se tarda la PCH para retomar la operación una vez se genere indisponibilidad del caudal, como parte de la respuesta de la organización empresarial.	Cuanto más pronto se reinicie la operación de la PCH después de un evento climático que interrumpa la generación energética, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Minutos promedio post evento de puesta en marcha de la PCH.	Saravia et al. 2022.	Empresa
Disminución de pérdidas económicas generadas por indisponibilidad hídrica	Empresa	Reducción de pérdidas económicas asociados a indisponibilidad hídrica por la implementación de medidas de adaptación al cambio climático.	Cuanto menores sean las pérdidas económicas por indisponibilidad hídrica, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Pesos COP/ (m <sup>3</sup> /seg) mes	IRENA 2023; UNIDO y ICSHP 2022; Paz et al. 2019	Empresa

NOMBRE DEL INDICADOR	ESCALA	DEFINICIÓN	CAUSALIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	REFERENCIA	FUENTE DE INFORMACIÓN
Impacto sobre los compromisos de reducción de emisiones por consecuencia de la generación de emisiones de GEI residuales por indisponibilidad hídrica	Empresa	Cuantifica el impacto medido sobre la línea base o compromiso de reducción de emisiones asociada a la generación renovable de la PCH. Las metas de reducción de emisiones de GEI hacen parte de los objetivos estratégicos de las compañías que cuentan con una estrategia de carbono neutralidad o que están sujetas al impuesto al carbono. Esto hace que el no cumplimiento de las metas de reducción de emisiones afecte la eficiencia y, en algunos casos, la valorización de la compañía. Las metas de reducción de emisiones se cumplen con acciones de mitigación de emisiones, entre las que se encuentra el uso de energía renovable, como lo es la energía de la PCH.	Entre menos emisiones de GEI sean generadas mayor la adaptación al cambio climático, ya que la empresa cumple la meta de reducción de emisiones.	Emisiones residuales (tCO <sub>2</sub> eq) /tCO <sub>2</sub> eq sobre la línea base de reducción de emisiones de la PCH al año.	Siclari Bravo 2020	Empresa
Inversión empresarial al cambio climático	Empresa	Este indicador hace referencia a la capacidad adaptativa de las PCH para ajustarse a las condiciones cambiantes impuestas por el cambio climático, basada en los recursos y esfuerzos invertidos en estrategias de adaptación.	Cuanto mayor sea la inversión en adaptación empresarial para la gestión de los impactos climáticos, mayor será la capacidad de adaptación.	Pesos COP invertidos	Kadel et al. 2024; IRENA 2023; UNIDO y ICSHP 2022; Ochieng et al. 2022; Skoulikaris 2021; International Hydropower Association 2019	Empresa
Fortalecimiento del conocimiento en materia de cambio climático	Empresa	El fortalecimiento de capacidades en materia de cambio climático aumenta la capacidad de respuesta para afrontar un clima cambiante.	A mayor porcentaje de personas capacitadas en temas de cambio climático, mayor será la capacidad de adaptación al cambio climático.	Porcentaje de personas capacitadas por la empresa en temas de cambio climático.	Comisión Europea 2019; Brooks y Adger 2004.	Empresa
Índice de innovación y tecnología para la adaptación empresarial	Empresa	Mide el grado en que una empresa integra herramientas tecnológicas e innovaciones organizacionales en sus procesos de gestión, infraestructura y operación, con el fin de reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia frente al cambio climático.	A mayor incorporación de tecnologías innovadoras orientadas al monitoreo, predicción y gestión de eventos climáticos, así como de prácticas empresariales basadas en innovación, menor será el tiempo de inoperatividad y mayor la resiliencia operativa de la PCH frente a eventos climáticos extremos.	Incremento en la eficiencia hídrica o energética tras implementar innovación	Elshebli et al. 2024	Empresa

Fuente: elaboración propia.

## Ilustración de la aplicación de los indicadores para el caso de estudio de una PCH en el río Nus: limitaciones y resultados principales

Se aplicó la metodología propuesta para evaluar la vulnerabilidad y riesgo climático en la generación hidroeléctrica de pequeña escala en la cuenca del río Nus, usando información disponible. El análisis se centró en el recurso hídrico por su relevancia para la operación y viabilidad económica de los proyectos PCH.

La cuenca del río Nus, ubicada en el nororiente del departamento de Antioquia (Colombia), drena hacia el río Nare y posteriormente hacia la cuenca media del río Magdalena (Figura 4); y sus aguas se han aprovechado tradicionalmente para la generación hidroeléctrica de pequeña escala. Para el análisis de vulnerabilidad y riesgo climático se tomó como caso de estudio el proyecto PCH Cantayús.

A partir de la batería de indicadores construida, se buscó definir aquellos que pudieran ser aplicables al caso de estudio a través de un juicio de expertos. Este proceso tuvo las siguientes limitaciones:

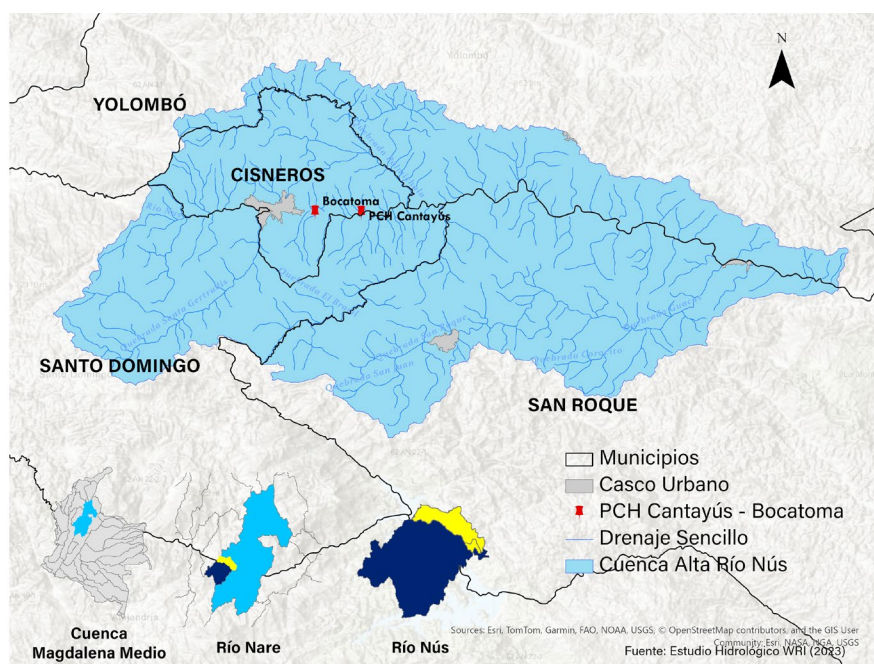
**1. Accesibilidad a la información:** no fue posible incluir los indicadores de género, equidad y aspectos socioculturales debido a la escasez de datos disponibles a nivel nacional y

subnacional. A esto se suma que en el ámbito empresarial, la información relativa a la operación hidroeléctrica y los impactos por cambio climático suele ser confidencial. Por ello, los indicadores empresariales de sensibilidad y capacidad de adaptación se calcularon mediante una encuesta de 46 preguntas, codiseñada con el Ministerio de Minas y CEERA, aplicada a la PCH Cantayús y a otras PCH en la cuenca del río Nus. de la cuenca del río Nus (Apéndice B, tabla 1B). Esta estrategia facilitó la obtención de información clave para un análisis integral de vulnerabilidad y riesgo climático.

**2. Estado de la información:** las fuentes de información necesarias para calcular los indicadores a la escala requerida (vereda, cuenca) están desactualizadas. Por ejemplo, el Censo Nacional Agropecuario, principal fuente para los indicadores de capacidad de adaptación del entorno, se realizó por última vez en 2014. Este desfase limita el análisis de vulnerabilidad y riesgo climático, impidiendo reflejar con precisión el estado actual, aumentando la incertidumbre y afectando las proyecciones e interpretaciones sobre los impactos climáticos en las PCH a nivel nacional.

