



# Vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán, Colombia, a los incrementos de temperatura en un escenario de cambio climático

Ecological vulnerability of paramos complex Chili-Barragán, Colombia, to the temperature increases in a scenario of climate change

Cristian D. Moreno<sup>1</sup>

Juan D. Palma<sup>2</sup>

Jenny M. Trilleras<sup>3</sup>

José A. Salamanca<sup>4</sup>

Fecha de recibido: 19 de febrero de 2021

Fecha de aceptado: 19 de noviembre de 2021

## Resumen

La presente investigación tiene como finalidad evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán a los incrementos de la temperatura en el escenario de cambio climático RCP 6,0 para el periodo 1981-

<sup>1</sup> Ingeniería Geográfica y Ambiental, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Colombia, correo electrónico: [crimoreno@udca.edu.co](mailto:crimoreno@udca.edu.co)

<sup>2</sup> Ingeniería Geográfica y Ambiental, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Colombia, correo electrónico: [jpalma@udca.edu.co](mailto:jpalma@udca.edu.co)

<sup>3</sup> Ciencias Ambientales, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Colombia, correo electrónico: [jetrilleras@udca.edu.co](mailto:jetrilleras@udca.edu.co)

<sup>4</sup> Ingeniería Geográfica y Ambiental, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Colombia, correo electrónico: [josalamanca@udca.edu.co](mailto:josalamanca@udca.edu.co)

2095. Para lo cual se deben estimar los incrementos de la temperatura del periodo 1981-2010 y 2011-2095, determinar el impacto potencial y el potencial de recuperación del complejo de páramos Chilí-Barragán.

La evaluación de la vulnerabilidad ecológica se llevó a cabo con diferentes índices e indicadores, entre los que se destaca el índice de vulnerabilidad ecológica. Los métodos que se emplearon son el del proceso analítico jerárquico y opinión de expertos.

En el complejo se encontró un incremento de la temperatura media de 0,79 °C (1981-2010) y de 2,12 °C (2011-2095). Un potencial de recuperación medio y un impacto potencial alto. La vulnerabilidad ecológica es en su mayor medida alta, y representa el 47,51% del área del complejo.

*Palabras clave: vulnerabilidad ecológica, ecosistema páramo, cambio climático, Sistema de Información Geográfica (SIG), impacto potencial, potencial de recuperación.*

## Abstract

This research aims to assess the ecological vulnerability of the complex páramos Chilí-Barragán to increases in temperature in the climate change scenario RCP 6.0 for the period 1981-2095. To which must be estimated temperature increases in the period 1981-2010 and 2011-2095, determine the potential impact and potential recovery in the complex of páramos Chilí-Barragán.

The ecological vulnerability assessment was carried out with different indexes and indicators, including the ecological vulnerability index. The methods used are the analytic hierarchy process and expert opinion.

In the complex was found an increase in the average temperature of 0,79 °C (1981-2010) and 2,12 °C (2011-2095). It has mostly average recovery potential and a high potential impact. The ecological vulnerability is mostly high extent, and represents 47,51% of the area of the complex.

*Key words: ecological vulnerability, páramo ecosystem, climate change, Geographic Information System (GIS), potential impact, recovery potential.*

## Introducción

Actualmente se están presentando cambios globales que amenazan el soporte de vida en el planeta (Steffen *et al.*, 2011), uno de estos es el cambio climático que provoca alteraciones en los ecosistemas en diferentes áreas geográficas Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés, 2007b). Colombia, que posee diversos ecosistemas con alta diversidad biológica y con una proyección de incremento de temperatura

para el año 2100 de entre 3 °C y 4 °C (Pabón, 2012) o de 1,5 °C y 4 °C (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales —IDEAM *et al.*, 2015), se convierte en un país altamente vulnerable a pesar de su baja contribución en la emisión y contaminación que provoca el cambio climático. En consecuencia, es fundamental evaluar los potenciales cambios que tendrían los ecosistemas como respuesta al cambio climático, y dentro de estos ecosistemas con prioridad a evaluar se encuentran los de alta montaña, como los páramos que presentan una mayor fragilidad, en comparación con otros ecosistemas en función de sus procesos y servicios ecosistémicos (Castaño, 2002).

En la primera comunicación nacional de Colombia sobre la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), se presenta a los ecosistemas de alta montaña, como los más vulnerables a los efectos del cambio climático. Ya que se prevé para el año 2050, el aumento de la temperatura media anual del aire en un promedio de 1 °C a 2 °C; y una variación espacial y temporal en la precipitación  $\pm 15\%$ , el retroceso y pérdida del 78 % de los nevados y del 56% de los páramos (Ministerio de Ambiente, vivienda y Desarrollo Territorial —MAVDT *et al.*, 2001).

Los impactos del cambio climático en el ecosistema páramo en Colombia son diversos, porque a medida que avanza el cambio climático se producen pérdidas del ecosistema (transgresión) y hábitat o disminución del área de los mismos, lo que puede provocar la pérdida de la biodiversidad, esto sucederá según sea la capacidad de adaptación de la biota al cambio climático, si el ecosistema ha contado con la presencia de glaciares o perturbaciones similares de periodos interglaciales, y que las especies que habitan el páramo estén adaptadas a cambios en su distribución geográfica (IDEAM, 2002; Van der Hammen *et al.*, 2002).

