



Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS BOSQUES DE LOS ANDES DEL NORTE Y CENTRO

VIRGINIA ALBERDI NIEVES
ÁNGEL M. FELICÍSIMO PÉREZ
Centro Universitario de Mérida

Universidad de Extremadura. Avenida de Santa Teresa de Jornet, 38.E06800 Mérida España
virginiaan@unex.es; amfeli@unex.es

RESUMEN

La Cordillera de los Andes es una de las regiones de mayor biodiversidad del mundo. En las próximas décadas, sus ecosistemas pueden verse afectados por el cambio climático global de forma más o menos intensa. El objetivo de este trabajo es realizar estimaciones de esos cambios en los principales sistemas forestales de la región. Para ello se analiza la distribución actual de los bosques y se utilizan métodos de modelado predictivo para la delimitación de las áreas de distribución potenciales actuales y futuras. Se consideran tres escenarios diferentes bajo el modelo global CCCma. Los resultados muestran los cambios previstos en el área de distribución de forma tabular y cartográfica. Los bosques se ven afectados negativamente de forma general aunque hay algunas excepciones bajo algunos escenarios como es el caso del bosque de piedemonte del SO de la Amazonía que aumenta de una forma significativa y el bosque siempre verde subandino del Oeste de la Amazonía se reduce significativamente. Se discute la interpretación de los resultados y las incertidumbres que afectan a este tipo de modelos.

Palabras clave: cambio climático, bosques, modelos predictivos, Andes, MaxEnt

ASSESSING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE FORESTS OF NORTHERN AND CENTRAL ANDES

ABSTRACT

The Andes is one of the most biodiverse regions in the world. In the coming decades, ecosystems may be affected by global climate change more or less intensively. The objective of this paper is to estimate the potential changes in major forest systems in the region. The current spatial distribution of forests is analyzed and predictive modeling methods used for identifying areas of current and future potential distribution. Three different scenarios under global model CCCma are considered. The results show the expected changes as tables and maps. Forests are

generally adversely affected although there are some exceptions under some scenarios. The interpretation of results and uncertainties affecting such models are discussed.

Keywords: climate change, forest, predictive modelling, Andes, MaxEnt

1 Introducción

El concepto de cambio climático global (CCG) se refiere a la modificación general del clima de la Tierra respecto a la historia reciente. Es cierto que el clima ha sido siempre variable según lo atestiguan numerosos registros pero la característica diferencial del CCG no es el cambio en sí mismo, sino la velocidad a la que se produce. En otras épocas, los ecosistemas disponían de miles de años para adaptarse a las variaciones climáticas naturales pero actualmente los cambios parecen producirse en plazos mucho más cortos con lo que la adaptación natural puede ser imposible.

Los Andes constituyen una de las regiones de mayor diversidad ambiental del mundo (Myers et al. 2000) y donde aparecen los rangos más extremos de tipos de paisajes, climas y comunidades vegetales de la Tierra (Mujica Barreda y Holle 1998). Este territorio alberga más de 40 millones de personas en núcleos urbanos y poblados rurales que dependen, en gran medida, de los recursos naturales (Unidas 2013). Los estudios realizados señalan a los Andes como una de las zonas más afectadas por el cambio climático en los próximos 100 años (Beaumont et al. 2011; Gonzalez et al. 2010; Malcolm et al. 2006). Estos trabajos se han realizado con proyecciones climáticas de baja resolución (50 km) que no pueden captar la heterogeneidad de la zona. Existe algún trabajo con mejores resoluciones (Zelazowski et al. 2011), con 5 km y aplicado a las Yungas Peruanas, pero apenas muy recientemente se ha abarcado el área total de los Andes Tropicales (Tovar et al. 2013). Dentro de los estudios locales, los resultados señalan cambios muy heterogéneos en escenarios muy diversos (Buytaert et al. 2011). En (Herzog et al. (2012) se prevé un incremento general de temperaturas de al menos 2°C mientras que (Buytaert y De Bièvre (2012) señalan tanto reducción de precipitaciones en algunos lugares (10% en el altiplano boliviano) como incremento en otras zonas (entre 5-60% en Ecuador y Perú).

En cualquier caso, hay evidencias de que el cambio climático afecta ya la diversidad biológica (Gonzalez et al. (2010) por lo que continuar y afinar los estudios de los potenciales efectos del mismo se hace cada vez más necesario.

La comprensión de las relaciones funcionales entre el cambio climático y los ecosistemas es aún pobre debido a la complejidad de los procesos implicados y a que los datos disponibles son limitados, tanto en cantidad como en resolución espacial y temporal. Mucha de la información necesaria es desconocida y muy escasa, como los factores que determinan la vulnerabilidad, las densidades poblacionales, requerimientos ecológicos y fisiológicos, etc. (Herzog et al. (2012). Aun así, se ha realizado ya un abundante trabajo sobre el impacto potencial del cambio climático sobre las especies (Parmesan 2006; Root et al. 2005), los efectos sobre la probabilidad de extinción (Menges 2000; Thuiller et al. 2008) o la vulnerabilidad en área montañosas (García-Romero et al. 2010).

Estos trabajos están basados en técnicas de modelado predictivo (Guisan y Zimmermann 2000) con las que se establecen relaciones estadísticas (no causales), entre la presencia y ausencia de las especies y conjuntos de variables climáticas. Si estas relaciones son estadísticamente significativas, cambia el escenario para hacer una predicción de la presencia/ausencia en condiciones ambientales diferentes. La bibliografía sobre modelado predictivo es ya muy abundante y sus ventajas y problemas son bien conocidos (Anderson et al.

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, n°17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

2003; Engler et al. 2009) lo que permite interpretar los resultados críticamente y valorando adecuadamente las incertidumbres que suponen (Mateo et al. 2011b; Pliscoff and Fuentes-Castillo 2011). Entre las técnicas estadísticas más usadas se ha incorporado recientemente los llamados algoritmos de máxima entropía entre los cuales MaxEnt se ha generalizado por su fácil uso y buenos resultados (Phillips et al. 2006; Phillips and Dudík 2008) y ha sido el utilizado en este trabajo.

En este contexto, el objetivo general de este trabajo es estimar la influencia potencial del cambio climático en la distribución espacial de las formaciones forestales de una parte de la Cordillera Andina. Este objetivo se consiguió analizando la distribución actual de las principales formaciones arbóreas, estableciendo relaciones entre esa distribución y variables climáticas y proyectando los modelos estadísticos resultantes a escenarios climáticos diferentes; en concreto los escenarios de emisión A1B, A2A y B2A dentro del modelo CCma para el periodo 2040-2069 (Gitay et al. 2002; Nakicenovic y Alcamo 2000). Los resultados esperados son mapas de la distribución potencial actual y futura, lo que permitirá establecer la magnitud del cambio en la distribución espacial y las zonas donde este cambio se producirá con más o menos intensidad.

2 Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende parte de la Cordillera de los Andes, el principal sistema montañoso de América del Sur. La zona analizada, los Andes septentrionales y centrales, está entre los 11°N y 23°S de latitud, hasta el límite con Argentina y Chile (



Figura 1). Esta enorme masa montañosa discurre en dirección N-S cubriendo una extensión de 1.5 Mkm² aproximadamente. Se trata de un relieve de gran variación altitudinal (la altura máxima de la zona de estudio es el Huascarán, en Perú, con 6768 m) que, unida a las variaciones climáticas y el gradiente latitudinal, ha generado una gran diversidad de ecosistemas.



Figura 1. El área (en verde) muestra los bosques de los Andes del Norte y Centro.

3 Materiales

La información necesaria para realizar este trabajo es, en el apartado de datos, la cartografía de las variables climáticas actuales y futuras y los mapas de distribución actual de los bosques en esta zona de los Andes.

3.1 Datos de bosques

Los datos de la distribución y características de los sistemas forestales provienen de la memoria y mapa de ecosistemas de los Andes del Norte y Centro elaborado unificando numerosas fuentes cartográficas previas (Josse et al. 2009a; Josse et al. 2009b) y que provee una leyenda unificada para los países mencionados: Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Se ha trabajado con un total de 62 formaciones forestales de las cuales se presentan aquí los resultados de las 12 más representativas por criterios de superficie en su distribución actual (Tabla 1).

Tabla 1. Bosques andinos incluidos en el trabajo (código usado en Josse et al. (2009a, 2009b); % es el porcentaje de superficie de cada formación respecto al total forestal.

Código	Tipología de la formación	km ²	%
408.570	Bosque del piedemonte del suroeste de la Amazonía	17731	2.9
408.565	Bosque siempreverde subandino del oeste de la Amazonía	77131	12.7
408.543	Bosque siempreverde subandino Suroeste de la Amazonía	77282	12.8
409.043	Bosque altimontano pluvial de Yungas	8622	1.4
409.105	Bosques altimontanos Norte-Andinos siempre verdes	12845	2.1
409.921	Bosque montano pluviestacional subhúmedo de Yungas	13905	2.3
409.050	Bosque montano pluvial de Yungas	22378	3.7
409.051	Bosque montano pluviestacional húmedo de Yungas	14548	2.4
409.110	Bosque montano pluvial de los Andes del Norte	43492	7.2
409.054	Bosque basimontano pluviestacional húmedo de Yungas	10827	1.8
409.048	Bosque y palmar basimontano pluvial de Yungas	46281	7.6
409.112	Bosque montano bajo pluvial de los Andes del Norte	40216	6.6

3.2 Datos climáticos

Los datos sobre clima presente y futuro provienen del portal WorldClim (Hijmans et al. 2012) un servidor de datos de clima global con una resolución espacial de 1 km² (Hijmans et al. 2005). El modelo utilizado fue el CCCma (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada 2010) y se contemplaron tres escenarios de emisión: A1B, A2A y B2A (Nakicenovic y Alcamo 2000).

