

Artículo de investigación

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS FORMACIONES VEGETALES EN COLOMBIA

Climate change and spatial distribution of vegetation in Colombia
As mudanças climáticas e a distribuição espacial das formações vegetais na Colômbia

Título corto: Cambio climático y formaciones vegetales

Palabras clave: clima, Colombia, impactos, modelo, vegetación.

Keywords: climate change, Colombia, impacts, model, vegetation changes.

Palavras-chave: mudanças climáticas, vegetação, Colômbia, impactos formações vegetais.

Juan Carlos Alarcón Hincapié¹

José Daniel Pabón Caicedo²

RESUMEN

Se analizan los cambios que habría en la distribución espacial de la vegetación sobre el territorio colombiano bajo dos escenarios de cambio climático en diferentes periodos del siglo XXI. Se reprodujo la distribución espacial de la vegetación del país utilizando el modelo de Holdridge y datos climatológicos del periodo de referencia 1970-2000, en resolución espacial de 900 metros; en esta reconstrucción la vegetación con mayor ocupación territorial correspondió al bosque subhúmedo tropical, el bosque seco tropical y el bosque andino bajo húmedo. Se efectuó la validación de los resultados, lo que corroboró un alto grado de aproximación entre los patrones espaciales modelados y los ecosistemas del país. Adicionalmente, se tomaron las variables climatológicas generadas para Colombia por un modelo climático regional en dos escenarios (A2 y B2) de IPCC (2007) para los periodos 2011-2040 y 2070-2100, y se generó la distribución de la vegetación correspondiente a esos periodos y escenarios. Mediante la comparación de las distribuciones de los periodos actual (1970-2000)

y futuros (2011-2040 y 2070-2100), se establecieron los cambios que habría en la vegetación. Los resultados se resumen en lo siguiente: en los dos escenarios, para los dos periodos analizados, las formaciones vegetales sufren cambios hacia las de pisos altitudinales más bajos y provincias de humedad más secas; el cambio más drástico ocurre en el escenario A2 para el periodo 2070-2100. Las formaciones vegetales que más se afectan son las de páramo y las altoandinas, que según los escenarios climáticos explorados, desaparecerían a mediados del siglo XXI.

ABSTRACT

Vegetation change under two climate change scenarios in different periods of the 21st Century are modeled for Colombia. Vegetation for the years 1970 to 2000 was reproduced using the Holdridge model with climate data with a spatial resolution of 900 meters. The vegetation types that occupied the most territory were sub-humid tropical forest, tropical dry forest and Andean wet forest. The-

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ingeniería Ambiental; Bogotá D. C., Colombia. jcalarconh@udistrital.edu.co

² Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geografía; Bogotá D. C., Colombia. jdpabonc@unal.edu.co

se results were validated by comparing with the Colombian ecosystem map (SINA, 2007), which confirmed a high degree of similarity between the modeled spatial vegetation patterns and modern ecosystem distributions. Future vegetation maps were simulated using data generated by a regional climate model under two scenarios (A2 and B2; IPCC, 2007) for the periods 2011-2040 and 2070-2100. Based on our predictions high altitude vegetation will convert to that of lower altitudes and drier provinces with the most dramatic change occurring in the A2 scenario from 2070-2100. The most affected areas are the páramo and other high Andean vegetation types, which in the time-frame of the explored scenarios will disappear by the middle of the 21st Century.

RESUMO

Analisam-se as mudanças que teriam na distribuição espacial da vegetação sobre o território colombiano em dois cenários da mudança climática em diferentes períodos do século XXI. A distribuição espacial da vegetação do país foi reproduzida utilizando o modelo Holdridge e os dados climatológicos do período de referência 1970-2000 em resolução espacial de 900 metros. Nesta reconstrução, a vegetação com mais ocupação territorial correspondeu ao bosque subúmido tropical, o bosque seco tropical e o bosque andino sob úmido. A validação dos resultados foi efetuada por meio da comparação da distribuição obtida e o mapa dos ecossistemas do país (SINA, 2009), corroborando um alto grau de aproximação entre os padrões espaciais modelados e os ecossistemas do país. Aliás, tomaram-se as variáveis climatológicas geradas para a Colômbia por um modelo climático regional em dois cenários (A2 e B2 de IPCC, 2007) para os períodos 2011-2040 e 2070-2100 e gerou-se a distribuição da vegetação correspondente a esses períodos e cenários. Mediante a comparação das distribuições dos períodos: atual (1970-2000) e futuros (2011-2040 e 2070-2100) estabeleceram-se as mudanças que teriam na vegetação nesses períodos e cenários.

Os resultados são resumidos no seguinte: nos cenários, para os períodos analisados, as formações vegetais mudam em direção aos pisos altitudinais mais baixos e províncias de umidade mais secas. A mudança mais drástica acontece no cenário A2 para o período 2070-2100. As formações vegetais que são mais afetadas são os páramos e as altoandinas que, segundo os cenários climáticos explorados, desapareceriam na metade do século XXI.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad está ocurriendo un cambio climático que impactará las diferentes regiones del mundo (IPCC, 2007); este modificará las distribuciones espaciales en los componentes fisicobiótico y socioeconómico, lo que producirá conflictos tanto en la relación sociedad-naturaleza como en cada uno de estos componentes. En efecto, el cambio climático, expresado en la modificación de la temperatura media, la precipitación anual, la humedad relativa y la escorrentía, afectará directamente los ecosistemas, la salud humana y la disponibilidad de agua para diferentes propósitos; por tanto, perturbará el patrón de los fenómenos meteorológicos extremos que recurrentemente generan desastres en una región. En esta nueva situación estarán expuestos diversos actores de la población, la infraestructura y los procesos socioeconómicos del territorio.

