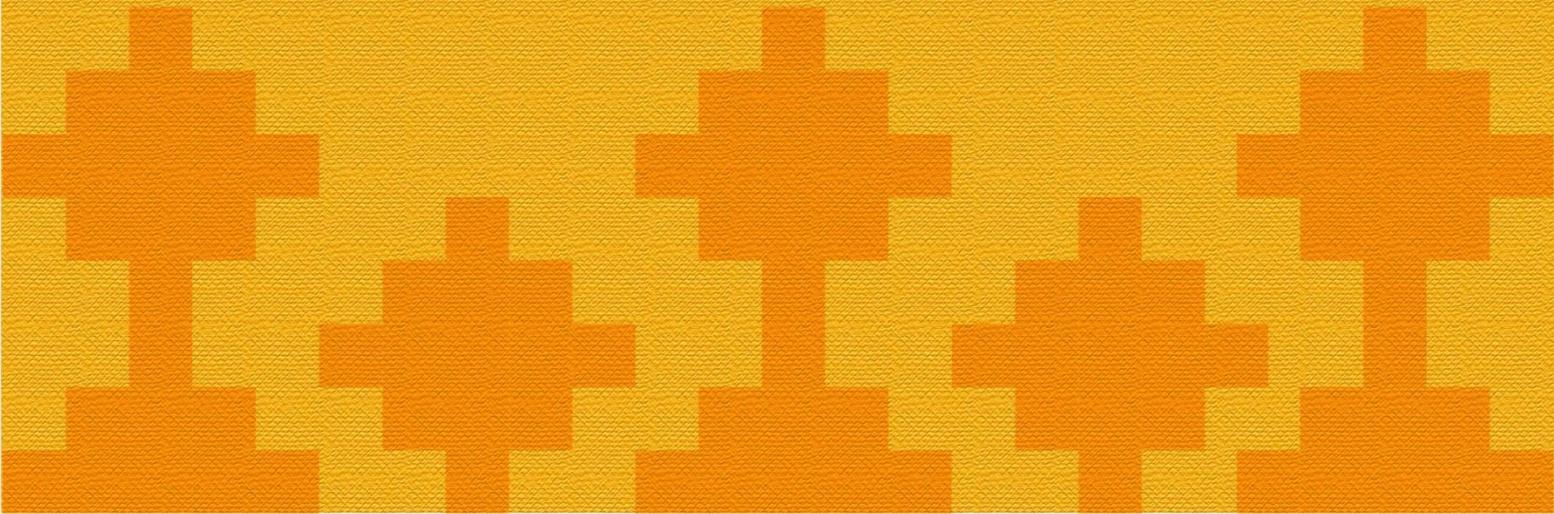




La economía del  
**cambio  
climático  
en Bolivia**

Impactos sobre  
la biodiversidad



Banco Interamericano de Desarrollo



La economía del cambio climático en Bolivia  
Impactos sobre la biodiversidad

Autor: Lykke E. Andersen

Editores: Carlos E. Ludeña y Leonardo Sánchez Aragón



NACIONES UNIDAS

CEPAL



**Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo**

Andersen, Lykke E.

La economía del cambio climático en Bolivia: impactos sobre la biodiversidad / Lykke E. Andersen; Carlos E. Ludeña, Leonardo Sánchez Aragón, editores.

p. cm. – (Monografía del BID; 192)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Biodiversity—Climatic factors—Bolivia. 2. Environmental economics—Bolivia. I. Ludeña, Carlos E., editor. II. Sánchez Aragón, Leonardo, editor. III. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático y Sostenibilidad. IV. Título. V. Serie.

IDB-MG-192

Número de referencia de la CEPAL, Naciones Unidas: LC/L.3812

**Palabras clave:** Cambio Climático, Biodiversidad, Bosques, Bolivia

**Clasificación JEL:** Q54, Q57, O54.

Este documento es uno de los análisis sectoriales que conforman la serie “La economía del cambio climático en Bolivia” del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el marco del Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático (ERECC) en América Latina y el Caribe, coordinado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y con el apoyo de UKAID del gobierno Británico.

Se agradece el apoyo del Ministerio de Ambiente y Agua en la realización de este estudio, en especial al Programa Nacional de Cambios Climáticos, ahora Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra.

Esta serie fue coordinada por Carlos Ludeña en colaboración con Leonardo Sánchez-Aragón (BID) y Carlos de Miguel, Karina Martínez y Mauricio Pereira (CEPAL).

El presente documento fue preparado por Lykke E. Anderson, con los aportes de Karla Blöcher, Axelle Boulay, Nashira Calvo, Jairo Escobar, Rebecca Goldman, Luis Carlos Jemio, Juan Carlos Ledezma, Carlos Ludeña, Rubén Mamani, Carlos de Miguel, Gustavo Nagy, Alejandra Palma, Mauricio Pereira, Humberto Perotto, Patricia Valdez, Horacio Valencia, Prem Jai Vidaurre, Jaime Villanueva, y de los participantes de diferentes talleres sobre los impactos del cambio climático organizados por el Programa Nacional de Cambios Climáticos.

**Citar como:**

Andersen, L.E. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: Impactos sobre la Biodiversidad*. C.E.

Ludeña y L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 192, Washington, DC.

Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Se prohíbe el uso comercial no autorizado de los documentos del Banco, y tal podría castigarse de conformidad con las políticas del Banco y/o las legislaciones aplicables.

Copyright ©2014 Banco Interamericano de Desarrollo. Todos los derechos reservados; este documento puede reproducirse libremente para fines no comerciales.

Introducción.....	1
El cambio climático .....	2
Metodología de estimación de impactos del cambio climático sobre la biodiversidad .....	4
Definición de biodiversidad y su relación con el clima .....	5
1    ¿Cómo medir la biodiversidad? .....	5
2    Relaciones entre el clima y la biodiversidad en el largo plazo .....	7
Simulación del impacto bruto del cambio climático sobre la biodiversidad .....	11
Impactos netos del cambio climático sobre la biodiversidad, bajo un escenario base con deforestación .....	14
1    Estimación del impacto directo de la deforestación sobre la biodiversidad .....	15
2    Simulación de impactos directos del cambio climático sobre la biodiversidad en el largo plazo (tomando en cuenta la deforestación).....	17
Simulación de impactos de la fertilización de CO <sub>2</sub> sobre la biodiversidad .....	20
1    Fertilización de CO <sub>2</sub> y su efecto sobre la productividad primaria neta .....	20
2    Productividad primaria neta y biodiversidad .....	22
3    Fertilización de CO <sub>2</sub> y su efecto sobre la biodiversidad .....	24
4    Simulación de los impactos finales del cambio climático sobre la biodiversidad, tomando en cuenta la deforestación y los impactos de la fertilización de CO <sub>2</sub> .....	25
Implicaciones económicas de la pérdida de biodiversidad debida al cambio climático .....	28
1    Valuación de la biodiversidad .....	28
2    Costo económico de la pérdida de biodiversidad ocasionado por el cambio climático (tomando en cuenta la deforestación previa y la fertilización de CO <sub>2</sub> ).....	30
Supuestos e incertidumbres.....	32
Oportunidades para reducir los impactos sobre bosques y biodiversidad .....	34
Conclusiones y recomendaciones .....	35
Referencias .....	37
Anexo: Estimación de la deforestación en el escenario base.....	40
1    Metodología utilizada.....	40
2    Datos sobre deforestación .....	41
3    Proyecciones de población rural/urbana, 2001 - 2100.....	42
4    Intensidades de deforestación .....	44
5    Proyecciones de deforestación, 2001-2100 .....	48

## Resumen

La tasa de deforestación per cápita en Bolivia es 12 veces más alta que el promedio mundial y una de las más altas del mundo. Las fuertes interacciones entre la deforestación y el cambio climático indicarían que la deforestación podría aumentar aún más los impactos adversos del cambio climático. Este estudio es un primer intento de estimar los costos económicos que resultan de la pérdida de biodiversidad causados por el cambio climático. Los resultados sugieren que el cambio climático previstos por el modelo PRECIS podrían tener fuertes impactos para la biodiversidad en Bolivia, especialmente en el Altiplano donde se prevé un proceso de desertificación debido a la reducción de las precipitaciones y al aumento en variabilidad de las temperaturas. En las tierras bajas, el cambio climático no sería la mayor amenaza para la biodiversidad, pero si el avance de la frontera agrícola; mientras que en las tierras altas, el cambio climático sería responsable de las fuertes reducciones en biodiversidad previstas. En total, entre los procesos de deforestación y cambio climático, se espera que haya sustancialmente menos diversidad de especies a finales del siglo.

Existe mucha incertidumbre asociada al análisis realizado, y por eso los resultados deben ser interpretados con cautela.

# La economía del cambio climático en Bolivia

## Impactos sobre la biodiversidad

---

### 1 Introducción

Durante el siglo XX, Bolivia convirtió entre 3 y 4 millones de hectáreas de bosque para expandir la frontera agrícola en las tierras bajas. Otros 3 millones de hectáreas se perdieron durante la primera década del siglo XXI.<sup>1</sup> Si no se cambian estas tendencias de deforestación acelerada, Bolivia estaría totalmente deforestada antes de llegar al final de este siglo.

La tasa de deforestación per cápita en Bolivia ( $\approx 198 \text{ m}^2/\text{persona/año}$ )<sup>2</sup> es 12 veces más alta que el promedio mundial ( $\approx 16 \text{ m}^2/\text{persona/año}$ ) y una de las más altas del mundo, por encima de los niveles de otros grandes países como Brasil ( $\approx 137 \text{ m}^2/\text{persona/año}$ ), Indonesia ( $\approx 63 \text{ m}^2/\text{persona/año}$ ), Malasia ( $\approx 109 \text{ m}^2/\text{persona/año}$ ) y China ( $\approx 14 \text{ m}^2/\text{persona/año}$ ), aunque menor que la de algunos países africanos (Zambia, con  $948 \text{ m}^2/\text{persona/año}$ ; Botswana, con  $739 \text{ m}^2/\text{persona/año}$  y Sudán, con  $332 \text{ m}^2/\text{persona/año}$ ).

Si todas las áreas naturales de Bolivia se convirtiesen en tierras agrícolas, se generarían graves consecuencias para nuestro estatus de país megadiverso.<sup>3</sup> Tan drásticas serían las consecuencias para la biodiversidad que, probablemente, no importaría si el clima también cambiara o no.

Por otro lado, existen estudios que prevén la desaparición de la selva amazónica hasta 2100 debido solamente al cambio climático (Cox et al., 2000; Cox et al., 2004; Harris, Huntingford y Cox, 2008; Huntingford et al., 2008), lo que también tendría graves consecuencias para la biodiversidad.

Esta situación aparentemente ineludible de pérdida de la biodiversidad podría provocar la siguiente pregunta: ¿para qué esforzarse para reducir la deforestación, si la selva desaparecerá de todos modos? Sin embargo, resulta que existen fuertes interacciones entre la deforestación y el cambio climático que indicarían que la deforestación podría aumentar aún más los impactos adversos del cambio climático (Suarez et al., 2012). La deforestación, por ejemplo, aumenta la probabilidad de inundaciones y erosión de suelos, así como también afecta el microclima además del clima regional y global (Bradshaw et al., 2007).

El propósito de este estudio es estimar los costos económicos que resultan de la pérdida de biodiversidad causados por el cambio climático. Sin embargo, para poder estimar estos costos, es necesario también analizar los otros factores que afectan la biodiversidad, sobre todo la expansión de la frontera agropecuaria.

El resto del documento está organizado como se explica a continuación. En la segunda sección, se define el cambio climático en función del análisis que se efectuará en el presente estudio. En la tercera sección se explica la metodología aplicada para estimar los cambios en materia de biodiversidad causados por los

---

<sup>1</sup> De acuerdo con imágenes satelitales procesadas e interpretadas por el equipo de investigación del Museo Noel Kempff Mercado.

<sup>2</sup> Los datos son de FAO (2003) y se refieren al período 1990-2000. Si analizamos la tasa de deforestación para Bolivia para el período 2002-07, esta es incluso mayor a la observada durante el período 1990-2000, ya que asciende a  $320 \text{ m}^2/\text{persona/año}$ .

<sup>3</sup> Por ser uno de los 20 países con más biodiversidad en el mundo, Bolivia es miembro del Grupo de Países Megadiversos Afines, que se estableció con la Declaración de Cancún en febrero de 2002.

cambios climáticos y la metodología para estimar los costos económicos de estos cambios. En la cuarta sección se define el concepto de biodiversidad y se estima una relación estadística entre el clima y la biodiversidad en Bolivia. En la quinta sección se simula el impacto bruto del cambio climático sobre la biodiversidad, sin tomar en cuenta que también habrá otros procesos que impactarán en la biodiversidad durante el siglo XXI. En la sexta sección se estima el impacto de la deforestación sobre la biodiversidad para después calcular un impacto neto del cambio climático sobre la biodiversidad, tomando en cuenta la deforestación en el escenario base. En la séptima sección se analiza cómo la fertilización de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) podría afectar la productividad neta primaria y el nivel de biodiversidad y se hace una corrección de este efecto para llegar a un efecto final del cambio climático sobre la biodiversidad. En la octava sección se estima una relación entre biodiversidad y consumo per cápita, y esta relación se utiliza para estimar los costos económicos del cambio climático. En la novena sección se resaltan todos los supuestos y la certidumbre involucrada en estas estimaciones. En la décima sección se analizan las opciones para reducir el impacto sobre la biodiversidad, y finalmente se proporcionan conclusiones y recomendaciones.

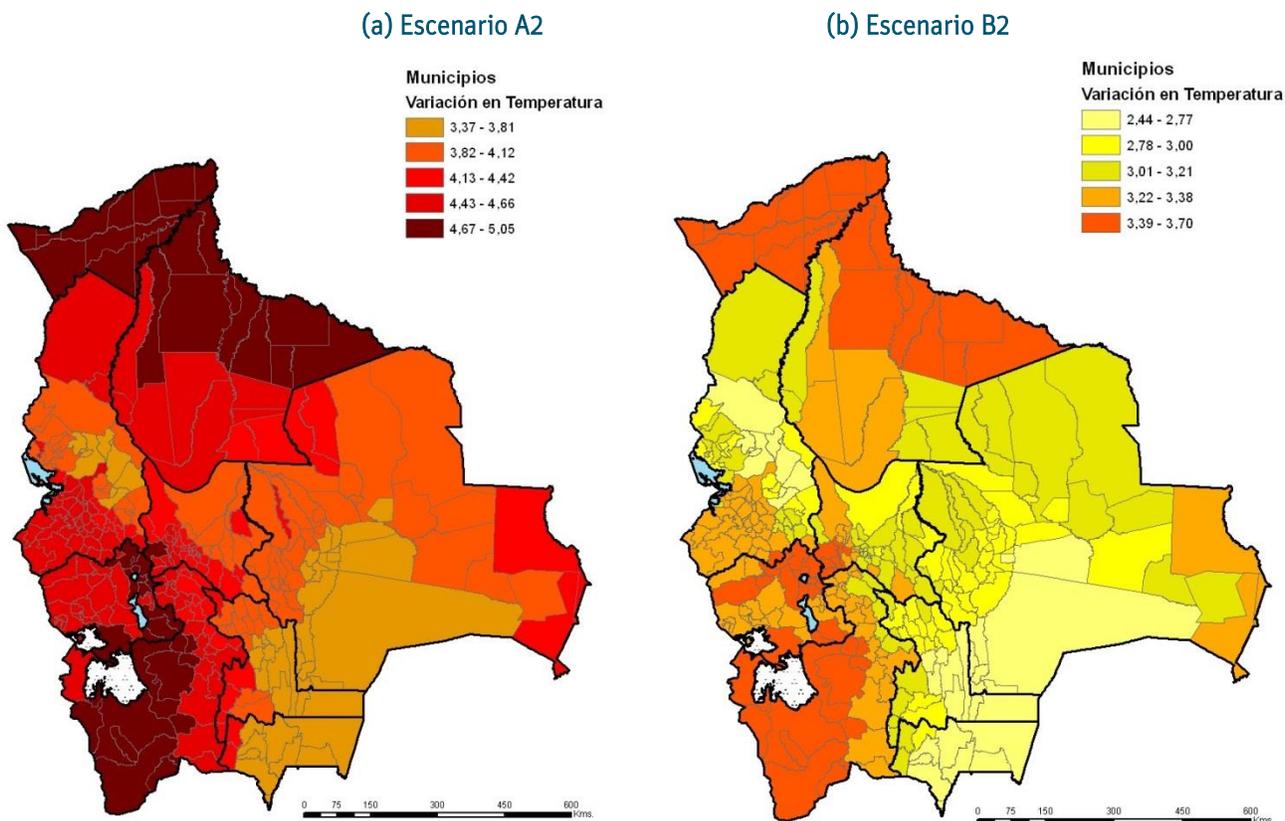
## 2 El cambio climático

El presente estudio forma parte de un proyecto más amplio sobre el impacto económico del cambio climático en Bolivia durante el siglo XXI (BID/CEPAL, 2014), el cual a su vez integra un proyecto aún más amplio sobre el impacto económico del cambio climático en América Latina hasta el año 2100, ERECC (CEPAL, 2010). Todos los estudios sectoriales llevados a cabo en el marco del proyecto ERECC, incluido el presente, usan los mismos dos escenarios climáticos, A2 y B2, generados por el modelo regional PRECIS del Centro Hadley del Reino Unido, que tiene una resolución de 50 x 50 km (véanse Jones et al., 2004; Alves, 2007; Andrade, 2014). Los escenarios muestran los cambios en temperatura mensual y precipitación mensual que se esperan entre el período base (1961-90) y el período futuro (2071-2100). Estos cambios climáticos se deben exclusivamente al aumento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera debido a actividades humanas.

En el caso de los estudios de Bolivia, se han calculado los escenarios de cambio climático al nivel de municipios, para poder relacionar estos cambios con datos socioeconómicos. En los mapas 1(a) y 1(b), se muestran los cambios en temperatura promedio anual entre el período base (1961-90) y el período futuro (2071-2100) en los dos escenarios (A2 el más extremo, debido a mayores emisiones y concentraciones de CO<sub>2</sub>, y B2 el escenario más moderado).