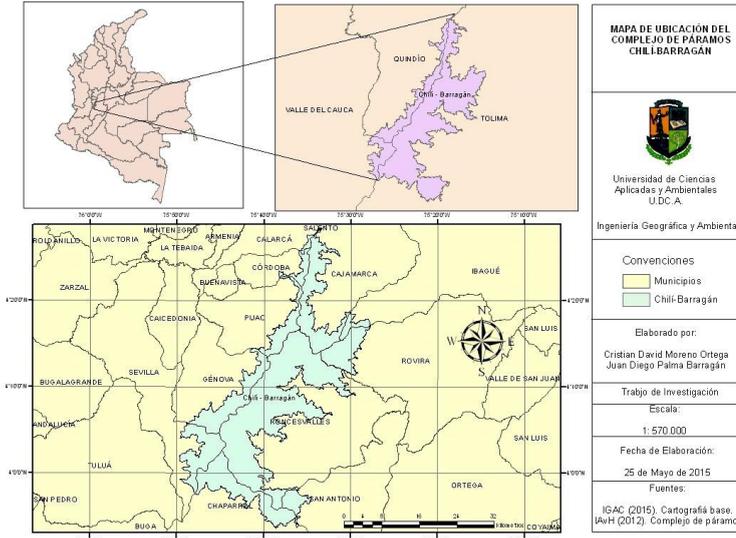
La adaptación en general suele ser muy limitada ante cambios bruscos, pero esto se debe examinar por especie y las interacciones entre estas, porque cada especie tiene diferentes adaptaciones y comportamientos según sea el medio. Es importante destacar que se debe considerar la conectividad entre los ecosistemas, dado que entre mayor sea la conectividad entre ecosistemas y del hábitat natural de las especies, menor será el impacto del cambio climático (Van der Hammen *et al.*, 2002).

El complejo de páramos Chilí-Barragán es un importante enlace de paisaje (referido generalmente como corredor biológico y ecológico) de la cordillera central de Colombia, puesto que tiene la función de conectar los nevados de Caldas, Tolima, Huila y Cauca, es decir provee la importante conexión de dos parques nacionales naturales, los cuales son el del Nevado y el de las Hermosas (Corporación Autónoma Regional del Valle Cauca —CVC, 2005).

## Metodología

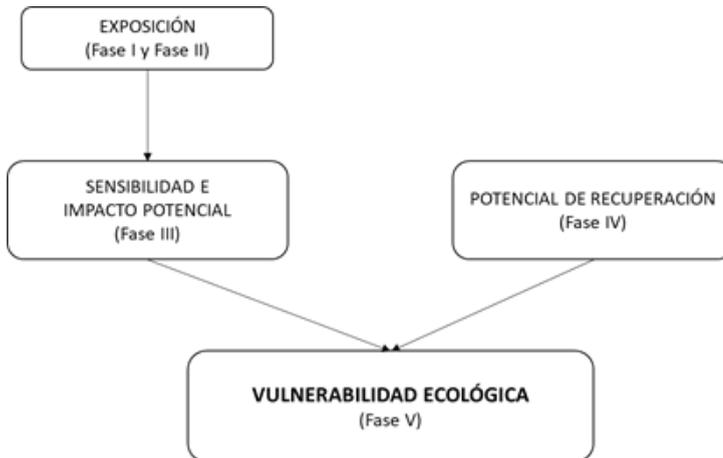
El complejo de páramos Chilí-Barragán está localizado aproximadamente entre los 4° 30' 00" N y 3° 55' 00" N, y los 75° 50' 00" W y 75° 25' 00" W, en

Colombia. Cuenta con 27.900 hectáreas aproximadamente, se ubica en la cordillera Central, entre los departamentos de Tolima, Quindío y Valle del Cauca (Figura 1) (Morales *et al.*, 2007; CVC, 2005).



**Figura 1.** Ubicación del complejo de páramos Chilí-Barragán.

Fuente: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH, 2012).



**Figura 2.** Diseño metodológico de toma de datos para evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán.

Fuente: elaboración propia.

Para evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán, se estimó el impacto potencial y la capacidad de adaptación del complejo de páramos (Cinner *et al.*, 2013; Marshall *et al.*, 2013; y Marshall *et al.*, 2010) siguiendo las cinco fases que se describen en la Figura 2.

### **I) Exposición-incrementos de temperatura 1981-2010**

Esta fase se dividió en dos etapas: Primera etapa: Organización, preparación de los datos y análisis descriptivo. Para realizar la climatología del complejo de páramos Chilí-Barragán se realizó el procesamiento de datos de las variables meteorológicas (temperatura del aire y precipitación) y se les aplicó las medidas de tendencia central, observaciones y medición. Las variables de temperatura del aire y precipitación se pueden obtener a partir de observaciones y mediciones en estaciones meteorológicas o climatológicas y con el uso de modelos meteorológicos o climatológicos, para este caso se optó por seleccionar las siguientes estaciones meteorológicas: Barragán y Cumarco en Valle del Cauca; El Edén y Calarcá en Quindío; Cajamarca, Cucuana, Demostración, San Antonio, Riomanso y Yerbabuena en el Tolima. Segunda etapa: Interpolación de los datos, las herramientas de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) y Spline son consideradas como métodos de interpolación determinísticos, debido a que se basan directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Pero, también se encuentran los métodos geoestadísticos, de los cuales Kriging es un ejemplo, y este se fundamenta en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación (*Environmental Systems Research Institute* —ESRI, 2015). El método de Kriging se utilizó con la temperatura del aire y el de IDW con el de precipitación. La interpolación se realizó con los datos promedios anuales de la temperatura del aire máxima, mínima, media y precipitación, en el programa de ArcGIS 10.2, para lo cual se editó la tabla de atributos del archivo con formato shapefile tipo punto obtenido de la página del IDEAM o la digitalización de la ubicación de cada estación para generar la distribución espacial de la temperatura del aire y precipitación para el periodo 1981-2010.