Dado que existe una estrecha relación clima-vegetación-ecosistemas-biomas, este factor ambiental tiene una incidencia importante en los procesos bióticos del planeta, y de manera particular en la distribución espacial de los biomas y la existencia de una determinada diversidad biológica (Herzog *et al.*, 2010; Parmesan & Yohe, 2003). Hay evidencias de que los cambios climáticos del pasado han tenido una incidencia marcada en el medio biótico (Bradley, 1999). El cambio climático en curso no solo no haría una excepción en ese sentido, sino que también afectaría considerablemente el funcionamiento y el desarrollo de una sociedad estrechamente relacionada con los ecosistemas. Para el territorio colombiano,

las evidencias en la distribución de la vegetación debido a los cambios climáticos del pasado han sido presentadas por autores como Hooghiemstra (1984) o van der Hammen *et al.* (2002).

Un enfoque para evaluar la incidencia del cambio climático sobre los ecosistemas es a partir de la modelación de las posibles afectaciones en la distribución espacial de las coberturas vegetales; este enfoque se está aplicando en Centroamérica por Mendoza *et al.* (2001) y Alpizar (2007), donde se han utilizado escenarios climáticos globales, no regionales. Este cambio climático impactará la biodiversidad desde el nivel de ecosistemas hasta el nivel de especies (Reid & Huq, 2005); sin embargo, no afectará de igual manera a todas las especies y comunidades, algunas tienden más a la extinción que otras por efectos directos o indirectos del cambio (IPCC, 2002; Biringer *et al.*, 2005). El impacto más obvio se da en los límites de los ecosistemas como consecuencia del incremento del nivel del mar y los cambios en la temperatura; esto provocará que algunos ecosistemas se expandan a nuevas áreas y otros disminuyan en tamaño (IPCC, 2007; Reid & Huq, 2005).

Este cambio climático incidirá en el medio físico-biótico del país, lo que se traducirá en impactos sobre los ecosistemas y los sistemas humanos establecidos en el territorio colombiano; Buytaert *et al.* (2011) plantean que dicho cambio desplazará y reducirá fuertemente el área de ecosistemas alpinos tropicales, por lo que se aumentará su fragmentación y se inducirá la extinción de especies y la pérdida de la biodiversidad biológica. Por esta razón, es de suma urgencia analizar las modificaciones que a las distribuciones de la vegetación y de los ecosistemas traería el cambio climático en los decenios venideros. Motivados por esta necesidad de conocimiento, el presente trabajo explora los cambios que en la distribución de las formaciones vegetales del territorio generarían diferentes escenarios de cambio climático en el transcurso del siglo XXI en el territorio colombiano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en dos grandes fases: 1) la elaboración del mapa de la distribución espacial actual de las formaciones vegetales en Colombia con una base climática 1971-2000 y 2) la elaboración de mapas de las posibles distribuciones futuras de las formaciones vegetales considerando los periodos entre los años 2011-2040 y 2070-2100, bajo los escenarios de cambio climático A2 y B2 (IPCC, 2000).

LA MODELACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL ACTUAL DE LAS FORMACIONES VEGETALES

La distribución espacial de la vegetación para un periodo de referencia (1970-2000) se ajustó utilizando el modelo de Holdridge (1967), que relaciona variables climáticas y formaciones vegetales. El sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge asocia las formaciones vegetales (o los biomas) con la temperatura media anual del aire (biotemperatura), la precipitación anual y la tasa de evapotranspiración anual. En este modelo cada zona de vida está representada por un hexágono conformado por el cruce de las isolíneas de las tres variables señaladas.

La temperatura media anual del aire se obtuvo a partir de las mediciones en estaciones climatológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y estimaciones con base en el modelo digital de elevación (DEM), las cuales generaron datos de temperatura media anual para píxeles cada 900 metros. Para el cálculo de la temperatura media anual con el DEM se utilizó la relación:

$$T_x = T_{\text{estación}} - (\Omega_T * (h_{\text{pixel}} - h_{\text{estación}}))$$

T_x : temperatura media para un nuevo píxel;
 $T_{\text{estación}}$: temperatura media anual de la estación meteorológica;

h_{pixel} : altura sobre el nivel del mar del nuevo píxel; $h_{\text{estación}}$: altura sobre el nivel del mar de la estación meteorológica;

Ω_T : gradiente de temperatura por región climática (ver tabla 1); se calcula así:

$$\Omega_T = (T_{\max} - T_{\min}) / (h_{\max} - h_{\min})$$

T_{\max} : temperatura máxima de la región climática en mm;

T_{\min} : temperatura mínima de la cuenca climática en mm;

h_{\max} : altura máxima de la estación con temperatura en m;

h_{\min} : altura mínima de la estación con temperatura en m.

Con la distancia inversa ponderada o *inverse distance weighted interpolation* (IDW) se interpolaron los datos de la temperatura media anual observados y los generados con el DEM para obtener datos para pixeles de 900 metros (cerca de 1 500 000 puntos para el territorio colombiano).

La precipitación se obtuvo utilizando los datos de estaciones climatológicas suministradas por el Ideam, complementadas a partir de la bases de datos de la Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM); se obtuvo un total de 3700 puntos con datos de precipitación anual. A partir de estos datos, con interpolación (con IDW), se generaron datos para una cuadrícula de 900 x 900 metros. La evapotranspiración potencial (ETP) se calculó mediante la fórmula:

$$ETP = \text{Biotemperatura} * 58.93$$

(en milímetros anuales)

La tasa de evapotranspiración o las provincias de humedad se definieron de la siguiente manera:

$$IH = ETP / PP$$

Tabla 1. Gradiente de temperatura por región climática

REGIÓN	GRADIENTE (oC/100 metros)	REGIÓN	GRADIENTE (oC/100 metros)
1. ALTA GUAJIRA	0,6	13. SABANA DE BOGOTÁ	0,55
2. SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA Y CUENCA DEL CESAR	0,57	14. RÍO SOGAMOSO	0,55
3. LITORAL CENTRAL	0,57	15. CATATUMBO	0,52
4. BAJO MAGDALENA	0,5	16. RÍO ARAUCA Y CUENCA MEDIA DEL META	0,58
5. SINÚ-SAN JORGE-BAJO NECHI- URABÁ	0,5	17. PIEDEMONTE LLANERO	0,53
6. PACÍFICO NORTE Y CENTRAL	0,49	18. ORONOQUÍA ORIENTAL	0,57
7. PACÍFICO SUR	0,49	19. ORINOQUÍA CENTRAL	0,55
8. MONTAÑA NARIÑIENSE	0,57	20. SURORIENTE AMAZÓNICO	0,55
9. ALTO CAUCA	0,57	21. AMAZONIA CENTRAL	0,53
10. MEDIO CAUCA Y ALTO NECHI	0,52	22. PIEDEMONTE AMAZÓNICO	0,51
11. ALTO MAGDALENA	0,57	23. ALTO PATÍA	0,57
12. MEDIO MAGDALENA	0,57	24. SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA	0,58