En los mapas 2(a) y 2(b) se muestran los cambios en precipitación anual en los dos escenarios para los mismos 110 años.

*Mapa 1*  
*Cambios en la temperatura media anual (en grados centígrados) entre 1961-90*  
*y 2071-2100, de acuerdo con el modelo PRECIS, escenarios A2 y B2*



Fuente: Calculado por Andrade (2014) en base a corridas realizadas por el INPE con el modelo PRECIS.

En el escenario A2, las temperaturas medias aumentarían entre 3,4°C y 5,1°C, de acuerdo con el lugar (más calentamiento en el norte del país y en el Altiplano). En el escenario B2, las temperaturas medias aumentarían entre 2,4°C y 3,7°C, siguiendo el mismo patrón espacial.

La precipitación muestra un cuadro más variable que la temperatura. Bajo los dos escenarios estudiados, la precipitación promedio disminuye moderadamente en la zona altiplánica (hasta llegar a -16%) y se incrementa (hasta 44%) en las zonas bajas.

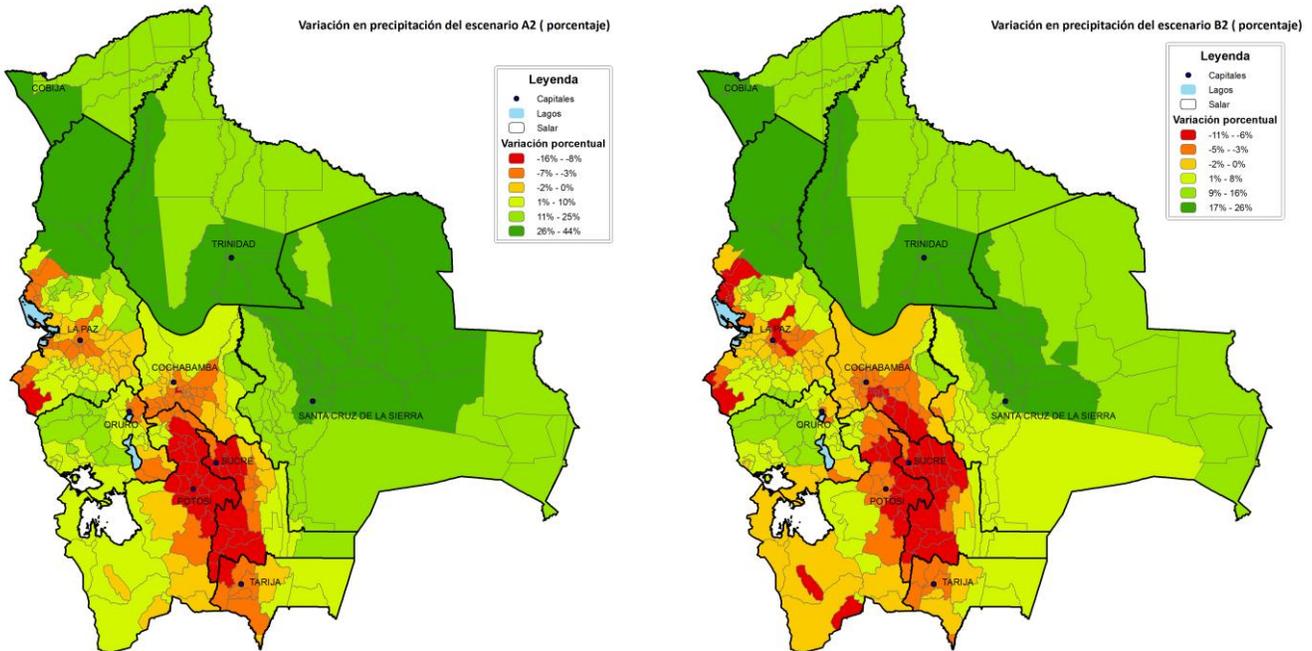
El máximo incremento en la precipitación se observa en la zona de mayor pendiente de terreno en Bolivia, principalmente en la zona este de los Andes. Aunque esta región corresponde de manera natural a la región en Bolivia donde la precipitación es máxima, el modelo sugiere un incremento relativamente grande en la zona. La región afectada es mucho más grande bajo el escenario A2 que bajo B2 (véase el mapa 2).

## Mapa 2

*Cambios en precipitación medio anual (en porcentaje) entre 1961-90 y 2071-2100, de acuerdo con el modelo PRECIS, escenarios A2 y B2*

(a) Escenario A2

(b) Escenario B2



Fuente: Calculado en base a corridas realizadas por el INPE con el modelo PRECIS (véase Andrade, 2014).

El presente estudio también toma en cuenta cambios en la variabilidad de la temperatura y la precipitación. De acuerdo con el modelo PRECIS, habrá aumentos en la variabilidad de las temperaturas y en la variabilidad de la precipitación en todos los municipios.

### 3 Metodología de estimación de impactos del cambio climático sobre la biodiversidad

Existen muchos estudios acerca del efecto del cambio climático sobre los cultivos agrícolas más importantes para la alimentación humana, pero pocos acerca del impacto del cambio climático sobre la biodiversidad en general. Normalmente, los estudios que se han hecho se enfocan en una especie a la vez, como por ejemplo los osos polares (véase Derocher, Lunn y Stirling, 2004) o los corales (Hoegh-Guldberg et al., 2007). En Bolivia, se ha iniciado un proyecto de monitoreo de cambios en la biodiversidad y el clima en alta montaña (proyecto Global Observation Research Initiative in Alpine Environments, GLORIA), pero tardará décadas hasta que se empiezan a generar resultados sólidos sobre la relación entre cambio climático y biodiversidad, y los resultados no serán representativos para toda Bolivia. Tampoco intentan estimar los impactos económicos de los cambios en biodiversidad ocasionados por el cambio climático.

La metodología aplicada en el presente estudio aprovecha sobre todo la heterogeneidad geográfica de Bolivia para estimar relaciones empíricas entre clima, biodiversidad e ingresos en dicho país.

La metodología usada consiste en los siguientes pasos:

- Definición del concepto de biodiversidad y estimación de un modelo econométrico que muestra cómo la biodiversidad depende de factores climáticos y otros factores.
- Simulación del impacto bruto de cambio climático sobre la biodiversidad, usando los cambios climáticos descritos en sección 2 sobre el modelo de biodiversidad estimado en sección 4.
- Estimación del impacto de la deforestación sobre la biodiversidad, y estimación del impacto neto del cambio climático sobre la biodiversidad, tomando en cuenta el impacto previo de la deforestación.
- Estimación del impacto de la fertilización de CO<sub>2</sub> sobre la biodiversidad, y estimación del impacto final sobre la biodiversidad, tomando en cuenta la deforestación y la fertilización de CO<sub>2</sub>.
- Estimación de la relación entre biodiversidad e ingresos a nivel municipal y simulación del impacto económico de los cambios en biodiversidad causados por el cambio climático.

En cada uno de estos pasos existe bastante incertidumbre. Por eso se dedica una sección entera a la discusión de todos los supuestos que subyacen a estas estimaciones.

## 4 Definición de biodiversidad y su relación con el clima

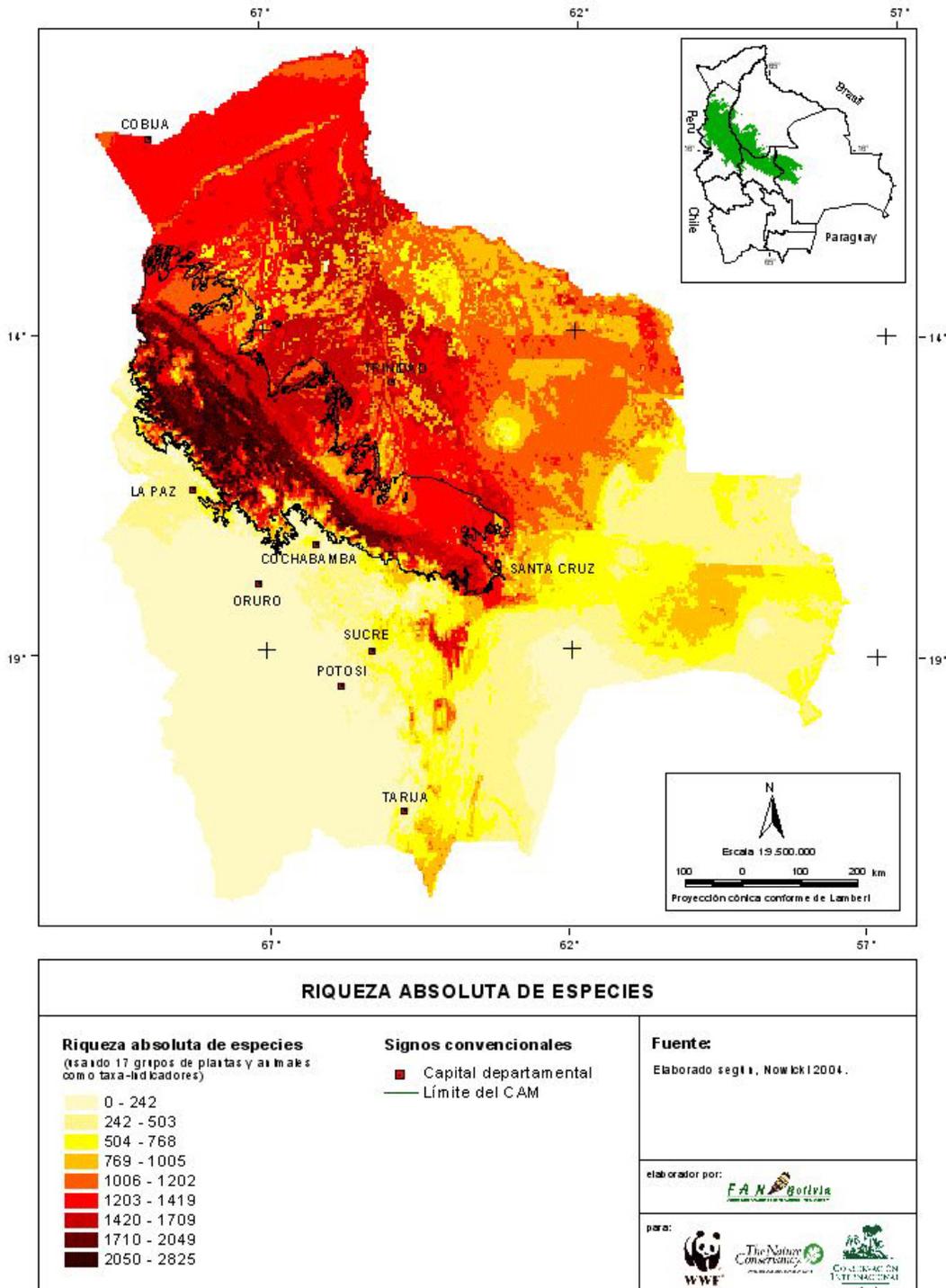
### 4.1 ¿Cómo medir la biodiversidad?

Dado el enorme territorio de Bolivia y la inaccesibilidad de muchas áreas, no existen registros detallados sobre todas las especies que existen en el país. Se han estudiado en detalle ciertas especies, como las orquídeas (Vásquez e Ibsch, 2004), pero contar todas las especies que hay en todo el territorio sería imposible. Por eso, se usan modelos como BIOM para estimar la distribución geográfica de diferentes especies y para estimar el nivel de biodiversidad y endemismo en diferentes regiones (Sommer et al., 2003; Nowicki et al., 2004). Estos modelos se basan en observaciones actuales sobre la presencia de ciertas especies en diferentes climas y ecosistemas para predecir su presencia o no en otras áreas del país.

Para el presente análisis se eligió usar la estimación de Riqueza Absoluta de Especies (RAE) de Nowicki et al. (2004), que también es utilizada por FAN (2005) y el Servicio Nacional de Áreas Protegidas del Ministerio de Medioambiente. La variable está estimada para todo el país en cuadrículas de 2 arc min. (3,6 km x 3,6 km, aproximadamente), lo que significa más de 77.000 cuadrículas en total. Se han utilizado 17 grupos de plantas y animales como taxa-indicadores, y el máximo número de especies dentro de estos 17 grupos dentro de una cuadrícula es de 2.825, mientras que el mínimo es cero (por ejemplo, en glaciares y salares).

El mapa 3 muestra la variación en RAE en el país. Se puede notar que las áreas con más riqueza de especies (flora y fauna) se encuentran en los valles de La Paz y Cochabamba, áreas que se caracterizan por tener altos niveles de precipitación y una topografía muy accidentada. Las áreas con menos biodiversidad son las áreas planas y áridas del Altiplano y del Chaco.

Mapa 3  
Riqueza Absoluta de Especies (RAE) en Bolivia (número de especies por píxel)



Fuente: FAN (2005).

En el resto de este documento usamos los términos “biodiversidad” y “RAE” como sinónimos, en representación del nivel de diversidad biológica en cada lugar. Es importante aclarar que en este estudio todas las especies son tratadas de manera equivalente: una paloma o un ratón contribuyen de manera igual a la

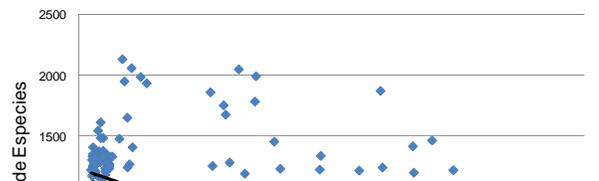
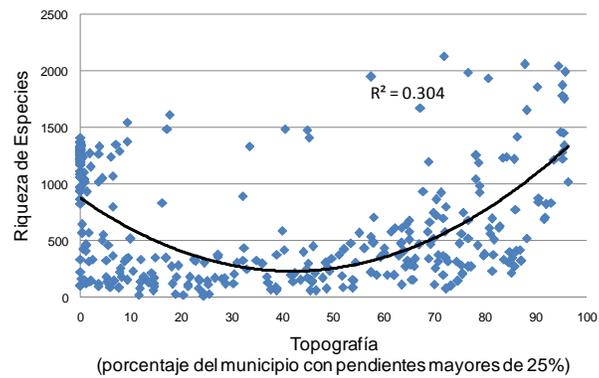
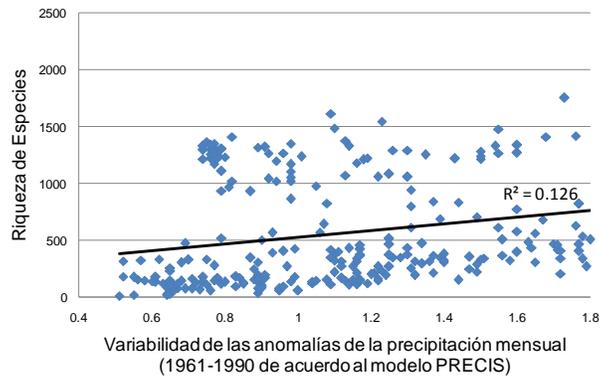
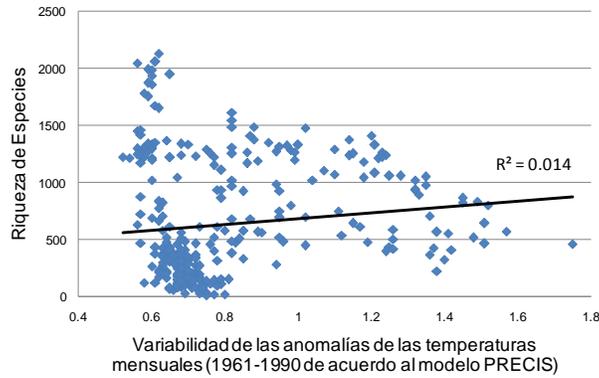
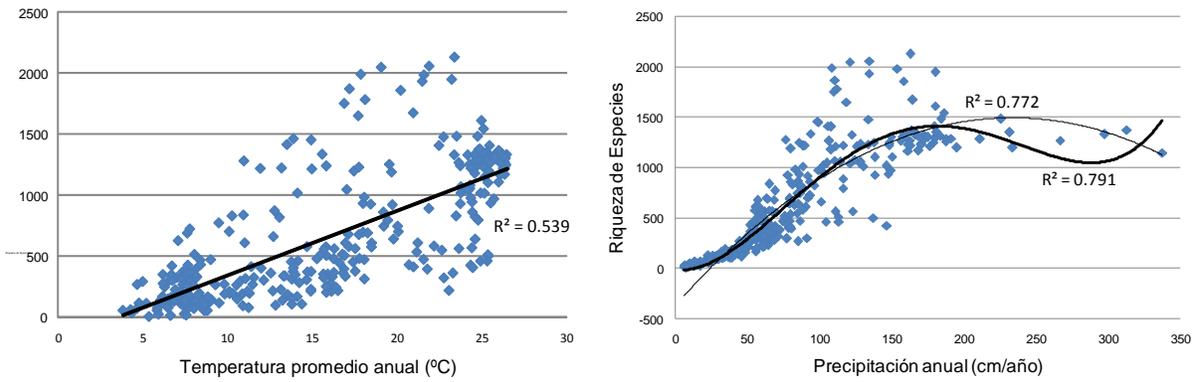
biodiversidad que un puma o un oso, y una hierba mala igual que un árbol. Sería posible hacer un análisis para especies individuales de particular interés, con esta misma metodología, pero en este estudio nos interesa el nivel de biodiversidad en general.

## 4.2 Relaciones entre el clima y la biodiversidad en el largo plazo

Para cuantificar el efecto de factores climáticos sobre la biodiversidad, se estima un modelo simple a nivel municipal que explica la variación en RAE (del mapa 3) con variables climáticas (temperatura promedio, precipitación promedio, variación en temperaturas, variación en precipitación), controlando por topografía (porcentaje del municipio con pendientes mayores de 25%) y altura sobre el nivel del mar.