### **II) Exposición-incrementos de temperatura 2011-2095**

En esta fase se utilizó la aplicación web MarkSim, realizada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) y su seccional el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), en la que se trabajó con datos de modelos globales climáticos, y estimó los incrementos de la temperatura del aire en el escenario de cambio climático RCP 6,0. La herramienta en línea MarkSim es una plataforma de generación de tiempo estocástica que tiene como objetivo ayudar a los usuarios con datos meteorológicos diarios en todo el mundo. MarkSim fue desarrollado en la

década de 1980 y 1990 para simular el clima de fuentes conocidas de datos climáticos mensuales de todo el mundo. Se dividió el mundo en 720 grupos de clima que eran todos distintos entre sí y dispuestos de un tercer modelo de Markov a los datos de precipitación. La simulación de datos de temperatura del aire se deriva de SIMMETEO (Geng *et al.*, 1988). Los incrementos de temperatura del aire se obtienen de restar los promedios multianuales del periodo 2011-2095 con los del periodo 1981-2010, operación que se realiza en la calculadora ráster (*Raster Calculator*) con los dos rásteres de los dos periodos y de la temperatura del aire respectiva.

### III) Sensibilidad e impacto potencial

La sensibilidad se estimó como las Zonas de Vida y transición de Holdridge que se perderían o ganarían como respuesta a los cambios en la precipitación o incrementos de temperatura del aire. Estas áreas de pérdida o ganancia se generaron para los periodos 1981-2010 y 2011-2095, tomando los resultados de la exposición (las interpolaciones). Se establecieron previamente los valores de clasificación que se obtuvieron principalmente de Gutiérrez (2001). El impacto potencial se determinó mediante el índice de impacto potencial que es una propuesta metodológica que se realizó en el transcurso de esta investigación, para determinarlo se toman los rásteres finales que resultan de los indicadores de incrementos de temperatura (IT) y movimientos de las zonas de vida de *Holdridge* (MZVH), y se realiza un promedio de estos en la calculadora ráster (*Raster Calculator*), teniendo en cuenta la siguiente fórmula (Ecuación 1):

$$IIP = \frac{(IT + MZVH)}{2} \quad (1)$$

Donde:

*IIP*: Índice de Impacto Potencial

*IT*: Incrementos de temperatura

*MZVH*: Movimiento de las zonas de vida de Holdridge.

El indicador de los incrementos de temperatura (IT), se obtuvo al realizar el promedio de los incrementos de la temperatura del aire media, máxima y mínima, en la calculadora ráster (*Raster Calculator*) como sigue (Ecuación 2):

$$IT = \frac{(ITMED + ITMAX + ITMIN)}{3} \quad (2)$$

Donde:

*ITMED*: Incremento de la temperatura media

*ITMAX*: Incremento de la temperatura máxima

*ITMIN* : Incremento de la temperatura mínima.

El indicador de los movimientos de las zonas de vida de Holdridge (MZVH) es el resultado de la intersección (Intersect) con los archivos tipo vector de las zonas de vida de Holdridge para el periodo 1981-2010 y para el periodo 2011-2095.

#### **IV) Potencial de recuperación**

En esta fase se demuestran las condiciones con las que cuenta el complejo para afrontar los impactos del cambio climático, por lo que se seleccionaron los indicadores de cambio de cobertura (1988-2014), de cambio de conectividad (1988-2014), suelos (órdenes), áreas protegidas y erosión. De acuerdo con lo reportado por Van der Hammen y colaboradores (2002), se considera fundamental evaluar la conectividad, pero también se debe analizar la influencia humana en los ecosistemas, las características azonales dadas por los suelos y las áreas protegidas que representan iniciativas de conservación y protección para los ecosistemas. Para la construcción de este índice se utilizó la metodología Delphi (consulta a expertos) Dalkey y Helmer (1963), la cual consiste en la selección de un grupo de expertos a los que se les pregunta su opinión sobre cuestiones referidas a diferentes acontecimientos, en este caso se les preguntó sobre el peso que le darían a cada indicador, el resultado fue el peso ponderado que aparece en la Ecuación 3:

$$IPR = 0,3 CE + 0,2 CC + 0,2 OS + 0,2 AP + 0,1 E \quad (3)$$

Donde:

*IPR*: Índice de potencial de recuperación

*CE*: Conectividad estructural

*CC*: Cambio de cobertura

*OS*: Órdenes de suelos

*AP*: Áreas protegidas

*E*: Erosión.