IH: índice de humedad; ETP: evapotranspiración potencial; PP: precipitación media anual

El modelo de Holdridge se programó en código Fortran y se obtuvo la formación vegetal para cada uno de los 1.500.000 puntos con información de temperatura media anual del aire, la precipitación anual y la relación de la evapotranspiración anual. Con la interpolación de estos resultados se elaboró el mapa de formaciones vegetales para Colombia con la base climática o periodo de referencia 1971-2000, la capa resultante fue suavizada mediante un algoritmo estadístico (majority) que promedia los datos de una matriz de 7 x 7 celdas adyacentes y atenúa los cambios bruscos entre pixel y pixel. Para validar el modelo se utilizó la comparación del mapa de generado con el mapa de ecosistemas de Colombia publicado por SINA (2007).

METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE LAS FORMACIONES VEGETALES FUTURAS

Las formaciones vegetales futuras se simularon mediante la incorporación al modelo de Holdridge de los datos climatológicos de los escenarios propuestos con base en la aplicación de un modelo climático regional (MCR) por Pabón (2011) para los periodos 2011-2040 y 2070-2100, en los escenarios A2 y B2 de IPCC (2000). La distribución espacial de la temperatura media anual y de la precipitación anual en esos escenarios se interpoló utilizando IDW para generar información a mayor resolución espacial y disponer de datos para los mismos puntos con información en el periodo 1971-2000.

Con los datos de temperatura media anual y precipitación anual se generaron las formaciones vegetales futuras en cada uno de los 1 500 000 puntos. A partir de la utilización del método IDW, se interpolaron los datos de formaciones vegetales para obtener así las distribuciones espaciales de la vegetación en el futuro.

RESULTADOS

TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN ACTUAL

Con base en la información climática básica se generaron las capas de precipitación para el periodo 1971-2000, los valores mínimos y máximos reportados para la capa de precipitación fueron entre 242 mm y 14665 mm, en la Guajira y el sector norte del departamento del Cauca, respectivamente. El mapa de temperatura media anual generó resultados a 900 m de resolución espacial y por cuenca climática, pues así se considera más fielmente la distribución espacial de la temperatura, por tener en cuenta factores de tipo geográfico como la altura sobre el nivel del mar, las variaciones locales por efecto de la topografía y el efecto de barlovento y sotavento (figura 1).

FORMACIONES VEGETALES ACTUALES Y FUTURAS

Con base en las dos variables climáticas básicas actuales, temperatura y precipitación, se obtuvieron veinte zonas de vida, que van desde ambientes desde el nivel del mar hasta sistemas nivales, ubicados en las zonas altas de las cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta, y abarcan desde los bosques tropicales hasta las nieves perpetuas. La mayoría de formaciones vegetales actuales corresponden al piso basal, con un 78,62% de su superficie; seguidas por las formaciones vegetales del piso andino, con un 18,66%; en menor proporción se encuentran las vegetaciones de las zonas altas, compuestas por el piso altoandino y las zonas de páramos, con tan solo un 2,7% aproximadamente. La formación vegetal de mayor representación espacial corresponde al bosque tropical subhúmedo, con un 60,47% del territorio colombiano, seguido por el bosque seco tropical, con el 13,16%.

Los resultados del modelo aplicado fueron validados con las coberturas vegetales obtenidas del

mapa general de ecosistemas producido por las entidades del SINA (figura 2), a partir de lo cual se obtuvo una correspondencia muy alta en términos de la distribución espacial de las formaciones vegetales modeladas cercana al 90%, descontando las excepciones como las áreas ya intervenidas por cultivos, pastos y asentamientos humanos, y las áreas de sabanas naturales de la Orinoquía colombiana. Se verificaron las coberturas vegetales de los pisos altos como los páramos y las áreas de hielo; se encontró también una alta correspondencia de los resultados del modelo con la vegetación actual de esos espacios geográficos.

TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN FUTURAS

En términos generales, para el periodo 2011-2040, la temperatura del aire aumentaría alrededor de los 2 °C por encima de lo observado en el periodo de referencia, con aumentos de hasta 4 °C en diferentes regiones al finalizar el periodo; el calentamiento tiende a ser mayor en el valle del Magdalena, en la Orinoquía, un extenso sector de la Amazonia y el sector central del Litoral Caribe, así como en el sur de la Costa Pacífica, principalmente en el departamento de Nariño. En el periodo 2071-2100, bajo el escenario A2, la temperatura media anual del aire presenta aumentos drásticos. Si bien, en general el incremento de la temperatura es del orden de 2 °C a 4 °C, en la mayor parte del territorio colombiano, en el valle del Magdalena, Valle del Cauca, la región Caribe y la Orinoquía colombiana, el aumento está entre 4 °C y 6 °C.

En los dos escenarios evaluados (A2 y B2), la precipitación anual durante el periodo 2011-2040 tendría un incremento mayor del 10%, en comparación con la que se observaba en el periodo de referencia; estos aumentos se observan principalmente en las regiones de la Orinoquía y la Amazonia, el piedemonte amazónico y llanero, el Alto y Medio Magdalena, todo el altiplano cundiboyacense y el nororiente del Chocó. Por otro lado, se aprecian núcleos con incrementos mayores principalmente en el piedemonte llanero, la parte alta del río Arauca, el norte del Chocó y

un sector al sureste de la Sierra Nevada de Santa Marta. Una reducción de la precipitación anual en el periodo mencionado se observaría en la cuenca del río Cauca, el Pacífico sur y un sector centro-sur del Chocó, así como una amplia zona en la región Caribe.