Para poder escoger una especificación adecuada para el modelo, primero se grafican las relaciones bivariantes entre biodiversidad y estas seis posibles variables explicativas (véase el gráfico 1). Se nota una relación positiva, aproximadamente lineal, entre temperatura promedio anual y RAE. También existe una relación positiva entre precipitación anual y RAE, pero la relación no es lineal ni cuadrática. Para poder captar bien la relación, especialmente en áreas con poca precipitación, es necesario especificar un polinomio de cuarto orden. Las relaciones entre variabilidad de temperaturas, variabilidad de precipitación y RAE no son muy fuertes. Se nota una relación de forma U entre topografía y riqueza de especies. Los municipios con pendientes fuertes tienen altos niveles de biodiversidad porque incluyen muchos y diferentes microclimas dentro de cada hectárea. En el otro extremo, los municipios completamente planos se encuentran en dos grupos: los de tierras bajas, que tienen alta biodiversidad, y los de tierras altas, que tienen bajos niveles de biodiversidad. Esto lleva al último gráfico que muestra una relación inversa respecto de la altura.

**Gráfico 1**  
*Relaciones simples entre RAE y potenciales variables explicativas, a nivel municipal en Bolivia*



Se estima un modelo simple con estas seis variables explicativas, con las formas funcionales que se presentan en el gráfico 1. Para captar el impacto no-lineal de precipitación, se incluye no solamente la variable precipitación promedio, sino también precipitación promedio al cuadrado y al tercer y cuarto poder. Los resultados de esta simple estimación indican que las variables climáticas y de topografía y altura explican muy bien la variación observada en la riqueza de especies en Bolivia (el poder explicativo del modelo alcanza el 87%). Todas las variables, excepto la temperatura promedio, son estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 99% (véase el cuadro 1).<sup>4</sup>

**Cuadro 1**  
*Modelo municipal de riqueza de especies para Bolivia*

Variable explicativa	Coeficiente estimado
Constante	716,67 (4,.43) ***
Temperatura promedio	-8,73 (-1,56)
Precipitación promedio	-1157,14 (-4,06) ***
Precipitación promedio <sup>2</sup>	2979,47 (7,04) ***
Precipitación promedio <sup>3</sup>	-1297.74 (-6,77) ***
Precipitación promedio <sup>4</sup>	184,14 (5,91) ***
Desviación estándar de temperaturas	-238,57 (-3,.69) ***
Desviación estándar de precipitación	150,24 (5,90) ***
Topografía	-8,39 (-5,42) ***
Topografía <sup>2</sup>	0,12 (7,.42) ***
Altura	-0,08 (-2,97) ***
# obs = 327	R <sup>2</sup> = 0,8776

Fuente: Estimación propia.

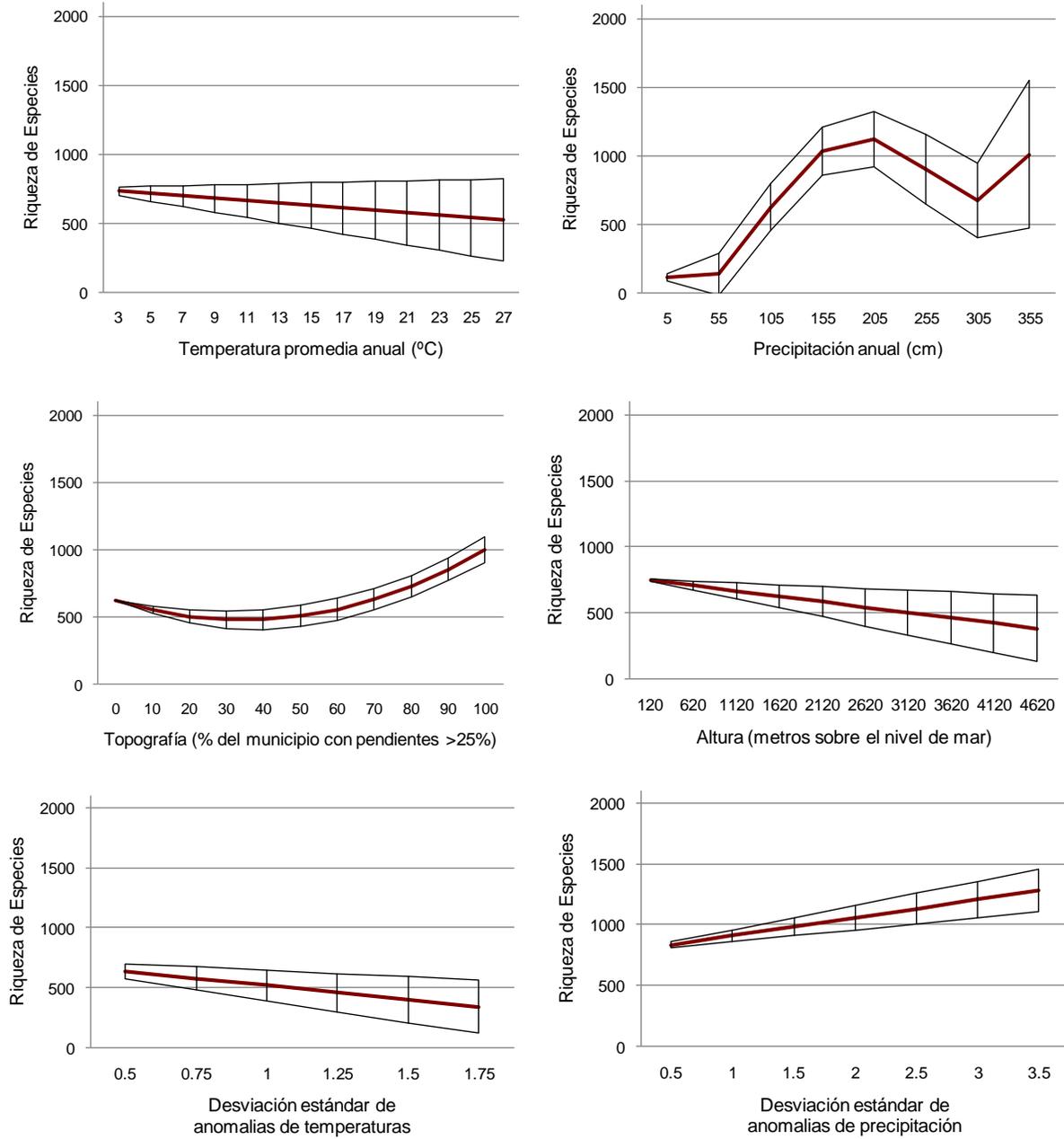
Notas: Los números entre paréntesis son estadísticas t.

\* significativo al 10%, \*\* significativo al 5%, \*\*\* significativo al 1%.

Las relaciones parciales estimadas se ilustran en el gráfico 2 con intervalos de 95% de confianza.

<sup>4</sup> Para ver la robustez de la relación, se intentó excluir las dos variables de variabilidad climática (porque sus relaciones con la biodiversidad no son muy claras en el gráfico 1, y porque las variables provienen del modelo PRECIS y no son confirmadas por observaciones reales), pero esto no tenía un efecto sobre los signos y la significancia estadística de las otras variables. También se intentó incluir una variable de interacción entre temperatura y precipitación, pero no resultó estadísticamente significativa.

**Gráfico 2**  
*Relaciones estimadas entre clima, topografía y RAE en Bolivia*



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Las líneas rojas representan los estimados puntuales del cuadro 1, mientras que las líneas negras delimitan los intervalos de 95% de confianza (calculados por el comando Lincom de Stata).

Una vez determinadas las relaciones de largo plazo entre clima y riqueza de especies, se puede proceder a simular los efectos de cambios en las variables climáticas.

## 5 Simulación del impacto bruto del cambio climático sobre la biodiversidad

En esta sección se simulan los impactos brutos del cambio climático previsto por el modelo PRECIS en el escenario A2 descrito en la sección 2.

Para esta primera simulación se compara un escenario base con un escenario con cambio climático en base a las proyecciones del modelo PRECIS (sin contabilizar deforestación). La diferencia entre los dos escenarios sería el impacto bruto atribuible al cambio climático, en ausencia de otros cambios, como la deforestación.

Formalmente, el nivel de biodiversidad ( $RAE$ ) en el municipio  $i$  para el escenario base (período 1961-90) se puede escribir como:

$$RAE_{i,base} = \alpha + \beta_1 \cdot temp_{i,base} + \beta_2 \cdot temp_{i,base}^2 + \beta_3 \cdot precip_{i,base} + \beta_4 \cdot precip_{i,base}^2 + \beta_5 \cdot precip_{i,base}^3 + \beta_6 \cdot precip_{i,base}^4 + \beta_7 \cdot SDT_{i,base} + \beta_8 \cdot SDP_{i,base} + \beta_9 \cdot topo_i + \beta_{10} \cdot topo_i^2 + \beta_{11} \cdot alt_i + \varepsilon_i,$$

Donde  $temp_{i,base}$  y  $precip_{i,base}$  son la temperatura promedio anual y la precipitación acumulada anual en municipio  $i$  en el período de referencia;<sup>5</sup>  $SDT_{i,base}$  y  $SDP_{i,base}$  miden la variabilidad en temperatura y precipitación en el municipio  $i$  en el período de referencia;<sup>6</sup>  $topo_i$  y  $alt_i$  son variables que describen la topografía y la altura sobre nivel de mar de municipio  $i$ ; y  $\varepsilon_i$  es el término de error para municipio  $i$ .

De manera similar, el nivel de riqueza de especies en el escenario con cambio climático (la situación prevista por el modelo PRECIS en 2071-2100) se puede escribir de la siguiente manera:

$$RAE_{i,CC} = \alpha + \beta_1 \cdot temp_{i,CC} + \beta_2 \cdot temp_{i,CC}^2 + \beta_3 \cdot precip_{i,CC} + \beta_4 \cdot precip_{i,CC}^2 + \beta_5 \cdot precip_{i,CC}^3 + \beta_6 \cdot precip_{i,CC}^4 + \beta_7 \cdot SDT_{i,CC} + \beta_8 \cdot SDP_{i,CC} + \beta_9 \cdot topo_i + \beta_{10} \cdot topo_i^2 + \beta_{11} \cdot alt_i + \varepsilon_i.$$

Entonces, el efecto sobre la biodiversidad que se puede atribuir al cambio climático hasta 2100 sería:

$$\begin{aligned} \Delta RAE_{i,CC} &= RAE_{i,CC} - RAE_{i,base} \\ &= \beta_1 \cdot (temp_{i,CC} - temp_{i,base}) + \beta_2 \cdot (temp_{i,CC}^2 - temp_{i,base}^2) + \beta_3 \cdot (precip_{i,CC} - precip_{i,base}) + \beta_4 \cdot (precip_{i,CC}^2 - precip_{i,base}^2) + \beta_5 \cdot (precip_{i,CC}^3 - precip_{i,base}^3) + \beta_6 \cdot (precip_{i,CC}^4 - precip_{i,base}^4) + \beta_7 \cdot (SDT_{i,CC} - SDT_{i,base}) + \beta_8 \cdot (SDP_{i,CC} - SDP_{i,base}). \end{aligned}$$

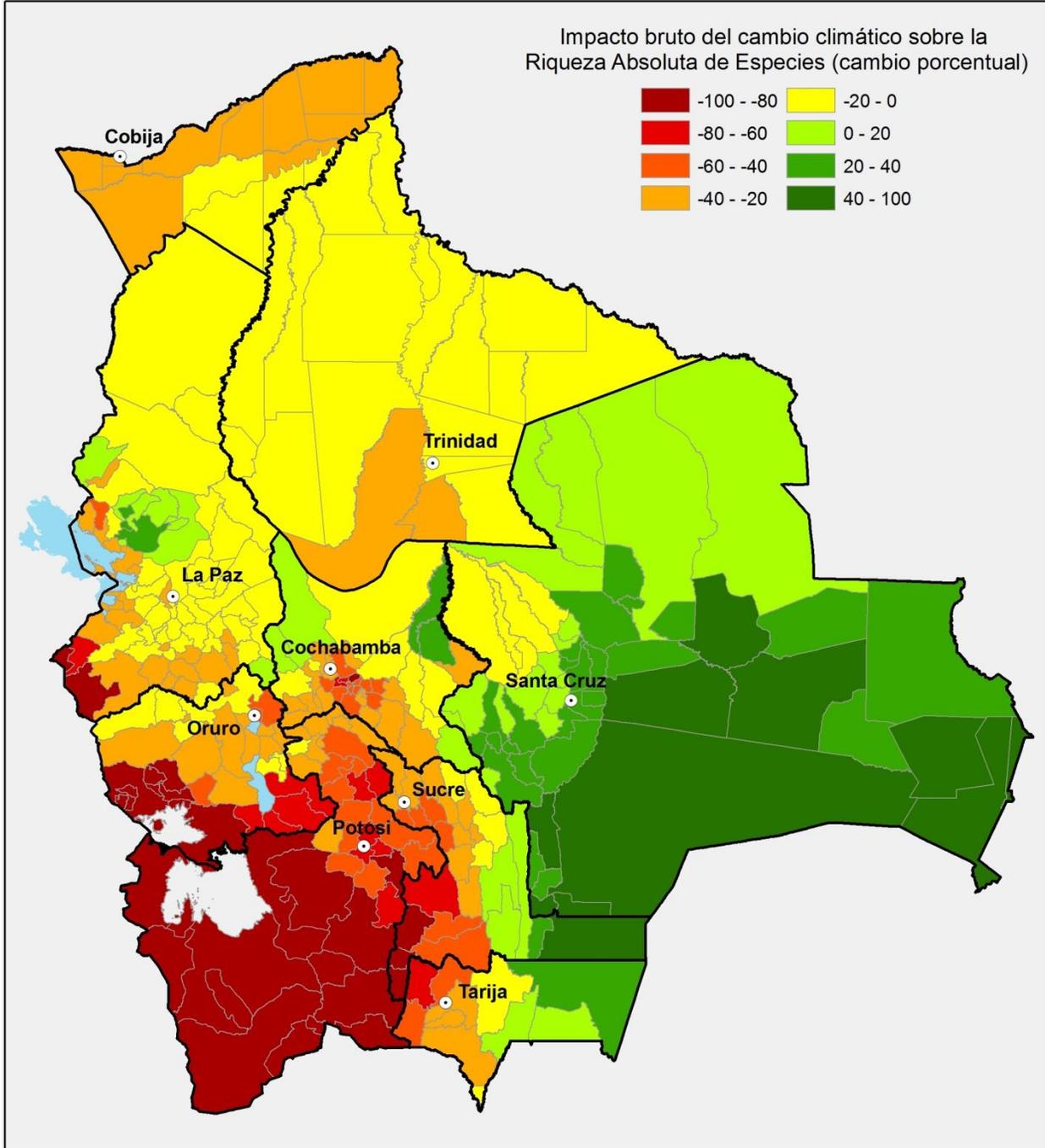
Los resultados de esta simulación están ilustrados en el mapa 4. Los resultados indican que la biodiversidad en el departamento de Santa Cruz podría verse favorecida por los cambios climáticos previstos por el PRECIS, mientras que en casi todo el resto del país los cambios climáticos tendrían un efecto adverso.

<sup>5</sup> Datos de Worldclim que reflejan la situación en el periodo de referencia.

<sup>6</sup> Calculados como la desviación estándar de las temperaturas y precipitaciones promedio mensuales en cada municipio en el período 1961-90 de acuerdo con el modelo PRECIS.

Mapa 4

Impacto bruto del cambio climático sobre la RAE en Bolivia (cambio porcentual) bajo el escenario A2, 1990-2100 (sin tomar en cuenta la deforestación y la fertilización de CO<sub>2</sub>)



Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 2 se desagregan los efectos por las diferentes vías por las cuales operarían los cambios climáticos. El modelo indica que la biodiversidad no varía significativamente con temperatura (asumiendo que todos los demás otros factores son constantes). Los cambios previstos en precipitación tendrían un efecto muy positivo en el departamento de Santa Cruz, pero negativo en la mayor parte de La Paz, Chuquisaca y Potosí. El aumento

previsto en la variabilidad de temperaturas tendrían un efecto negativo en todo el país, pero más fuerte en Pando, donde la biodiversidad está acostumbrada a temperaturas muy estables. El aumento previsto en la variabilidad de precipitación tendría un efecto moderadamente positivo sobre la biodiversidad en todo el país. En total, los cambios climáticos tendrían un efecto positivo en el departamento de Santa Cruz (por el aumento en precipitación en áreas relativamente secas), pero negativo en el resto de los departamentos. En Beni, por ejemplo, se perdería un promedio de 116 especies en cada píxel, desde un nivel inicial de 1252 especies por píxel, en promedio, para este departamento.

### Cuadro 2

*Impactos brutos del cambio climático 1990-2100 sobre la RAE (sin tomar en cuenta la deforestación y la fertilización de CO<sub>2</sub>), por departamento y vía de impacto, bajo el escenario A2 en Bolivia (cambio porcentual en el número de especies por píxel)*

Departamento	Por cambio en temperatura	Por cambio porcentual en precipitación	Por cambio porcentual en variabilidad de temperaturas	Por cambio porcentual en variabilidad de precipitación	Impacto bruto del cambio climático
Beni	n.s.	1	-15	5	-9
Chuquisaca	n.s.	-2	-13	2	-13
Cochabamba	n.s.	2	-12	4	-6
La Paz	n.s.	-3	-13	5	-11
Oruro	n.s.	11	-109	46	-51
Pando	n.s.	1	-25	4	-21
Potosí	n.s.	-17	-124	27	-100
Santa Cruz	n.s.	27	-8	5	25
Tarija	n.s.	0	-7	3	-5
<b>Bolivia</b>	n.s.	8	-15	5	-1

Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por el área de cada municipio.

n.s. = no es estadísticamente significativo a un nivel de confianza del 90%.

En vez de reportar los resultados por departamento, en el cuadro 3 se reportan por ecosistema predominante en cada municipio. Se puede notar que las áreas de puno y otra vegetación alto andina perderían más del 40% de su biodiversidad por los cambios climáticos previstos en el escenario A2. Los otros tipos de vegetación son más resistentes y perderían un porcentaje mucho menor. Incluso, el Chaco, el Cerrado Chaqueño y el Bosque Seco Chiquitano podrían ver aumentos significativos en la biodiversidad por los incrementos previstos en la precipitación en estas áreas.