#### **V) Vulnerabilidad ecológica**

Se combinan los resultados obtenidos del impacto potencial (IIP) y el potencial de recuperación (IPR), jerarquizando los valores de la vulnerabilidad ecológica en muy baja, baja, media, alta y muy alta. El índice de vulnerabilidad ecológica es el componente principal para evaluar la vulnerabilidad ecológica, seguido de los índices de potencial de recuperación e impacto potencial, como se observa en la Ecuación 4.

$$IVE = (0,6 IIP) - (0,4 IPR) \quad (4)$$

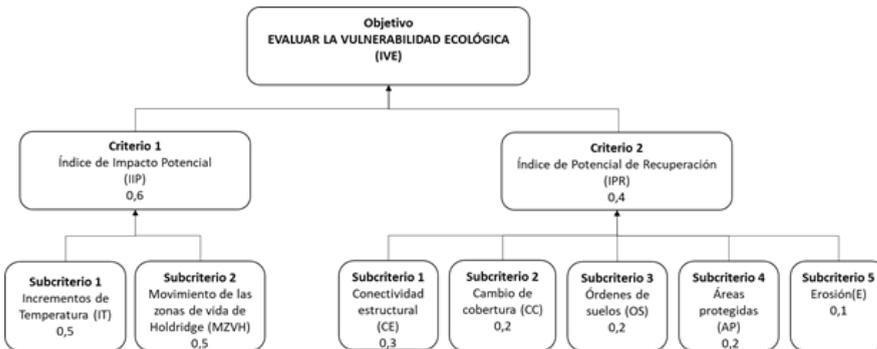
Donde:

*IVE*: Índice de Vulnerabilidad ecológica

*IIP*: Índice de impacto potencial

*IPR*: Índice de potencial de recuperación.

El método utilizado para evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán fue un proceso analítico jerárquico, que es una técnica de decisión multicriterio que emplea dos etapas: la modelización y la valoración (Moreno, 2012). En la etapa de modelización, se elabora una estructura en la que se encuentran representados todos los aspectos relevantes del proceso de resolución, que pueden ser escenarios, interdependencias, elementos y factores. El proceso analítico jerárquico considera cuatro axiomas, el de homogeneidad, expectativas, jerarquías y sistemas con dependencias y reciprocidad. La principal estructura de modelización es la jerarquía. En el mayor nivel se pone la meta global, en los siguientes niveles se ponen los demás aspectos relevantes. En la etapa de valoración, se incluyen las preferencias y los juicios que se introducen en las matrices de comparaciones pareadas o de decisión (Saaty, 1980; Moreno, 2012). También, en la jerarquía se deben considerar dos conceptos, el de prioridades locales y el de prioridades globales. Para, las prioridades locales se pueden hablar de subcriterios, es decir los indicadores, y los criterios son los índices de potencial de recuperación e impacto potencial, y la prioridad global es evaluar la vulnerabilidad ecológica, cada uno de los componentes y subcomponentes tienen un valor de ponderación que representa la importancia de cada uno en el nivel superior (Figura 3).



**Figura 3.** Modelo de prioridades y valores de ponderación dados con el proceso analítico jerárquico para evaluar la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán.

Fuente: elaboración propia.

## Resultados y discusión

### *Exposición-incrementos de temperatura del aire*

La temperatura del aire media en el complejo de páramos Chilí-Barragán se incrementó en promedio 0,79 °C para el periodo 1981-2010. El mayor

incremento de temperatura se registró en la estación de Riomanso con 1,03 °C, seguida de la estación Cajamarca con 0,91 °C, de San Antonio Quinta con 0,84 °C y Barragán con 0,82 °C, mientras que los menores incrementos en temperatura se registraron en las estaciones del Edén (0,61 °C) y Demostración (0,63 °C). Estos resultados complementan estudios previos como el de Pabón en el 2012, quien encontró un calentamiento generalizado entre 0,1 °C-0,2 °C/decenio en diferentes regiones del territorio colombiano para el periodo 1960-2005. De igual manera, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010) reportó un incremento de 0,13 °C por década para el periodo 1971-2000. Para el caso del complejo de páramos Chilí-Barragán el incremento de la temperatura del aire por decenio es de 0,26 °C para el periodo 1981-2010. Estos hallazgos tienen implicaciones sobre la fauna y flora de los ecosistemas de alta montaña, como el desplazamiento de especies que afecta la dinámica de estos ecosistemas (Roselli *et al.*, 2017), las interacciones planta-patógeno que están afectando las especies de frailejones (Cifuentes, 2017), así como también tiene implicaciones sobre los procesos ecosistémicos que dan lugar al suministro de servicios ecosistémicos (Hofstede *et al.*, 2014).

En prospectiva, la temperatura del aire media en el complejo de páramos Chilí-Barragán se incrementó en promedio 2,12 °C para el periodo 2011-2095 en el escenario RCP 6,0. El mayor incremento de temperatura se registró en la estación de Barragán con 2,94 °C, seguido de la estación del Edén con 2,67 °C y Demostración con 2,26 °C, mientras que los menores incrementos en temperatura se registraron en las estaciones de San Antonio Quinta (1,38 °C) y Cucuana (1,84 °C). Estos resultados son consistentes con los incrementos de temperatura reportado por el IPCC (2013) para el escenario RCP 6.0, quienes reportan un incremento de 2,2 °C para el periodo 2081-2100. De igual manera, para Colombia el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) estimaron un incremento de 1,0 °C para el periodo 2011-2040 con el ensamble de todos los escenarios del IPCC (IDEAM *et al.*, 2015). Otros escenarios para Colombia reportan incrementos de 2,4 °C para el periodo 2041-2070 (Ruiz, 2010), y de 3 °C y 4 °C para el periodo 2071-2100 (Pabón, 2012).