En el periodo 2071-2100, en los dos escenarios A2 y B2, las reducciones de precipitación mayores del 30% en relación con los valores anuales de 1971-2000 se observarían en la región interandina y el Caribe. La reducción más fuerte (por encima del 50%) se observaría en la parte andina de Nariño y Cauca, Huila y Tolima, el altiplano cundiboyacense, Norte de Santander, La Guajira y los sectores del Litoral Caribe central. Un aumento de la precipitación ocurriría en la vertiente del Pacífico y en la Orinoquía y Amazonia. Se destacan los sectores con incrementos mayores del 50% en el centro-norte de la Costa Pacífica, el Magdalena Medio y en algunos pequeños núcleos en el piedemonte amazónico y llanero. En el escenario A2 el aumento de la precipitación en el área del Magdalena Medio es más intenso, y cubre mayor área en comparación con lo que ocurriría bajo el escenario B2 (ver figura 3).

MAPAS DE FORMACIONES VEGETALES FUTURAS

Al ejecutar el modelo de zonas de vida de Holdridge para los escenarios de cambio climático propuestos, se generaron cuatro mapas con la distribución espacial de la vegetación para los dos periodos analizados y bajo los escenarios de cambio climático A2 y B2. Se observa que la formación vegetal con mayor representación espacial es el bosque tropical subhúmedo, con más del 55% del área total en los cuatro resultados, pero, a su vez, con una marcada tendencia a su reducción en superficie; la unidad que sigue en área es el bosque seco tropical y con tendencia a incrementar su superficie en los dos escenarios, pero cuya mayor superficie la alcanzaría en el escenario B2 para el periodo 2070-2100, con un 16,2% de la superficie nacional. La unidad de bosque andino bajo húmedo proyecta un incremento aproximado