Pese a las limitaciones, el proceso metodológico permitió calcular indicadores clave para el estudio. Específicamente, se logró obtener un indicador de sensibilidad empresarial (pérdidas económicas por indisponibilidad de la PCH por variaciones en los caudales, Tabla 6), y cuatro de los cinco

Figura 4 | Mapa de la cuenca del río Nus (Nororiente de Antioquia, Colombia) y localización de la PCH Cantayús



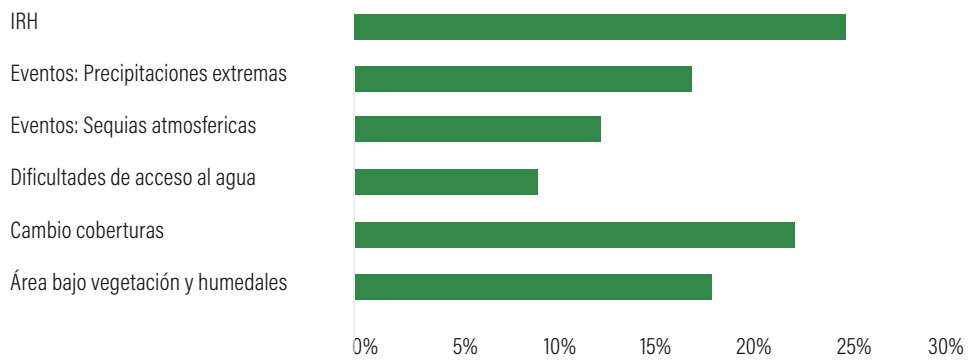
Fuente: elaboración propia con base en cartografía IDEAM, IGAC.

indicadores de capacidad de adaptación empresarial (Tabla 4); con base en la información proporcionada por la PCH Cantayús mediante la encuesta.

Para el componente del entorno, mediante un juicio de expertos con participación del Ministerio de Minas y Energía, el Ministerio de Ambiente, la empresa privada y especia-

listas, se ponderaron los indicadores definidos (Figuras 8 y 9), obteniendo siete indicadores de sensibilidad y trece de capacidad de adaptación, fundamentales para el análisis de vulnerabilidad y riesgo climático de esta PCH, según la metodología propuesta.

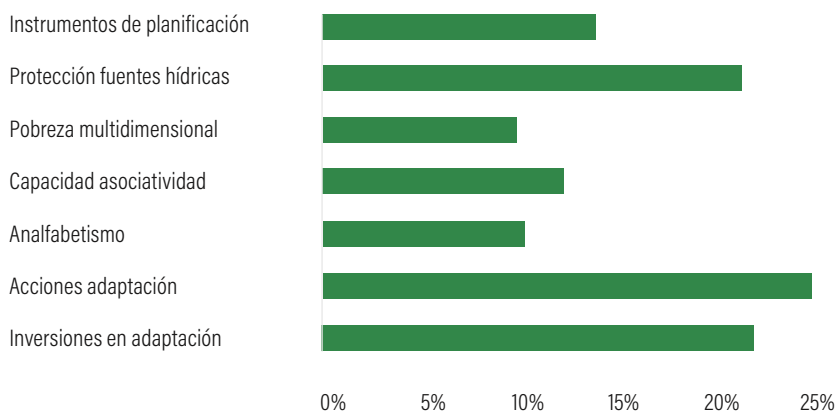
**Figura 5 | Ponderación porcentual de indicadores de sensibilidad del entorno para el caso de estudio (PCH Cantayús)**



*Nota:* IRH = Índice de Regulación y Retención Hídrica.

*Fuente:* elaboración propia como resultado de la ponderación del juicio de personas expertas.

**Figura 6 | Ponderación porcentual de indicadores de capacidad adaptativa para el caso de estudio (Cuenca del río Nus)**



*Fuente:* elaboración propia como resultado de la ponderación del juicio de personas expertas.

## Conclusiones

Se presentan a continuación algunas conclusiones derivadas del estudio:

- El marco metodológico propuesto, alineado con el IPCC (AR5 y AR6) y el PIGCCme 2050, plantea un enfoque flexible y escalable para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo climático de las PCH, integrando análisis a escala territorial y empresarial. Su diseño permite la aplicación bajo distintos contextos geográficos y condiciones operativas, incluso en escenarios de incertidumbre o limitaciones de información climática y sectorial. Para garantizar robustez, comparabilidad y replicabilidad, se establece la necesidad de priorizar de 9 a 12 indicadores distribuidos en amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa; asegurando un balance entre dimensiones internas de las PCH (infraestructura, operación, gestión), y factores del entorno (recursos hídricos, dinámicas socioeconómicas, instrumentos de planificación y gestión). Los indicadores deben incorporar variables climáticas proyectadas (precipitación, temperatura, disponibilidad hídrica), factores territoriales de sensibilidad y determinantes de capacidad adaptativa (protección de cuencas, planificación adaptativa, innovación tecnológica y capital humano). Este enfoque sistémico permite caracterizar riesgos, identificar capacidades y priorizar medidas de adaptación, fortaleciendo la resiliencia climática del sector hidroeléctrico frente a impactos actuales y futuros.
- Contar con información actualizada y confiable es crucial para orientar las estrategias públicas y privadas de adaptación del sector hidroeléctrico de pequeña escala ante los impactos del cambio climático. El crecimiento de las PCH en Colombia, impulsado por su capacidad para descarbonizar el sector energético y mejorar el acceso a electricidad en las ZNI, requiere fortalecer la generación y disponibilidad de datos accesibles y precisos. La carencia de información limita la evaluación rigurosa de su vulnerabilidad y riesgo climático. Por ello, es indispensable sistematizar datos climáticos, hidrológicos y socioeconómicos a nivel nacional y subnacional, desarrollar censos y bases de datos interoperables que integren los estudios de impacto ambiental empresariales y otras fuentes relevantes, y establecer líneas base que reflejen con precisión las condiciones reales de la operación hidroeléctrica. Esta información le permitirá al sector privado planificar acciones de adaptación efectivas y facilitar a las autoridades territoriales la gestión de los impactos climáticos, fortaleciendo la resiliencia territorial y la sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos.
- El conocimiento del entorno es clave para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo climático de las PCH en el país. Reconocer que la vulnerabilidad empresarial se integra a la del territorio permite orientar acciones de adaptación que reduzcan impactos locales, especialmente socioambientales, en un contexto donde las interacciones entre clima, biodiversidad y sociedad determinan riesgos emergentes, como señala el IPCC AR6. Desde esta perspectiva territorial, es necesario generar y sistematizar datos sobre inversión con enfoque de género y equidad en las zonas de influencia de las PCH, alineados con el AR6 para promover una adaptación climática efectiva e inclusiva.
- Sensibilizar sobre las vulnerabilidades y los riesgos climáticos de las PCH en Colombia es clave para reducir su exposición y acelerar la adaptación según los contextos territoriales. La comprensión de los impactos climáticos sobre la operación empresarial y los sistemas hídricos requiere el fortalecimiento de capacidades técnicas de empresas y autoridades locales, facilitando decisiones basadas en evidencia que garanticen la seguridad energética y la gestión eficiente de recursos hídricos bajo un enfoque de gobernanza adaptativa. Esta coordinación debe ser liderada por el Gobierno nacional, particularmente por el Ministerio de Minas y Energía, con participación de autoridades ambientales y del sector privado, promoviendo una planificación estratégica de los territorios hidroenergéticos con visión de largo plazo.

## Apéndices

### Apéndice A

Resumen de los estudios más destacados en Colombia con relevancia para el sector hidroeléctrico, los cuales permiten identificar y evaluar riesgos climáticos en relación con la gestión del recurso hídrico y su interrelación con otras dimensiones.

**Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCNCC) (IDEAM 2017):** el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) presentó la TCNCC, que incluye un análisis exhaustivo de vulnerabilidad y riesgo a causa del cambio climático en Colombia. Este estudio evalúa seis dimensiones territoriales: seguridad alimentaria, recurso hídrico, biodiversidad y servicios ecosistémicos, salud, hábitat humano e infraestructura. Utilizando 113 indicadores se determinó que, para el año 2040, el 59% de los municipios del país enfrentará un nivel de riesgo de medio a muy alto, por cuenta del cambio climático. Las regiones más afectadas incluyen la Andina, Amazonía y Pacífica (IDEAM et al. 2017).

**Análisis de vulnerabilidad y riesgo en la macrocuenca Magdalena-Cauca (TNC e IDEAM 2019):** The Nature Conservancy (TNC), en colaboración con el IDEAM, realizó un estudio enfocado en las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca. Se analizaron servicios ecosistémicos como la provisión de alimentos (peces y cultivos), control de inundaciones, abastecimiento de agua y servicios culturales. El estudio utilizó modelaciones hidrológicas bajo escenarios de cambio climático, tanto más húmedos como más secos, para evaluar la vulnerabilidad de sistemas socioecológicos en áreas como la Depresión Momposina y la cuenca del río Otún (Useche et al. 2019).

**Adaptación a los impactos climáticos en regulación y suministro de agua en el área de Chingaza-Sumapaz-Guerrero (2022):** el Proyecto de Adaptación al Cambio Climático en Alta Montaña es ejecutado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de Conservación Internacional Colombia, y es financiado por el Fondo Global Ambiental (GEF), a través del Banco Interamericano de Desarrollo. La vulnerabilidad y riesgo climático para el corredor de páramos Chingaza, Sumapaz y Guerrero fue evaluada como elemento clave para implementar medidas de adaptación al cambio climático en la alta montaña, fundamental para el suministro de agua en Bogotá (Bejarano et al. 2022).

**Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático en la transición Andes, Amazonía y Orinoquía. Cuencas abastecedoras a los Parques Nacionales Naturales Sumapaz, Cordillera de los Picachos, Sierra de la Macarena, Tinigua y Serranía de Chiribiquete (2022):** se desarrolló un análisis de vulnerabilidad y riesgo para facilitar la toma de decisiones en los Parques Nacionales Naturales Sumapaz, Cordillera de los Picachos, Sierra de la Macarena, Tinigua y Serranía de Chiribiquete, además de sus paisajes circundantes. Este análisis se elaboró usando índices e indicadores relacionados con las amenazas climáticas, los fenómenos detonados por cambios en el clima a largo y corto plazo, y las condiciones que hacen vulnerables a las comunidades, a los ecosistemas y a la infraestructura vial (Abud et al. 2022).

**Análisis de vulnerabilidad territorial ante el cambio climático (2018):** la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) desarrolló una guía para evaluar la vulnerabilidad territorial al cambio climático. Este documento ofrece herramientas metodológicas para comprender la variabilidad climática y diferenciar entre vulnerabilidad ante eventos extremos, y cambios climáticos a largo plazo.

Se enfoca en orientar la evaluación de la vulnerabilidad en territorios específicos, facilitando la planificación y gestión del riesgo (CAR y UNAL 2018).

**Resultados del análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en la cuenca del río Bogotá (2024):** la CAR realizó un análisis de los posibles impactos del cambio climático en la cuenca del río Bogotá, enfocándose en biodiversidad, recurso hídrico y riesgo de desastres. El estudio destaca la importancia de implementar medidas de adaptación y gestión del riesgo para proteger los ecosistemas y las comunidades locales (CAR-DGOAT et al. 2024).

## Apéndice B

Tabla 1B | Encuesta codiseñada por el Ministerio de Minas y Energía, el gremio CEERA y WRI aplicada a los proyectos de tipo PCH localizados en la cuenca del río Nus

N°	PREGUNTA FORMULADA	COMPONENTE
1	Nombre de la Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH)	Contexto
2	Por favor indique la vereda donde opera el proyecto PCH:	Contexto
3	¿Cuál es el caudal mínimo (m³/s) con el que opera la PCH?	Contexto
4	¿Cuánta es la energía máxima (MWh) generada por la PCH?	Contexto
5	¿Cuál es la capacidad nominal (MWh) de la PCH?	Contexto
6	En caso de generar excedentes ¿se venden al Sistema Interconectado Nacional (SIN)?	Contexto
7	¿Cuál es el precio de venta promedio de la energía (kWh) de su PCH al SIN?	Contexto
8	Conoce su empresa el Plan de Gestión Integral para Cambio Climático formulado por la autoridad ambiental (CAR) en la jurisdicción donde su ubica la PCH?	Adaptación
9	¿Conoce los riesgos climáticos que puede estar enfrentando el municipio donde se encuentra ubicada la PCH?	Adaptación
10	Si su respuesta anterior es Sí, ¿cuáles riesgos climáticos conoce?	Adaptación
11	¿Participa su empresa en actividades de recuperación ambiental, tales como actividades de restauración ecológica, reforestación de cuencas hidrográficas u otras, lideradas por el municipio donde se encuentra ubicada la PCH?	Adaptación
12	Si su repuesta anterior es Sí, describa en qué tipo de actividades participa:	Adaptación
13	¿Existe en su empresa un Plan de Gestión Integral de Cambio Climático o un plan similar para la gestión de riesgos climáticos?	Adaptación
14	Si su respuesta anterior es Sí, describa brevemente el alcance de cada plan específico y sus líneas o acciones estratégicas:	Adaptación
15	¿Su empresa conoce o cuenta con una identificación de riesgos climáticos en la zona geográfica de operación?	Adaptación
16	Si su respuesta anterior es Sí, por favor indique: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ¿Cuáles?</li> <li>▪ ¿Año y fuente de la información?</li> </ul>	Adaptación
17	¿Su empresa tiene asignadas personas para identificar y monitorear riesgos climáticos asociados a la operación de la PCH?	Adaptación
18	¿La PCH implementa medidas para la gestión del cambio climático?	Adaptación
19	Si responde Sí a la pregunta anterior, por favor seleccione el tipo de medidas que implementa: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No tengo información</li> <li>▪ Mitigación al cambio climático</li> <li>▪ Adaptación al cambio climático</li> <li>▪ Adaptación y mitigación al cambio climático</li> </ul>	Adaptación
20	¿Podría mencionar las principales medidas de mitigación al cambio climático que se implementan en la PCH y su entorno? (Mencione al menos dos medidas si se implementan)	Mitigación
21	¿Podría mencionar las principales medidas de adaptación al cambio climático que se implementan en la PCH y su entorno? (Mencione al menos dos medidas si se implementan y en cuál fase de ejecución se encuentran)	Adaptación
22	¿Se destinan recursos para la implementación de medidas de adaptación y/o mitigación al cambio climático?	Adaptación

N°	PREGUNTA FORMULADA	COMPONENTE
23	<p>Si su respuesta anterior fue Sí, ¿cuántos recursos destina la empresa?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No tengo esta información</li> <li>▪ 0 - 200.000.000 COP</li> <li>▪ 200.000.001 - 400.000.000 COP</li> <li>▪ 400.000.001 - 600.000.000 COP</li> <li>▪ 600.000.001 - 800.000.000 COP</li> <li>▪ Más de 800.000.001 COP</li> </ul>	Adaptación
24	<p>¿Cuántas capacitaciones en materia de adaptación al cambio climático realiza al año la empresa con los operarios de la PCH? Ejemplos de capacitaciones incluyen participar en un taller sobre la adaptación al cambio climático, un curso en línea sobre riesgos climáticos, etc.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No tengo esta información</li> <li>▪ 0</li> <li>▪ 1 - 3</li> <li>▪ 3 - 6</li> <li>▪ 6 - 8</li> <li>▪ Más de 8</li> </ul>	Adaptación
25	<p>¿Siente que la empresa se encuentra adaptada al cambio climático? Explique el porqué de su respuesta anterior</p>	Adaptación
26	<p>Según su experiencia, ¿qué acciones podrían ser más útiles para desarrollar medidas de adaptación al cambio climático?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No tengo esta información</li> <li>▪ Implementar acciones ya formuladas que sean aplicables en la organización y su entorno</li> <li>▪ Adoptar iniciativas que han funcionado en otras PCH</li> <li>▪ Formular medidas de adaptación propias</li> <li>▪ Construir conjuntamente medidas de adaptación en apoyo con organizaciones público- privadas que se encuentren cercanas a la PCH.</li> <li>▪ Otras: mencione</li> </ul>	Adaptación
27	<p>¿Por cuáles causas asociadas a eventos climáticos se ha presentado el mayor número de interrupciones en la generación de energía de la PCH? (Ordene de mayor a menor)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lluvias y avenidas torrenciales</li> <li>2. Sequía asociada a disminución de caudal</li> <li>3. La erosión</li> <li>4. Deslizamientos</li> <li>5. Otras: fallas en la red</li> </ol>	Sensibilidad
28	<p>¿Cuáles son las otras causas asociadas a eventos climáticos?</p>	Sensibilidad
29	<p>Considera que las consecuencias de las indisponibilidades de la PCH por eventos climáticos son: (Seleccione una opción)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Son mínimas y la interrupción en la producción de energía es temporal y de corta duración.</li> <li>▪ Podrían ser moderadamente graves, resultando en problemas de suministro para la operación de la PCH.</li> <li>▪ Son graves, representa un costo alto la no generación de energía.</li> <li>▪ Resultan en una situación de emergencia grave y generalizada. Los costos son muy altos para la PCH y la empresa.</li> </ul>	Sensibilidad
30	<p>¿Se han presentado daños en la infraestructura a causa del comportamiento climático? (Seleccione una opción)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No se han registrado daños en la infraestructura como resultado del comportamiento climático.</li> <li>▪ Se han reportado algunos daños menores en la infraestructura.</li> <li>▪ Los daños en la infraestructura son visibles y han afectado parcialmente su funcionalidad.</li> <li>▪ Se han reportado daños extensos en la infraestructura, lo que ha causado interrupciones importantes en los servicios y la generación de energía.</li> <li>▪ La infraestructura ha sufrido daños graves y generalizados que han tenido un impacto devastador en la empresa.</li> </ul>	Sensibilidad
31	<p>Cuando la generación de energía en la PCH es afectada por indisponibilidad de caudal asociado a muchas o pocas lluvias, se aumentan las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) que la PCH puede compensar. Teniendo esto en cuenta: (Sí/No)</p>	Sensibilidad