Los datos disponibles en WorldClim están organizados en dos grupos. El primero incluye las variables clásicas (precipitaciones y temperatura media de las máximas y de las mínimas a nivel mensual) y el segundo incluye un total de 18 variables formadas por combinación de las anteriores y llamadas variables bioclimáticas. Estas variables fueron elegidas teniendo en cuenta su carácter de factor influyente o limitante en los procesos biológicos (Hijmans et al. (2012) y son las que hemos usado en este trabajo. Su descripción es: bio1 = temperatura media anual, bio2 = rango diurno medio (media de los valores mensuales de temperatura máxima-temperatura mínima), bio3 = isothermalidad ($100 \times \text{bio2}/\text{bio7}$), bio4 = estacionalidad de la temperatura (desviación estándar $\times 100$), bio5 = temperatura máxima del mes más cálido, bio6 = temperatura mínima del mes más frío, bio7 = rango anual de temperatura (bio5-bio6), bio8 = temperatura media del trimestre más húmedo, bio9 = temperatura media del trimestre más seco, bio10 = temperatura media del trimestre más cálido, bio11 = temperatura media del trimestre más frío, bio12 = precipitación anual, bio13 = precipitación del mes más húmedo, bio14 = precipitación del mes más seco, bio15 = estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación), bio16 = precipitación del trimestre más húmedo, bio17 = precipitación del trimestre más seco, bio18 = precipitación del trimestre más cálido, bio19 = precipitación del trimestre más frío.

4 Métodos

4.1 Los modelos de distribución potencial (MDP)

En el contexto de este trabajo, los MDP son modelos cartográficos donde se representa la distribución espacial que una especie o formación vegetal podría tener en un territorio determinado en función de las características climáticas del mismo. Los MDP son indicadores

de la idoneidad del hábitat para el desarrollo de poblaciones de una especie concreta o de una comunidad (Ferrier y Guisan 2006) estimada a partir de observaciones de presencias en el terreno y de sus relaciones con una serie de variables ambientales que actúan como predictores (Elith 2002). Los valores de idoneidad suelen estar en el rango 0-1 donde 0 implica que la zona tiene características incompatibles en este caso con la planta y 1 que las condiciones climáticas son idóneas. En cualquier modelo se verá que existen valores intermedios en función de las condiciones en cada lugar.

El área de distribución actual de una especie o formación suele ser sólo una fracción del área potencial. La reducción de área puede deberse a un conjunto complejo de causas, entre las cuales la deforestación, y en general la intervención humana, suele ser un factor muy relevante.

El área de distribución potencial es aquella donde existen condiciones ambientales adecuadas para que esa especie o formación vegetal prospere. Su extensión puede deberse tanto a factores abióticos (topografía, geología, clima) como bióticos (competencia interespecífica, barreras, capacidad de dispersión...). Muchos de estos factores son desconocidos o difíciles de integrar en los modelos por lo que éstos suelen elaborarse sólo con variables más conocidas, derivadas del clima y de la topografía.

4.2 Construcción de los MDP

El procedimiento genérico para construir un MDP de una especie o una formación se organiza en los siguientes pasos:

- 1) Se localizan geográficamente los registros de presencia de la especie y, si es posible, se establecen igualmente puntos de ausencia. La presencia/ausencia se constituye como variable dependiente (dicotómica). En el caso de los bosques, se realiza un muestreo aleatorio sobre el tipo de bosque y las ausencias se extraen sobre otros bosques diferentes. En este trabajo el tamaño muestral de todos los bosques ha sido, como mínimo de 10000 puntos tanto para presencias como para ausencias.
- 2) Se define un conjunto de variables descriptivas que se utilizarán como predictores para intentar definir en cada especie un nicho ambiental a partir de los datos de presencias y ausencias disponibles y de su localización.
- 3) Se extrae para cada punto de presencia o ausencia los valores de las variables independientes que le corresponden en esa localización geográfica. El conjunto de registros presencia/ausencia, coordenadas geográficas, valores de variables descriptivas se denomina muestra de entrenamiento.
- 4) Se establece una relación estadística entre las variables descriptivas y la dependiente (presencia/ausencia). Este proceso consiste esencialmente en generar un algoritmo que relacione cada combinación de variables independientes con la frecuencia de presencia o ausencia de la especie analizada. A esta relación la denominaremos modelo estadístico y es una función que genéricamente se expresa como $P(i) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ donde $P(i)$ es valor de probabilidad de presencia de la especie i y $x_1 \dots x_n$ representan las variables descriptivas. La función se interpreta como que la probabilidad de que una especie esté presente en un lugar depende de los valores de las variables descriptivas; por ejemplo, la presencia de una especie concreta puede reducirse según aumenten los valores de temperaturas estivales y disminuyan los de precipitaciones en primavera.
- 5) Se valora la bondad del modelo estadístico, es decir, hasta qué punto dicho modelo ha conseguido describir correctamente la relación entre los datos de presencia y ausencia

que se le han suministrado y las variables ambientales. En algunos casos, la distribución actual no podrá ser explicada por las variables usadas y el modelo no podrá ser usado. Para medir la bondad del modelo estadístico es conveniente disponer de una muestra de contraste independiente sobre la cual aplicarlo. La bondad del ajuste se suele estimar mediante el estadístico AUC (Fielding y Bell 1997).

- 6) Se construye el mapa que representa el MDP a partir del modelo estadístico. Este procedimiento se realiza etiquetando cada punto del área de estudio con el valor $P(i)$ que le corresponda en función de los valores de las variables independientes en ese punto. El MDP de una especie es un mapa que representa lo adecuado o inadecuado del territorio para la presencia de la especie en una escala continua que suele ajustarse al rango 0-1 (0: incompatible, 1: idóneo). Que un punto del terreno tenga un valor próximo a 1 significa que las variables descriptivas en ese punto son muy similares a las que existen en las zonas de presencia actual de la especie por lo que, consecuentemente y en ausencia de otros factores, ese lugar puede considerarse compatible para su existencia.

4.3 Métodos estadísticos

El modelo estadístico puede construirse con una amplia variedad de métodos. Posiblemente el más utilizado inicialmente fue la regresión logística multivariable (RLM), aunque más recientemente los investigadores han comenzado a explorar otros métodos buscando especialmente superar las limitaciones inherentes a los métodos paramétricos. Los métodos más habituales en la bibliografía, aunque no los únicos, son los métodos de regresión (GLM, generalized linear models, y LMR, logistic multiple regresion), las redes neuronales (ANN, artificial neuronal networks, y SVP, support vector machines), los algoritmos genéticos (GARP, genetical algorithm for rule-set production), los árboles de clasificación y regresión (CART, classification and regresion trees), los modelos adaptativos (MARS, multivariate adaptive regresion splines) y los modelos de máxima entropía (MaxEnt, máximo entropy modeling). En este trabajo se ha utilizado MaxEnt porque posee cinco propiedades que merecen una buena valoración: genera resultados coherentes espacialmente, siempre muestra valores de ajuste situados entre los máximos del conjunto de métodos, se adapta bien a las muestras de tamaño reducido, puede ser automatizado para la producción de grandes cantidades de modelos y, finalmente, se trata de software gratuito. Respecto a los parámetros usados en la elaboración de los modelos, los más relevantes son los siguientes: se ha hecho un único modelo para cada combinación de especie y escenario ya que al disponer de tamaños muestrales muy grandes (siempre superiores a 10000 presencias y otras tantas ausencias), las potenciales variaciones en los resultados debidas a diferentes submuestreos no son relevantes. El formato de salida de los resultados ha sido el logístico, con un rango potencial de valores entre 0 y 1. El número de iteraciones se mantuvo en automático, lo que supone un máximo de 500. Finalmente, el umbral de corte para segmentar el mapa de idoneidad en dos clases fue el que minimizaba los errores de omisión y comisión en cada bosque (lo que supone valores diferentes y adaptados a cada caso).

Además de los mapas de idoneidad, los resultados de MaxEnt incluyen información sobre las dependencias entre las variables y las presencias, la importancia de cada variable, etc., lo que permite a los especialistas analizar las posibles relaciones funcionales que el modelo puede potencialmente revelar.

Los MDP para escenarios futuros se construyen igual que los anteriores pero sustituyendo las variables ambientales por los valores estimados en las proyecciones. Los mapas resultantes son, por tanto, comparables con los actuales, y pueden derivarse estadísticas de superficies potenciales y detectar zonas de permanencia o cambio en sus condiciones de idoneidad.

5 Resultados

Los valores de bondad del ajuste han sido en todos los casos excelentes ($AUC > 0.95$). Tras esta validación se han realizado los análisis de superficies potenciales y cambios previstos en las diferentes proyecciones al futuro. La **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** muestra las superficies de los bosques donde SRA es la superficie real, tal como aparece en el mapa de ecosistemas usado como fuente, y SPA es la superficie potencial en las condiciones climáticas actuales. Como es habitual, la superficie real es sólo una fracción de la potencial (ver mapa de ejemplo en la **Figura 2**), destacando por su relativa buena conservación (44-51%) los bosques siempre verdes subandinos del O y SO de la Amazonía y el bosque y palmar basimontano pluvial de Yungas. En el otro extremo, el bosque basimontano pluvial húmedo de Yungas ha quedado reducido a un 7% de su área potencial.