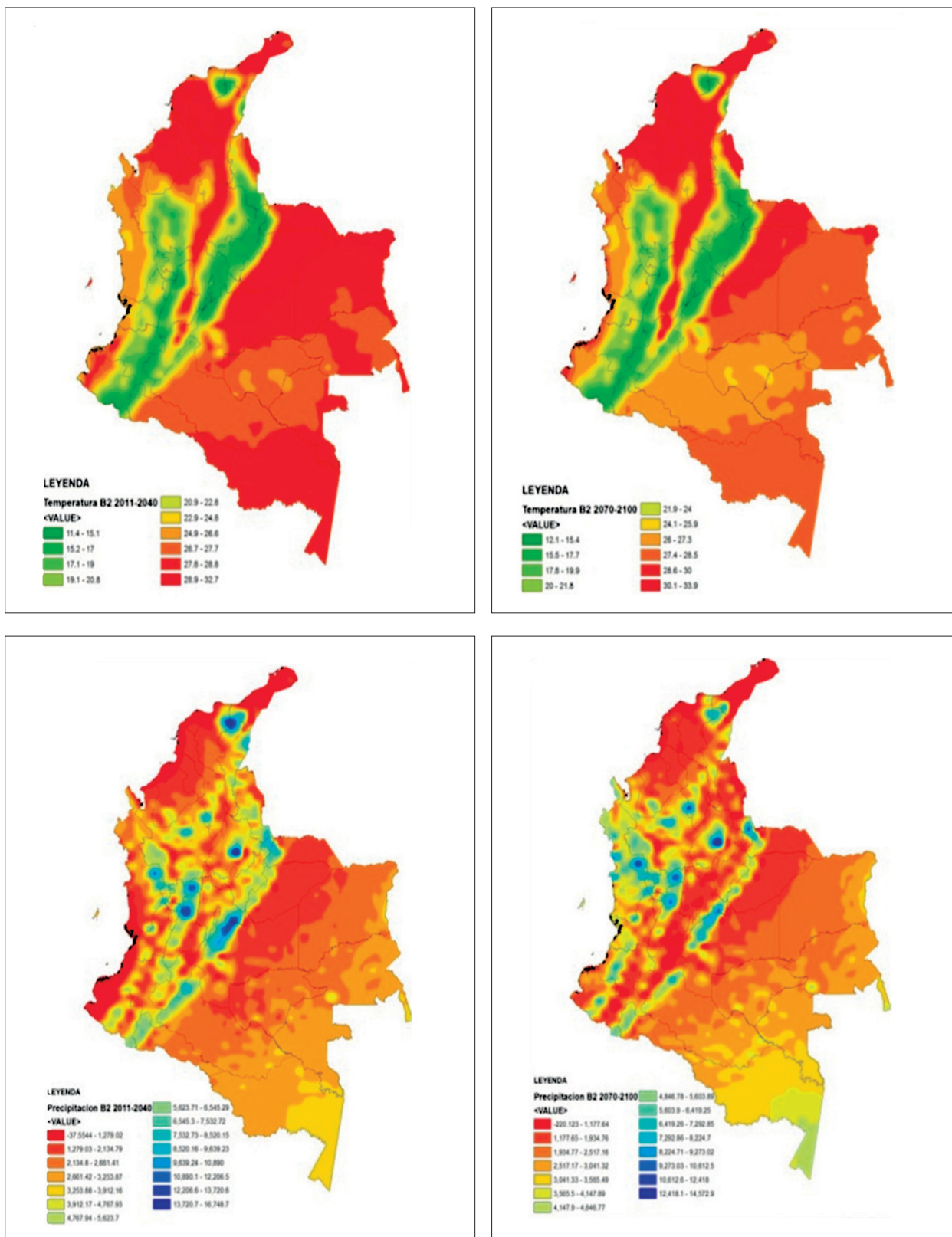
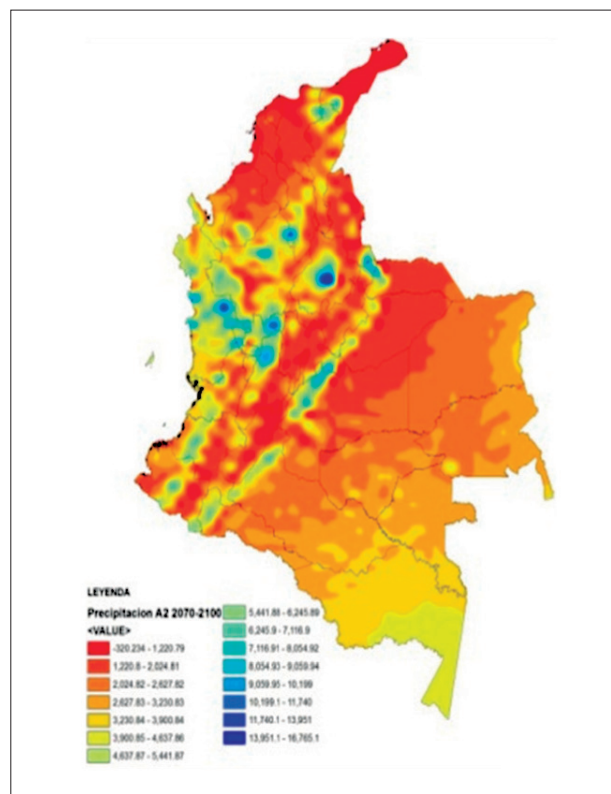
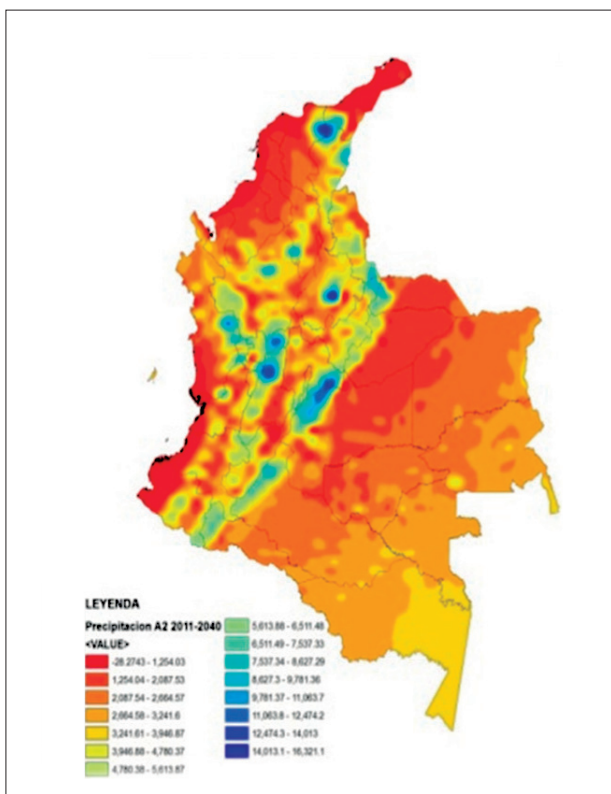
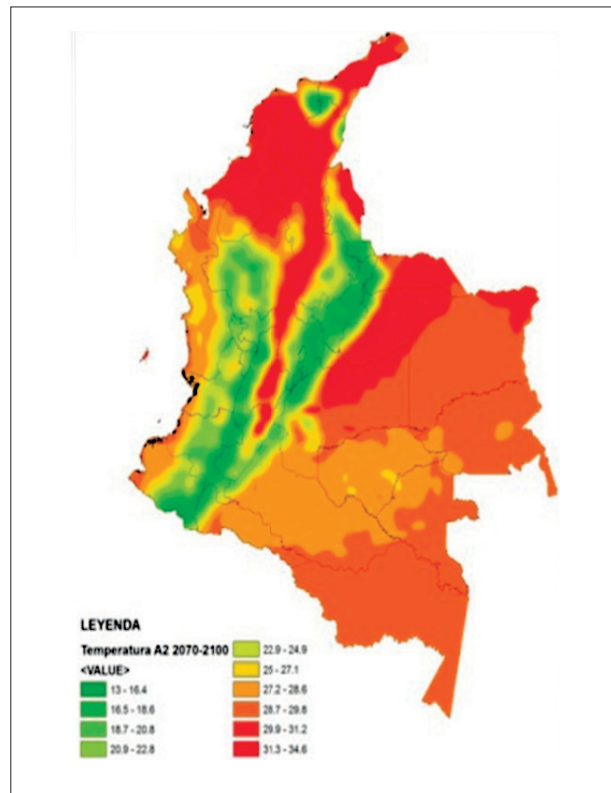
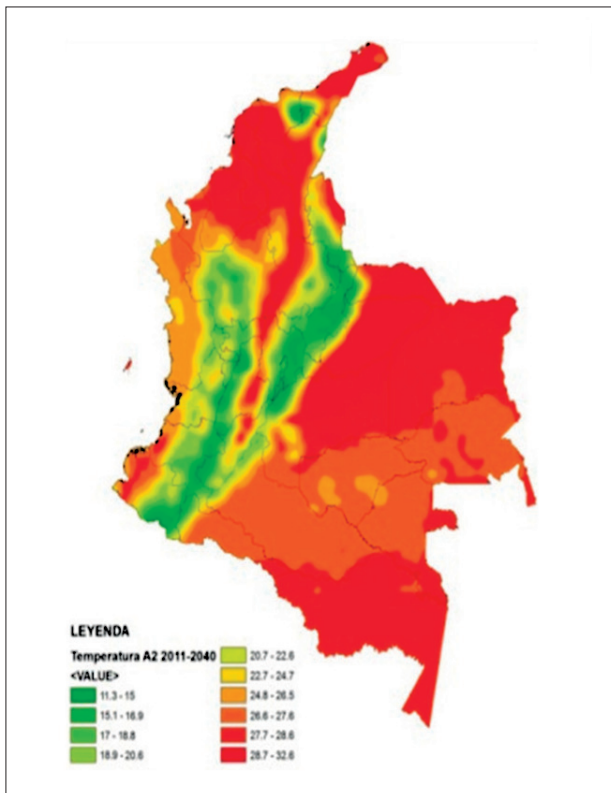


Figura 3. Temperatura media anual del aire (arriba) y precipitación media anual (abajo) bajo los escenarios A2 y B2, periodos 2011-2040 y 2070-2100



del 2,4% para los escenarios A2 y B2 en el primer periodo de análisis 2011-2040, luego muestra un leve descenso para el segundo periodo en los dos escenarios. Las formaciones vegetales de pisos altos (nieve y páramos) desaparecen por completo para los escenarios estudiados (figura 4).