N°	PREGUNTA FORMULADA	COMPONENTE
32	<p>En caso de contestar Sí a la pregunta anterior, ¿cuánto le costó a la empresa compensar en el año 2023 las emisiones de gases efecto invernadero generadas por la inoperancia de la PCH a causa del comportamiento climático?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No tengo información</li> <li>▪ 0 - 50.000.000 COP</li> <li>▪ 50.000.001 - 300.000.000 COP</li> <li>▪ 300.000.001 - 450.000.000 COP</li> <li>▪ 450.000.001 - 600.000.000 COP</li> <li>▪ Más de 600.000.001 COP</li> </ul>	Sensibilidad
33	<p>¿Cuántas emisiones de gases de efecto invernadero en el 2023 fueron causadas por la inoperatividad de la PCH a causa del comportamiento climático?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No tengo ese dato</li> <li>▪ 0 - 50,000 tCO<sub>2</sub> Eq/año</li> <li>▪ 50,001 - 150,000 tCO<sub>2</sub> Eq /año</li> <li>▪ 150,001 - 480,000 tCO<sub>2</sub> Eq /año</li> <li>▪ 480,001 - 640,000 tCO<sub>2</sub> Eq /año</li> <li>▪ Más de 640,001 tCO<sub>2</sub> Eq /año</li> </ul>	Sensibilidad
34	<p>¿Qué tipo de obligaciones tiene asociada a la generación de energía? Seleccione tantas como apliquen, en el caso de otras, indique cuáles</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entrega de energía pague lo generado</li> <li>▪ Entrega de energía pague lo contratado</li> <li>▪ Certificados de reducción de emisiones por generación efectiva</li> <li>▪ Otro: indique cual _____</li> </ul>	Sensibilidad
35	<p>Cuando no se puede generar energía por comportamientos climáticos (exceso / ausencia de lluvias). Selecciona tantas cuantas le apliquen, en el caso otras indiquen cuáles:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Debe comprar energía para cumplir sus obligaciones</li> <li>▪ Debe comprar certificados para cumplir sus obligaciones de compensación de emisiones</li> <li>▪ Deja de percibir ingresos por certificados no emitidos</li> <li>▪ Otro: indique cual _____</li> </ul>	Sensibilidad
36	<p>Cuando se presenta una indisponibilidad de la PCH por la ocurrencia de un evento climático relacionado con altas lluvias, ¿cuánto tiempo (en promedio) se ha demorado en reiniciar por completo la operación?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 - 7 horas</li> <li>▪ 7 - 24 horas</li> <li>▪ 1 - 3 días</li> <li>▪ 3 - 7 días</li> <li>▪ Más de 7 días</li> <li>▪ No tengo esta información</li> </ul>	Sensibilidad
37	<p>Cuando se detiene la PCH, ¿cuánto tiempo (en promedio) tarda en reiniciar por completo su operación en condiciones normales?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0 - 7 horas</li> <li>▪ 7 - 24 horas</li> <li>▪ 1 - 3 días</li> <li>▪ 3 - 7 días</li> <li>▪ Más de 7 días</li> <li>▪ No tengo esta información</li> </ul>	Sensibilidad
38	<p>En el año 2023, ¿cuántos días se presentaron indisponibilidades de la PCH por eventos climáticos?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0 - 50 días</li> <li>▪ 51 - 150 días</li> <li>▪ 151 - 220 días</li> <li>▪ 221 - 290 días</li> <li>▪ 291 - 365 días</li> <li>▪ No tengo esta información</li> </ul>	Sensibilidad

N°	PREGUNTA FORMULADA	COMPONENTE
39	<p>¿En los últimos cinco (5) años, porcentualmente se ha logrado reducir la inoperatividad de la PCH a causa del comportamiento climático?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No tengo esta información</li> <li>▪ La empresa no tiene en cuenta estos criterios</li> <li>▪ 0 – 20%</li> <li>▪ 21 – 40%</li> <li>▪ 41 – 60%</li> <li>▪ 61 – 80%</li> <li>▪ 81 – 100%</li> </ul>	Sensibilidad
40	<p>Cuando se presentan eventos climáticos que inciden en la operación normal de una PCH se generan pérdidas económicas por la no generación de energía, entendiéndose estas pérdidas como el dinero que se deja de percibir y los gastos en que se incurre para subsanar el evento con el uso de combustibles u otras fuentes de energía, entre otros. En este sentido, percibe usted que las pérdidas económicas para la empresa son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inexistentes</li> <li>▪ Mínimas</li> <li>▪ Moderadas</li> <li>▪ Altas</li> <li>▪ Muy altas</li> <li>▪ No sé</li> </ul>	Sensibilidad
41	<p>En los últimos cinco (5) años, ¿cuánto se estima han sido las pérdidas económicas causadas por la indisponibilidad de la PCH por eventos imprevistos (paradas forzadas) no asociadas al comportamiento climático?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ No tengo información</li> <li>▪ 0 – 50.000.000 COP</li> <li>▪ 50.000.001 – 300.000.000 COP</li> <li>▪ 300.000.001 – 450.000.000 COP</li> <li>▪ 450.000.001 – 600.000.000 COP</li> </ul>	Sensibilidad
42	<p>En los últimos cinco (5) años, ¿cuánto ha sido la energía anual (kWh-año máxima) que ha dejado de generar la PCH por indisponibilidad asociada a eventos imprevistos (paradas forzadas) no relacionados con el comportamiento climático?</p>	Sensibilidad

*Nota:* contexto, sensibilidad y adaptación son los tres componentes en torno a los cuales se estructuraron las preguntas formuladas, ya que hacen referencia a aspectos clave de la operación de las PCH, así como a datos relevantes para evaluar su sensibilidad y capacidad de adaptación frente a los impactos de un clima cambiante.

*Fuente:* elaboración propia.

---

## Acrónimos y siglas

<b>CREG</b>	Comisión de Regulación de Energía y Gas	<b>PCH</b>	Pequeña Central Hidroeléctrica
<b>ERAS</b>	Evaluaciones Regionales del Agua	<b>PIGGCme 2050</b>	Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del Sector Minero Energético 2050 de Colombia
<b>EOT</b>	Esquemas de Ordenamiento Territorial	<b>POMCAs</b>	Planes de Manejo y Ordenación de Cuencas
<b>GLI</b>	Inversión con Enfoque de Género.	<b>PORH</b>	Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico
<b>LAC</b>	Latinoamérica y Caribe	<b>PNACC</b>	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Colombia
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia	<b>SIN</b>	Sistema Interconectado Nacional
<b>FNCER</b>	Fuentes No Convencionales de Energía Renovables	<b>TCNCC</b>	Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático
<b>IEUA</b>	Índice de Eficiencia en el Uso del Agua	<b>UPA</b>	Unidad de Planeación Agropecuaria
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, por sus siglas en inglés)	<b>WRI</b>	Instituto de Recursos Mundiales (World Resources Institute por sus siglas en inglés)
<b>IRH</b>	Índice de Regulación y Retención Hídrica	<b>ZNI</b>	Zonas No Interconectadas