Tabla 2. Superficie real actual (SRA), superficie potencial actual (SPA) según los modelos de idoneidad y porcentaje de la SRA respecto a la SPA; unidades: km².

Formación (bosque...)	SRA	SPA	%
. del piedemonte del SO de la Amazonía	17731	82878	21
. siempreverde subandino del O de la Amazonía	77131	175153	44
. siempre verde subandino del SO de la Amazonia	77283	152310	51
. altimontano pluvial de Yungas	8622	35802	24
. altimontanos Norte-andinos siempre verdes	12845	87792	15
. montano pluvial húmedo de Yungas	14548	135884	11
. montano pluvial de Yungas	22378	105476	21
. montano pluvial húmedo de Yungas	14548	66657	22
. montano pluvial de los Andes del Norte	43492	154194	28
. basimontano pluvial húmedo de Yungas	10827	159183	7
. y palmar basimontano pluvial de Yungas	46281	105810	44
. montano bajo pluvial de los Andes del Norte	40217	209708	19

La **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** muestra los cambios previstos en la superficie potencial de cada bosque en cada uno de los escenarios respecto a la superficie potencial actual. Se observa que los resultados son muy diferentes en función del escenario. Los escenarios A1B y A2A son, en promedio, más desfavorables que el B2A. Contrasta especialmente la situación del bosque de piedemonte del SO de la Amazonía, que se reduce drásticamente en los dos primeros casos pero aumenta de forma significativa en el tercer escenario. El resto se comporta de forma algo más estable, con variaciones que suelen ser siempre de reducción del área potencial futura. Destacan por esto los bosques siempre verdes subandino del O y SO de la Amazonía, con reducciones del 41-44% en todos los escenarios.

Tabla 3. Superficie potencial futura para cada escenario (SPF) y porcentaje respecto a la superficie potencial actual reflejada en la Tabla 2 (SPA); unidades: km².

Formación (bosque...)	A1B		A2A		B2A	
	SPF	%	SPF	%	SPF	%

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, n°17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

. del piedemonte del SO de la Amazonía	16559	20	12874	16	104084	126
. siempre verde subandino del O de la Amazonía	71516	41	76941	44	77003	44
. siempre verde subandino del SO de la Amazonia	48848	32	24733	16	73405	48
. altimontano Pluvial de Yungas	34111	95	37345	104	31234	87
. altimontanos Norte-Andinos siempre verdes	67268	77	68138	78	74151	84
. montano pluviestacional subhúmedo de Yungas	148773	109	114801	84	133213	98
. montano pluvial de Yungas	69844	66	47275	45	81224	77
. montano pluviestacional húmedo de Yungas	53607	80	34973	52	53011	80
. montano pluvial de los Andes del Norte	103240	67	111549	72	123436	80
. basimontano pluviestacional húmedo de Yungas	98190	62	76258	48	146470	92
. y palmar basimontano pluvial de Yungas	36811	35	29587	28	62004	59
. montano bajo pluvial de los Andes del Norte	101752	49	110474	53	136326	65

De forma general, es destacable que todas las formaciones sufren una menor reducción de su área de distribución potencial en el escenario B2A con una media de conservación de área potencial del 78%, mientras que las cifras para el escenario A1B y A2A son del 61 y 53% respectivamente. Estos resultados apoyan que este escenario B2A, que describe un mundo en el que predomina la sostenibilidad económica, social y ambiental con una población que aumenta moderadamente y un desarrollo económico intermedio, es el más adecuado para la permanencia de la mayor parte de las formaciones forestales. En cambio, en los escenarios A1B y A2A, cinco y seis formaciones respectivamente caen por debajo del 50% de su distribución potencial actual.

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, n°17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

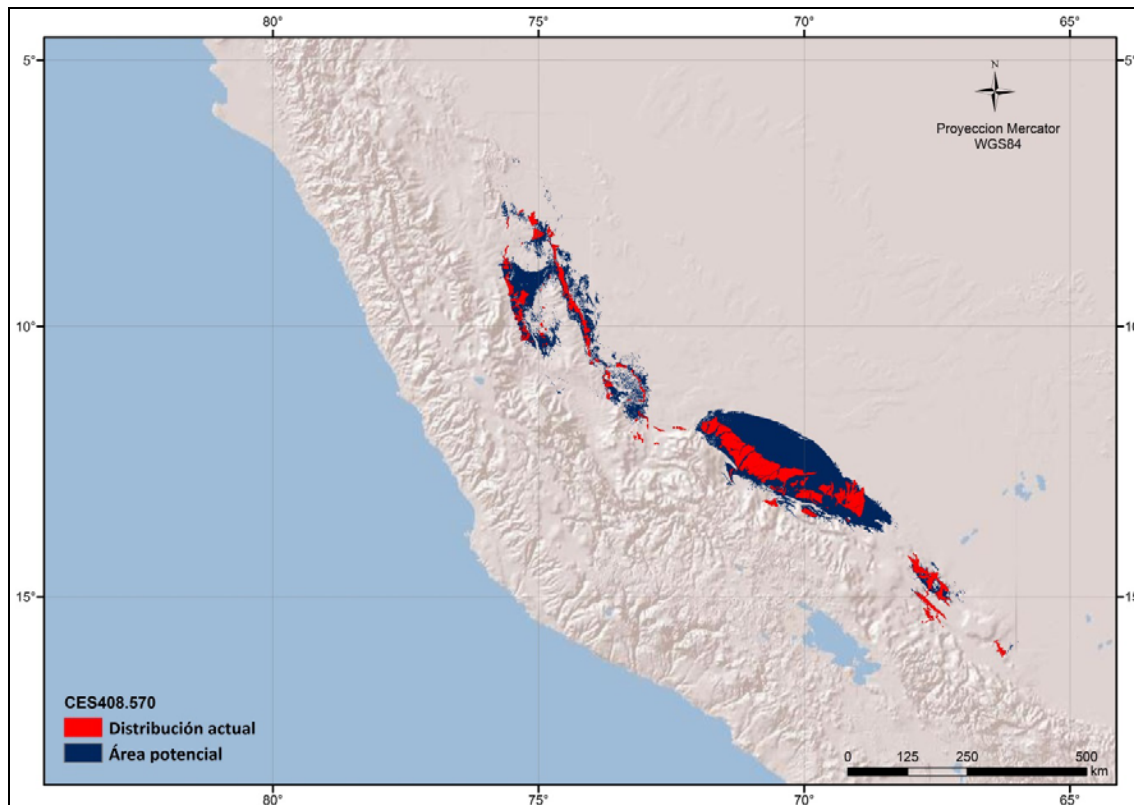


Figura 2. Bosque de piedemonte del SO de la Amazonía (408.570): área de distribución actual y áreas de distribución potencial actual.

En el

se muestra la contribución de las dos variables más influyentes en la construcción de los modelos estadísticos para cada formación forestal. Las variables que intervienen son diferentes pero hay algunas que lo hacen de forma más frecuente como bio8 (temperatura media del trimestre más húmedo, en 4 modelos), bio10 (temperatura media del trimestre más cálido, en 5), bio6 (temperatura mínima del mes más frío, en 3) y bio14 (precipitación del mes más seco, en 3). Otras, en cambio, no intervienen en ningún modelo como bio2 (rango diurno medio), bio3 (isotermalidad) y bio4 (estacionalidad de la temperatura). La interpretación de esta información puede ser de gran interés ya que da pistas sobre posibles factores limitantes específicos de cada tipo de bosque pero debe ser realizada por especialistas teniendo en cuenta también el resto de variables intervinientes.

Tabla 1. Variables con mayor contribución (%) a la construcción de cada modelo (se incluyen las dos más importantes).

Formación (bosque...)	Variable	%	Variable	%
. del piedemonte del Suroeste de la Amazonía	bio18	27.2	bio14	25.2
. siempre verde subandino del Oeste de la Amazonía	bio15	60.8	bio9	10.7
. siempre verde subandino del Suroeste de la Amazonia	bio6	21.0	bio7	19.1
. altimontano pluvial de Yungas	bio6	39.6	bio11	11.9

. altimontanos Norte-Andinos siempre verdes	bio5	24.6	bio8	21.9
. montano pluviestacional subhúmedo de Yungas	bio8	43.7	bio14	12.1
. montano pluvial de Yungas	bio1	31.2	bio8	18.1
. montano pluviestacional húmedo de Yungas	bio10	22.8	bio17	14.3
. montano pluvial de los Andes del Norte	bio8	34.0	bio10	21.4
. basimontano pluviestacional húmedo de Yungas	bio10	31.9	bio6	14.1
. y palmar basimontano pluvial de Yungas	bio10	32.1	bio14	14.9
. montano bajo pluvial de los Andes del Norte	bio5	32.4	bio10	20.4

La cartografía de las áreas potenciales idóneas puede arrojar algo más de luz sobre las variaciones previstas en la superficie de distribución en algunos de los casos mencionados. La **Figura 3** muestra la distribución del área real actual y de las áreas potenciales actuales y futuras para el bosque del piedemonte del suroeste de la Amazonía. Puede observarse que el crecimiento del 126% previsto para el escenario B2A en el **Error! No s'ha trobat l'origen de la referència.** (mapa inferior derecho), se debe a la aparición de un área nueva en el Sureste de la zona. La capacidad de expansión de este bosque sobre esa zona potencial es uno de los factores que quedan sin definir en estos modelos y que podrían servir de base para actuaciones de ingeniería ecológica (Rey Benayas et al. 2007). El problema de las áreas potenciales desconectadas del área de distribución actual es la dificultad de que las semillas puedan llegar desde el área actual hasta la nueva zona, potencialmente idónea. La gestión real de estas áreas debe tener en cuenta esta circunstancia, que puede anular la potencialidad real de zonas emergentes y que condiciona los procesos de expansión de las masas forestales que, a su vez, están regidos por una serie de elementos, mecanismos y procesos ecológicos como competencia, fragmentación, estabilidad, perturbación, forma de los fragmentos y conectividad (Green y Ostling 2003; Storch et al. 2012).