Las implicaciones de estos incrementos son variadas, en los páramos se encuentran especies que se han adaptado y han sincronizado su funcionamiento a las condiciones bioclimáticas, por lo que pueden ser alteradas por el cambio climático (Pabón y Hurtado, 2002). Conocer los incrementos de la temperatura del aire en prospectiva, permite tomar medidas de adaptación al cambio climático en zonas de alta montaña, por lo que el manejo, gestión y administración de estas áreas debe ser prioritario (Isch, 2012; Uribe, 2015). Por tal razón es imprescindible el conocimiento de las condiciones climáticas en las que funciona el páramo, la variación espacio-

temporal, las fluctuaciones extremas del clima y su incidencia en el ecosistema de páramo (Pabón y Hurtado, 2002).

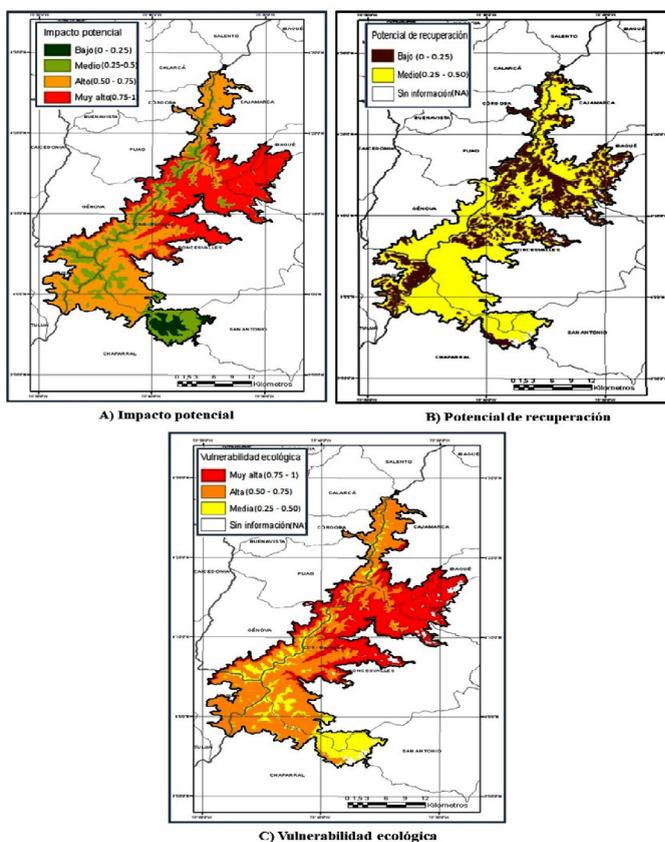
## Sensibilidad e impacto potencial

Las Zonas de Vida y Transiciones de Holdridge que perderían área para el periodo 2011-2095, debido al desplazamiento altitudinal por cambios en precipitación e incrementos de temperatura del aire, es la Zona de Vida de páramo pluvial subalpino (páramo) que perdería 52.381 hectáreas (96,86% del área que tiene para el periodo 1981-2010) y la Transición de Holdridge de páramo pluvial subalpino (Páramo) y tundra pluvial alpina (Superpáramo) que perdería 26.340 hectáreas (100% del área que tiene para el periodo 1981-2010) (Figura 4). Estos resultados complementan estudios previos que muestran que la zona de vida de Páramo Pluvial Subalpino pierde el 92% y tiene una conversión del 76% a Bosque Muy Húmedo Montano (bmh-M) (Gutiérrez, 2001). Por otro lado, Van der Hammen y colaboradores (2002) describieron como el cambio climático podría desaparecer áreas de Superpáramo en zonas con alturas menores a los 4.600 msnm y cómo el ascenso de las zonas bioclimáticas altoandinas estaría entre los 400 o 500 metros.

En el sentido opuesto, las Zonas de Vida y Transiciones de Holdridge que ganarían área para el periodo 2011-2095, es la Zona de Vida del bosque muy húmedo montano (subpáramo) que aparecería dentro del complejo de páramos con 34.119 hectáreas y la Transición de Holdridge de bosque muy húmedo montano (subpáramo), páramo pluvial subalpino (páramo) y bosque pluvial montano (subpáramo) con 44.601,8 hectáreas o 412 veces más de lo que tenía de área en el periodo 1981-2010. Como resultado de la ganancia de área de las zonas de vida y transiciones de Holdridge se presentará una sucesión o el recambio de las especies vegetales como lo menciona Cabrera y Ramírez (2014). De acuerdo con Flórez (2002), los pisos bioclimáticos responden a los cambios climáticos globales y cambian de posición altitudinal de acuerdo a las variaciones térmicas, por lo que los páramos se pueden considerar como eslabones que disminuyen o aumentan la superficie respecto a los cambios térmicos atmosféricos parecido a una catena.