*Cuadro 3*

*Impactos brutos del cambio climático 1990-2100 sobre la RAE (sin tomar en cuenta la deforestación y la fertilización de CO<sub>2</sub>), por eco-región, bajo el escenario A2 en Bolivia (cambio porcentual en el número de especies por píxel)*

Departamento	Riqueza de especies inicial (número de especies por píxel)	Impacto del cambio climático previsto hasta 2100 (cambio porcentual en número de especies por píxel)
Puna y vegetación alto andina	209	-43
Bosque montañoso	1194	-9
Chaco y Chiquitano	513	+41
Sabanas	1178	-4
Bosque inundable	1229	-11
Bosque amazónico	1112	-1
<b>Bolivia</b>	<b>814</b>	<b>-1</b>

Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por el área de cada municipio.

El efecto bruto del cambio climático sobre la biodiversidad fue estimado bajo el supuesto de que ningún otro proceso en cuanto a los cambios en el patrón de temperaturas y precipitación afectaría la biodiversidad durante el resto del siglo. Sin embargo, hay por lo menos otros dos procesos que podrían tener un efecto significativo: la deforestación y la fertilización de CO<sub>2</sub>.

## 6 Impactos netos del cambio climático sobre la biodiversidad, bajo un escenario base con deforestación

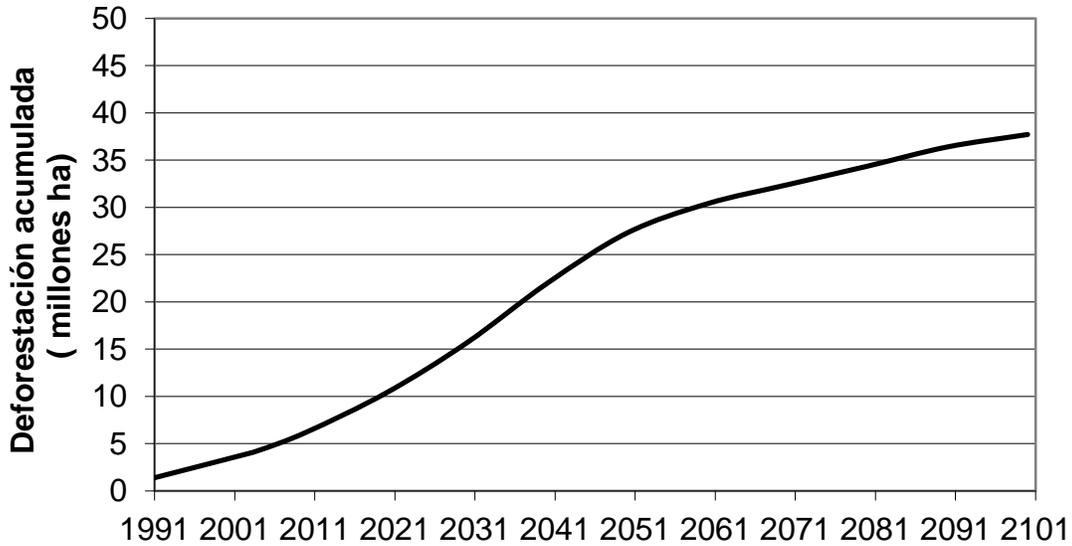
Bolivia está deforestando alrededor de 300.000 hectáreas de bosque cada año, y esta transformación total del hábitat tiene un impacto negativo para las áreas afectadas. Es necesario tomar en cuenta la deforestación prevista en el escenario base antes de calcular el impacto del cambio climático, ya que el impacto de la deforestación vendría con anterioridad y con mucho más fuerza que los cambios climáticos graduales previstos por el modelo PRECIS.

En el anexo se ha estimado la trayectoria de deforestación durante el siglo en el escenario base a nivel municipal y a nivel nacional usando la metodología de la Institución Internacional de Economía y Empresa (IIIDE, 2009). Esta metodología extiende las tendencias de deforestación observada en cada municipio en el pasado, pero toma en cuenta las restricciones en disponibilidad de bosque, lo cual significa que la deforestación no puede seguir aumentando para siempre, sino que más bien seguirá la trayectoria demostrada en el gráfico 3.

De acuerdo con esta proyección, la cual supone que se mantiene la política actual, Bolivia perderá unos 34 millones hectáreas de bosque durante el siglo XXI. En términos de promedios anuales, este se acerca muy bien a las tasas observadas actualmente, pero se supone que las tasas de deforestación serán mayores en la primera mitad del siglo que en la última mitad.

Gráfico 3

Deforestación acumulada observada, 1991-2004, y proyección de deforestación acumulada en 142 municipios naturalmente boscosos en Bolivia, 2005-2100



Fuente: Elaboración propia.

Se asume que el nivel de deforestación no se ve afectado por el cambio climático, sino que está determinado por la demanda de tierra para la producción agropecuaria. Puede ser que el cambio climático facilite la deforestación en ciertas áreas (áreas con más sequías) y lo complica en otras (áreas con más inundaciones), pero en general asumimos que la trayectoria de deforestación es el mismo en el escenario base y en el escenario con cambio climático.

### 6.1 Estimación del impacto directo de la deforestación sobre la biodiversidad

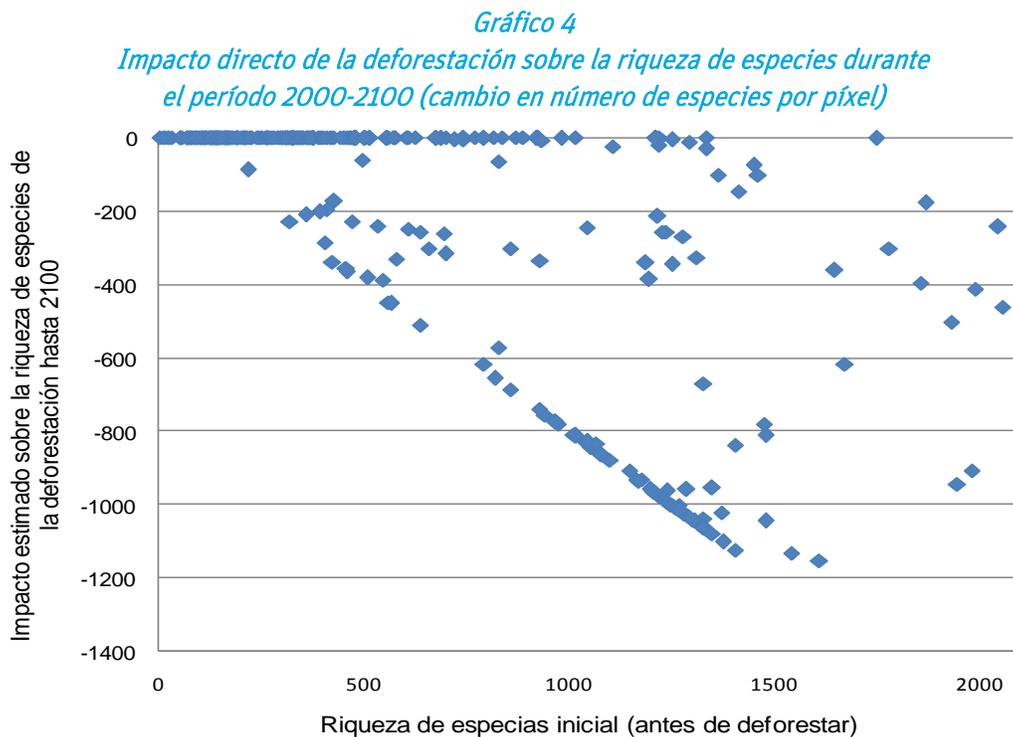
Para estimar el efecto directo de la deforestación ( $DEF$ ) sobre la Riqueza Absoluta de Especies ( $RAE$ ) en el municipio  $i$ , suponemos que la deforestación total de un municipio causa la pérdida del 80% de su nivel de riqueza original de especies,<sup>7</sup> mientras que un nivel de deforestación menor de 100% causa una pérdida proporcionalmente más baja:

$$\Delta RAE_i = -0.8 \cdot DEF_i \cdot RAE_{0,i}$$

<sup>7</sup> El parámetro del 80% es un supuesto que refleja que aun con un 100% de deforestación, siempre quedan algunas especies resistentes. Para ilustrar esto, imaginamos la transformación más drástica que se pueda hacer: crear un centro urbano donde antes había bosque. Suponiendo un nivel inicial de Riqueza Absoluta de Especies ( $RAE$ ) de 2000 por píxel, el parámetro del 80% implica que quedarían alrededor de 400 especies de animales y plantas en una ciudad tropical cubriendo 10 km<sup>2</sup>, lo cual parece razonable.

Esto es una simplificación de los cambios complejos que ocurren cuando los humanos transforman áreas naturales para usos antropogénicos. Sin embargo, para los propósitos de un estudio sobre los impactos del cambio climático es suficiente con una aproximación cruda. Es importante notar que no se sugiere que se pierda el 80% de las especies en el municipio si se deforesta el 100% del bosque, sino que la riqueza o abundancia de especies promedio en cada píxel se reduce en un 80%.<sup>8</sup>

El impacto calculado bajo este supuesto se ilustra en el gráfico 4 para cada municipio graficado contra su nivel de riqueza de especies original. Los municipios que se encuentran en la línea de cero impacto son los que no van a deforestar nada hasta 2100. En la mayoría de los casos esto se debe a que no tienen una cantidad de bosque significativa para deforestar o a sus bosques están naturalmente protegidos por la topografía del municipio.



Fuente: Elaboración propia.

<sup>8</sup> Lo que es relevante para el propósito de este estudio no es la existencia de una especie, sino la abundancia de la misma, porque solamente especies abundantes pueden brindar beneficios sustanciales a la población local. Por ejemplo, Bolivia no sería el primer exportador del mundo de castañas, si solamente tuviese un par de árboles *Bertholletia excelsa* en una esquina de un municipio. Para brindar beneficios económicos se necesitan cientos de miles de estos árboles distribuidos en áreas grandes.

Los municipios que se encuentran en la línea diagonal son los que van a deforestar el 100% de su bosque hasta 2100 (de acuerdo con las proyecciones elaboradas en el anexo), y que por eso van a perder cerca del 80% de su abundancia de especies original de acuerdo con nuestros cálculos.

El cuadro 4 muestra las pérdidas promedio por departamento. Esta simulación indica que Beni y Santa Cruz perderían más de la mitad de su biodiversidad original debido a la deforestación masiva que se espera hasta 2100. Oruro y Potosí no perderían nada porque no hay deforestación significativa en estos departamentos. Dado el gran tamaño de Beni y Santa Cruz, a nivel nacional se perdería un poco más de la mitad de la biodiversidad por la deforestación prevista hasta 2100 en el escenario base (sin esfuerzos para limitar la deforestación). Esto no necesariamente significa la extinción total de la mitad de nuestras especies, ya que muchas de ellas podrían sobrevivir en áreas naturales remanentes en poblaciones reducidas, pero sí significaría la extinción local de muchas especies.

*Cuadro 4*  
*Impactos de la deforestación sobre la riqueza de especies hasta 2100, por departamento en Bolivia*

Departamento	Riqueza de especies inicial (número de especies por píxel)	Impacto de la deforestación prevista hasta 2100 (cambio porcentual en el número de especies por píxel)
Beni	1.252	-65
Chuquisaca	460	-11
Cochabamba	943	-38
La Paz	1110	-42
Oruro	113	0
Pando	1290	-43
Potosí	93	0
Santa Cruz	751	-72
Tarija	473	-42
<b>Bolivia</b>	<b>814</b>	<b>-57</b>

Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por el área de cada municipio.

Una vez establecida la línea base, en la siguiente sección se estiman los impactos netos del cambio climático sobre la biodiversidad, tomando en cuenta la deforestación previa.

## 6.2 Simulación de impactos directos del cambio climático sobre la biodiversidad en el largo plazo (tomando en cuenta la deforestación)

A continuación se explica el procedimiento para estimar el impacto neto del cambio climático tomando en cuenta la deforestación. Primero, se calcula el porcentaje de biodiversidad que queda en cada municipio después de haber deforestado lo previsto hasta 2100, de acuerdo con las estimaciones en la subsección previa. Después se multiplica este porcentaje por el impacto del cambio climático estimado en la sección previa.

El cuadro 5 muestra los impactos agregados a nivel departamental y nacional. Después de un siglo de deforestación y cambio climático, el nivel de biodiversidad en el país se habría reducido en un 60%. La deforestación sería culpable de la gran mayoría (95%) de esta reducción a nivel nacional.

Sin embargo, en los departamentos altiplánicos de Potosí y Oruro, el cambio climático sería responsable del 100% de la reducción en biodiversidad. Potosí, con su bajo nivel de biodiversidad, es particularmente vulnerable al cambio climático, y de acuerdo con las simulaciones realizadas, podría perder prácticamente toda su biodiversidad debido al aumento en la variabilidad de temperaturas y a la reducción de la precipitación prevista por el PRECIS.

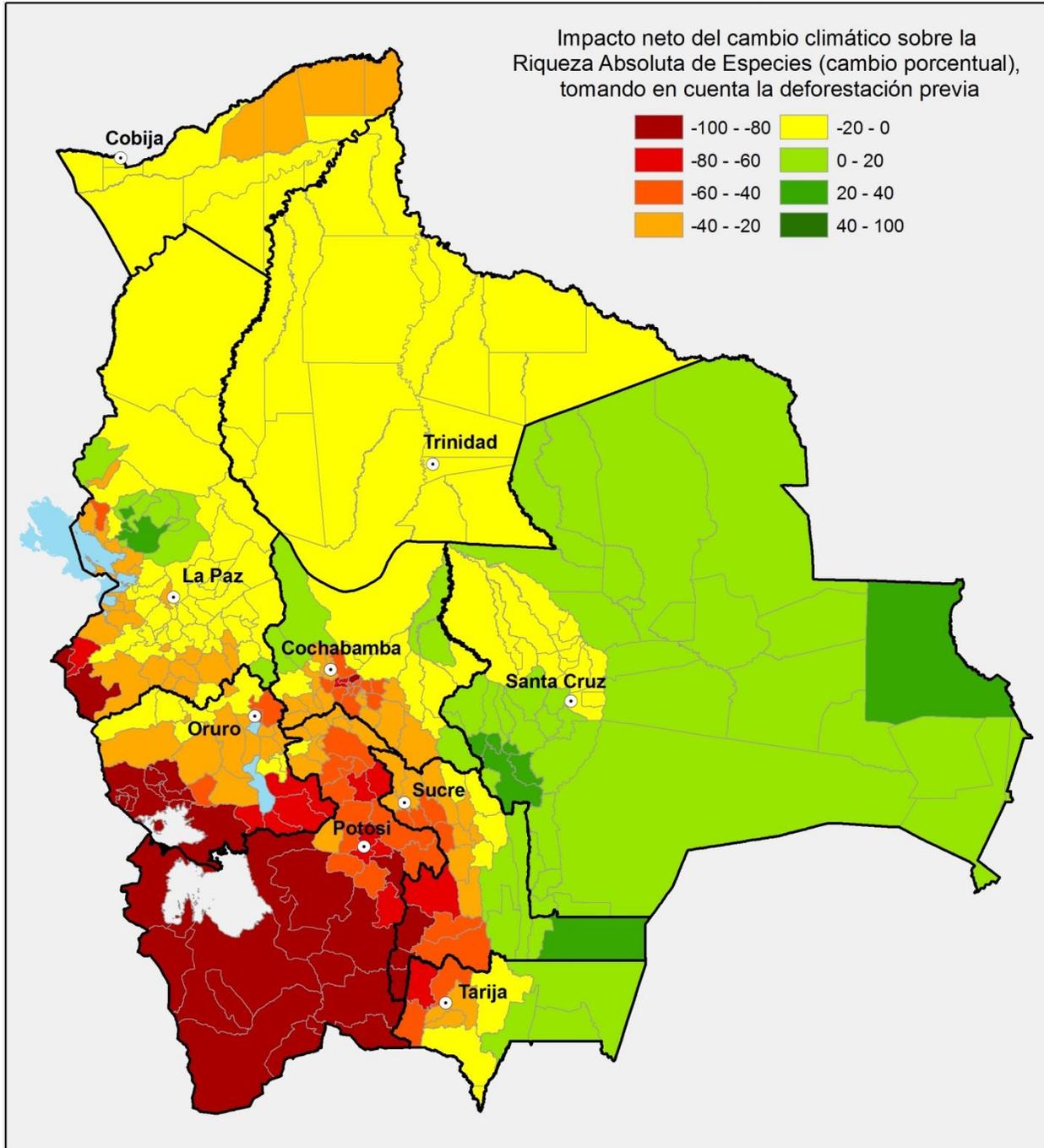
*Cuadro 5*  
*Impactos sobre la RAE (número de especies por píxel), 1990-2100,*  
*bajo el escenario A2, por departamento en Bolivia*

Departamento	Riqueza de especies inicial (número de especies por píxel)	Impacto de la deforestación (cambio porcentual en el número de especies por píxel)	Impacto neto del cambio climático (tomando en cuenta la deforestación previa) (cambio porcentual en número de especies por píxel)
Beni	1252	-65	-1
Chuquisaca	460	-11	-18
Cochabamba	943	-38	-5
La Paz	1110	-42	-3
Oruro	113	0	-51
Pando	1290	-43	-9
Potosí	93	0	-100
Santa Cruz	751	-72	+3
Tarija	473	-42	-7
<b>Bolivia</b>	<b>814</b>	<b>-57</b>	<b>-3</b>

Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por el área de cada municipio.

*Mapa 5*  
*Impacto neto del cambio climático sobre la RAE en Bolivia (cambio porcentual)*  
*en el escenario A2 (tomando en cuenta la deforestación previa)*



Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 6 muestra los impactos netos atribuibles al cambio climático previsto hasta 2100 por eco-región. Se puede notar que las áreas con puna y vegetación alto andina son las más vulnerables, mientras que los otros tipos de ecosistemas son más resistentes al cambio climático. Incluso, el Chaco, el Cerrado Chaqueño y el

Bosque Seco Chiquitano podrían ver aumentos significativos en la biodiversidad por los incrementos previstos en la precipitación en estas áreas.

*Cuadro 6*  
*Impactos del cambio climático del escenario A2 sobre la RAE*  
*(tomando en cuenta la deforestación), por eco-región (cambio porcentual en número de especies por píxel)*

Ecosistema dominante	Riqueza de especies inicial (número de especies por píxel)	Impacto del cambio climático previsto hasta 2100 (cambio porcentual)
Puna y vegetación alto andina	209	-43
Bosque montañoso	1194	-2
Chaco y Chiquitano	513	+6
Sabanas	1178	-1
Bosque inundable	1229	0
Bosque amazónico	1112	-3
<b>Bolivia</b>	<b>814</b>	<b>-3</b>

Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por el área de cada municipio.