## Notas finales

- 1 Instrumentos subnacionales para la planificación territorial y gestión del recurso hídrico que deben ser tenidos en cuenta en un análisis de vulnerabilidad y riesgo climático para la generación hidroeléctrica de pequeña escala:
  - Planes de Manejo y Ordenación de Cuencas (POMCAs),
  - Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH),
  - Evaluaciones Regionales del Agua (ERAS),
  - Planes de Ordenamiento Territorial (POT), Planes Básicos de Ordenamiento Territorial (PBOT), o Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT),
  - Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Territoriales (PIGCCT) y
  - Planes locales de Adaptación.
- 2 Municipio: se define como una entidad territorial fundamental de la división político-administrativa del Estado, con autonomía política, fiscal y administrativa dentro de los límites que le señalen la Constitución y las leyes de la República y cuya finalidad es el bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población en su respectivo territorio (DANE, 2018a).
- 3 Vereda: se define como la división territorial de carácter administrativo en el área rural de los municipios, establecida mediante acuerdo municipal. Se concibe como una agrupación comunitaria de base territorial y principal espacio de sociabilidad, caracterizada por la proximidad de residencia de sus miembros, el sentido de pertenencia e identidad común y el predominio de las relaciones vecinales. Se conforma principalmente por la agrupación de predios delimitados por accidentes geográficos y vías principales (DANE, 2018b).
- 4 Los proyectos tipo PCH que cuentan con contratos de compra-venta de energía deben cumplir con las condiciones establecidas en la Resolución CREG No. 024 de 1995 por la cual se reglamentan los aspectos comerciales del mercado mayorista de energía en el SIN o en acuerdos bilaterales entre privados. Estos contratos pueden incluir cláusulas de firmeza o garantías de entrega de energía, obligando al generador a suministrar la energía pactada, independientemente de las condiciones operativas de la planta. Así, si la empresa posee un contrato del tipo "firme", debe asumir los costos de cumplir con la entrega de energía contratada; incluso si debe adquirirla en el mercado a precios más altos cuando, por ejemplo, un evento climático afecta su producción y la generación energética. Si por el contrario, la empresa tiene un contrato de tipo "pague lo generado", la empresa no recibe ingresos si no genera energía, pero aún debe cubrir sus costos fijos de operación y obligaciones financieras, como el servicio de la deuda.
- 5 Los cuatro criterios definidos para la priorización de indicadores de sensibilidad y capacidad de adaptación, aplicados en el juicio de expertos como parte del proceso metodológico del análisis de vulnerabilidad y riesgo climático, fueron:
  - Aplicabilidad para el sector: criterio que reconoce las necesidades y prioridades del sector hidroeléctrico de pequeña escala para dar respuestas eficientes en la gestión del cambio climático y del recurso hídrico.
  - Disponibilidad de información: uno de los grandes inconvenientes a la hora de desarrollar indicadores es la dificultad para encontrar información disponible para su cálculo. De acuerdo con esto, a través del conocimiento de expertos, se evalúa la prioridad desde el punto de vista de la disponibilidad de datos, y conlleva una revisión previa de la información existente para el cálculo del indicador.
  - Nivel de importancia: existen consideraciones que deben abordarse para comprender las causalidades de los impactos potenciales por cambio climático. En este sentido, se busca priorizar indicadores que se consideren relevantes para identificar la vulnerabilidad y riesgo climático.
  - Posibilidad de ser replicable: este criterio considera que el indicador pueda incorporarse en un análisis de vulnerabilidad y riesgo climático para diferentes PCH en sus contextos territoriales, por lo cual, la priorización de los indicadores dependerá de la oportunidad de que puedan ser replicables.
- 6 Se sugiere definir las áreas de estudio en función de las unidades hidrológicas, siguiendo el comportamiento natural de los sistemas hídricos, que no se ajusta a las divisiones político-administrativas del país. Este enfoque facilita los análisis ambientales relacionados con el comportamiento hidrológico, que es el aspecto clave en este tipo de estudios para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo climático en el sector hidroeléctrico de pequeña escala.
- 7 Este aspecto no aplica cuando toda la información que alimenta el estudio tiene igual relevancia, escala o relación directa con el objetivo final. Si los indicadores son homogéneos y de la misma naturaleza, se puede hacer una sumatoria simple, sin pesos porcentuales.
- 8 Los escenarios RCP (Representative Concentration Pathways) presentados por el IPCC en su informe AR5, fueron empleados en este estudio debido a que eran los escenarios disponibles a la fecha de la investigación. Sin embargo, es importante considerar que el IPCC (Pörtner et al. 2022) en su Sexto Informe de Evaluación (AR6), introdujo los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways o Rutas Socioeconómicas Compartidas), los cuales representan posibles trayectorias de desarrollo socioeconómico a nivel global. Estos escenarios exploran cómo podrían transformarse, en las próximas décadas, factores como la economía, la sociedad, la tecnología y el crecimiento demográfico, y analizan los desafíos que dichos cambios implican para las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. Así mismo, en agosto de 2025, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), presentó los nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia (IDEAM 2024), en el marco de la Cuarta Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia. Estos escenarios se desarrollaron entre 2022 y 2024 con una alta participación de sectores, instituciones y comunidades académicas, y se fundamentan en las proyecciones globales del IPCC en su informe AR6, empleando las Rutas Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés).

- 
- 9 El riesgo de transición es aquel que se refiere a las pérdidas financieras que surgen directa o indirectamente del proceso de ajuste hacia una economía más baja en emisiones de carbono y más sostenible desde el punto de vista medioambiental (TCFD 2017).
- 10 Emisión residual de GEI: emisión de gases de efecto invernadero que persiste después de tomar todas las medidas posibles por una empresa para implementar la reducción de emisiones (ICONTEC 2022).
- 11 El proceso de compensación de emisiones de carbono se enmarca en la Ley 1819 de 2018 que estableció el impuesto al carbono en Colombia, lo que no solo generó un costo para las compañías que deben pagarlo, sino que también impulsó la creación de un nuevo mercado de carbono. Lo anterior, además de impulsar proyectos de remoción de emisiones a nivel nacional, motivó la creación de estrategias y planes de descarbonización y carbono neutralidad dentro de las compañías.