La

Figura 3. Bosque de piedemonte del SO de la Amazonía (408.570): área de distribución potencial.

muestra los mapas para el bosque siempre verde subandino del suroeste de la Amazonía como ejemplo donde las diferencias de las predicciones entre los tres escenarios son importantes. Finalmente, en las figuras 5 a 13 se muestran los mapas del resto de las formaciones forestales contempladas en este artículo.

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, n°17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

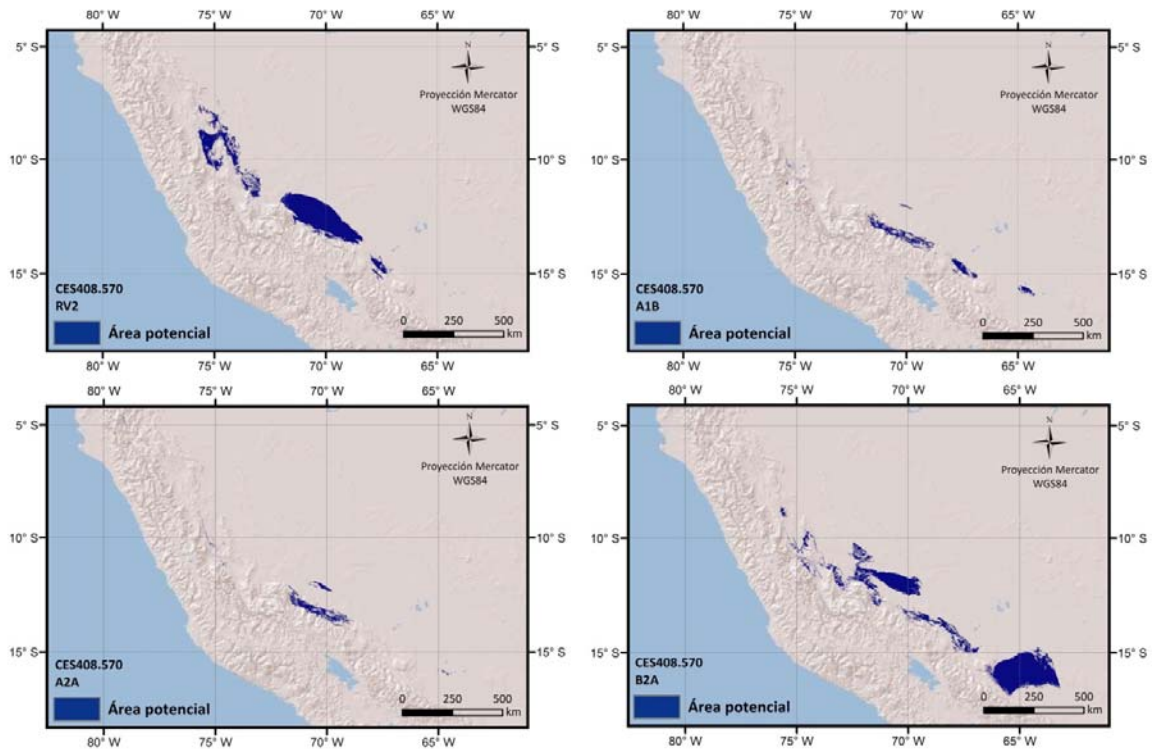


Figura 3. Bosque de piedemonte del SO de la Amazonía (408.570): área de distribución potencial.

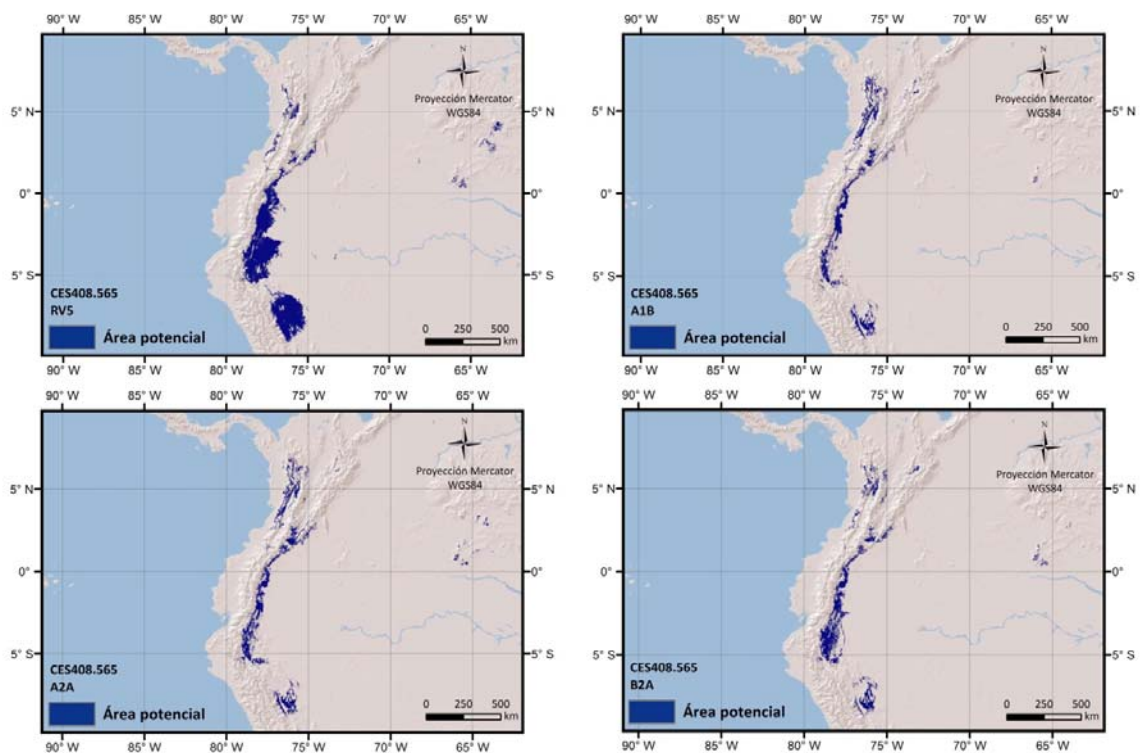


Figura 4. Bosque siempreverde subandino del suroeste de la Amazonía (408.565)

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

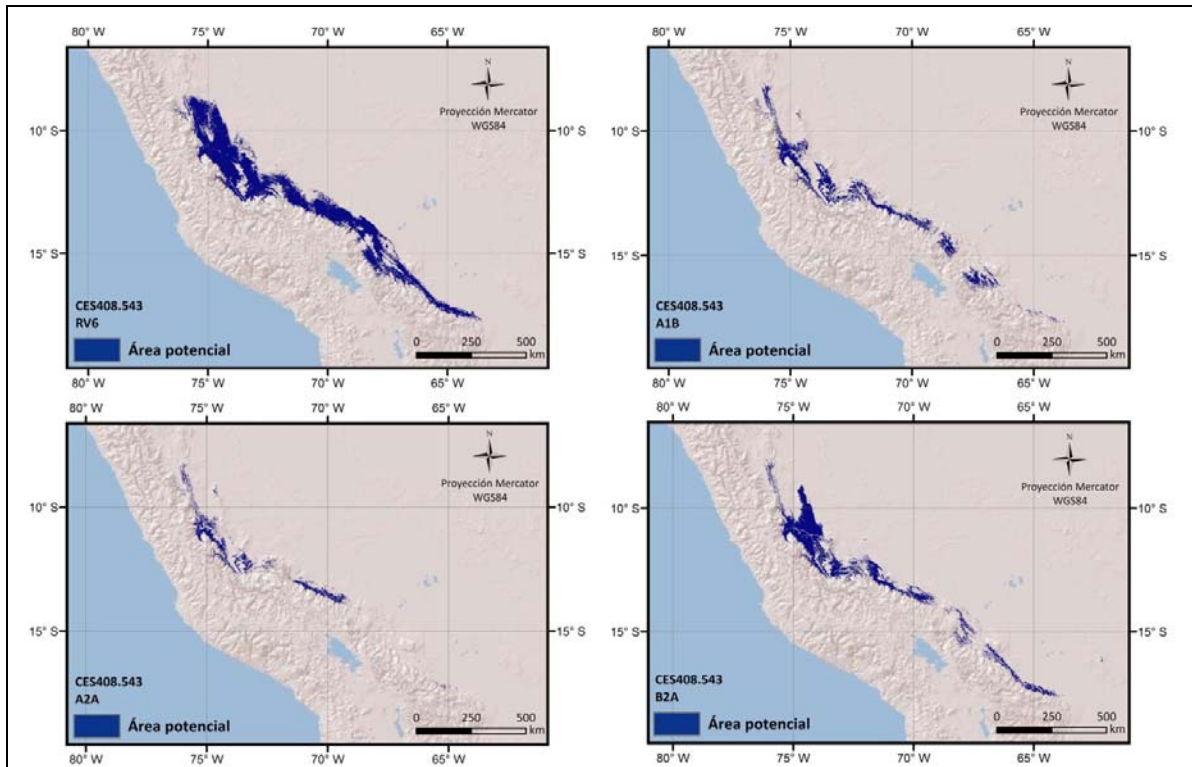


Figura 5. Bosque siempreverde subandino Suroeste de la Amazonía (408.543).