A partir de lo anterior, las formaciones vegetales más afectadas por el cambio climático serían las localizadas en los pisos altitudinales altos, en especial las zonas nivales y las áreas de páramos, pues los resultados sugieren que para los dos escenarios utilizados A2 y B2, tan solo para los años 2040 estas unidades desaparecerían totalmente (tabla 2).

Las coberturas altoandinas también sufrirán un gran impacto, solo quedarían en porcentajes mínimos, es decir, algunos relictos de la unidad de bosque altoandino lluvioso; pero solo para el primer periodo de análisis, en los dos escenarios las demás coberturas altoandinas desaparecerían. Las coberturas andinas presentan una dinámica muy particular, algunas unidades como el bosque andino bajo húmedo y el bosque andino húmedo reducen dramáticamente su superficie para los dos periodos de análisis, pero con una mayor velocidad para el primer periodo en los dos escenarios, aproximadamente el 5% de su superficie original; otras aumentan en superficie como el bosque andino bajo húmedo y el bosque andino lluvioso, de manera más fuerte en el primer que en el segundo periodo de análisis.

Para los dos escenarios climáticos evaluados se observa la aparición de unidades de clima cálido y seco, como la formación desierto y matorral desértico, así como un notable incremento en área para la unidad bosque tropical seco en la parte norte del departamento de La Guajira, y algunos enclaves en los departamentos de Huila, Atlántico y sur de La Guajira, lo que puede interpretarse como una marcada tendencia a condiciones de altas temperaturas y menores precipitaciones, lo cual posibilita o deja el territorio nacional más expuesto a posibles incendios en la cobertura vegetal y a procesos de desertificación. Aguilar *et al.* (2005) en sus análisis revela una tendencia general al calentamiento por

el aumento de las temperaturas cálidas máximas y mínimas, y la disminución de eventos de temperaturas frías extremas.

Otro análisis importante es evidenciar a qué nueva formación vegetal migrarán o se desplazarán las unidades analizadas (figura 5) para el caso de la cobertura hielo; en los dos escenarios evaluados, su cambio en más del 99% de su superficie original se dio en la unidad bosque andino lluvioso para el primer periodo de análisis, y cerca del 93% para el segundo periodo. Similar análisis ocurre con las unidades de páramo y subpáramo, pues principalmente migran a la unidad bosque andino lluvioso, pero de manera más marcada para el primer periodo de análisis; mientras que para el 2100, en los dos escenarios, se convierten en bosque andino lluvioso y bosque andino húmedo, proporcionalmente.

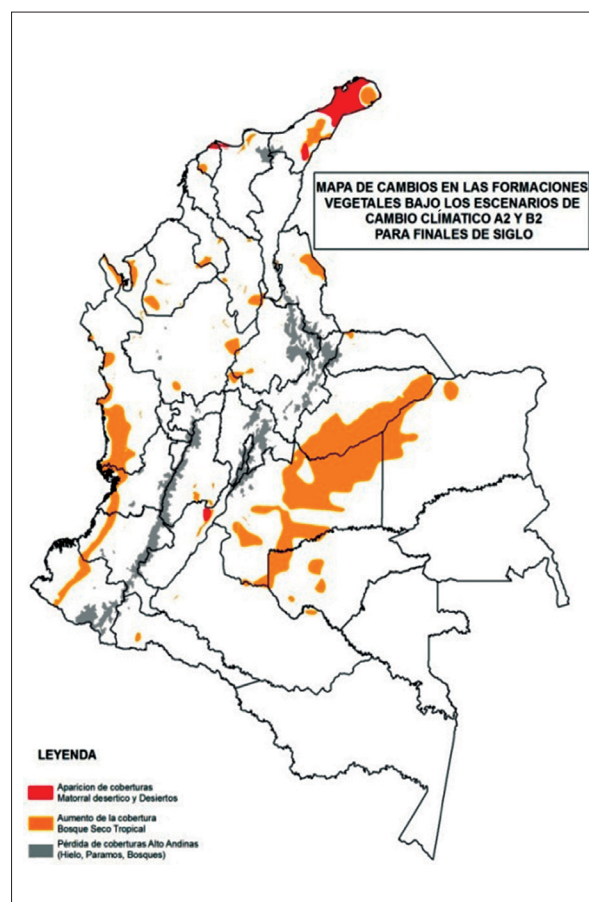


Figura 5. Principales cambios en las formaciones vegetales bajo los escenarios A2 y B2 para finales de siglo