El impacto potencial en el complejo de páramos Chile-Barragán es alto en su mayor parte, porque se presentaría en aproximadamente el 43,02% del área del complejo (Figura 4). El impacto potencial para los incrementos de temperatura es alto (62,66%) y para los movimientos de las Zonas de Vida y Transiciones de Holdridge es muy alto (72,66%). Se tiene también un impacto potencial muy alto en el 33,49% del área del complejo, un impacto potencial medio en el 19,92% del área del complejo y un impacto potencial muy bajo en el 3,57% del área del complejo de páramos. El impacto potencial alto responde a incrementos de la temperatura del aire que se encuentran entre 1,5 °C y 2 °C,

que de acuerdo con Van der Hammen y colaboradores (2002) es una situación que se le debe prestar atención en el menor tiempo posible. Lo anterior indica que en menos de cien años la vegetación del páramo propiamente dicho se ocuparía por la del subpáramo, lo que para Castaño (2002) es una traslocación, que consecuentemente afectaría los procesos ecológicos del ecosistema, y también como lo menciona el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP por sus siglas en inglés, 2005, 2007) se afecta la seguridad alimentaria, los suelos y el recurso hídrico, como consecuencia del incremento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos extremos.



**Figura 4.** Variaciones en el impacto potencial (A), potencial de recuperación (B) y vulnerabilidad ecológica (C) del complejo de páramos Chili-Barragán al incremento de temperatura en el escenario RCP 6,0.

### Potencial de recuperación

El potencial de recuperación del complejo de páramos Chili-Barragán es predominantemente medio y cubre una superficie de 56.040 hectáreas

(69,38%). El potencial de recuperación bajo cubre 22.010 hectáreas (27,25%) y las áreas que no tienen información de potencial de recuperación son 2.722 hectáreas (3,37%) (Figura 4). Para el IPCC (2007a) el potencial de recuperación se puede concebir como la capacidad de adaptación que tiene un determinado sistema ecológico con miras a ajustarse al cambio climático, pudiendo mitigar los posibles impactos, o también aprovechar las condiciones y consecuencias dadas por el cambio climático (IPCC, 2013; IDEAM *et al.*, 2015). En este sentido el complejo de páramos Chilí-Barragán cuenta con algunas condiciones como por ejemplo, abandono de áreas con sistemas agropecuarios, alto grado de endemismo, ubicación de dos importantes áreas protegidas como Proaves (<http://www.proaves.org/>) y Corporación Semillas de Agua (<https://semillasdeagua.org/>) que promueven la investigación y el conocimiento de los ecosistemas, para afrontar los posibles impactos potenciales de un cambio climático, por lo tanto se recomienda considerar la articulación de sectores (institucionales, privados y públicos), territorio y comunidades mediante proyectos y la implementación de políticas públicas (Uribe, 2015), que promuevan el potencial de recuperación del complejo de páramos Chilí-Barragán.

## Vulnerabilidad ecológica

El complejo de páramos Chilí-Barragán tiene una vulnerabilidad ecológica alta al incremento de temperatura en el escenario RCP 6,0. La vulnerabilidad ecológica alta se presenta en un área de 38.370 ha (47,51%), seguido de una vulnerabilidad ecológica muy alta en 25.850 ha (32,01%) y una vulnerabilidad ecológica media en 13.640 ha (16,89%) (Figura 4). Las áreas sin información de vulnerabilidad ecológica ocupan un 3,59% del área del complejo. La vulnerabilidad ecológica alta se distribuye en el centro del complejo, en la que se encuentra la mayor parte del bosque y del páramo propiamente dicho, las implicaciones de estos hallazgos van desde efectos sobre la biodiversidad (desplazamiento de las especies) y los servicios ecosistémicos que estos ecosistemas proporcionan a la sociedad (fuente de agua dulce, regulación hídrica, alimentos, importancia cultural, entre otros) (Anderson *et al.*, 2012), hasta la intensificación o expansión de la frontera agrícola a tierras altas, como por ejemplo lo que ha estado sucediendo con los cultivos de papa en Perú, donde el calentamiento regional del clima ha estado acompañado por un ascenso del cultivo de 300 m en los últimos 38 años (Hole *et al.*, 2012).

Además se encontró que la vulnerabilidad ecológica muy alta se reporta en la vertiente húmeda del complejo, que es la parte del departamento del Tolima cuyas condiciones presentan también un alto impacto potencial y un bajo potencial de recuperación, debido posiblemente al cambio de cobertura y la ausencia de áreas protegidas. La vulnerabilidad ecológica media se distribuye

en su mayor proporción hacia los bordes inferiores del complejo, cuyas condiciones son el relieve inclinado a escarpado, clima frío, y la presencia de flora y fauna típica del ecosistema páramo, además no se encuentran grandes cambios de cobertura, hay presencia de áreas protegidas y buena conectividad estructural, lo que brinda mayores capacidades para la adaptación al cambio climático (Murillo *et al.*, 2017).

## Conclusiones

Los ecosistemas de páramo, superpáramo y subpáramo del complejo de páramos Chilí-Barragán son vulnerables al cambio climático. La evaluación de la vulnerabilidad ecológica usada en esta investigación tiene en cuenta recomendaciones de expertos y es abordado desde un contexto socio-ecológico. Sin embargo, se recomienda también desarrollar este tipo de evaluaciones a diferentes niveles jerárquicos (poblaciones, comunidades, ecosistemas y paisaje) (Ippolito *et al.*, 2010). No obstante, la información generada aquí se hizo a nivel de paisaje y constituye información novedosa para la zona evaluada. La información generada puede usarse en el establecimiento de planes de manejo e incorporación de políticas públicas que contribuyan a salvaguardar los ecosistemas de páramo, superpáramo y subpáramo del complejo de páramos Chilí-Barragán y hacer una mezcla de conservación mediante áreas protegidas y planificación integral de uso sostenible del suelo (Hole *et al.*, 2012), que además podría apoyar el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (DNP *et al.*, 2012) para reducir la vulnerabilidad ecológica al cambio climático.