## 7 Simulación de impactos de la fertilización de CO<sub>2</sub> sobre la biodiversidad

Hasta ahora hemos ignorado los efectos directos del aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> sobre el nivel de riqueza de especies, por la simple razón de que no existe variación en la concentración de CO<sub>2</sub> entre municipios, y por eso no podíamos incluir dichos efectos en el modelo estadístico.

Sin embargo, dado que la fertilización de CO<sub>2</sub> tiende a aumentar la productividad primaria neta de la vegetación natural, es posible que también afecte el nivel de biodiversidad.

En esta sección, primero analizamos la relación entre la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y el nivel de productividad primaria neta, y después examinamos la relación entre esta última y el nivel de biodiversidad.

### 7.1 Fertilización de CO<sub>2</sub> y su efecto sobre la productividad primaria neta

Mientras que los humanos y los animales necesitan oxígeno para respirar y vivir, las plantas necesitan CO<sub>2</sub>. A través del proceso de fotosíntesis utilizan el CO<sub>2</sub>, junto con el agua, para crear celulosa, el componente principal de todas las plantas. Para crear sustancias más complicadas, como proteínas, también necesitan nitrógeno, potasio, sulfuro y muchos otros elementos, pero CO<sub>2</sub> y el agua siempre son esenciales. Sin embargo, mientras que el oxígeno es relativamente abundante (una de cada cinco moléculas en la atmósfera es oxígeno), el CO<sub>2</sub> es muy escaso (una por cada 2.500 moléculas).

Una de las maneras en que una planta puede captar más CO<sub>2</sub>, es abriendo sus estomas<sup>9</sup> (“bocas” en las hojas), pero esto viene al costo de perder más agua por respiración. Esto puede ser aceptable en lugares húmedos, con abundante disponibilidad de agua, pero no en lugares áridos. Por eso, las plantas en áreas relativamente áridas y con bajos niveles de CO<sub>2</sub> han desarrollado un sistema de captación de carbono más eficiente (fijan el CO<sub>2</sub> por la vía de cuatro carbonos [C4] en vez de la de 3 carbonos [C3]). Entre las plantas C4, se encuentran el maíz y la caña de azúcar, y otros cereales importantes para la alimentación humana. En términos geológicos, estos cultivos se han desarrollado en forma relativamente reciente y son optimizados para el clima actual de escasez de CO<sub>2</sub> y agua. En cambio, la gran mayoría de las plantas (el 95% de las especies existentes) se ha desarrollado en épocas con mayor disponibilidad de CO<sub>2</sub> y agua que ahora, y por eso se siente restringida en el acceso a sus elementos vitales. Esto explica por qué la gran mayoría de los cultivos (y plantas en general) responde positivamente a experimentos que aumentan la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.<sup>10</sup>

Para cuantificar el efecto de fertilización de CO<sub>2</sub> sobre la productividad primaria neta, usamos la ecuación de Bacastov y Keeling (1973):

$$PPN(C_{2100}) = PPN(C_{2000}) \left[ 1 + \gamma \ln \left( \frac{C_{2100}}{C_{2000}} \right) \right],$$

Donde  $PPN(C_{2100})$  es la productividad primaria neta a los niveles de CO<sub>2</sub> ambientales esperados a final de este siglo ( $C_{2100}$ ), mientras que  $PPN(C_{2000})$  es el nivel de productividad primaria neta al principio del siglo bajo los niveles de CO<sub>2</sub> encontrados en ese momento ( $C_{2000}$ ). El parámetro  $\gamma$  es el “factor de crecimiento”, el cual tiende a variar de lugar a lugar, dependiendo de la escasez de otros insumos complementarios (principalmente luz, nitrógeno y agua). La relación entre concentración de CO<sub>2</sub> y PPN es logarítmica, lo que implica un efecto decreciente (al principio del siglo un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> de 10 ppm tendría un efecto mucho mayor sobre la PPN que el mismo aumento al final del siglo, cuando la concentración de CO<sub>2</sub> es mayor.)

Alexandrov, Oikawa y Yamagata (2003) estiman factores de crecimiento de 0,14 para bosques tropicales y de 1,15 para tundra. La explicación del bajo factor de crecimiento encontrado para bosques tropicales es que la principal restricción para el crecimiento en este ecosistema es la escasez de luz debajo de la canopea cerrada, y el aumento en CO<sub>2</sub> no hace nada para aliviar esta restricción. En cambio, en áreas áridas con vegetación abierta, las principales restricciones para el crecimiento son la escasez de CO<sub>2</sub> y de agua, y la fertilización de CO<sub>2</sub> funciona para aliviar ambas restricciones. Para matorrales y áreas de pasto natural los valores encontrados son intermedios: entre 0,43 y 0,48.

En el escenario A2 la concentración de CO<sub>2</sub> aumentará de 360 ppm hasta 800 ppm durante este siglo, mientras que en el escenario B2 solamente aumentará hasta 600 ppm al final del siglo. Usando la ecuación de Bacastov y Keeling, con parámetros de Alexandrov, se observan los aumentos en productividad primaria neta que se presentan en el cuadro 7.

<sup>9</sup> Los estomas son los pequeños poros de las plantas, que se encuentran localizados en la superficie de sus hojas. Son los principales participantes en la fotosíntesis, ya que por ellos transcurre el intercambio gaseoso mecánico, es decir que en este lugar sale el oxígeno y entra el CO<sub>2</sub>. Sin embargo, su apertura también provoca la pérdida de agua de la planta en forma de vapor a través del proceso denominado transpiración. Por esto, la apertura o cierre de los estomas está muy finamente regulado en la planta por factores ambientales como la luz, la concentración de CO<sub>2</sub> y la disponibilidad de agua. Con mayores niveles de CO<sub>2</sub>, la planta no necesita abrir tanto sus estomas, por lo que se reduce la pérdida de agua por transpiración.

<sup>10</sup> Véase [http://www.co2science.org/data/plant\\_growth/photo/photo\\_subject.php](http://www.co2science.org/data/plant_growth/photo/photo_subject.php), donde hay una base de estudios acerca del efecto de la fertilización de CO<sub>2</sub> para diferentes especies.

*Cuadro 7*  
*Impacto de los cambios en la fertilización de CO<sub>2</sub> (2000-2100)*  
*sobre la productividad primaria neta, por eco-región, Bolivia*

Ecosistema dominante	Productividad Primaria Neta (PPN) 2000 (kg/ha/año)	Factor de crecimiento	Aumento PPN, 2000-2100 (%)	
			A2	B2
Puna y vegetación alto andina	9,38	0,43	34	22
Bosque montañoso	10,21	0,26	21	13
Chaco y Chiquitano	11,48	0,26	21	13
Sabanas	8,59	0,48	38	25
Bosque inundable	11,95	0,14	11	7
Bosque amazónico	18,90	0,14	11	7
Bolivia	11,67	0,32	25	16

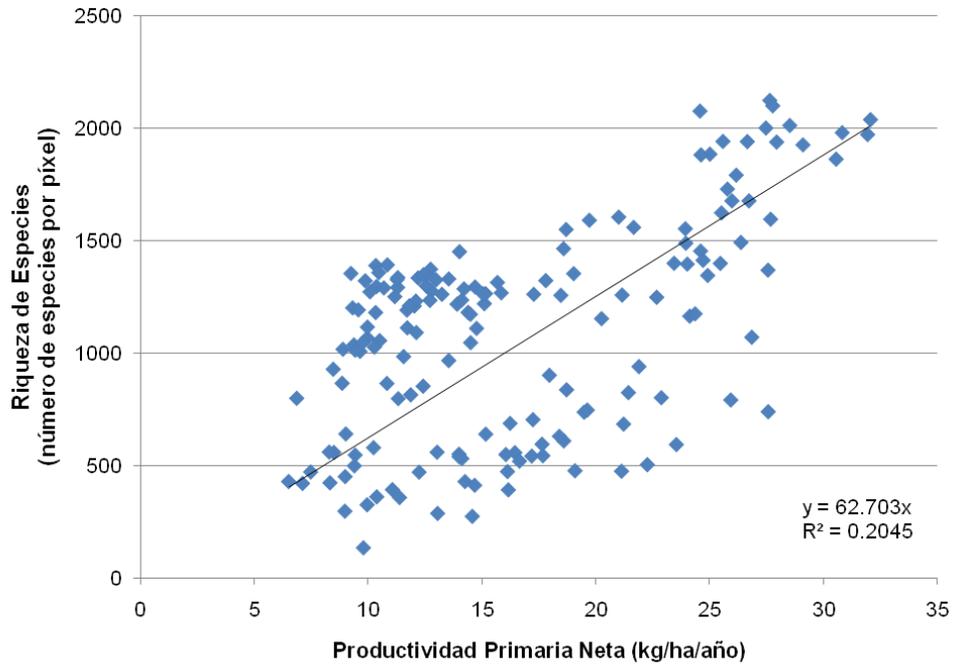
Fuente: Estimación propia.

Es decir, en el escenario más extremo (A2), se espera que la fertilización de CO<sub>2</sub> cause un aumento en la productividad primaria neta de las vegetaciones naturales de entre un 11% y un 38%, y en el escenario B2, se espera que esas cifras se sitúen entre un 7% y un 25%. Este aumento podría tener un efecto positivo sobre la biodiversidad, como veremos en la siguiente subsección.

## 7.2 Productividad primaria neta y biodiversidad

En general, se observa una correlación positiva entre productividad primaria neta y riqueza de especies (véase el gráfico 5 que muestra la relación observada al nivel de los municipios de Bolivia). Sin embargo, la explicación para esta relación no es clara. Puede ser que la productividad primaria neta afecte la riqueza de especies; que esta última afecte a la primera, o que factores abióticos comunes (como clima y topografía) afecten a las dos simultáneamente (Costanza et al., 2007).

*Gráfico 5*  
*Relación entre productividad primaria neta y riqueza de especies en Bolivia, a nivel municipal, 2000*



Fuente: Elaboración propia.

En este documento no podemos resolver el debate ecológico sobre la dirección de la causalidad, pero sí podemos estimar la relación empírica entre productividad primaria neta y riqueza de especies, controlando por factores climáticos y topográficos.

Los resultados de una regresión a nivel municipal para Bolivia indican que aun cuando controlamos por factores climáticos y topográficos, la productividad primaria neta tiene una relación fuerte y positiva con la riqueza de especies (véase el cuadro 8).

**Cuadro 8**  
*Estimación del impacto de la productividad primaria neta sobre la riqueza de especies, controlando por factores climáticos y topográficos, Bolivia 2000*

Variable explicativa	Coeficiente estimado	
Constante	475,09	(3,17) ***
Temperatura promedio	-3,99	(-0,78)
Precipitación promedio	-448,76	(-1,64)
Precipitación promedio <sup>2</sup>	1644,60	(4,47) ***
Precipitación promedio <sup>3</sup>	-826,77	(-4,50) ***
Precipitación promedio <sup>4</sup>	116,33	(3,94) ***
Desviación estándar de temperaturas	-279,98	(-4,74) ***
Desviación estándar de precipitación	78,77	(3,19) ***
Topografía	-9,36	(-6,63) ***
Topografía <sup>2</sup>	0,12	(8,06) ***
Altura	-0,06	(-2,53) **
Productividad primaria neta	18,02	(8,19) ***
# obs = 327	R <sup>2</sup> = 0,8955	

Fuente: Estimación propia.

Notas: Los números entre paréntesis son estadísticas t.

\* Significativo al 10%, \*\* significativo al 5%, \*\*\* significativo al 1%.

### 7.3 Fertilización de CO<sub>2</sub> y su efecto sobre la biodiversidad

Usando los resultados de las anteriores dos subsecciones podemos estimar el posible efecto de la fertilización de CO<sub>2</sub> sobre el nivel de biodiversidad en cada municipio, usando la siguiente fórmula:

$$RAE_{i,cf} = RAE_{i,sf} + \delta \cdot PPN_{i,C2000} \cdot \gamma_i \cdot \ln\left(\frac{C_{2100}}{C_{2000}}\right)$$

donde  $RAE_{i,cf}$  es la Riqueza Absoluta de Especies en el municipio  $i$  tomando en cuenta la fertilización de CO<sub>2</sub> y  $RAE_{i,sf}$  es lo mismo sin tomar en cuenta la fertilización de CO<sub>2</sub>,  $\delta$  es el coeficiente de productividad primaria neta en la regresión anterior (es decir  $\delta = 18.025$ ),  $PPN_{i,C2100}$  es la productividad primaria neta en el municipio  $i$  a principios de siglo,  $\gamma_i$  es el factor de crecimiento para el municipio  $i$ , y  $C_{2100}$  y  $C_{2000}$  es la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera al final y al principio del siglo, respectivamente.

*Cuadro 9*  
*Impacto de fertilización de CO<sub>2</sub> sobre la riqueza de especies en Bolivia*  
*(cambio porcentual en el número de especies por píxel), 1990-2100,*  
*bajo el escenario A2, por departamento*

Departamento	Riqueza de especies inicial (número de especies por píxel)	Impacto de la fertilización de CO <sub>2</sub> (cambio porcentual en el número de especies por píxel)
Beni	1,252	+3
Chuquisaca	460	+11
Cochabamba	943	+4
La Paz	1,110	+4
Oruro	113	+35
Pando	1,290	+3
Potosí	93	+73
Santa Cruz	751	+6
Tarija	473	+9
Bolivia	814	+6

Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por el área de cada municipio.

#### 7.4 Simulación de los impactos finales del cambio climático sobre la biodiversidad, tomando en cuenta la deforestación y los impactos de la fertilización de CO<sub>2</sub>

Con los resultados de la sección anterior, podemos ajustar los resultados que se presentan en el mapa 5, para incluir el efecto positivo de la fertilización de CO<sub>2</sub>.

*Cuadro 10*

*Impactos del cambio climático total sobre la RAE en Bolivia (cambio porcentual en el número de especies por píxel), 1990-2100, bajo el escenario A2, por departamento*

Departamento	Riqueza de especies inicial (número de especies por píxel)	Impacto de la deforestación (cambio porcentual en el número de especies por píxel)	Impacto total del cambio climático (tomando en cuenta la deforestación previa y la fertilización de CO <sub>2</sub> ) (cambio porcentual en el número de especies por píxel)	Cambio en la riqueza de especies causado por deforestación, cambio climático y fertilización de CO <sub>2</sub> , con respecto al año 2000 (porcentaje)
Beni	1.252	-65	+2	-63
Chuquisaca	460	-11	-7	-18
Cochabamba	943	-38	-1	-39
La Paz	1,110	-42	+1	-41
Oruro	113	0	-16	-16
Pando	1.290	-43	-6	-49
Potosí	93	0	-41	-41
Santa Cruz	751	-72	+9	-62
Tarija	473	-42	+2	-40
Bolivia	814	-57	+2	-54

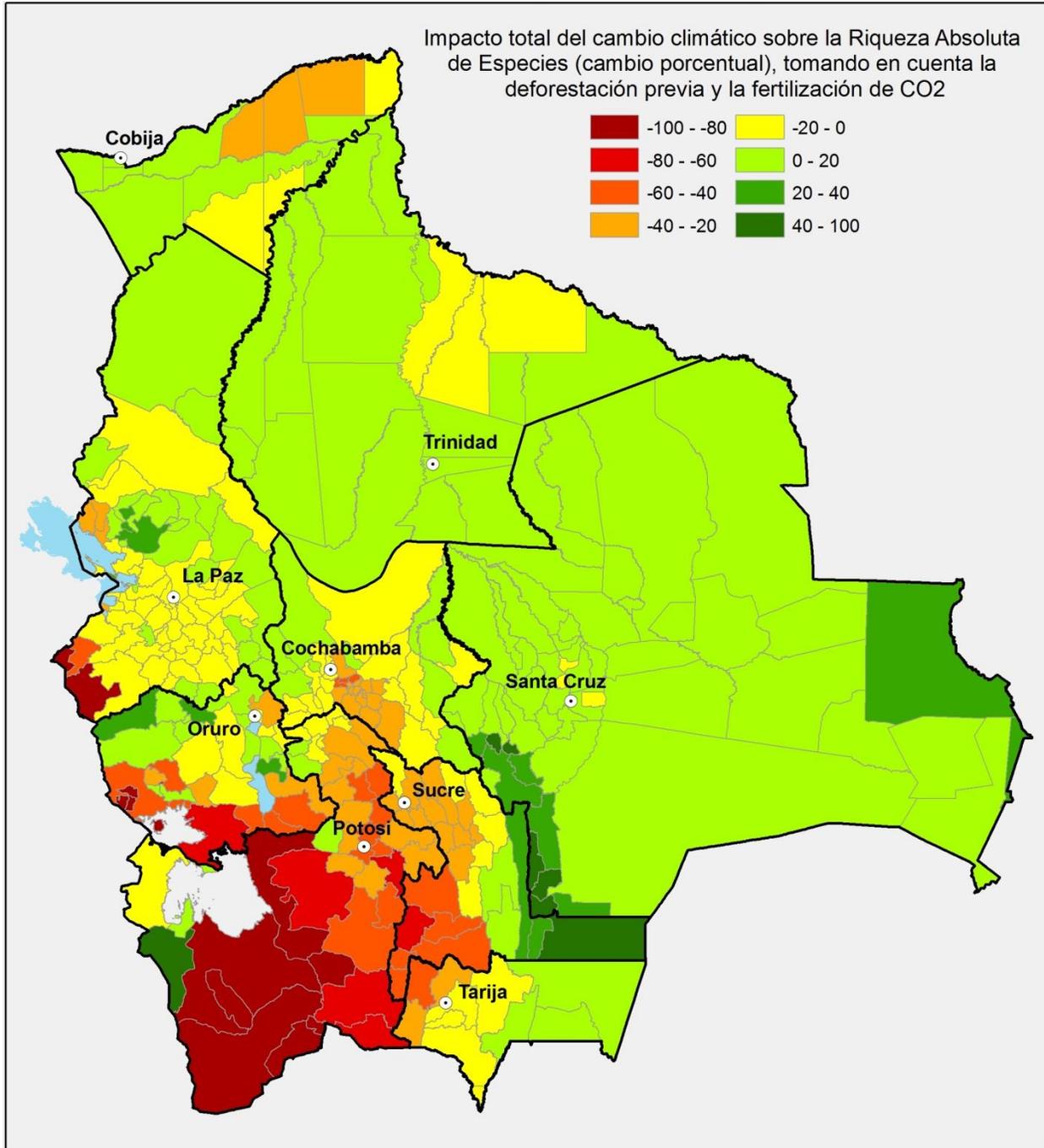
Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por el área de cada municipio.