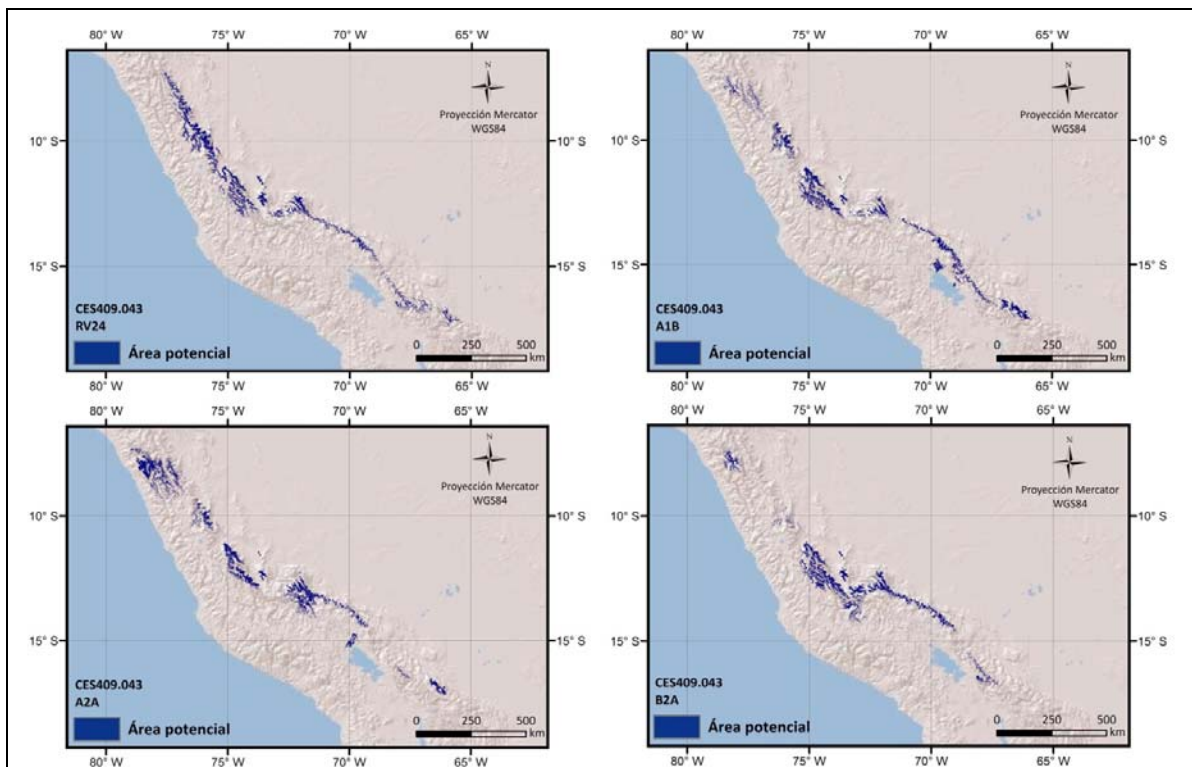


Figura 6. Bosque altimontano pluvial de Yungas (409.043).

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, n°17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

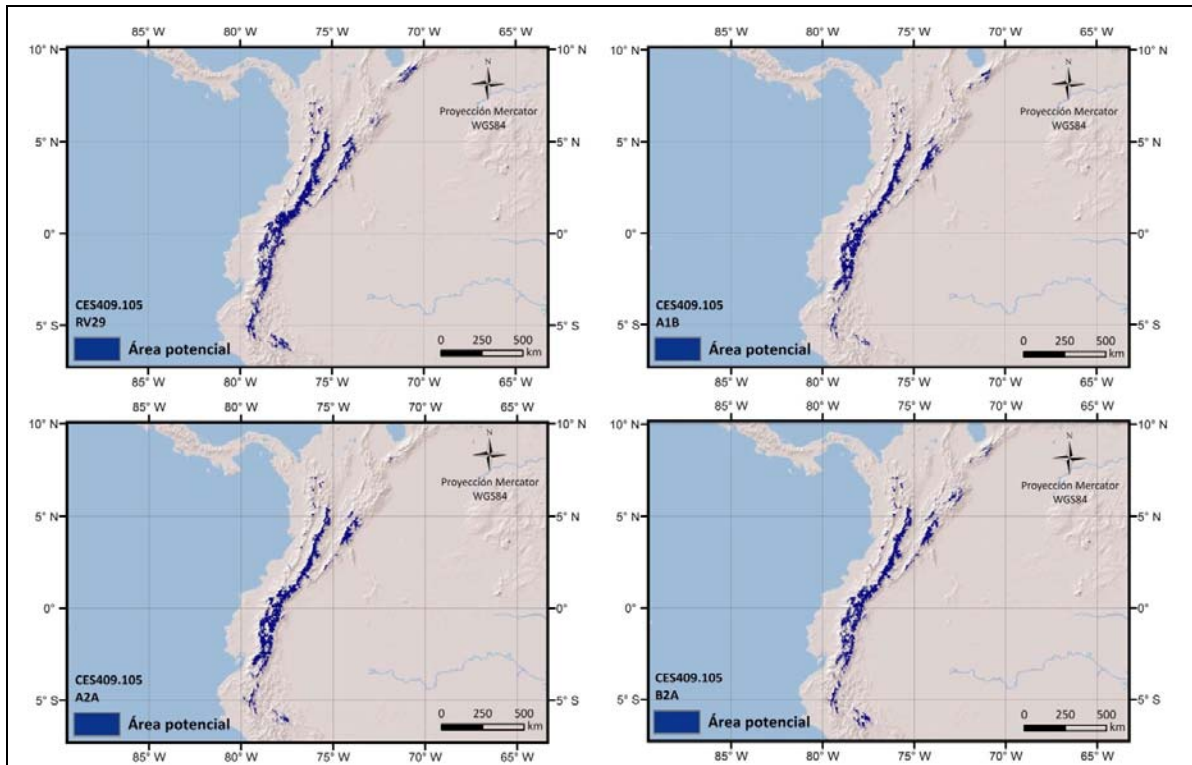


Figura 7. Bosques altimontanos Norte-Andinos siempre verdes (409.105).

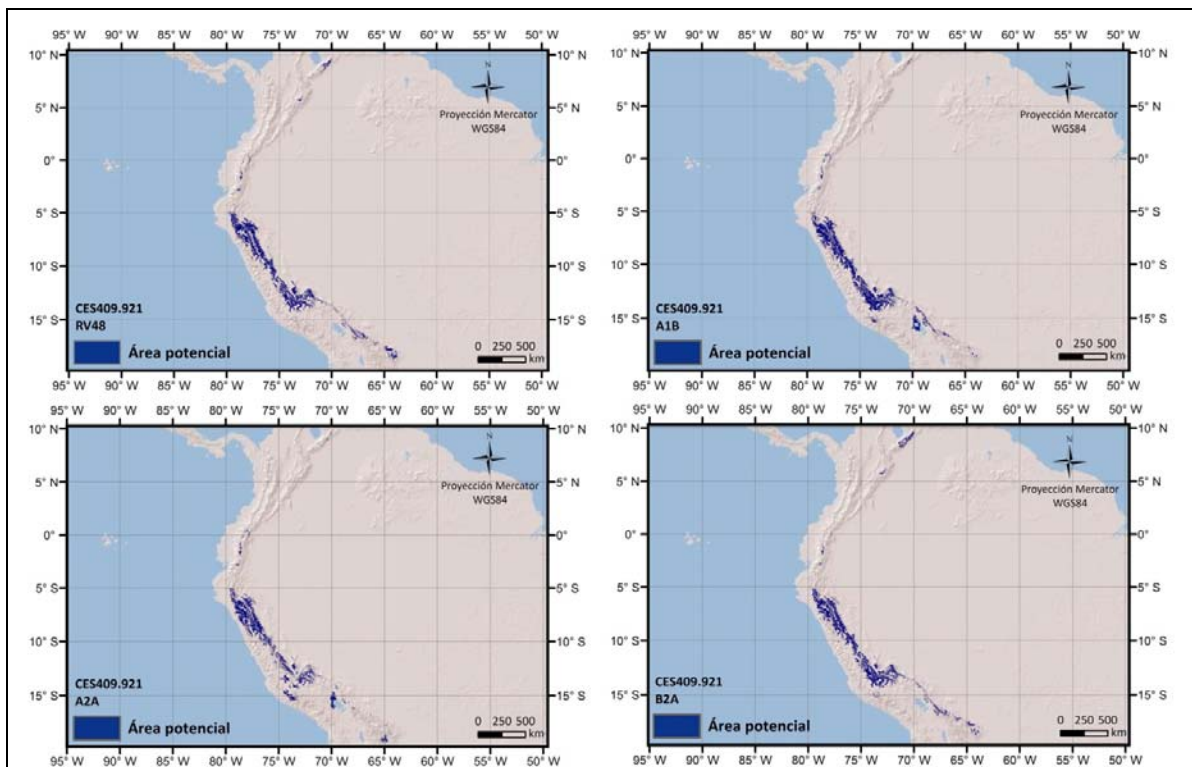


Figura 8. Bosque montano pluviestacional subhúmedo de Yungas (409.921).