Los diferentes incrementos en la temperatura del aire demostraron la presencia de un cambio climático en el complejo de páramos Chilí-Barragán para el periodo considerado 1981-2010 que indican cambios que acentúan la exposición del complejo en el tiempo de referencia y ante futuros incrementos. Para el periodo 2011-2095 en el escenario RCP 6,0 la temperatura del aire aumentará en promedio 2 °C, tal incremento se presentaría de manera diferencial en el complejo debido a las particularidades del complejo de páramos como lo son la presencia de barlovento y sotavento, las diferentes coberturas, las diferencias del relieve y los cambios en los vientos. De igual manera, aunado a lo anterior, la desaparición de zonas de vida y transiciones de Holdridge provocarían un alto impacto del cambio climático en el complejo de páramos Chilí-Barragán para el periodo 1981-2095, como consecuencia se afectarían la flora y la fauna que se asocia con la respectiva zona de vida, los servicios ecosistémicos (ej. regulación hídrica), la población que depende del complejo, la transición bosque altoandino y páramo, la economía de la región y las culturas ancestrales.

Por otro lado, el potencial de recuperación medio del complejo de páramos Chilí-Barragán sugiere que el complejo carece de las condiciones que faciliten adaptarse y mitigar los impactos potenciales del cambio climático. Sin embargo, hay posibilidades de incrementar el potencial de recuperación del complejo de páramos, para lo que se requiere el fortalecimiento del vínculo del ser humano con el ecosistema páramo, y el trabajo interdisciplinario entre las instituciones, la academia y la comunidad. Pese a que la vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán es alta, el complejo presenta características como alto grado de endemismo, clima cambiante, relieve variado, ubicación geoestratégica en la cordillera central y su participación en las cuencas de los ríos Magdalena y Cauca que podrían proporcionarle también capacidad de adaptación o potencial de recuperación. Por tal razón es importante que para el complejo de páramos Chilí-Barragán se planeen y ejecuten políticas públicas, programas y proyectos de restauración ecológica, estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático.

## Referencias

- Anderson, E. P., Marengo, J. A., Villalba, R., Halloy, S. R., Young, B. E., Cordero, D. y Ruiz Carrascal, D. (2012). Consecuencias del cambio climático en los ecosistemas y servicios ecosistémicos de los Andes Tropicales. *Cambio climático y biodiversidad en los Andes Tropicales*, 426.
- Cabrera, M. y Ramírez, W. (Eds.) (2014). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH): Bogotá, D.C. Colombia, 296 pp.
- Castaño, C. (2002). Colombia alto andina y la significancia ambiental del bioma páramo en el contexto de los Andes tropicales: una aproximación a los efectos de un tensor adicional por el Cambio Climático Global (Global Climatic Tensor): 27-51(en) IDEAM (2002). Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor. IDEAM (Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales), Bogotá, Colombia.
- Cifuentes, J. M. (2017). *Relación de variables climáticas y de uso de suelo, con afectaciones presentes en frailejones del Páramo de Chingaza, Colombia* [Tesis de maestría, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales].
- Cinner, J. E., Huchery, C., Darling, E. S., Humphries, A. T., Graham, N. A. J., Hicks, C. C., Marshall, N. & McClanahan, T. R. (2013). Evaluating social and ecological vulnerability of coral reef fisheries to climate change. *PLoS ONE*, 8 (9), 1-12.
- CVC (2005). *Páramos de las Cordilleras Central y Occidental de Colombia. Informe Región del Grupo de Trabajo de Páramos Centro Occidente de Colombia-GTP-CO*. Dirección Técnica Ambiental. Santiago de Cali, 300 pp.
- Dalkey, N., y Helmer, O. (1963). An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science*, 9(3), 458-467.