El cuadro 10 muestra que el impacto del cambio climático sobre la biodiversidad varía enormemente de lugar a lugar. En el departamento de Santa Cruz, se podrían esperar aumentos en la biodiversidad de hasta un 9%, debido al mayor nivel de precipitación que el modelo PRECIS prevé en este departamento y la fertilización de CO<sub>2</sub>, mientras que en el departamento de Potosí se podría perder hasta un 41% de la biodiversidad, aun tomando en cuenta que este es el departamento que más se beneficiaría gracias a la fertilización de CO<sub>2</sub>.

Mapa 6

Impacto total del cambio climático en el escenario A2 sobre la RAE en Bolivia (cambio porcentual) (tomando en cuenta la deforestación y la fertilización de CO<sub>2</sub>)



Fuente: Elaboración propia.

Por último, el cuadro 11 muestra los impactos totales atribuibles al cambio climático previsto hasta 2100 por eco-región. Se puede notar que las áreas con puna y vegetación alto andina son las más vulnerables, mientras que los otros tipos de ecosistemas son más resistentes al cambio climático. Incluso, el Chaco, el Cerrado Chaqueño y el Bosque Seco Chiquitano podrían ver aumentos significativos en la biodiversidad debido a los cambios climáticos previstos por el modelo PRECIS en estas áreas.

**Cuadro 11**  
*Impactos del cambio climático total del escenario A2 sobre la RAE (tomando en cuenta la deforestación y la fertilización de CO<sub>2</sub>), por eco-región*

Ecosistema dominante	Riqueza de especies inicial (número de especies por píxel)	Impacto del cambio climático previsto hasta 2100 (cambio porcentual en el número de especies por píxel)
Puna y vegetación alto andina	209	-14
Bosque montañoso	1.194	+1
Chaco y Chiquitano	513	+17
Sabanas	1.178	+2
Bosque inundable	1.229	+2
Bosque amazónico	1.112	0
Bolivia	814	+2

Fuente: Estimación propia.

Nota: Promedios ponderados por el área de cada municipio.

## 8 Implicaciones económicas de la pérdida de biodiversidad debida al cambio climático

Aunque es difícil poner un valor económico en algo tan complejo como nuestra biodiversidad, en esta sección se procura estimar las pérdidas económicas que sufriríamos debido a las pérdidas de biodiversidad que el cambio climático podría ocasionar durante el resto de este siglo.

### 8.1 Valuación de la biodiversidad

En esta sección se procede a hacer un análisis económico de los efectos del cambio climático sobre nuestra biodiversidad. El análisis será necesariamente crudo, ya que solamente se cuenta con información sobre el número de especies, y no con información específica sobre la composición de la comunidad. Es decir: una paloma y un nogal de 100 años son tratados de igual manera, aunque claramente el nogal podría crear ingresos mucho más altos que la paloma. Por otra parte, hay muchos valores de la biodiversidad que no se pueden capturar usando valores de “uso” porque hay valores de existencia, culturales, etc. que son difíciles, sino imposibles, de cuantificar en una manera económica.

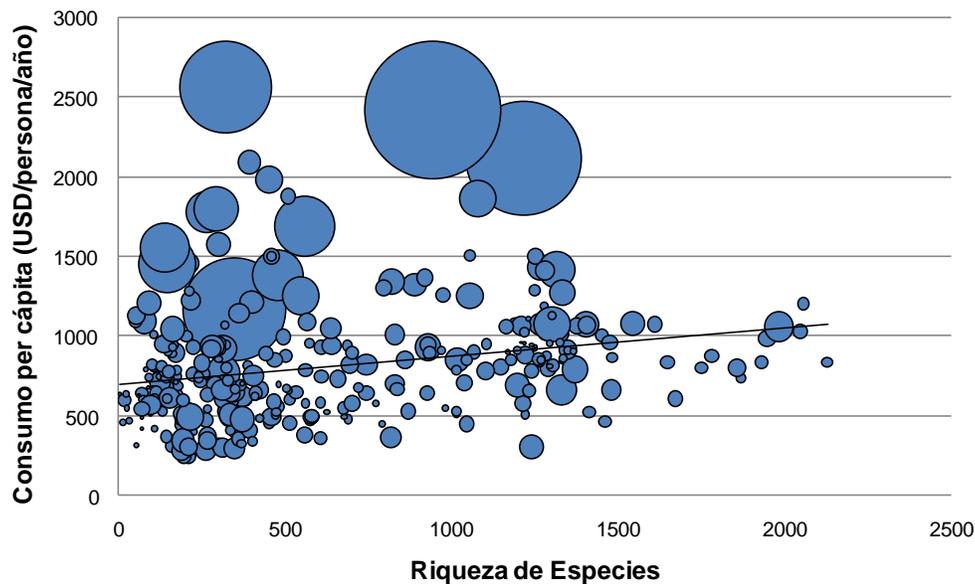
Aun así se pueden identificar relaciones generales que se pueden usar para hacer una evaluación económica.

Primero observamos (gráfico 6) que existe una relación positiva entre riqueza de especies y nivel de ingresos (medido a través del consumo per cápita calculado por PNUD (2004)) a nivel municipal ( $\rho = 0,26$ ), y que esta relación positiva es particularmente fuerte en municipios rurales ( $\rho = 0,38$ ).

Hay varias posibles explicaciones para esta relación positiva. Primero, en muchas áreas rurales, la caza y la pesca contribuyen de manera importante al consumo de alimentos, y la población usa la vegetación local para materiales de construcción, medicina, alimentos, ceremonias, etc. (Boom, 1987). Machicado, Muriel y Jemio (2010) analizan los datos de la Encuesta de Hogares 2003-04 de Bolivia para calcular la contribución de la biodiversidad al consumo de los hogares, y observan que el acceso a carne de monte, pesca, leña, madera, frutas, etc., aumenta en promedio el consumo total de las familias en un 19,8% para todas las familias que recolectan estos productos, y que este porcentaje es mayor en el área rural, donde se aprecia un incremento del 21,5%, cifra que se eleva hasta el 36,7% en el caso de las familias ubicadas en los Llanos de Bolivia. Por eso, una reducción en la biodiversidad podría tener un efecto adverso muy directo en el consumo de los habitantes.

Segundo, la biodiversidad desempeña un rol clave en la agricultura a través de los servicios de polinización y control natural de plagas, y por la contribución que realiza a la variación genética en los cultivos, aunque también puede tener efectos negativos sobre los mismos (plagas y enfermedades). Además, la biodiversidad puede ser clave para ciertas actividades económicas, como el ecoturismo, la recolección de castañas y otras. Finalmente, la biodiversidad brinda servicios ambientales esenciales, como la regulación del suministro de agua, el control de la erosión o la revitalización de suelos, lo que puede tener un efecto indirecto sobre el nivel de ingresos y consumo de los habitantes.

**Gráfico 6**  
*Relación entre riqueza de especies e ingreso  
(consumo per cápita)*



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El tamaño de las burbujas indica el tamaño de la población en cada municipio.

Un análisis econométrico muestra que la relación es la misma a nivel nacional y a nivel rural,<sup>11</sup> así que podemos usar la misma elasticidad para toda Bolivia. En promedio, un aumento del 10% en la riqueza de las especies estaría relacionado con un incremento del 1,15% en el consumo per cápita (cuadro 12).

*Cuadro 12*  
*Estimación de la elasticidad entre riqueza de especies y consumo per cápita en el largo plazo en Bolivia*

Variable explicativa	Coeficiente estimado
Constante	5,92 (45,54) ***
Ln (riqueza de las especies)	0,12 (5,41) ***
# obs = 327	R <sup>2</sup> = 0,080

Fuente: Estimación propia.

Notas: La variable dependiente es el logaritmo del consumo per cápita en 2001.

Los números entre paréntesis son estadísticas *t*.

\* Significativo al 10%, \*\* significativo al 5%, \*\*\* significativo al 1%.

## 8.2 Costo económico de la pérdida de biodiversidad ocasionado por el cambio climático (tomando en cuenta la deforestación previa y la fertilización de CO<sub>2</sub>)

Ahora se utiliza el cambio porcentual en la riqueza de especies causada por el cambio climático (mapa 4), junto con la elasticidad estimada en el cuadro 12, para calcular cómo los cambios en la riqueza de especies podrían traducirse en cambios en los niveles de consumo per cápita en cada municipio.

Debido a que la población boliviana está concentrada en los departamentos en donde se considera que habrá reducciones en biodiversidad, a nivel nacional se prevé que el cambio climático causaría una pérdida del 0,9% del producto interno bruto (PIB) a finales del siglo XXI. Los departamentos más adversamente afectados serían Potosí y Chuquisaca, justamente los departamentos más pobres.

Para traducir estos porcentajes en números monetarios, se asume que las pérdidas porcentuales aumentan linealmente desde 2000 hasta 2100. Esto es una simplificación, que supone que aun pequeños cambios climáticos pueden tener impactos sobre la biodiversidad, porque existen especies que son mucho más sensibles a los cambios climáticos que otras. Por ejemplo, las especies inusuales que se han adaptado a un nicho ecológico muy particular son más vulnerables a cambios climáticos que las especies abundantes y flexibles en sus requerimientos. Las especies poco móviles, como los árboles, también son más vulnerables que las especies más móviles, como las aves (Gitay et al., 2002).

<sup>11</sup> A nivel rural el coeficiente es 0,165 (*t* = 5,73), mientras que a nivel nacional es 0,115 (*t* = 5,41). El coeficiente es robusto a la inclusión de otras variables explicativas. Si se incluyen variables de educación, caminos y urbanización, el coeficiente de biodiversidad se reduce a 0,096 (*t* = 7,81), pero este no es estadísticamente diferente del resultado simple a nivel nacional.

*Cuadro 13*

*Costo económico de la pérdida de biodiversidad causado por los cambios climáticos a 2100 en Bolivia bajo el escenario A2, por departamento*

Departamento	Cambio en la riqueza de especies entre 2000 y 2100 atribuible al cambio climático (porcentaje)	Cambio del consumo per cápita (porcentaje)
Beni	+2	+0,3
Chuquisaca	-7	-2,8
Cochabamba	-1	-1,2
La Paz	+1	-0,9
Oruro	-16	-1,9
Pando	-6	+0,1
Potosí	-41	-4,8
Santa Cruz	+9	+1,1
Tarija	+2	-1,0
Bolivia	+2	-0,9

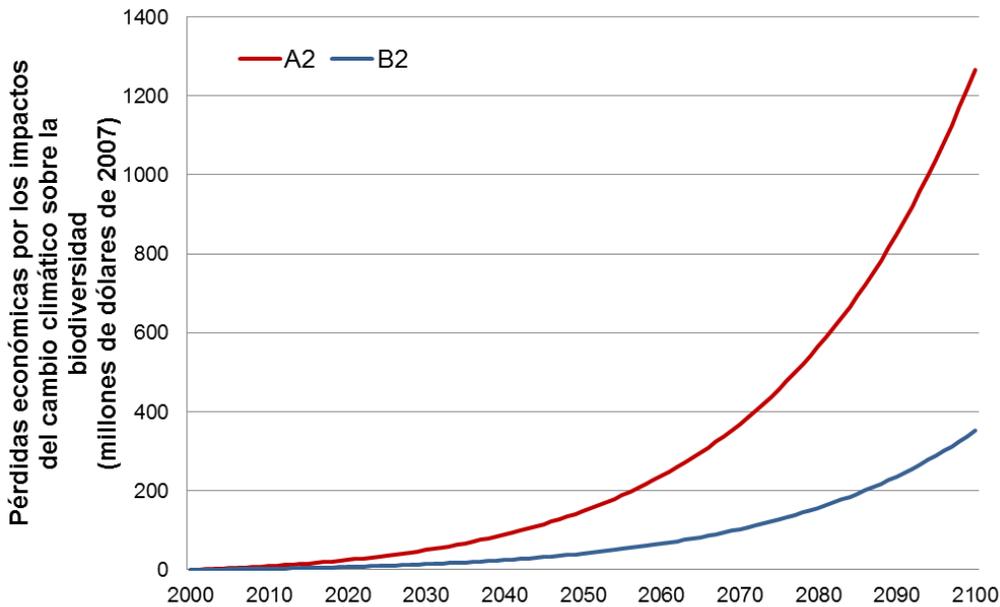
Fuente: Estimación propia.

Nota: La primera columna está calculada con promedios ponderados por el área de cada municipio, mientras que la segunda columna está calculada con promedios ponderados por la población en cada municipio en 2001.

El escenario base muestra que el consumo total de Bolivia aumentaría exponencialmente de US\$7.211 millones en 2000 a US\$138.628 millones en 2100 (ambos medidos en dólares de 2007) (véase Jemio et al. 2014). Si se aplican pérdidas de 0% en 2000, y se aumentan linealmente hasta 0,91% en 2100, se llega a las pérdidas anuales que se representan en el gráfico 7.

*Gráfico 7*

*Costos anuales de la pérdida de biodiversidad debida al cambio climático en Bolivia, 2100 (Escenarios A2 y B2)*



Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico también incluye las pérdidas calculadas de manera idéntica para el escenario B2, las cuales han sido estimadas en un 0,25% del consumo total para 2100.

En el escenario A2, las pérdidas económicas que Bolivia sufriría por las pérdidas en biodiversidad causadas por el cambio climático aumentarían exponencialmente hasta llegar a US\$1.267 millones en 2100, cifra correspondiente al 0,91% del consumo total del país. En el escenario climático menos drástico, el B2, las pérdidas llegarían a US\$352 millones en 2100, cifra correspondiente al 0,25% del consumo total del país. Vale la pena notar que las pérdidas no se distribuirían de manera igual en todo el país, sino que serían mucho más fuertes en el Altiplano, zona que experimentaría un proceso muy fuerte de desertificación.

Las pérdidas acumuladas se pueden representar como un valor neto presente, bajo diferentes supuestos acerca de la tasa de descuento (véase el cuadro 14). La suma simple de las pérdidas durante el siglo ascendería a cerca de US\$30.000 millones (medido en valores reales de 2007) para el escenario A2 y a cerca de US\$8.000 millones en el escenario B2. Sin embargo, dado que se espera que la población sea más rica en el futuro, y dado que la utilidad marginal del dinero es decreciente, se deben descontar valores futuros con una tasa de descuento positiva.<sup>12</sup> Si se aplicara una tasa de descuento del 2% (lo que corresponde más o menos a la tasa de crecimiento del PIB real per cápita en el largo plazo), se llegaría a un valor neto presente de las pérdidas de US\$16.000 millones para el escenario A2 y de US\$9.000 millones para el escenario B2. Esto correspondería al 50% y al 14% del PIB de Bolivia en 2007, respectivamente. Aun con una tasa de descuento muy alta, del 12%, se llegaría a un valor neto presente de las pérdidas de US\$85 millones y US\$24 millones, respectivamente, en los dos escenarios de cambio climático, en comparación con el escenario base.

*Cuadro 14*  
*Valor neto presente de las pérdidas económicas en biodiversidad debidas al cambio climático en Bolivia (millones de dólares de 2007)*

Escenario climático	Tasa de descuento (porcentaje)				
	0,5%	2%	4%	6%	12%
Escenario A2	20.099	6.504	1.748	602	85
Escenario B2	5.586	1.807	486	167	24

Fuente: Estimación propia.

## 9 Supuestos e incertidumbres

Existe mucha incertidumbre acerca de todos los resultados del presente estudio, y vale la pena recalcar los principales factores que contribuyen a ello.

Primero, existe incertidumbre en cuanto a los escenarios de cambios climáticos, especialmente en relación con la precipitación, donde hay poca concordancia entre los diferentes modelos climáticos. Aquí solamente se usa uno de los muchos modelos disponibles, lo que da una impresión irreal del nivel de confianza que se puede tener en estos escenarios.

Segundo, también existe incertidumbre sobre la distribución actual de especies en las diferentes partes del país, ya que la medida simplificada de biodiversidad fue estimada sobre la base de un número limitado de las

<sup>12</sup> No es obvio cuál es la tasa de descuento más apropiada para el propósito, por lo que presentamos resultados en un rango amplio para que el lector pueda escoger.

especies más fáciles de identificar, excluyendo todo tipo de insectos, hongos y bacterias, que también tienen funciones ecológicas muy importantes.

Tercero, existe incertidumbre en las relaciones entre factores climáticos y riqueza de especies. Como se puede ver en los gráficos 1 y 2 las relaciones no son muy fuertes, especialmente con la variabilidad de temperaturas, que resulta muy importante en las simulaciones. Con respecto a la precipitación existe una relación más fuerte y confiable, pero justamente los cambios en precipitación son los más inciertos.

Cuarto, el modelo de vulnerabilidad de la biodiversidad a cambios climáticos se ha estimado usando la variabilidad actual de especies a lo largo del territorio. Esta metodología puede causar un sesgo en los extremos. Por ejemplo, el modelo predice pérdidas de biodiversidad muy grandes en el Altiplano, pero en realidad las pocas especies que existen en este clima ya son muy resistentes a un clima adverso, y es probable que el modelo exagere la vulnerabilidad en esta área. Por otro lado, puede subestimar el efecto en áreas donde la biodiversidad está acostumbrada a un clima muy estable, como la selva amazónica.

Quinto, puede ser que la biodiversidad no responda de manera tan simple a cambios climáticos. Si una especie clave se pierde en un área, puede tener repercusiones para muchas otras especies. Si hay mucha interdependencia entre especies, la pérdida de una especie central puede causar la pérdida de otras 10, pero si hay competencia entre especies, el vacío que se crease por la pérdida de una de ellas podría llenarse con otras 10. En este estudio se trata a todas especies de igual manera, ignorando así que puede haber especies clave.