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

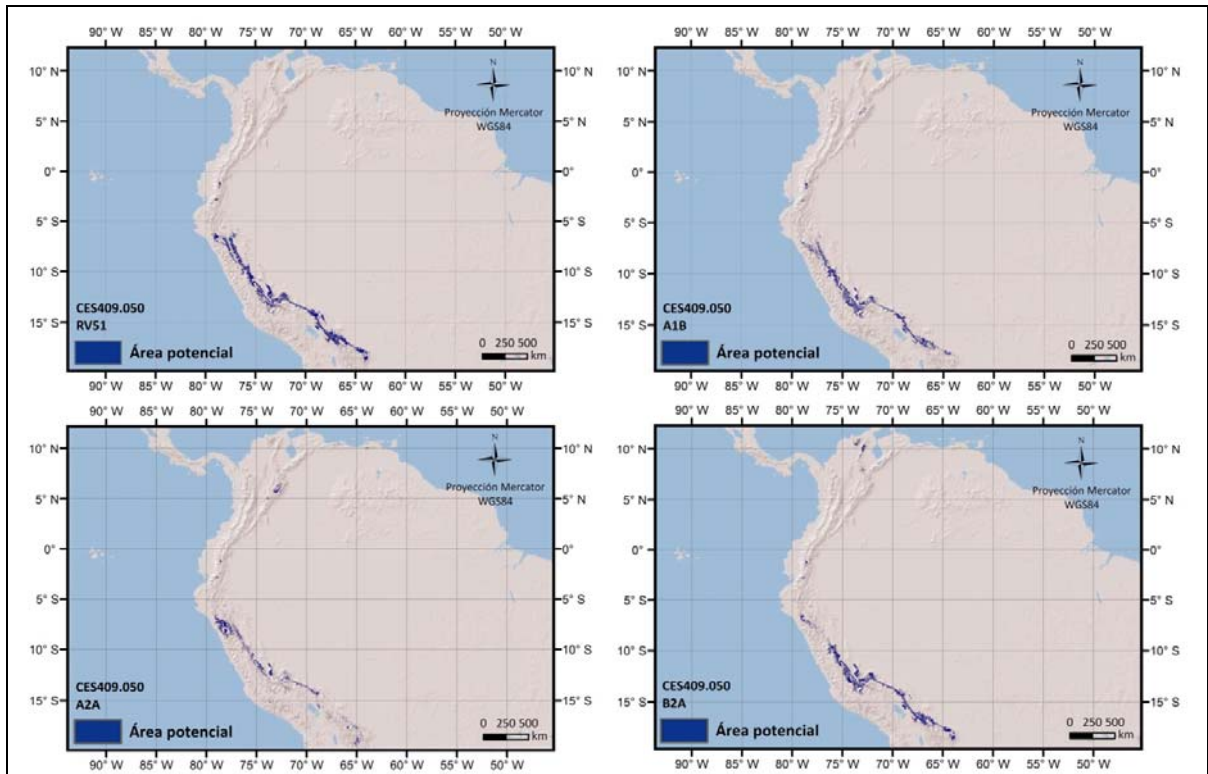


Figura 9. Bosque montano pluvial de Yungas (409.050).

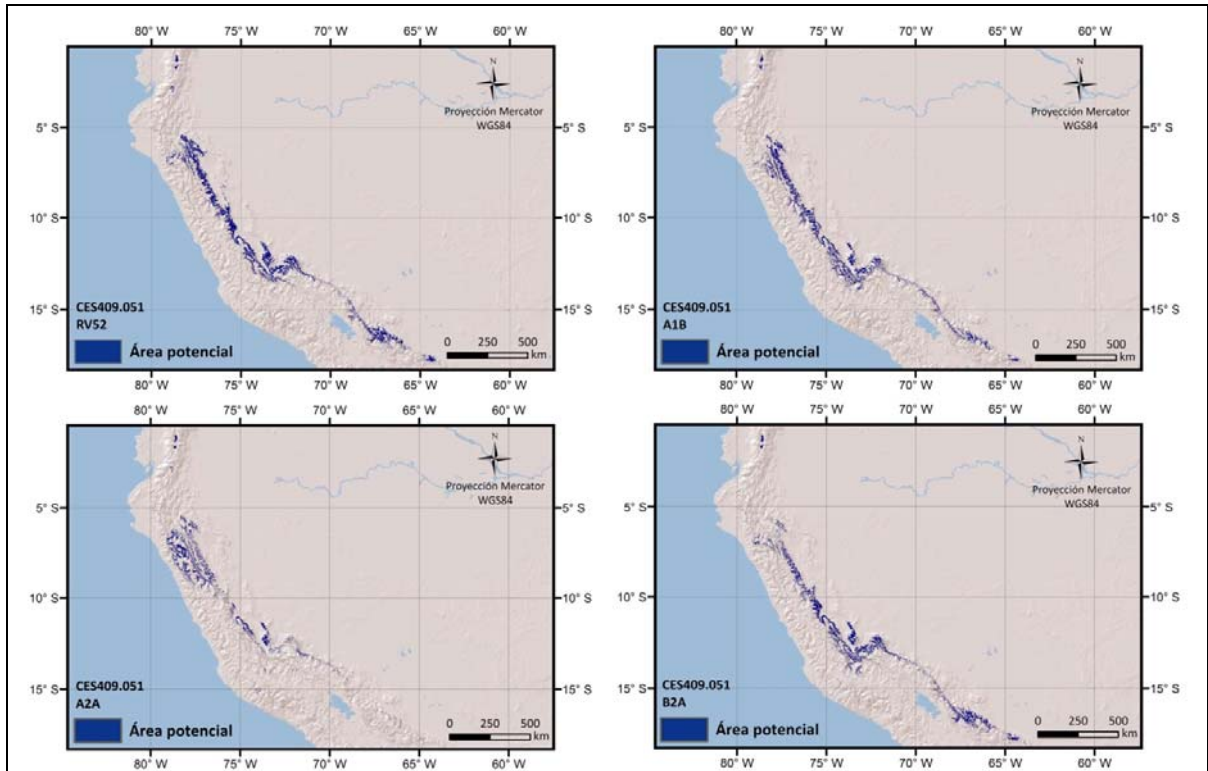


Figura 10. Bosque montano pluvial húmedo de Yungas (409.051).

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

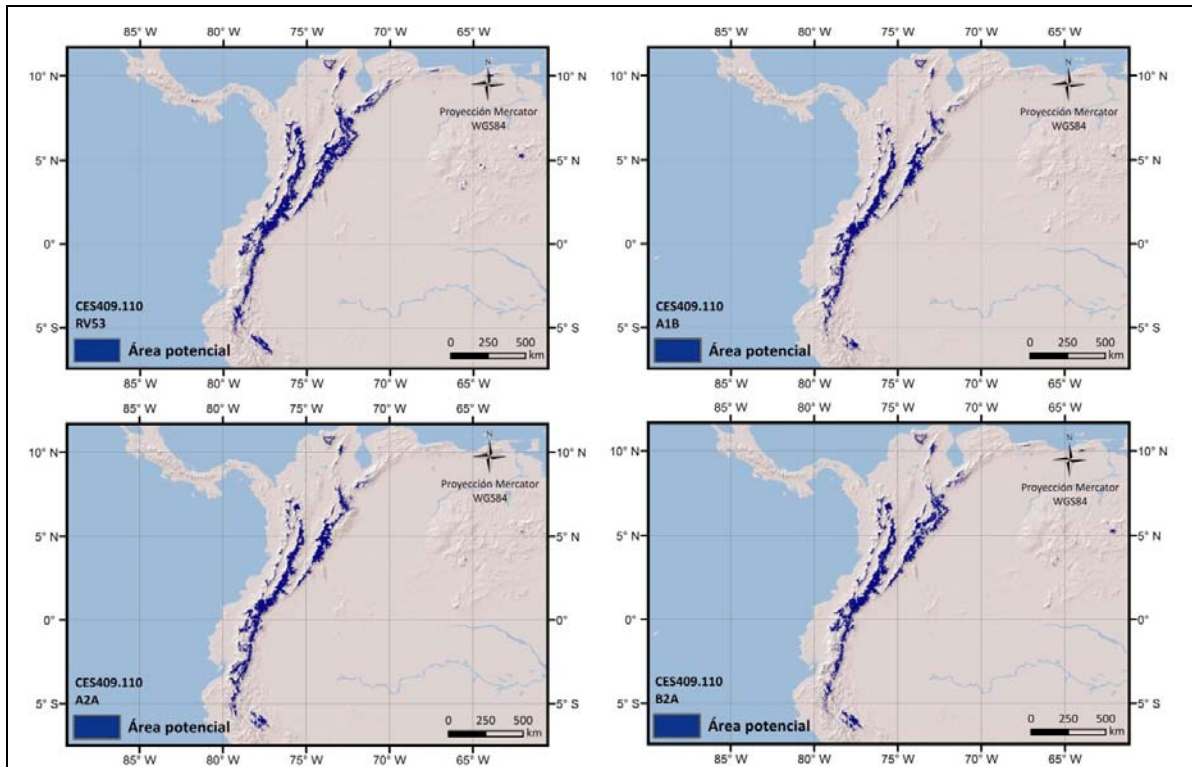


Figura 11. Bosque montano pluvial de los Andes del Norte (409.110).