- DNP, MADS, IDEAM y UNGRD (2012). *ABC: Adaptación bases conceptuales. Marco conceptual y lineamientos Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)*, 80 pp.
- ESRI (2015). *Cómo funciona Kriging*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- Flórez, A. (2002). Movilidad altitudinal de páramos y glaciares en los Andes colombianos.. En: MMA, CAR, IDEAM y C. I. Colombia. *Memorias Congreso Mundial de Páramos. Tomo I* (pp. 80-97), Bogotá.
- Geng, S., Auburn, J., Brandstetter, E. y Li, B. (1988). A Program to Simulate Meteorological Variables. Documentation for SIMMETEO. (Agronomy Report No. 204). University of California: Davis Crop Extension.
- Gutiérrez, H.J. (2001). *Aproximación a un modelo para la evaluación de la vulnerabilidad de las coberturas vegetales de Colombia ante un posible cambio climático utilizando SIG* [Tesis de grado para optar al título de magíster, Instituto de Estudios Ambientales IDEA], Universidad Nacional de Colombia.
- Hofstede, Robert et. al. (2014). *Los páramos andinos. ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN, Quito, Ecuador.
- Hole, D. G., Young, K.R, Seimon, A., Gómez, C., Hoffman, D., Schutze, K., Sánchez, S., Muchoney, D., Grau, H. R. y Ramirez, E. (2012). Manejo adaptativo para la conservación de la biodiversidad frente al cambio climático, perspectiva en los Andes tropicales. En Herzog, S.K., Martinez, R., Jørgensen, P. M. y Tiessen, H. *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales (23-57)*. Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), Sao José dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE), París.
- IAvH (2012). Proyecto: Actualización del Atlas de Páramos de Colombia. Complejo de Páramos Chili - Barragán Distrito Viejo Caldas - Tolima Sector Cordillera Cental CC-CT-CBG. Convenio Interadministrativo de Asociación 11-103, Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Escala 1:100.000. Bogotá D.C. Colombia. [http://www.humboldt.org.co/images/Atlas%20de%20paramos/23CC-CT-CBG\(Chili-Barragan\).pdf](http://www.humboldt.org.co/images/Atlas%20de%20paramos/23CC-CT-CBG(Chili-Barragan).pdf).
- IDEAM (2002). *Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor*. Bogotá, Colombia.
- IDEAM (2010). *Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Bogotá, Colombia, 448 pp.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería (2015). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100. Herramientas científicas para la toma de decisiones*. Enfoque Nacional Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.
- IPCC (2007a). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.

- IPCC (2007b). Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., and Hanson, C.E. (Eds). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability (AR4 WG2)*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Ippolito, A. S., Sala, J. H., Faber, M. V. (2010). Ecological vulnerability analysis: a river basin case study. *Sci Total Environ*, 408 (18), 3880-3890.
- Isch, E. (2012). *El cambio climático y la gestión de páramos*. Quito, Ecuador: Imprimax.
- Marshall, N. A., Marshall, P. A., Tamelander, J., Obura, D., Malleret-King, D. and Cinner, J.E. (2010). *A framework for social adaptation to climate change: sustaining tropical coastal communities and industries*. GlandSwitzerland: IUCN, 36 pp.
- Marshall, N., Tobin, R., Marshall, P., Gooch, M. and Hobday, A. (2013). Social vulnerability of marine resource users to extreme weather events. *Ecosystems*.
- MAVDT, IDEAM and PNUD (2001). Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Bogotá, Colombia.
- Morales, M., Otero, J., Van der Hammen, T., Torres, A., Cadena, C., Pedraza, C., Rodríguez, N., Franco, C., Betancourth, J. C., Olaya, E., Posada, E. & Cárdenas, L. (2007). *Atlas de páramos de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D. C., 208 pp.
- Moreno Jiménez, J. M. (2012). *El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones*. Departamento de Métodos Estadísticos. Facultad de Económicas. Universidad de Zaragoza, 33 pp.
- Murillo, L. G., Pabón Restrepo, G. A., Pérez Álvarez, P. A., Rojas Laserna, M., and Suárez Castaño, R. (2017). *Política Nacional de cambio climático: documento para tomadores de decisiones*.
- Pabón, J. D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36 (139), 261-278.
- Pabón, J. D. and Hurtado, G. (2002). La variabilidad y el cambio climático y su efecto en los biomas de páramo. En Ange Jaramillo, C., Castaño Uribe, C., Arjona Hincapié, F., Rodríguez, J.V. y Durán, C.L. *Memorias del Congreso Mundial de Páramos. Tomo 1*. Ministerio de Medio Ambiente, IDEAM, Conservación Internacional, Bogotá, Colombia, pp. 98-103.
- Rosselli, L., Stiles, F. G. y Camargo, P. A. (2017). Changes in the avifauna in a high Andean cloud forest in Colombia over a 24-year period. *Journal of Field Ornithology*, 88 (3), 211-228.
- Ruiz, F. (2010). *Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama*

- 2011-2100). Nota Técnica de IDEAM, No. IDEAM- METEO/005-2010. Bogotá D.C., 91 pp.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill: New York.
- Steffen, W., Persson, Å., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K. and Molina, M. (2011). The Anthropocene: From global change to planetary stewardship. *Ambio*, 40 (7), 739-761.
- UNEP (2005). *Climate change: processes, characteristics and threats*. UNEP/GRID-Arendal Maps and Graphics Library. [http://maps.grida.no/go/graphic/climate\\_change\\_processes\\_characteristics\\_and\\_threats](http://maps.grida.no/go/graphic/climate_change_processes_characteristics_and_threats)
- UNEP (2007). *Insuring for sustainability: Why and how the leaders are doing it*. The inaugural report of the Insurance Working Group of the United Nations Environment Programme Finance Initiative. May 2007. [http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/insuring\\_for\\_sustainability.pdf](http://www.unepfi.org/fileadmin/documents/insuring_for_sustainability.pdf)
- Uribe Botero, E. (2015). *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*. Unidad de Cambio Climático de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Programa EUROCLIMA (CEC/14/001). Naciones Unidas, Santiago
- Van der Hammen, T., Pabón, J. D., Gutiérrez, H. and Alarcón, J. C. (2002). El Cambio Global y los Ecosistemas de Alta Montaña de Colombia (163-209). E, IDEAM, *Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en Condición HotSpot & Global Climatic Tensor*. IDEAM, Colombia.