## Referencias bibliográficas

- Abud, M., J. Guerrero, F. Suárez, J. Prüssmann, L. Cuadros y C. Urbano. 2022. Análisis de vulnerabilidad y riesgo climático en la transición Andes, Amazonía y Orinoquía. Cuencas abastecedoras a los Parques Nacionales Naturales Sumapaz, Cordillera de los Picachos, Sierra de la Macarena, Tinigua y Serranía de Chiribiquete. Publicación de WWF Colombia en el marco del proyecto Áreas Protegidas y Paz.
- Aceves-Navarro, L. A., B. Rivera-Hernández, y J.F. Juárez-López. 2024. "Precipitaciones extremas y periodos de retorno en la subregión de la Chontalpa, Tabasco, México". *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan* 12(2): 161-175.
- Aguilar Revelo, L. 2021. La igualdad de género ante el cambio climático: ¿qué pueden hacer los mecanismos para el adelanto de las mujeres de América Latina y el Caribe?. Santiago: Naciones Unidas (CEPAL).
- Annandale, G.W., G.L. Morris y P. Karki. 2016. *Extending the Life of Reservoirs: Sustainable Sediment Management for Dams and RunofRiver Hydropower*. Washington, DC: World Bank Group.
- Arango-Aramburo, S., S.W.E. Turner, K. Daenzer, J.P. Ríos-Ocampo, M.I. Hejazi, T. Kober, A.C. Álvarez-Espinosa, G.D. Romero-Otalora, y B. van der Zwaan. 2019. "Climate impacts on hydropower in Colombia: A multi-model assessment of power sector adaptation pathways". *Energy Policy* 128: 179-188.
- Arévalo, E. R. 2000. "Cultivar sin arar: Labranza mínima y siembra directa en los Andes — Proyecto Checua (Proyecto de Conservación de Suelo y Agua en la Zona Andina)". Bogotá, Colombia: CAR / GTZ.
- Athayde, S., C.G. Duarte, A.L.C.F. Gallardo, E.M. Moretto, L.A. Sangoi, A.P.A. Dibo, J. Siqueira-Gay y L.E. Sanchez. 2019a. "Improving Policies and Instruments to Address Cumulative Impacts of Small Hydropower in the Amazon." *Energy Policy* 132: 265-271.
- Athayde, S., M. Mathews, S. Bohlman, W. Brasil, C. Rodrigues da Costa Dória, J. Dutka-Gianelli, P.M. Fearnside, B.A. Loiselle, E.E. Eugênio, Marques, T.S. Melis, B. Millikan, E.M. Moretto, A. Oliver-Smith, A.N. Rossete, R. Vacca y D.A. Kaplan. 2019b. "Mapping Research on Hydropower and Sustainability in the Brazilian Amazon: Advances, Gaps in Knowledge and Future Directions." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 37: 50-69. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.06.004>.
- Azrulhisham, A.E. y M.A. Azri. 2019. "Operational Impact of Suspended Sediment on the Run-of-river Small Hydro Power Plants," *IEEE* 10-15. <https://doi.org/10.1109/EnCon.2019.8861268>.
- Bretas, F., G. Casanova, T.L. Crisman, A. Embid Irujo, L. Martin, F. Miralles-Wilhelm y R. Muñoz Castillo. 2020. Agua para el futuro: Estrategia de seguridad hídrica para América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0002816>
- Banco Interamericano de Desarrollo. 2021. Plan de Acción del Grupo BID en materia de cambio climático 2021-2025. <https://doi.org/10.18235/0003153>
- Bejarano, P., A. Grünwaldt, y Á. Andrade. 2022. Adaptación al cambio climático en la alta montaña colombiana: Chingaza Sumapaz-Guerrero Monografía. Bogotá, D. C., Colombia: Banco Interamericano de Desarrollo; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Conservación Internacional.
- Buras, A., A. Rammig y C.S. Zang. 2020. "Quantifying impacts of the drought 2018 on European ecosystems in comparison to 2003". *Biogeosciences*, 17, 1655-1672. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1655-2020>
- Bravo, C., D. Benítez, J. Vargas, R. Alemán, B. Torres y H. Marín. 2023. "Análisis del Sistema de Producción Agropecuaria y su Contribución al Desarrollo Económico Local en la Parroquia Madre Tierra, Pastaza, Ecuador". *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2): 118-130.
- Brockway, A. M., y L.N. Dunn. 2019. "Weathering Adaptation: Grid Infrastructure Planning in a Changing Climate". *Climate Risk Management*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100256>.
- Brooks, N. y W.N. Adger. 2004. Technical Paper 7: Assessing and Enhancing Adaptive Capacity. *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures* 165-181. Cambridge University Press. <https://www4.unfccc.int/sites/NAPC/Country%20Documents/General/apf%20technical%20paper07.pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). 2025. (Base de Datos). Datos Abiertos del BID. BID. Último acceso: noviembre 2025.
- Cáceres, C., Y. Li, y B. Hilton. 2021. "A Climate Change Vulnerability Assessment Framework: A Spatial Approach". Documento preparado para "Proceedings of the 1st Virtual Conference on Implications of Information and Digital Technologies for Development".
- Cao, S., y H. Zheng. 2016. "Climate change adaptation to escape the poverty trap: role of the private sector". *Ecosystem Health and Sustainability* 2(10): e01244. [10.1002/ehs2.1244](https://doi.org/10.1002/ehs2.1244)
- CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca) y UNAL (Universidad Nacional de Colombia). 2018. "Guía ilustrativa sobre análisis de la vulnerabilidad territorial ante el cambio climático. Propuesta metodológica para los entes territoriales de la jurisdicción CAR". Grupo de Cambio climático DGOAT CAR – Grupo de investigación "Tiempo, clima y sociedad", Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia: 73 pp.
- CAR-DGOAT, UNAL (Universidad Nacional de Colombia)- Geografía, J.D. Pabón-Caicedo, A.F. Carvajal-Vanegas, G.E. Armenta-Porras, J.A. Martínez, J.C. Camacho, L. Guerrero-Castelblanco, L.V. Celis-Gil, L.F. Cusgüen-Castro, M.P. Céspedes-Romero, D.W. Ortiz-Olarte, Z.Y. Peña-Beltrán, W. González-Daza, G. Sánchez-Rojas, E. Osorio-Bustamante, J.T. Mora-Linares, W.O. Riaño-Acosta, J.M. Jiménez-Vergara, C.A. Guzmán-García, K.L. Farfán-Aspina, L.M. Pongutá-Buitrago, M.E. Báez-Caballero, C. Giraldo-Vieira, A.M. García-Gómez, J.A. López-Cleves, L.M. Sabogal-Ardila, A.S. Garzón-Rodríguez y J.D. Acosta-Romero. 2024. "El cambio climático en la cuenca del río Bogotá: amenaza, vulnerabilidad, riesgo y adaptación". Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – Universidad Nacional de Colombia. Convenio 3702 CAR-UNAL. Bogotá D.C.
- CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca). s.f. (Base de datos). Evaluación Regional del Agua (ERA). CAR. Último acceso: noviembre 2025.
- Ceballos Liévano, A.F. Cruz-Mendoza, S. Martínez-Serrano y L.C. Zuluaga-Cárdenas. 2024. "Informe del estado de los glaciares colombianos 2023". Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Ministerio de Minas y Energía. 2021. Plan Integral de gestión del cambio del sector minero energético (PIGCCme 2050). Bogotá: Oficina de asuntos Ambientales y Sociales, Ministerio de Minas y Energía.
- Charles, A., D. Kalikoski y A. Macnaughton. 2019. "Addressing the climate change and poverty nexus: a coordinated approach in the context of the 2030 agenda and the Paris agreement". Roma: FAO
- Chavez-Demoulin, V., E. Jondeau y L. Mhalla. 2021. "Climate-Related Disasters and the Death Toll". arXiv preprint arXiv: 2109.02111.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2021. Perspectivas de la Agricultura y del Desarrollo Rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2021-2022. San José, Costa Rica: IICA.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2024. "Recomendaciones y resultados técnicos obtenidos entre México y Argentina en materia de gestión de sequía". Ciudad de México: Gobierno de México.
- Comisión Europea. 2019. "Avances en la Acción Climática de América Latina: Contribuciones Nacionalmente Determinadas al 2019". Bruselas, Bélgica: Programa EUROCLIMA+, Dirección General de Desarrollo y Cooperación – EuropeAid, Comisión Europea.
- CORDEX (Copernicus Climate Change Service). 2019. CORDEX regional climate model data on single levels. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.bc91edc3>. Último acceso: noviembre 2025.
- Corrales-Chaves, L. 2025. "¿Estamos perdiendo los humedales más rápido de lo que podemos restaurarlos?". Revista de Ciencias Ambientales, 59(1): 1-13.
- Cui, W., T. Galarneau y K. Hoogewind. 2024. Changes in mesoscale convective system precipitation structures in response to a warming climate. *JGR Atmospheres*, 129(9).
- DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2016. "Tercer censo nacional agropecuario: La mayor operación estadística del campo colombiano en los últimos 45 años". DANE. Tomo 1: Memorias.
- DANE 2018a. "Censo Nacional de Población y Vivienda CNPV, Manual de Conceptos 2018". DANE. <https://conceptos.dane.gov.co/conceptos/conceptos/4920/ficha/>
- DANE. 2018b. "Censo Nacional de Población y Vivienda CNPV, Manual de Conceptos 2018". DANE. <https://conceptos.dane.gov.co/conceptos/conceptos/6002/ficha/>
- DANE. 2020. "Nota metodológica de la medida de pobreza multidimensional municipal con información censal. Boletín Técnico". DANE. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/pobreza-y-desigualdad/medida-de-pobreza-multidimensional-de-fuente-censal>
- DANE. 2025. "Sistema Estadístico Nacional". <https://www.sen.gov.co/>. Último acceso: noviembre 2025.
- DNP (Departamento Nacional de Planeación). 2025. (Base de datos). Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) del Financiamiento Climático. DNP: Sistema Nacional de Información sobre Cambio Climático (SNICC). Último acceso: noviembre 2025.
- DNP. 2025. (Base de datos). Mapa de inversión. DNP. Último acceso: noviembre 2025.
- DNP. 2025. (Base de datos). Terridata. DNP. Último acceso: noviembre 2025.
- Elshebli, M., R. Parajuli y H. Bui. 2024. "Extreme weather and hydro-power system: Production, resilience, and sustainability". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-49.
- Esquivel Sarceño, J. A. 2018. "Analfabetismo y su relación con el desarrollo social de los seres humanos". *Revista Científica del SEP*, 1: 79-89.
- Fauer, F. S., y H.W. Rust. 2023. "Non-Stationary Large-Scale Statistics of Precipitation Extremes in Central Europe". *Stoch Environ Res Risk Assess* 37, 4417-4429. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02515-z>
- Feinstein N. W. y K. J. Mach. 2019. "Three roles for education in climate change adaptation". *Climate Policy*, 20(3). DOI: 10.1080/14693062.2019.1701975 [https://www.climateprep.earth.miami.edu/\\_assets/pdf/feinstein2019.pdf](https://www.climateprep.earth.miami.edu/_assets/pdf/feinstein2019.pdf)
- Felkner, J., Z. Nagy, A.L. Beck, D.C. Reeves, S. Richter, V. Shastry, E. Ramthun, E. Mbata, S. Zigmund, B. Marshall, L. Marks, V. Rueda, J. Triplett, S. Domedead, J.R. Vazquez-Canteli y V. Rai. 2022. "IMPACT: Integrated Bottom-Up Greenhouse Gas Emission Pathways for Cities". arXiv preprint arXiv:2202.07458.
- Fernández, H., y R. Martínez. 2020. "Eficiencia de Uso del Agua en Diferentes Secuencias de Cultivos y Barbechos en Argentina". *AgroCiencia*, 34(2): 123-136.
- Field C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White, eds. 2014. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- García-Ramírez, P., L. C. Alatorre-Cejudo y L. C. Bravo-Peña. 2023. "Índices de aridez para un sistema agroforestal cafetalero." *UV-serva* 8(1): 45-60.
- García-Valdecasas Ojeda, M., P. Yeste, S.R. Gámiz-Fortis, Y. Castro-Díez y M.J. Esteban-Parra. 2024. "Future changes in land and atmospheric variables: An analysis of their couplings in the Iberian Peninsula". *Science of The Total Environment*, 722. <https://arxiv.org/abs/2401.10164>.
- Gobierno de Colombia. 2016. "Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)". Bogotá. [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NAP\\_Colombia\\_2018.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NAP_Colombia_2018.pdf)
- González, L. M., y P.A. Rodríguez. 2023. "Incidencia del Cambio de Coberturas Vegetales sobre la Capacidad de Regulación Hídrica en la Cuenca del Río Otún". *Revista de Geografía y Ordenamiento Territorial*, 15(2), 45-62.
- González, A., y J. Sánchez. 2019. "Aplicación del mercado de carbono en pequeñas centrales hidroeléctricas". *Energética*, 40(2): 15-25.