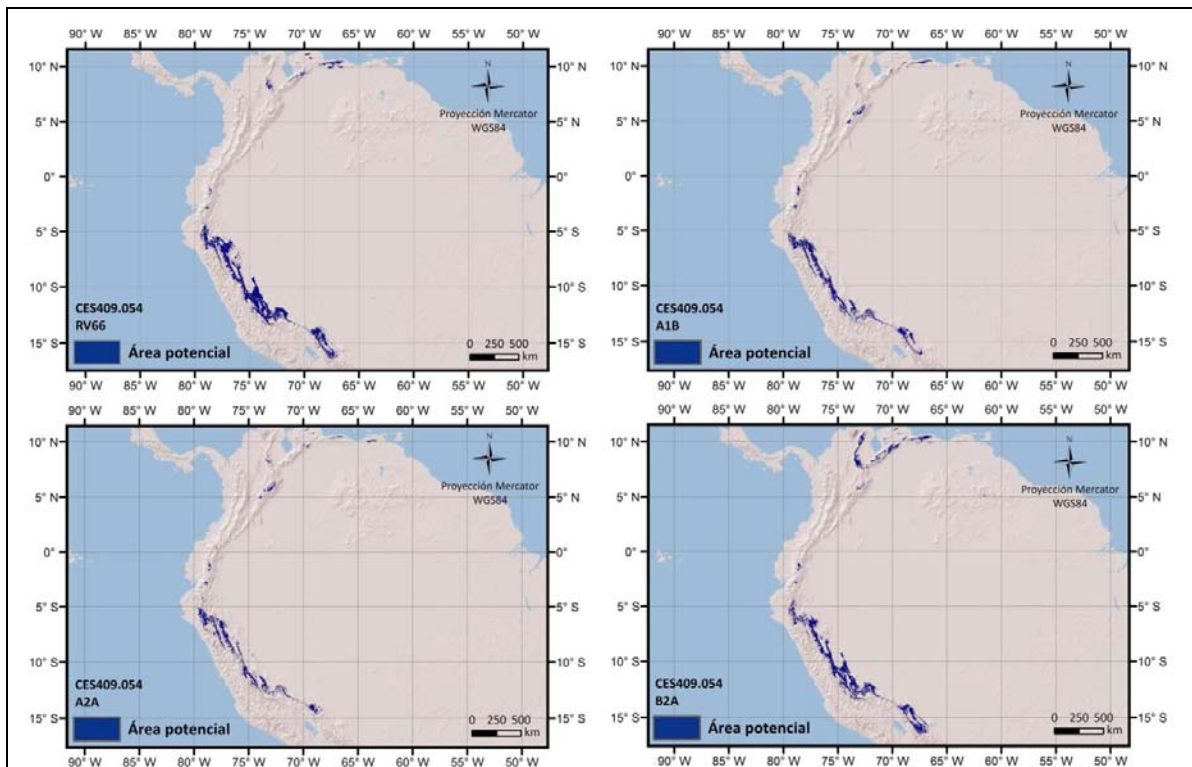


Figura 12. Bosque basimontano pluvial estacional húmedo de Yungas (409.054).

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, n°17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

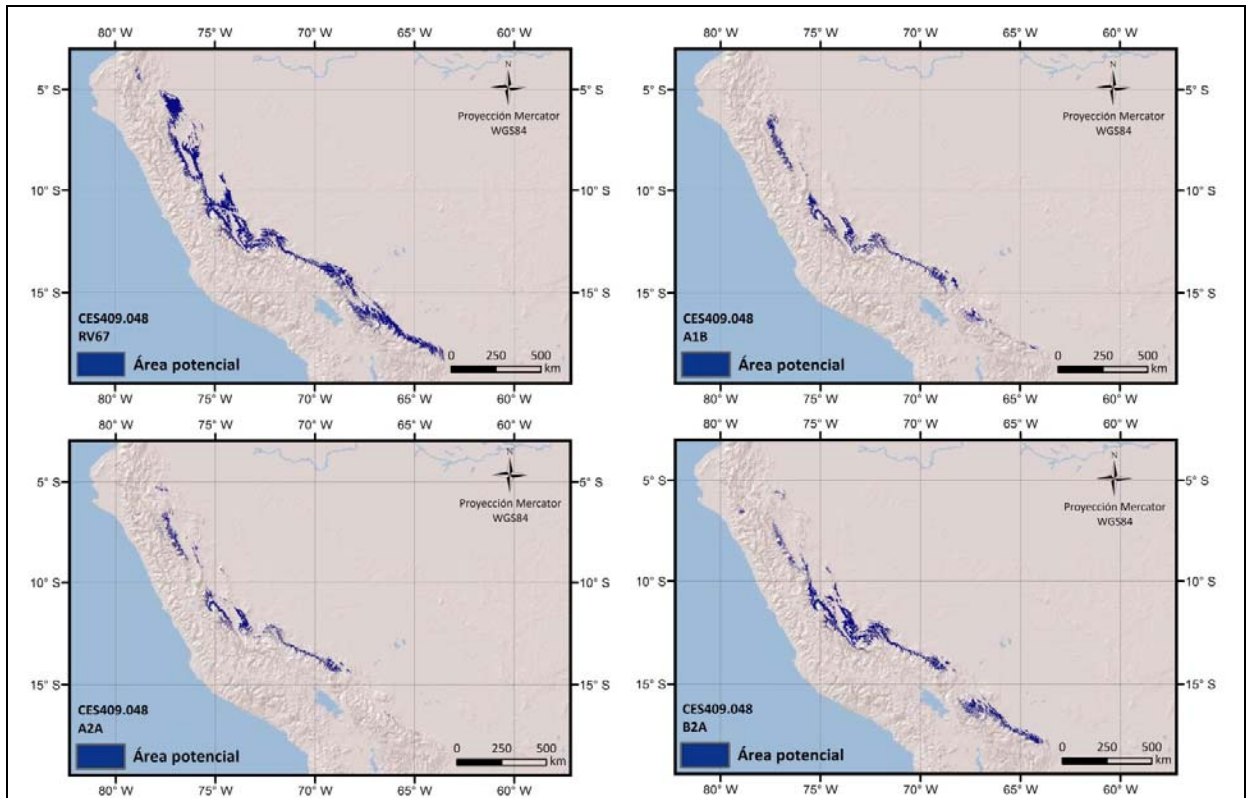


Figura 13. Bosque y palmar basimontano pluvial de Yungas (409.048).

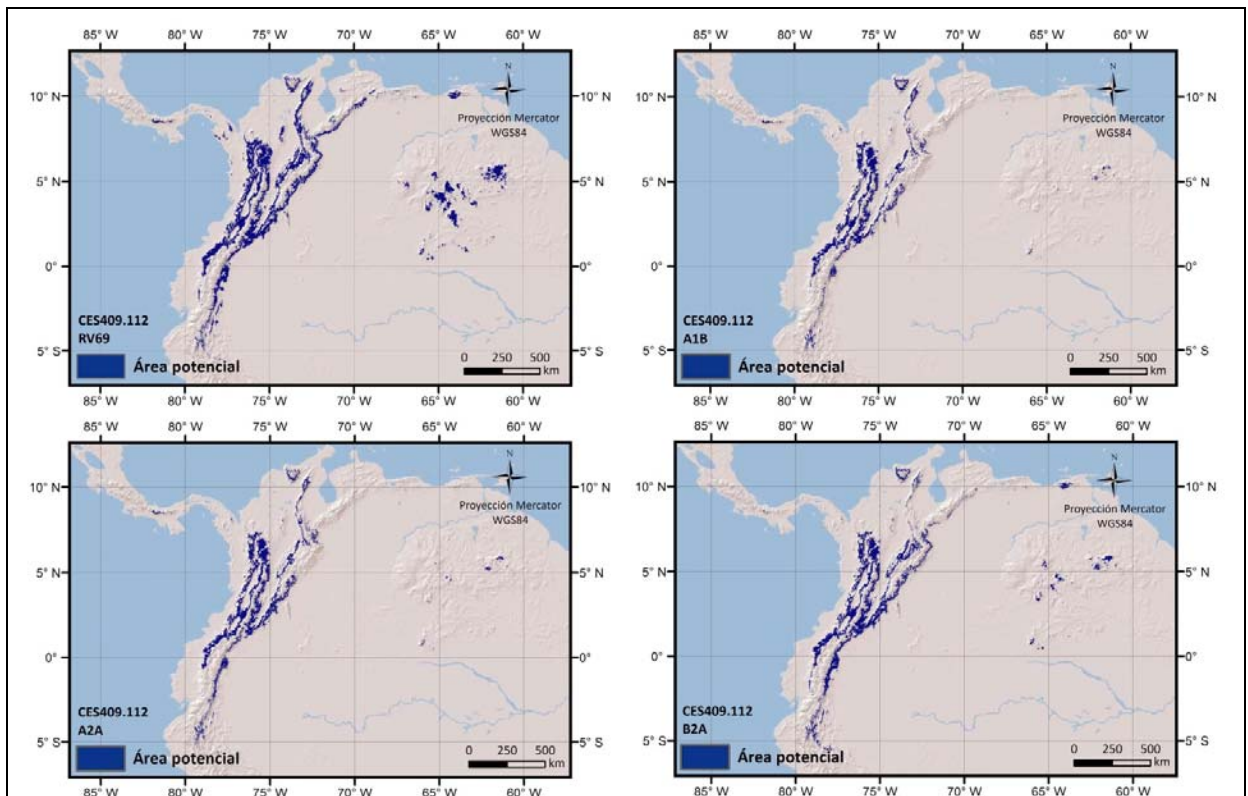


Figura 14. Bosque montano bajo pluvial de los Andes del Norte (409.112).

Con el fin de aumentar la posibilidad de predecir y prevenir los efectos del cambio climático sobre la biosfera a corto o largo plazo, será necesario continuar realizando estudios que permitan conocer cada vez más y mejor lo que está sucediendo en realidad.