Tabla 2. Formaciones vegetales actuales y futuras bajo los escenarios A2 y B2

Formaciones vegetales actuales	%	Formaciones vegetales actuales A2 2011-2040	%	Formaciones vegetales actuales B2 2011-2040	%	Formaciones vegetales actuales A2 2070-2100	%	Formaciones vegetales actuales B2 2070-2100	%
Hielo	0,00								
Páramo lluvioso	0,02								
Subpáramo húmedo	0,00								
Subpáramo lluvioso	0,10								
Bosque altoandino húmedo	2,18								
Bosque altoandino lluvioso	0,16	Bosque altoandino lluvioso	0,02	Bosque altoandino lluvioso	0,01		0		0
Bosque altoandino subhúmedo	0,24								
Bosque andino bajo húmedo	5,96	Bosque andino bajo húmedo	8,23	Bosque andino bajo húmedo	8,21	Bosque andino bajo húmedo	6,06	Bosque andino bajo húmedo	6,78%
Bosque andino bajo lluvioso	0,25	Bosque andino bajo lluvioso	5,68	Bosque andino bajo lluvioso	5,66	Bosque andino bajo lluvioso	3,81	Bosque andino bajo lluvioso	3,81%
Bosque andino bajo subhúmedo	5,15	Bosque andino bajo subhúmedo	0,09	Bosque andino bajo seco	0,10	Bosque andino bajo seco	0,37	Bosque andino bajo seco	0,47%
Bosque andino húmedo	2,42	Bosque andino húmedo	2,95	Bosque andino húmedo	2,90	Bosque andino húmedo	2,49	Bosque andino húmedo	2,44%
Bosque andino lluvioso	0,10	Bosque andino lluvioso	4,37	Bosque andino lluvioso	4,24	Bosque andino lluvioso	0,91	Bosque andino lluvioso	1,22%
Bosque andino seco	0,61								
Bosque andino subhúmedo	4,18	Bosque andino subhúmedo	0,16	Bosque andino subhúmedo	0,18	Bosque andino subhúmedo	1,59	Bosque andino subhúmedo	2,43%
Bosque espinoso	0,71	Bosque espinoso	0,81	Bosque espinoso	0,82	Bosque espinoso	0,77	Bosque espinoso	0,77%
Bosque tropical húmedo	3,37	Bosque tropical húmedo	2,84	Bosque tropical húmedo	2,95	Bosque tropical húmedo	8,05	Bosque tropical húmedo	5,34%
Bosque tropical lluvioso	0,10	Bosque tropical lluvioso	0,29	Bosque tropical lluvioso	0,31	Bosque tropical lluvioso	0,52	Bosque tropical lluvioso	0,38%
Bosque tropical muy seco	0,81	Bosque tropical muy seco	2,21	Bosque tropical muy seco	2,21	Bosque tropical muy seco	1,10	Bosque tropical muy seco	1,19%
Bosque tropical seco	13,16	Bosque tropical seco	14,42	Bosque tropical seco	13,85	Bosque tropical seco	15,43	Bosque tropical seco	16,18%
Bosque tropical subhúmedo	60,47	Bosque tropical subhúmedo	56,69	Bosque tropical subhúmedo	57,32	Bosque tropical subhúmedo	55,45	Bosque tropical subhúmedo	55,40%
		Desierto	0,09	Desierto	0,10	Desierto	0,34	Desierto	0,25%
		Matorral desértico	0,16	Matorral desértico	0,16	Matorral desértico	0,30	Matorral desértico	0,34%

Como se mencionó anteriormente, la unidad de mayor representación espacial en la actual distribución de coberturas es el bosque tropical subhúmedo, con un 60,47% del territorio nacional, la cual también sufre desplazamientos a otras coberturas; para el primer periodo, cerca del 12% de su superficie se transforma en bosque tropical seco y para el segundo periodo, tan solo se convierte el 10,5% al mismo bosque seco; las unidades nuevas que aparecen como desierto y matorral desértico provienen en su gran mayoría de las coberturas bosque espinoso y bosque tropical muy seco; lo anterior está en concordancia con las proyecciones globales de ambientes cada vez más cálidos y secos (figura 5).

DISCUSIÓN

A pesar de que existe un sinnúmero de modelos clima-vegetación que simulan la distribución biogeográfica de la vegetación, la propuesta de Holdridge (1967) (zonas de vida) para el caso colombiano es una aproximación muy fuerte para representar la distribución de la vegetación en el trópico; aunque en este estudio solo se llegó a la modelación de formaciones vegetales, se podrían mejorar los resultados si se utilizaran todos los niveles de análisis de la propuesta de Holdridge como, por ejemplo, la distribución de vegetación basada en biotemperatura, la precipitación, la región altitudinal y el cinturón latitudinal (Yates *et al.*, 2000). Se propone que para futuras investigaciones se utilicen modelos más robustos como los utilizados por Yates *et al.* (2000), Yanling & Deti (2008) y Chakraborty *et al.* (2013) para la evaluación de la distribución espacial de la vegetación y sus posibles impactos frente al cambio climático.

Los páramos y los ecosistemas altoandinos, además de ser altamente frágiles por su extensión y localización geográfica, tendrían muy poca capacidad de adaptación al ser ecosistemas de alta montaña que no pueden migrar a regiones con las condiciones climáticas adecuadas para su establecimiento (Biringier *et al.*, 2005), sin mencionar la presión que están sufriendo por actividades antrópicas (minería, ganadería y agricultura); adicionalmente, es

necesario complementar estos resultados con modelos de cambio en el uso del suelo y de presión a los que se ven expuestos estos ecosistemas.

Las formaciones de bosque andino aportan, en el balance nacional, con un 10% aproximadamente, se resalta la condición de alta humedad; es importante mencionar que para efectos de esta clasificación de formaciones vegetales con base en las variables climáticas mencionadas, no se tomaron en cuenta otros factores importantes que controlan la posible respuesta de la vegetación como el tipo de suelo, el relieve y los efectos indirectos del CO₂ (Yates *et al.*, 2000); por tanto, no se considera como una clasificación a nivel de asociaciones vegetales, sino de formaciones vegetales; sin embargo, para dar cumplimiento a los objetivos de esta investigación, se puede considerar suficiente, debido a que con la manipulación de las variables climáticas básicas es posible, y de una manera muy aproximada, examinar cuáles ecosistemas resultan más sensibles al efecto del cambio climático mediante cambios en su distribución y extensión.

Según Yates *et al.* (2000), si se tiene acceso limitado a modelos mecanicistas, expertos en modelación, datos regionales de alta resolución y calidad, los modelos de correlación se basan en relaciones simples entre medidas agregadas de clima y vegetación; Lugo *et al.* (1999) manifiestan que estos pueden ser los métodos más aplicables en estudios de impacto climático.

La marcada tendencia de las formaciones vegetales hacia provincias de humedad cada vez más secas y generalmente en las zonas de menor altitud se refleja en la amenaza para la cobertura bosque andino seco, que de hecho, y para efecto del presente análisis, desapareció por completo en los dos escenarios evaluados; esta cobertura aparece principalmente en los departamentos de Casanare, Meta, Santander, La Guajira, y en el sector occidental de los departamentos del Chocó, Valle del Cauca y Nariño; estos resultados también coinciden con los trabajos adelantados por Mendoza *et al.* (2001) en el pacífico nicaragüense donde se vienen incrementando las superficies de las zonas secas y muy secas.

La unidad de bosque seco tropical, una de las de mayor superficie en la actualidad y proyectada, también sufre ganancias considerables en área, en especial para el segundo periodo analizado 2070-2100. Pero no solamente formaciones vegetales del piso basal aparecen en los análisis, para el piso andino también se crean las condiciones climáticas óptimas para la aparición de la unidad bosque andino bajo seco, cuya mayor superficie proyectada sería, en el escenario B2 para el periodo 2070-2100, con un 0,45% de la superficie nacional.