- González-Prida, V., y A. Crespo Márquez. 2021. "Innovando desde la Gestión del Mantenimiento: El Remantenimiento. Caso Práctico Central Hidroeléctrica". *Revista de Ingeniería de Mantenimiento*, 12(3): 45-58.
- Grajales, D. A. 2023. "Inclusión de una trayectoria de resiliencia climática en la planeación de la transición energética colombiana". Tesis maestría en energía y Sostenibilidad. Bogotá, Colombia: Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/66838>.
- Gutiérrez-García, F., A. Arcos-Vargas y A. Gómez-Expósito. 2021. "Robustness of electricity systems with nearly 100% share of renewables: A worst-case study." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 155: 111932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111932>.
- Heinrich-Mertsching, C., J.C. Wahl, A. Ordonez, M. Stien, J. Elvsborg, O. Haug y T.L. Thorarindottir. 2023. "Assessing present and future risk of water damage using building attributes, meteorology and topography". *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 72(4): 809–828. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.15862>.
- Herrera-Carmona, J. C., L. A. Zapata y X. Moreno-Gutiérrez. 2014. "Vulnerabilidad, cambio climático y estrategias de adaptación en áreas marinas y costeras del Pacífico colombiano". Bogotá, D. C., Colombia: WWF-Colombia.
- Hu, S., Z. Yang, S.A. Galindo-Torres, Z. Wang, H. Han, Y. Wada, T.C. Wanger y L. Li. 2023. "Converging trend of global urban land expansion sheds new light on sustainable development". *arXiv preprint arXiv: 2310.02293*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.02293>.
- IEA (International Energy Agency). 2021. "Climate Impacts on Latin American Hydropower". Último acceso octubre 2025. <https://www.iea.org/reports/climate-impacts-on-latin-american-hydropower>
- IEA. 2023. "Colombia 2023 Energy Policy Review". Último acceso octubre 2025. <https://www.iea.org/reports/colombia-2023>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), DNP (Departamento Nacional de Planeación) y CANCELLERÍA. 2017. "Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático". Bogotá D.C., Colombia: IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM.
- IDEAM. 2019. "Estudio Nacional del Agua 2018". Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. 2023. "Estudio Nacional del Agua 2022". IDEAM.
- IDEAM. 2023. (Base de datos). Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH). IDEAM. Último acceso: noviembre 2025.
- IDEAM . s.f. (Base de datos). Red Hidrometeorológica Nacional. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>. Último acceso: noviembre 2024.
- IDEAM. (Base de datos). Escenarios de Cambio Climático de la Cuarta Comunicación Nacional de Cambio Climático. <https://visualizador.ideam.gov.co/portal/apps/storymaps/stories/660ec48de-9454157b54adc074b1f38fd>. Último acceso: Septiembre 2025.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2025. (Base de datos). Geoportail IGAC. IGAC. Último acceso: noviembre 2025. Parry, M., O. Canziani, J. Palutikof, V. del P. Linden & C Hanson. Cambridge, R. U, eds. 2007. Impacto, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del grupo de trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC. Cambridge, University Press: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). 2022. "GTC-ISO-IWA 42:2022: Directrices para el cero neto". ICONTEC. <https://tienda.icontec.org/gp-gtc-iso-iwa-directrices-pa-ra-el-cero-neto-gtc-iso-iwa42-2022.html>
- Jenks, G.F. 1967. "El concepto de modelo de datos en la cartografía estadística". *Anuario Internacional de Cartografía* 7: 186-190.
- Kim, J., R. Heim y L. Sun. 2024. "Sed de respuestas: explorando los misterios detrás de las sequías". *Revista Digital Universitaria*, 25(5): 1-10
- Larramendi Benítez, E. M., G. Millán Verdecia y M.A. Plana Castell. 2019. "Escasez y contaminación del agua, realidades del siglo XXI". *Revista 16 de Abril*, 58(253): 1-10
- Lempert, R., J. Arnold, R. Pulwarty, K. Gordon, K. Greig, C. Hawkins Hoffman, D. Sands y C. Werrell. 2018: "Reducing Risks Through Adaptation Actions". *Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment*, 2: 1309–1345. doi: 10.7930/NCA4.2018.CH28
- Li-Ting, Y. 2025. "Measuring the effects of sediment variation and evaporation loss on the overall operational efficiency of hydropower systems: A robust network data envelopment analysis model". *Renewable Energy*, 242: 122488. doi: 10.1016/j.renene.2025.122488.
- López, A., y M. Hernández. 2022. "Tendencias de sequía extrema en Puebla: índices climáticos y análisis temporal". *Agua y Saneamiento en Desarrollo*, 12(1): 45-60.
- López, R., y S. Martínez. 2020. "Dimensiones psicosociales de la pobreza: Percepción de una comunidad urbana". *Revista de Trabajo Social*, 12(1): 75-90.
- Lutz, W., R. Mutarak. y E. Striessnig. 2014. "Universal education is key to enhanced climate adaptation". *Science*, 346; 1061-1062
- Magnier, J., B. Fribourg-Blanc, T. Lemann, F. Witing, W. Critchley y M. Volk. 2024. "Natural/Small Water Retention Measures: Their Contribution to Ecosystem-Based Concepts". *Sustainability*, 16(3): 1-26. <https://doi.org/10.3390/su16031308>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). 2016. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- (MADS), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), y J.A. Casas. 2020. Guía para la integración de enfoque de género en proyectos, programas, planes y políticas para la gestión del cambio climático. Sector Mineroenergético. Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Minas y Energía.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. 2023. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Ecuador (2022-2027). Ecuador: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica

- Morales, S., C. Álvarez, C. Acevedo, C. Díaz, M. Rodríguez y L. Pacheco. 2015. "An Overview of Small Hydropower Plants in Colombia: Status, Potential, Barriers and Perspectives." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50: 1650-1657.
- Mwangi, J. K., y D. O. Ochieng. 2023. "Impact of Energy Inaccessibility on GHG Emissions in Developing Countries". *Journal of Environmental Science and Policy*, 45(2): 134-145.
- Nandikanti, S. S. S., A. Sunil, S. Pichuka y A. Mandal. 2024. "Assessment of Climate Change Impacts on the Precipitation and Temperature: A Case Study on Krishna River Basin". *Russ. Meteorol. Hydrol.* 49: 62-70. <https://doi.org/10.3103/S1068373924010084>
- Nguyen, T., y C. Brown. 2021. "Cost-Benefit Analysis of Climate Change Adaptation in Agriculture: Evidence from Sub-Saharan Africa". *Environmental Economics and Policy Studies*, 23(2): 233-255.
- OCHA (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs) y UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). 2023. *Panorama de los Desastres en América Latina y el Caribe 2000-2022*. Recuperado de <https://www.undrr.org/media/89902/download>.
- OLADE (Organización Latinoamericana de Energía). 2019. *Sistema de Información Energética de Latinoamérica y el Caribe – sieLAC*. <https://sielac.olade.org>.
- ONU Mujeres. 2024. *Perfil Regional de Igualdad de Género en América Latina y el Caribe*. [https://lac.unwomen.org/sites/default/files/2024-03/es-perfilregionaligualdadgenero-al-c\\_07marzo24\\_2.pdf](https://lac.unwomen.org/sites/default/files/2024-03/es-perfilregionaligualdadgenero-al-c_07marzo24_2.pdf)
- Pabón, D. 2010. *Informe de evaluación del cambio climático en Colombia*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional.
- Pabón, J.C y J.E. Montealegre. 2017. *Los fenómenos de El Niño y de La Niña, su efecto climático e impactos socioeconómicos*. Colección Jorge Álvarez Lleras, No. 34. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Palomino-Lemus, R., S. Córdoba-Machado, S.R. Gámiz-Fortis, Y. Castro-Díez y M.J. Esteban-Parra. 2024. "High-resolution boreal winter precipitation projections over Tropical America from CMIP5 models". *Clim Dyn* 51, 1773-1792. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3982-5>
- Paz, J., M. del Jesús, R. Kelman, S. Navas, L. Okamura y E. Feliu. 2019. *Vulnerabilidad al cambio climático y medidas de adaptación de los sistemas hidroeléctricos en los países andinos*. En *Nota técnica del BID*, editado por Paredes, J. y G. Fabio. <https://doi.org/10.18235/0001984>
- Perera, A. T. D., V.M. Nik, D. Chen, J.L. Scartezzini y T. Hong. 2020. "Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems". *Nature Energy*, 5(2): 150-159. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0558-0>
- Price, A., K. Mengersen, M. Rigby y P. Fiévez. 2024. "Creating a Spatial Vulnerability Index for Environmental Health". *Ecological Indicators*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113793>.
- Pörtner H.-O., D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, y B. Rama, eds. 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Puente Miranda, D. G., L.I. Valenzuela-García y M.T. Alarcón-Herrera. 2023. "Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México". *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 39, 127-137. <https://doi.org/10.20937/RICA.54697>
- Red de Agua de la Universidad Autónoma Metropolitana (Red-AgUAM). 2023. "La sequía en México." Red-AgUAM. <https://redaguam.xoc.uam.mx/wp-content/uploads/2023/08/Red-AgUAM-Sequia.pdf>.
- Saravia, F., E. Romero, R. Cortijo, M. Nater, D. Iparraguirre, J. Saavedra y A. Alarcón, eds. 2022. *Centrales hidroeléctricas reversibles: identificación de potencial y necesidades regulatorias en Latinoamérica*. Nota técnica del BID 2428. Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Secci, D., M.G. Tanda, M. D'Oria, V. Todaro y C. Fagandini. 2022. "Impacts of climate change on groundwater droughts by means of standardized indices and regional climate models". *Journal of Hydrology*, 603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127154>
- Siclari Bravo, P.G. 2020. *Amenazas de cambio climático, métricas de mitigación y adaptación en ciudades de América Latina y el Caribe*. Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/185). Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Skoulikaris, C. 2021. "Run-Of-River Small Hydropower Plants as Hydro-Resilience Assets against Climate Change". *Sustainability* 13(24): 14001. <https://doi.org/10.3390/su132414001>
- Smith, J., y L. Jones. 2020. "Financing Climate Change Adaptation in Developing Countries". *Climate Policy*, 20(4): 445-462
- Spary, M., P.M. Cox y M.S. Williamson. 2022. "Bioclimatic change as a function of global warming from CMIP6 climate projections". *Biogeosciences*, 20, 451-488, <https://doi.org/10.5194/bg-20-451-2023>
- TCFD (Task Force on Climate-Related Financial Disclosures). 2017. "Implementing the Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures. Task Force on Climate-related Financial Disclosures". *FINAL-2017-TCFD-Report.pdf*
- Tomás, L. R., G.G. Soares, A.A.S. Jorge, J.F. Mendes, V.L.S. Freitas y L.B.L. Santos. 2022. "Flood risk map from hydrological and mobility data: a case study in São Paulo (Brazil)". *Transactions in GIS*, 26, 2341-2365. <https://doi.org/10.1111/tgis.12962>