Sexto, el efecto de la fertilización de CO<sub>2</sub> sobre la biodiversidad es un tema muy poco estudiado en la literatura especializada. Aunque se sabe que la fertilización de CO<sub>2</sub> tiene un efecto beneficioso sobre la fotosíntesis y la producción primaria neta de las plantas verdes, no es obvio si tiene un efecto sobre el nivel de biodiversidad. Adams (2007) revisa la poca evidencia que existe acerca de los impactos sobre los insectos que viven en plantas fertilizadas con CO<sub>2</sub> extra. Hay evidencia de que los insectos comen más biomasa, tal vez porque las hojas contienen menos proteína cuando crecen a mayores niveles de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, las plantas también son más grandes, y resulta que la pérdida porcentual por insectos es menor. De hecho, parece que en general las plantas ganan la carrera, mientras que los insectos demuestran un crecimiento más lento y una mayor mortalidad (posiblemente por el cambio en la composición de su comida, que pasa a tener más carbohidratos y menos proteína). Esto significa que la diversidad de insectos podría sufrir, y dado que el mayor número de especies del mundo está compuesto por insectos herbívoros, esto posiblemente podría reducir la biodiversidad total a pesar del efecto positivo sobre el crecimiento de casi todos los tipos de plantas. En suma, se trata de un tema que necesitará mucha más investigación en el futuro.

Finalmente, la estimación del impacto económico de la pérdida de biodiversidad supone que la contribución de la biodiversidad seguirá siendo relativamente importante en Bolivia durante el resto del siglo, pero normalmente los países se vuelven menos dependientes de la caza, la pesca, el pastoreo, etc. cuando se tornan más ricos.

## 10 Oportunidades para reducir los impactos sobre bosques y biodiversidad

Como se ha demostrado en el presente estudio, hay dos grandes amenazas para la biodiversidad en Bolivia: la deforestación y el cambio climático. La deforestación es la mayor amenaza en las tierras bajas, mientras que el cambio climático lo es en las tierras altas de Bolivia.

En el caso de este país, la deforestación también es la mayor fuente de gases de efecto invernadero (GEI). Por eso, reducirla constituye nuestra principal oportunidad para contribuir a la mitigación del cambio climático y la protección de la megadiversidad de Bolivia.

La deforestación está vinculada con la expansión de la frontera agropecuaria, que tiene impactos positivos en términos de producción de alimentos, generación de empleo, ingresos y exportaciones, y reducción de la pobreza. Estos aspectos positivos tienen que ser balanceados contra los efectos negativos sobre la biodiversidad y los servicios ambientales locales y globales que brindan los bosques.

En general, si no se toman en cuenta los servicios ambientales locales y globales (las externalidades), los beneficios del bosque no pueden competir con los beneficios de las actividades agropecuarias, por lo que los dueños de tierras boscosas prefieren convertir dichas tierras en tierras agropecuarias (si tienen los recursos necesarios para convertirlas y cultivarlas).

Sin embargo, actualmente se están negociando mecanismos que podrían ayudar a equilibrar los incentivos, a través de compensaciones por servicios ambientales. Uno de los componentes más grande de los servicios globales de los bosques es el “secuestro” de carbono (véase, por ejemplo, Andersen et al., 2002), por lo que un mecanismo internacional de compensación por reducir la deforestación y la degradación podría convertirse en un mecanismo muy importante para disminuir la deforestación en Bolivia.

En promedio, cada hectárea deforestada aumenta el PIB del país en aproximadamente US\$1.000 (en valor neto presente con una tasa de descuento del 12, 67%<sup>13</sup>). De acuerdo con una encuesta de establecimientos en la frontera agrícola de Bolivia, más del 80% del área deforestada brinda beneficios mucho menores que el promedio, lo que significa que la deforestación se podría disminuir sustancialmente con un costo relativamente moderado en términos de reducción de la producción agropecuaria y de reducción en los ingresos de los hogares rurales (Andersen et al., 2009). Es fundamental que se convenza a quienes son menos productivos para que cambien sus actividades, pero hay que dejar que los más productivos sigan produciendo productos agropecuarios, o incluso que aumentan sus actividades muy productivas (Busch et al., de próxima publicación).

Para maximizar los beneficios de las actividades agropecuarias y al mismo tiempo los beneficios de conservación, sería recomendable elaborar (de manera consensuada) un mapa de prioridades de conservación (que toma en cuenta todos los beneficios de conservación y no solamente el “secuestro” de carbono) y un mapa de prioridades de desarrollo humano (que toma en cuenta el potencial agropecuario de los suelos y el acceso a los mercados), y superponer los dos para identificar tres tipos de áreas: 1) áreas que deberían ser protegidas, 2) áreas que merecen inversión pública para facilitar el desarrollo humano, y 3) áreas donde existe

---

<sup>13</sup> Esta es la tasa de descuento oficial para proyectos públicos de inversión.

un conflicto entre los dos objetivos y que necesitan incentivos especiales para resolver dicha situación. Un ejemplo de este tipo de análisis se encuentra en Andersen et al., (2006).

Entonces, los fondos internacionales que el país podría recaudar a través de reducciones de la deforestación, se deberían destinar a: 1) inversión pública en áreas que son prioritarias para el desarrollo humano, 2) protección legal y real de las áreas que brindan los mayores beneficios de conservación y 3) incentivos especiales en áreas de conflicto entre los dos objetivos. Estos incentivos especiales pueden incluir la inversión en actividades que aprovechen el ecosistema y lo dejen intacto, pero que al mismo tiempo generen ingresos (por ejemplo, el eco-turismo).

Con esta combinación de políticas se podría llegar a una situación en la que todos ganan y que beneficiaría a todos, incluidos:

- Los agricultores menos productivos (que recibirían ayuda para hacer algo que generaría más ingresos para ellos que la agricultura).
- Los agricultores más productivos (que recibirían inversión pública, por ejemplo: infraestructura de exportación, lo que les ayudaría a mejorar aún más su productividad).
- La biodiversidad (porque habría menos deforestación y más protección).
- Las poblaciones locales (porque habría una menor frecuencia de inundaciones y deslizamientos causados por la deforestación y un mayor acceso a productos y servicios de los bosques).
- El clima global (porque habría menores emisiones de CO<sub>2</sub>).
- Las finanzas públicas, porque el país recibiría pagos importantes por los servicios ambientales globales que ahora brindan de manera gratuita.

## 11 Conclusiones y recomendaciones

En este estudio se ha mostrado que los cambios climáticos previstos por el modelo PRECIS hasta el año 2100 podrían tener impactos muy fuertes para la biodiversidad en Bolivia, especialmente en el Altiplano donde se prevé un proceso de desertificación debido a la reducción de las precipitaciones y al aumento en variabilidad de las temperaturas sugerido por el modelo PRECIS.

En las tierras bajas, el cambio climático no es la mayor amenaza para la biodiversidad, ya que esta amenaza la constituye el avance de la frontera agrícola. En el escenario base se puede prever la deforestación de 33 millones de hectáreas durante el siglo XXI, lo que deja solamente una cuarta parte de nuestro bosque original.

En total, entre los procesos de deforestación y cambio climático, el nivel promedio de biodiversidad se reduciría a solamente un 46% del nivel original, de acuerdo con nuestras estimaciones. Esto no significa que el 54% de las especies se extingan, ya que muchas especies probablemente sobrevivirán en áreas protegidas, pero significa que, en promedio, habrá sustancialmente menos diversidad de especies en un área dada. En las tierras bajas, la deforestación es responsable de la gran mayoría de la pérdida de biodiversidad, mientras que en las tierras altas, donde no hay deforestación significativa, el cambio climático sería responsable del 100% de las fuertes reducciones en biodiversidad previstas.

Dado que existe una relación positiva entre el nivel de biodiversidad y el nivel de ingreso/consumo a nivel municipal, se pueden estimar las pérdidas económicas que las poblaciones locales sufrirían por la reducción en biodiversidad atribuible al cambio climático (excluidas las reducciones atribuibles a la deforestación). Los

cálculos indican pérdidas en el orden del 0,9% del PIB en 2100 a nivel nacional, pero de hasta el 4,8% en el departamento de Potosí.

Existe mucha incertidumbre en todos los pasos del análisis, y hay que interpretar los datos con cautela. El estudio constituye un primer intento de cuantificar los impactos económicos del cambio climático sobre la biodiversidad en Bolivia, y sirve para entender la magnitud del problema. Al compararse con los otros estudios sectoriales elaborados para el proyecto sobre la Economía del Cambio Climático en Bolivia, es evidente que el problema de pérdida de biodiversidad (desertificación) en el Altiplano es uno de los principales problemas del cambio climático, con profundas consecuencias para las poblaciones indígenas que dependen del pastoreo de camélidos en esta región.

## 12 Referencias

- Adams, J. 2007. *Vegetation Climate Interaction: How Vegetation Makes the Global Environment*. Nueva York: Springer-Praxis Books.
- Alexandrov, G. A., T. Oikawa e Y. Yamagata. 2003. "Climate Dependence of the CO<sub>2</sub> Fertilization Effect on Terrestrial Net Primary Production." *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 55B:669-675.
- Alves, L. M. 2007. Simulações da Variabilidade do Clima Presente sobre a América do Sul Utilizando um Modelo Climático Regional. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós- Graduação em Meteorologia. São José dos Campos: INPE.
- BID-y CEPAL. 2014. *La Economía del Cambio Climático en el Estado Plurinacional de Bolivia*. C.E. Ludeña, L. Sanchez-Aragon, C. de Miguel, K. Martínez, y M. Pereira (eds). Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 220 y Naciones Unidas LC/W.627.
- Andersen, L. E., C. W. J. Granger, E. J. Reis, D. Weinhold y S. Wunder. 2002. *The Dynamics of Deforestation and Economic Growth in the Brazilian Amazon*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Andersen, L. E., J. Escobar y J. C. Ledezma. 2009. "Escenarios de deforestación en Bolivia en base a escenarios socioeconómicos". La Paz, Bolivia: Oficina de Desarrollo Limpio.
- Andersen, L. E., J. C. Ledezma y M. Vargas. 2006. "Un mosaico de conservación, desarrollo humano y tensiones en el corredor Amboró-Madidi". Documento de Trabajo sobre el Desarrollo Nro. 04/2006. La Paz, Bolivia: Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo.
- Andersen, L. E., M. Ocampo y M. Vargas. 2006. "Conservación y desarrollo humano: un análisis dinámico-cuantitativo del corredor Amboró-Madidi". Documento de Trabajo sobre el Desarrollo Nro. 03/2006. La Paz, Bolivia: Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo.
- Andrade, M.F. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: Validación de Modelos Climáticos*. C.E. Ludeña y L. Sanchez-Aragon (eds), Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 184, Washington, DC.
- Bacastow, R. y C. D. Keeling. 1973. "Atmospheric Carbon Dioxide and Radiocarbon in the Natural Carbon Cycle: II. Changes from A.D. 1700–2070 as Deduced from a Geochemical Model." En: G. M. Woodwell y E. V. Pecan (eds.), *Carbon and the biosphere*, pp.86-135. Springfield: U.S. Department of Commerce.
- BID y CEPAL. 2014. *La Economía del Cambio Climático en el Estado Plurinacional de Bolivia*. C.E. Ludeña, L. Sanchez-Aragon, C. de Miguel, K. Martínez, y M. Pereira (eds). Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 220 y Naciones Unidas LC/W.627.
- Boom, B. M. 1987. "Ethnobotany of the Chácobo Indians, Beni, Bolivia." *Advances in Economic Botany* 4: 1-68.
- Bradshaw, C. J. A., N. S. Sodhi, K. S.-H. Peh y B.W. Brook. 2007. "Global Evidence that Deforestation Amplifies Flood Risk and Severity in the Developing World." *Global Change Biology*, 13: 1-17.
- Busch, J., R. Lubowski, F. Godoy, D. Juhn, K. Austin, J. Hewson, M. Steininger, M. Farid y F. Boltz. De próxima publicación. "Structuring National and Sub-National Economic Incentives to Reduce Emissions from Deforestation in Indonesia."
- Campari, J. S. 2005. *The Economics of Deforestation in the Amazon: Dispelling the Myths*. Cheltenham, UK & Northampton, MA: Edward Elgar Publishing.

- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2010. *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Síntesis 2010*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Costanza, R., B. Fisher, K. Mulder, S. Liu y T. Christopher. 2007. "Biodiversity and Ecosystem Services: A Multi-Scale Empirical Study of the Relationship between Species Richness and Net Primary Production." *Ecological Economics*, 61(2-3): 478-491
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall y I. J. Totterdell. 2000. "Acceleration of Global Warming due to Carbon-Cycle Feedbacks in a Coupled Climate Model." *Nature*, 408: 184-187. (doi:10.1038/35041539).
- Cox, P. M., R. A. Betts, M. Collins, P. P. Harris, C. Huntingford y C. D. Jones. 2004. "Amazonian Forest Die-Back under Climate-Carbon Cycle Projections for the 21st Century." *Theor. Appl. Climatol*, 78: 137-156. (doi:10.1007/s00704-004-0049-4).
- Derocher, A. E., N. J. Lunn e I. Stirling. 2004. "Polar Bears in a Warming Climate." *Integrative & Comparative Biology* 44(2):163-176.
- FAN (Fundación Amigos de la Naturaleza). 2005. Visión de conservación de la biodiversidad en el corredor Amboró-Madidi. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: Fundación Amigos de la Naturaleza.
- FAO (Fundación de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2003. *The State of the World's Forests 2003*. Roma: FAO.
- Gitay, H., A. Suárez, R. Watson y D. J. Dokken. 2002. "Cambio climático y biodiversidad". Documento técnico V del IPCC (abril).
- Harris, P. P., C. Huntingford y P. M. Cox. 2008. "Amazon Basin Climate under Global Warming: The Role of the Sea-Surface Temperature." *Phil. Trans. R. Soc. B*, 363:1753-59. (doi:10.1098/rstb.2007.0037).
- Hoegh-Guldberg, O, P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi y M. E. Hatzioles. 2007. "Coral Reefs under Rapid Climate Change and Ocean Acidification." *Science*, 318 (5857):1737-42.
- Huntingford, C., R. A. Fisher, L. Mercado, B. B. Booth, S. Sitch, P. P. Harris, P. M. Cox, C. D. Jones, R. A. Betts, Y. Malhi, G. R. Harris, M. Collins y P. Moorcroft. 2008. "Towards Quantifying Uncertainty in Predictions of Amazon 'Dieback'." *Phil. Trans. R. Soc. B*, 363: 1857-64. (doi:10.1098/rstb.2007.0028).
- IIDEE (Institución Internacional de Economía y Empresa). 2009 "Consultoría para la incorporación del país en los mecanismos de incentivos para la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la deforestación en el ámbito nacional". Estudio elaborado para el Banco Mundial. La Paz, Bolivia: IIDEE.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2005. *Bolivia: proyecciones de población urbana y rural por departamentos, sexo y grupos de edad, 2000-2030*. La Paz, Bolivia: INE.
- INE y PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2005. *Bolivia: atlas estadístico de municipios 2005*. La Paz, Bolivia: INE/PNUD.
- Jemio, L.C., L.E. Andersen, C.E. Ludeña, C. de Miguel, M. Pereira. 2014. *La economía del cambio climático en Bolivia: Estimación de Impactos en Equilibrio General*. Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 201, Washington, DC.
- Jones, R.G., M. Noguer, D. C. Hassell, D. Hudson, S. S. Wilson, G. J. Jenkins y J. F. B. Mitchell. 2004. "Generating High Resolution Climate Change Scenarios Using PRECIS, Met Office Hadley Centre." Exeter, Reino

Unido: National Communications Support Unit. Disponible en [http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/6/5/PRECIS\\_Handbook.pdf](http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/6/5/PRECIS_Handbook.pdf).

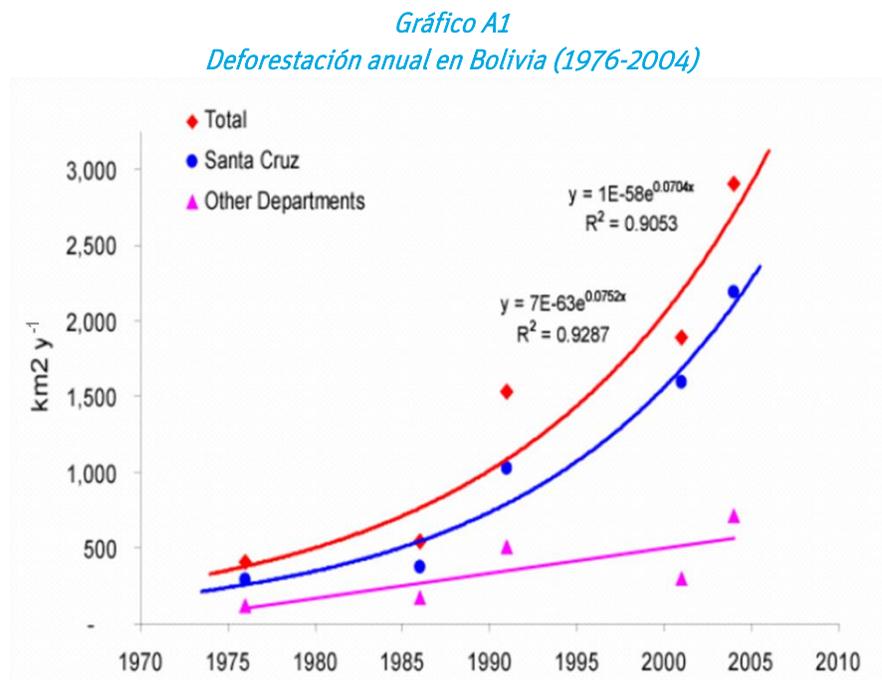
- Killeen, T. J., V. Calderon, L. Soria, B. Quezada, M. K. Steininger, G. Harper, L. A. Solórzano, y C. J. Tucker. 2007. "Thirty Years of Land-cover Change in Bolivia." *Ambio*, 36(7):600-606.
- Machicado, C. G., B. Muriel y L. C. Jemio. 2010. "Aporte de los servicios ecosistémicos silvícolas a la economía boliviana." Documento de Trabajo sobre el Desarrollo Nro. 12/2010. La Paz, Bolivia: Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo.
- Nowicki, C., A. Ley, R. Caballero, J. H. Sommer, W. Barthlott y P.L. Ibisch. 2004. "Extrapolating Distribution Ranges - BIOM 1.1., a Computerized Bio-Climatic Model for the Extrapolation of Species Ranges and Diversity Patterns." En: R. Vásquez Ch. y P. L. Ibisch (eds.), *Orchids of Bolivia. Diversity and Conservation Status* (Vol. 2), pp.39-68 . (Laeliinae, Polystachinae, Sobraliinae with update and complementation of the Pleurothallidinae). Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: Editorial FAN.
- Ozorio de Almeida, A. L. 1992. *The Colonization of the Amazon*. Austin: University of Texas Press.
- Ozorio de Almeida, A. L. y J. S. Campari. 1996. *Sustainable Settlement in the Amazon*. Nueva York: Oxford University Press.
- PNUD. 2004. *Índice de Desarrollo Humano en los municipios de Bolivia. Informe Nacional de Desarrollo Humano 2004*. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. La Paz.
- Sommer, J. H., C. Nowicki, L. Ríos, W. Barthlott y P.L. Ibisch. 2003. "Extrapolating Species Ranges and Biodiversity in Data-Poor Countries: The Computerized Model BIOM." *Revista de la Sociedad Boliviana de Botánica* 4(1):171-190.
- Suarez, C. F., L. G. Naranjo, J. C. Espinoza y J. Sabogal. 2012. *Cambios en el Uso del Suelo y sus Sinergias con el Cambio Climático*. En: Herzog, S. K., R. Martinez, P. M. Jørgensen y H. Tiessen (eds) Cambio Climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales. Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), Sao Jose dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE), Paris. Capítulo 9.
- Vásquez Ch. y P. L. Ibisch. 2004. *Orchids of Bolivia. Diversity and Conservation Status* (Vol. 2) (Laeliinae, Polystachinae, Sobraliinae with update and complementation of the Pleurothallidinae). Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: Editorial FAN.
- Wachholtz, R., J. L. Artola, R. Camargo y D. Yucra. 2006. *Avance de la mecanizada en Bolivia*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: Superintendencia Forestal.