6 Conclusiones

La mayoría de las proyecciones a escenarios futuros prevé una reducción del área potencial de los bosques más representativos de los Andes Meridionales. Sólo en tres casos de los 36 considerados (es decir, de 12 bosques en tres escenarios) se muestra un crecimiento ligero del área potencial. De los escenarios considerados, el más benigno es el B2A y el más duro el A2A. Estas previsiones deben tomarse solamente como una orientación o llamada de atención y en su interpretación se deben hacer varias consideraciones.

La primera es que se desconoce cuál va a ser el escenario real que va a producirse en las próximas décadas. El abanico es amplio y los modelos disponibles, predicen valores de cambio consistentes en sus tendencias generales pero con diferencias significativas. La posibilidad de escenarios más duros que los mostrados aquí no puede descartarse visto el escaso éxito en el cumplimiento de los acuerdos de Kioto en su primer y segundo periodos de vigencia.

Aun así, hay factores que pueden modificar profundamente la respuesta de la vegetación al cambio climático respecto a lo previsto en estos modelos.

Uno de estos factores es la plasticidad de las formaciones forestales ante el cambio. Es posible que algunas de las especies o bosques en su conjunto puedan responder con más flexibilidad que la estimada por los modelos ante cambios ambientales. Por ejemplo, una subida de temperaturas podría ser soportada si se produce simultáneamente a una subida de precipitaciones en la estación más cálida. Lamentablemente no tenemos información para valorar estas respuestas por lo que es más prudente ponerse en la situación que los modelos prevén. La vulnerabilidad de las especies ante el cambio climático ha sido discutida en ocasiones pero la escasez de datos es siempre un factor limitante en la eficacia de los modelos (Arribas et al. 2012).

También hay que considerar que este tipo de modelos no considera interacciones bióticas ni otros factores que pueden influir en un proceso espacio-temporal tan complejo como es la distribución de las especies (Mateo et al. 2011a; Plischoff y Fuentes-Castillo 2011). La naturaleza es compleja y los modelos son simplificaciones que nos permiten manejarla pero las incertidumbres son grandes.

Finalmente, hay que hacer énfasis en que el área potencial actual es normalmente mucho mayor que el área real, con lo que se abren posibilidades de recuperación de antiguas áreas de ocupación, hoy deforestadas, a pesar de los cambios en el clima. Todos estos factores deben tenerse en cuenta en la elaboración de planes de gestión del medio a medio y largo plazo, con el fin no solo de anticiparse a algunos cambios potenciales sino también de aprovechar oportunidades en zonas nuevas que podrían ser ocupadas o repobladas.

Agradecimientos

A Natureserve y especialmente a José A. Saito por habernos facilitado el Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro en formato digital, sin el cual este trabajo no podría haberse realizado.

7 Referencias bibliográficas

Anderson, R. P., Lew D. and Peterson A. T. (2003): "Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models" *Ecological Modelling*, 162 (3), 211-232.

Arribas, P., Abellán P., Velasco J., Bilton D.T., Lobo J. M., Millán A., Sánchez-Fernandez D. (2012). "La vulnerabilidad de las especies frente al cambio climático, un reto urgente para la conservación de la biodiversidad" *Ecosistemas*, 21(3), 79-84.

Beaumont, L. J., Pitman A., Perkins S., Zimmermann N., Yoccoz, N. G. (2011): "Impacts of climate change on the world's most exceptional ecoregions" *Proceedings of the National Academy of Sciences* (article first published online).

Buytaert, W., Cuesta-Camacho F. and Tobón C. (2011). "Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions" *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 19-33.

Buytaert, W. and De Bièvre B. (2012). "Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes" *Water Resources Research*, 48(8), published online, 13 p.

Canada, E. (2010). *Environment Canada - Climate Change - Climate Modelling and Analysis*. In. Victoria, Canada: Government of Canada, vol. 2013.

Elith, J.(2002). *Predicting the distribution of plants*. PhD Thesis. The University of Melbourne, Melbourne, Australia.

Engler, R., Randin C. F., Vittoz P., Czaka T., Beniston M., Zimmermann N. E., Guisan A. (2009). "Predicting future distributions of mountain plants under climate change: does dispersal capacity matter?" *Ecography*, 32(1), 34-45.

Ferrier, S. and Guisan A. (2006). "Spatial modelling of biodiversity at the community level" *Journal of Applied Ecology*, 43(3), 393-404.

Fielding, A. H. and Bell J. F. (1997). "A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models" *Environmental Conservation*, 24(1), 38-49.

García-Romero, A., Muñoz J., Andrés N. and Palacios D. (2010). "Relationship between climate change and vegetation distribution in the Mediterranean mountains: Manzanares Head valley, Sierra De Guadarrama (Central Spain)" *Climatic Change*, 100(3-4), 645-666.

Gitay, H., Suárez A., Watson R. and Dokken D.J. (2002). *Cambio climático y biodiversidad*. Ginebra, Suiza.

Gonzalez, P., Neilson R. P., Lenihan J. M. and Drapek R. J. (2010). "Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change" *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), 755-768.

Green, J. L. and Ostling A. (2003). "Endemics-area relationships: The influence of species dominance and spatial aggregation" *Ecology*, 2003, 84(11), 3090-3097.

Alberdi, V y Felicísimo A.M. (2016): "Evaluación del impacto del cambio climático en los bosques de los Andes del norte y centro", *GeoFocus (Artículos)*, nº17, p. 44-65. ISSN: 1578-5157

Guisan, A. and Zimmermann N. E. (2000). "Predictive habitat distribution models in ecology" *Ecological Modelling*, 135, 147-186.

Herzog, S. K., Martínez R. , Jorgensen P. M. and Tiessen H. (2012). *Cambio climático y biodiversidad en los Andes Tropicales*. Ed. Paris: Inter-American Institute for Global Change Research, Scientific Committee on Problems of the Environment. 426 p. ISBN 9788599875063.

Hijmans, R. J., Cameron S. and Parra J. (2012). WorldClim - Global Climate Data. In. Berkeley: University of California. Disponible en <http://www.worldclim.org/>

Hijmans, R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P. G., Jarvis A. (2005). "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas". *International Journal of Climatology*, 25 (15), 1965–1978.

Josse, C., Cuesta F., Navarro G., Barrena V., Cabrera E. (2009a). *Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. Memoria técnica*. Edtion ed. Lima, Perú: Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAvH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL, 100 p.

Josse, C., Cuesta F., Navarro G., Barrena V. (2009b). *Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela*. In. Lima, Perú: Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAvH, LTA-UNALM, ICAE-ULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL.

Malcolm, J. R., Liu C., Neilson R. P., Hansen L., Hannan L. (2006). "Global Warming and Extinctions of Endemic Species from Biodiversity Hotspots" *Conservation Biology*, 20(2), 538–548.

Mateo, R. G., Felicísimo A. M. and Muñoz J. (2011 a). "Modelos de distribución de especies y su potencialidad como recurso educativo" *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240.

Mateo, R. G., Felicísimo A. M. and Muñoz J. (2011 b). "Modelos de distribución de especies: una revisión sintética" *Revista Chilena de Historia Natural*, 84, 217-240.

Menges, E.S. "Population viability analyses in plants: challenges and opportunities" *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(2), 51-56.

Mujica Barreda, E. and Holle M. (1998). Los Andes y la transformación cultural del paisaje. In E. Mujica Barreda ed. *Paisajes culturales en los Andes*. Arequipa, Perú: UNESCO, p. 65-79.

Myers, N., Mittermeier R. A., Mittermeier C. G., Da Fonseca G. A. B., et al. (2000). "Biodiversity hotspots for conservation priorities" *Nature*, 403(6772), 853-858.

Nakicenovic, N. and Alcamo J. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios. A special report on Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edtion ed. Cambridge: Cambridge University Press. 599 p.

Parmesan, C. (2006). "Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change" *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 37(1), 637-669.

Phillips, S. J., Anderson R. P. and Schapire R. P. (2006). "Maximum entropy modeling of species geographic distributions" *Ecological Modelling*, 190(3/4), 231-259.

Phillips, S. J. and Dudík M. (2008). "Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation" *Ecography*, 31, 161-175.

Pliscoff, P. and Fuentes-Castillo T. (2011). "Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles" *Revista de Geografía Norte Grande*, (48), 61-79.

Rey Benayas, J. M., Newton A. C., Díaz A. and Bullock J. M. (2007). "Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis" *Science*, 325(5944), 1121-1124.

Root, T. L., Macmynowski D. P., Mastrandrea M. D. and Schneider S. H. (2005). "Human-modified temperatures induce species changes: Joint attribution" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(21), 7465-7469.

Storch, D., Keil P. and Jertz W. (2012). "Universal species-area and endemics-area relationships at continental scales" *Nature*, 488(7409), 78-83.

Thuiller, W., Albert C., Araújo M. B., Berry P. M., Cabeza M., Guisan A., Hickler T., Midgley G. F., Paterson J., Schurr F. M., Sykes M. T., Zimmermann N. E. (2008). *Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 9(3-4), 137-152.

Tovar, C., Arnillas C. A., Cuesta F. and Buytaert W. (2013). "Diverging Responses of Tropical Andean Biomes under Future Climate Conditions" *PLoS ONE*, 8(5), e63634.

Unidas, N. (2013). *Statistical Yearbook for Latin America and the Caribbean 2012*. Ed. Santiago de Chile: Naciones Unidas. 226 p. ISBN 9210210883.

Zelazowski, P., Malhi Y., Huntingford C., Sitch S., et al. (2011). Changes in the potential distribution of humid tropical forests on a warmer planet. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1934), 137-160.