- The Nature Conservancy. 2019. "Soluciones Basadas en la Naturaleza para la gestión del agua en España". [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/formacion/soluciones-basadas-en-la-naturaleza\\_tcm30-496389.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/formacion/soluciones-basadas-en-la-naturaleza_tcm30-496389.pdf)
- Thornton, P.E., B.C. Reed, G.Z. Xian, L. Chini, A.E. East, J.L. Field, C.M. Hoover, B. Poulter, S.C. Reed, G. Wang y Z. Zhu. 2023. "Capítulo 6: Cambios en la cobertura terrestre y en el uso de la tierra." En La Quinta Evaluación Nacional del Clima, editado por A.R. Crimmins, C.W. Avery, D.R. Easterling, K.E. Kunkel, B.C. Stewart y T.K. Maycock. U.S. Global Change Research Program. Washington, D.C.
- Tumbare, M.J. 2013. "Sedimentation of small and medium sized dams: discussion issues". *Journal of Engineering, Design and Technology* 11(2): 112-128.
- Unfried, K., K. Kis-Katos y T. Poser. 2022. "Water scarcity and social conflict". *Journal of Environmental Economics and Management* 113: 102633. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102633>.
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), Pontificia Universidad Javeriana, Instituto geográfico Agustín Codazzi, Colciencias. 2015. Atlas Potencial Hidroenergético de Colombia. Bogotá, Colombia.
- UPME. 2013. Estudio para determinar la vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático. Producto No. 3, Informe Final. Bogotá, Colombia: UPME.
- Useche, D.C., A. Carvajal, M. Cuéllar, J. Lamus, L. Celis, J. Chavarro, N. Verdugo, H. Angarita, C. Rogeliz-Prada, D. Ruiz-Carrascal, G. Armenta, J. Murcia, N. Depsky, D. Yates, D. Gonzalez-Duque, L. Álvarez, J. Delgado, G. Herrera-R, J. Maldonado-Ocampo y S. López-Casas. 2019. Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca: Resumen para tomadores de decisiones. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), The Nature Conservancy (TNC).
- Valencia-Rojas, M.P, Apolinar-Casas, A., Ruiz-Ordóñez, D.M., Otero-Sarmiento, J.D., Martínez-Idrobo, J-P., Ceballos-Sarria, V-E., Joaquín-Daza, S.C y González-Quijano, D. 2014. "Metodología para el análisis de vulnerabilidad en cuencas abastecedoras de agua ante la variabilidad climática." *Revista Ingeniería Universidad de Medellín*, 13(25): 29-43.
- Van Vliet, M. T. H., Sheffield, J., Wiberg, D., y Wood, E. F. 2016. "Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide". *Environmental Research Letters*, 11(12): 1-10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124021>.
- World Bank. 2009. *Poverty and Climate Change: Reducing the Vulnerability of the Poor through Adaptation*. Washington, DC: World Bank.
- World Bank. 2022. Evaluación del impacto del cambio climático en la generación eléctrica en los países del Cono Sur. Washington, DC: World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099709009062349091/pdf/IDU00999b0c30701e04b8509a-b1042e1adbff9ae.pdf>
- Xian, S., N. Lin, A. Hatzikyriakou y X. Hu. 2020. "Regional Flood Risk Projections under Climate Change". *Journal of Hydrometeorology*. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-20-0238.1>
- XM (Interconexión eléctrica S.A. E.S.P). 2024. "Capacidad Efectiva por Tipo de Generación." PARATEC. Último acceso en septiembre 2025. <https://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>.
- Yeste, P., J.J. Rosa-Cánovas, E. Romero-Jiménez, M.G.-V. Ojeda, S.R. Gámiz-Fortis, Y. Castro-Díez y M.J. Esteban-Parra. 2021. "Projected hydrologic changes over the north of the Iberian Peninsula using a Euro-CORDEX multi-model ensemble." *Science of The Total Environment* 777: 146126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.1461>
- Zapata, V., D.E.H.J. Gernaat, S.G. Yalew, S.R. Santos Da Silva, G. Iyer, M. Hejazi y D.P. Van Vuuren. 2022. "Climate change impacts on the energy system: A model comparison". *Environmental Research Letters*, 17(3):1-20. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5141>
- Zhong, P., M. Brunner, T. Opitz y R. Huser. 2022. "Spatial Modeling and Future Projection of Extreme Precipitation Extents". *Journal of the American Statistical Association*, 120(549), 80-95. <https://doi.org/10.1080/01621459.2024.2408045> 2212.03028

---

## Agradecimientos

Este documento es parte de la investigación realizada en el marco del Proyecto "Vulnerabilidad de la energía hidroeléctrica al cambio climático: caso Colombia", financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BIZ).

Los autores extienden su agradecimiento igualmente a CEERA, asociación que reúne a las empresas vinculadas a las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) y a las Centrales A Filo de Agua (RoR), por el apoyo y orientaciones recibidas durante el desarrollo del proyecto. De igual forma, agradecen a las siguientes empresas que proporcionaron información importante para el estudio: CENIT (Grupo Ecopetrol), Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (EPM), Hidrotolima S.A.S. y Vatia S.A. E.S.P.

Igualmente, extienden un reconocimiento a los profesionales y funcionarios del Ministerio de Minas y Energía y del Ministerio de Ambiente que participaron en las mesas técnicas para la construcción de la batería de indicadores y para el desarrollo general del proyecto.

Finalmente, expresan un profundo agradecimiento a los evaluadores de esta publicación: Sandra Rodríguez, Oscar Galvis Mora, Ángela Sarmiento Forero, Saul Pereyra, Luciana Gallardo Lomelli, Andrés Ladino. También se agradece a Carlos Muñoz Piña (editor de esta publicación), así como a Sara Botero, Anamaría Martínez y Simone Athayde del equipo de Investigación, Datos e Impacto.

## Acerca de WRI Colombia

El Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés) trabaja para mejorar la vida de las personas, proteger y restaurar la naturaleza, y estabilizar el clima. Como una organización de investigación independiente, utilizamos nuestros datos, experiencia y alcance global para incidir en políticas y catalizar cambios en sistemas como los alimentos, la tierra y el agua; la energía; y las ciudades. Nuestro equipo de más de 2.000 personas trabaja directamente en más de una docena de países prioritarios y con socios en más de 50 naciones.

## Sobre la autoría

**Mauricio Espitia**, consultor en gestión del cambio climático y especialista SIG.

Contacto: mauricio.espitia@wri.org

**Juliana Durán Prieto**, coordinadora de proyectos del programa de Clima, Economía y Finanzas de la oficina de WRI en Colombia.

Contacto: juliana.duran@wri.org

**Stefanie Tye**, investigadora en adaptación y resiliencia climática en WRI global.

Contacto: stefanie.tye@wri.org

**Juan Camilo Peña**, consultor en hidrología y cambio climático.

Contacto: juancamilopeca@gmail.com

**Diego Grajales**, consultor en temas energéticos y cambio climático.

Contacto: dgrajales51@gmail.com

**Jimena Gómez**, consultora del sector energético, especialmente en temas de adaptación del sector al cambio climático.

Contacto: esgojim@gmail.com

**Carolina Useche**, directora de Clima, Economía y Finanzas de la oficina de WRI en Colombia.

Contacto: carolina.useche@wri.org