CONCLUSIONES

Los diferentes informes del IPCC describen un panorama inequívoco sobre el cambio climático global; los resultados encontrados en el presente estudio, en los dos escenarios evaluados (A2 y B2), concuerdan en gran medida con las tendencias planetarias esperadas; primero, en que los ecosistemas altoandinos de páramo y zonas nivales son los más sensibles a dicho calentamiento y tienen una marcada tendencia a desaparecer incluso más rápido que las estimaciones globales, y, segundo, en la predisposición generalizada a que los ecosistemas secos cada vez aumenten más su superficie, pues las condiciones de mayor temperatura y menor humedad son cada vez más marcadas.

Colombia por su posición físico-geográfica es una región muy vulnerable a los impactos del cambio climático; estos cambios en las variables climatológicas básicas como temperatura y precipitación, sumados a las cada vez más fuertes presiones antrópicas (Ni, 2010), sugieren que las coberturas de hielo, los bosques altoandinos y los páramos, según el modelo, desaparecerían para mediados de siglo en los dos escenarios evaluados. Por lo anterior, esta cobertura se convierte en una de las más vulnerables a escenarios de cambio climático y genera así un impacto considerable en el componente socioeconómico toda vez que las principales ciudades y gran parte de las actividades socioeconómicas desarrolladas en la zona andina dependen del agua de estos ecosistemas o de los ríos o quebradas que nacen de ellos.

El bosque tropical subhúmedo es la cobertura que se afectará en mayor proporción, perderá en promedio un 11% de su superficie original (125 000 km²) aproximadamente, en los dos escenarios evaluados; este cambio se da en la cobertura bosque seco tropical, que se convierte en la formación que más superficie gana, y se propician condiciones más favorables para la ocurrencia de incendios en la cobertura vegetal en el territorio colombiano. Estas nuevas condiciones de altas temperaturas y menores precipitaciones que se generalizan en los escenarios evaluados favorecen la aparición de coberturas vegetales de ambientes áridos como desiertos y matorrales desérticos, con un 6% del territorio nacional para finales de siglo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, E. et al.** (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America. *Journal of Geophysical Research*. 2003. 110, D23107.
- Alpizar, E.** (2007). Vulnerabilidad de bosques ante cambio climático puede simularse con sistema de zonas de vida. *Ambientico*, 165, 28-30.
- Biringer, J. et al.** (2005). Biodiversity in a changing climate: a framework for assessing. Vulnerability and evaluating practical responses. En: C. Robledo, M. Kanninen & L. Pedroni (eds.). *Tropical forest and adaptation to climate change: In search of synergies* (pp. 154-183). Bogor, Indonesia: CIFOR.
- Bradley, R. S.** (1999). *Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary*. International geophysics series volume 68. San Diego: Elsevier Academic Press. 610 p.
- Buytaert, W., Cuesta, F., & Tobón, C.** (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 19-33.
- Chakraborty, A., Joshi, P. K., Ghosh, A., & Arendran, G.** (2013). Assessing biome

- boundary shifts under climate change scenarios in India. *Ecological Indicators*, 34, 536-547.
- Herzong, S. K. et al.** (2010). Efectos del cambio climático en la biodiversidad en los andes tropicales: el estado del conocimiento científico. Resumen para tomadores de decisiones y responsables de la formulación de políticas públicas. Sao José dos Campos, Brasil: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático Global (IAI).
- Holdridge, L. R.** (1967). Life zone ecology. San José, Costa Rica: Tropical Science Center. 206 p.
- Hooghiemstra, H.** (1984). Vegetational and climatic history of the High Plain of Bogotá, Colombia: A continuous record of the last 3.5 million years. En: T. Van der Hammen (ed.). El cuaternario de Colombia, 10, CRAMER, 368 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** (2002). Cambio climático y biodiversidad. Documento técnico V del IPCC. s.n.t. 85.
- Intergovernmental panel on Climate Change (IPCC).** (2007). General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 p.
- Lugo, A. E., Brown, S. L., Dodson, R., Smith, T. S., & Shugart, H. H.** (1999). The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. *Journal of Biogeography*, 26, 1025-1038.
- Mendoza, F., Chévez, M., & González, B.** (2001). Sensibilidad de las zonas de vida de Holdridge en Nicaragua en función del cambio climático. *Revista Forestal Centroamericana*, 33, 17-22.
- Ni, J.** (2010). Impacts of climate change on Chinese ecosystems: key vulnerable regions and potential thresholds. *Regional Environmental Change*, 11(S1), 49-64.
- Pabón J. D.** (2011). Los incendios de la cobertura vegetal en Colombia y su relación con la variabilidad climática y con el cambio climático. En: Incendios de cobertura vegetal en Colombia. Tomo I. Cali, 232. 145-165.
- Parmesan C., & Yohe, G.** (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421, 37-42.
- Reid, H., & Huq, S.** (2005). Climate change: Biodiversity and livelihood impacts. In: C. Robledo, M. Kanninen & L. Pedroni (eds.). Tropical forest and adaptation to climate change: In search of synergies (pp. 57-70). Bogor, Indonesia: CIFOR.
- Sistema de Información Nacional Ambiental (SINA).** (2007). Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Bogotá, D. C. 276 p. + 37 hojas cartográficas.
- van der Hammen T., Pabón, J. D., Gutiérrez, H., & Alarcón J. C.** (2002). El cambio global y los ecosistemas de alta montaña. En: Páramos y Ecosistemas Altoandinos de Colombia en Condiciones HotSpot & Global Climatic Tensor (pp. 163-209).
- Yanling, S., & Deti, X.** (June 2008). A new method of vegetation-climate classification in China. *International Journal of Climatology*, 1173, 1163-1173.
- Yates, D. N., Kittel, T. G. F., & Cannon, R. F.** (2000). Comparing the correlative Holdridge model to mechanistic biogeographical models for assessing vegetation distribution response to Climatic Change. *Climatic Change*, 59-87.