## 13 Anexo: Estimación de la deforestación en el escenario base

La destrucción del hábitat de manera repentina sin lugar a dudas tiene un efecto más drástico sobre la biodiversidad que los cambios lentos en temperatura y precipitación promedio que se esperan durante el resto del siglo. Por eso, antes de poder estimar los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad, es necesario establecer primero la cantidad de reducción de hábitat que se esperaría en el escenario base. En este anexo se describen la metodología y los datos utilizados para realizar dicho análisis.

### 13.1 Metodología utilizada

Killeen et al. (2007) analizan las tasas de deforestación en Bolivia durante los últimos 30 años y sugieren que el área deforestada por año está creciendo exponencialmente sin fin aparente (gráfico A1).



Fuente: Killeen et al. (2007).

Sin embargo, no se puede simplemente extrapolar esta tendencia para los próximos 100 años, ya que existen restricciones subyacentes, sobre todo en la disponibilidad de bosque, pero también en la disponibilidad de mano de obra (Ozorio de Almeida y Campari, 1996; Ozorio de Almeida, 1992; Campari, 2005), que impiden el crecimiento exponencial durante períodos extensos.

Por eso, se aplica la metodología de proyección de deforestación desarrollada por Andersen et al. (2006) y aplicada en Andersen et al. (2009), que consiste en lo siguiente: en primer lugar, se hacen proyecciones de la población rural y urbana para cada municipio hasta el año 2100, usando técnicas de proyección de población, que toman en cuenta los cambios previstos en fecundidad y mortalidad, y los patrones esperados de la

migración interna y externa. Es importante distinguir entre la población urbana y la rural, ya que solamente la población rural tiene un impacto significativo sobre la cobertura de bosques.

Segundo, se calcula el área promedio deforestada anualmente por cada habitante rural en cada municipio. Este parámetro, llamado la *intensidad de deforestación*, varía mucho de municipio a municipio, dependiendo sobre todo de la topografía del municipio (menor en municipios con topografía accidentada) y la densidad poblacional (menor en municipios densamente poblados). En general, la intensidad de deforestación se ha ido duplicando cada 10 años debido a los avances tecnológicos (Wachholtz et al. 2006) y otros factores que permiten que cada persona rural pueda invertir más en deforestación, preparación de la tierra, siembra etc. (Andersen et al., 2009).

Tercero, se multiplica la intensidad de deforestación por la población rural en cada municipio en cada año hasta 2100 para estimar los niveles acumulados de deforestación en cada municipio en el escenario base. Como en Andersen et al. (2009) se supone que no se puede deforestar en áreas con pendientes mayores al 25%. Una vez deforestado todo el bosque disponible dentro del municipio, los agricultores se ven forzados a cambiar su estrategia y empiezan a cultivar más intensivamente las áreas ya deforestadas.

El cambio tecnológico es modelado a través de la intensidad de la deforestación. Este parámetro puede aumentar, por ejemplo, si más agricultores aplican tractores y palas en vez de hachas y machetes. Sin embargo, el parámetro capta mucho más que la tecnología. También capta el nivel de pobreza (los más pobres no pueden invertir tanto en deforestación, preparación de suelos, siembra, etc.), el nivel de precios (con precios agropecuarios altos, los agricultores van a querer aumentar la producción), políticas públicas (las inversiones en infraestructura permiten aumentar la deforestación), y cambios en la inflamabilidad de los bosques (los bosques fragmentados se queman más fácilmente que los bosques intactos). Así que cuando se menciona el avance tecnológico, se habla de un conjunto de factores que permiten a los agricultores aumentar su intensidad de deforestación.

## 13.2 Datos sobre deforestación

Los datos sobre deforestación usados en el presente documento provienen del Museo Noel Kempff Mercado, ubicado en el departamento de Santa Cruz de la Sierra. Estos datos se basan en el análisis de imágenes Landsat de 1991, 2001 y 2004/2005. Los detalles técnicos son descritos en Killeen et al. (2007). Es importante aclarar que el bosque chaqueño no estaba incluido en estos datos, y por eso la deforestación en esta área, y en total, está subestimada. Como el tema principal del presente estudio es el cambio climático, y no la deforestación, se puede tolerar esta subestimación (de aproximadamente un 14%), tomando este sesgo en cuenta al momento de interpretar los resultados para la región del Chaco. Sin embargo, para estudios futuros sobre deforestación en Bolivia, se recomienda hacer un esfuerzo para incluir la deforestación en el Chaco.

Todos los datos geográficos sobre topografía, clima y caminos, entre otros, provienen de la base de datos georeferenciada de Conservation International en Bolivia.

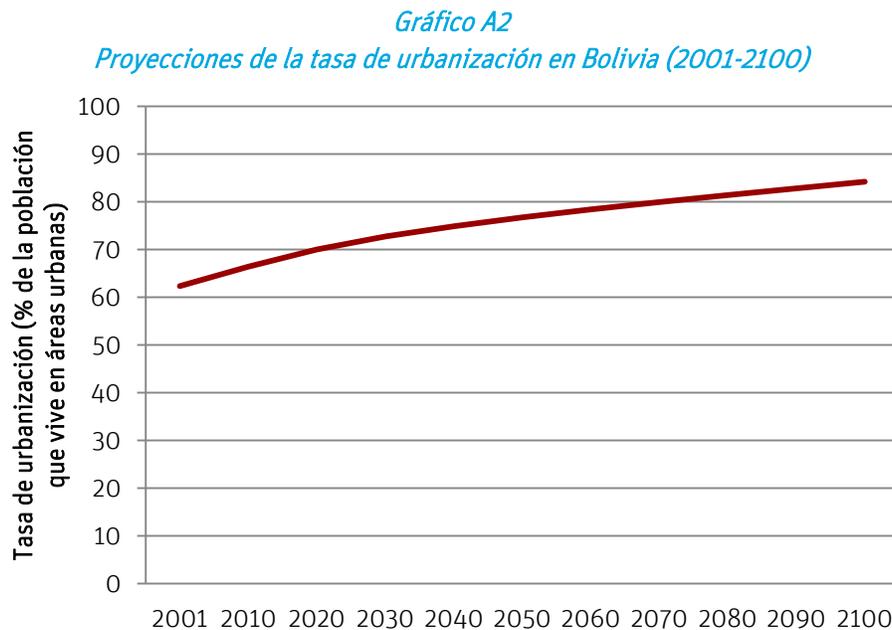
Los datos sobre la población, incluidas las proyecciones de población hasta 2100, son datos oficiales del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) hasta 2030 y después proyecciones de la CEPAL hasta 2100.

El análisis de deforestación solamente es relevante para municipios que tienen bosque, por lo cual se analizan los 142 municipios que tienen más de 10.000 hectáreas (= 100 km<sup>2</sup>) de áreas naturalmente boscosas.

### 13.3 Proyecciones de población rural/urbana, 2001 - 2100

El Instituto Nacional de Estadísticas (INE) ha elaborado proyecciones de población rural y urbana hasta 2030 en el ámbito departamental, y la CEPAL ha extendido estas proyecciones a nivel nacional hasta 2100. Para hacer las proyecciones de deforestación, es necesario desagregar las proyecciones nacionales hasta el nivel municipal rural/urbano, y esta sección explica la metodología aplicada.

Primero, se extienden las proyecciones sobre la tasa de urbanización a nivel nacional. En el año 2001 el 62% de la población vivía en áreas urbanas (conglomeraciones con más de 2.000 habitantes) y, de acuerdo con las proyecciones oficiales de INE, este porcentaje crecerá hasta el 73% en 2030. La tendencia se extendió, de modo que llega hasta el 84% en 2100 (gráfico A2), lo que corresponde aproximadamente al nivel actual promedio de los países que tienen el nivel de ingreso per cápita que se espera para Bolivia en el año 2100.<sup>14</sup>

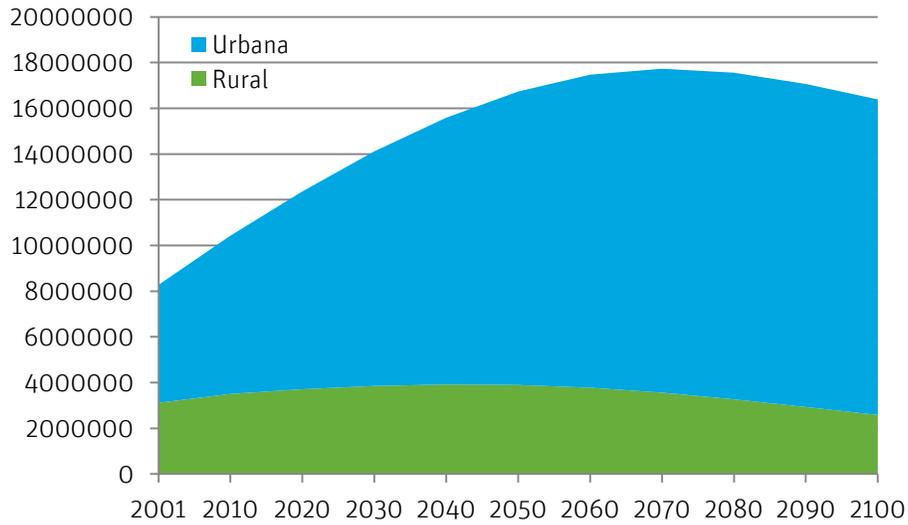


Fuente: Elaboración propia, extendiendo las proyecciones del INE.

Junto con las proyecciones de población de la CEPAL hasta 2100, se traza la evolución de la población nacional que se puede observar en el gráfico A3. Se nota que la población total llegaría a un máximo de 17,7 millones en el año 2070, para después caer a un nivel de 16,4 millones en 2100. Sin embargo, la población rural llegaría a su máximo de 3,9 millones ya en 2040 y después empezaría a caer hasta alcanzar 2,6 millones en 2100.

<sup>14</sup> Jemio et al. (2014) usan un Modelo de Equilibrio General Computable para desarrollar un escenario base para la economía boliviana hasta 2100. El escenario base indica que el PIB per cápita aumentaría aproximadamente ocho veces durante el siglo XXI.

*Gráfico A3*  
*Proyecciones de población rural/urbana en Bolivia (2001-2100)*



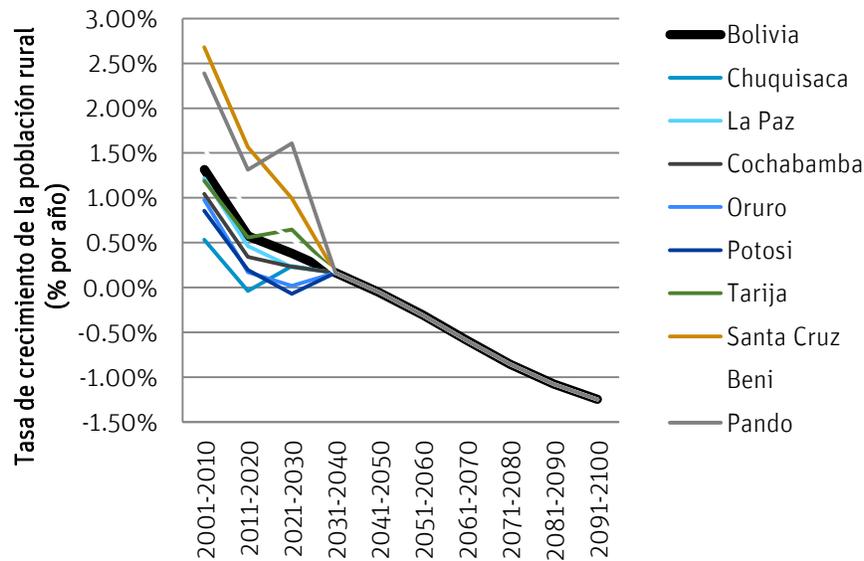
Fuente: Elaboración propia, en base a las proyecciones de la población de la CEPAL y en función de la tasa de urbanización del gráfico A2.

Este comportamiento poblacional previsto implica que las futuras tasas de crecimiento de la población rural serán menores de las que se han visto en el pasado, e incluso negativas durante la mayor parte del siglo XXI, lo cual alivia la presión para deforestar.

Sin embargo, de acuerdo con las proyecciones al nivel departamental del INE, la población rural de las tierras bajas (con bosque) estaría creciendo a tasas más altas que la población rural de las tierras altas (sin bosque), por lo que se deben tomar en cuenta estas diferencias. No obstante, en el futuro lejano es imposible prever los patrones de migración interna,<sup>15</sup> así que a partir de 2030, suponemos tasas de crecimiento iguales para todos los departamentos (véase el gráfico A4).

<sup>15</sup> Por ejemplo, hace 100 años hubiera sido imposible prever el impresionante crecimiento poblacional de Santa Cruz de la Sierra.

**Gráfico A4**  
**Proyecciones de las tasas de crecimiento de la población rural en Bolivia, por departamento (2001-2100)**



Fuente: Elaboración propia en base a las proyecciones de población del INE y de la CEPAL, y en función de la tasa de urbanización del gráfico A2.

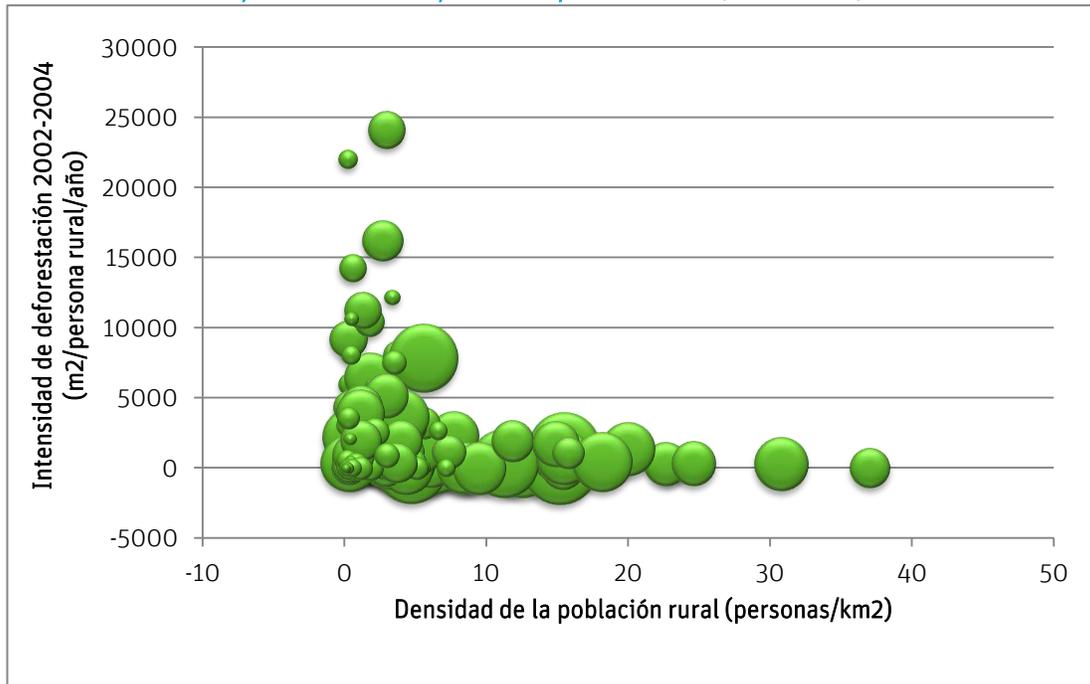
Las tasas de crecimiento de la población rural que se presentan en el gráfico A4 han sido aplicadas a la población rural de cada municipio en 2001 para hacer las proyecciones de la población rural a nivel municipal que sean necesarias para después realizar las proyecciones de deforestación a nivel municipal.

### 13.4 Intensidades de deforestación

El gráfico A5 muestra la gran variación en las intensidades de la deforestación entre municipios. Existen municipios que no deforestan prácticamente nada aunque tengan poblaciones rurales grandes y sean densamente poblados. Por otro lado, existen municipios donde cada persona rural (incluidos mujeres, niños y personas de la tercera edad) deforesta en promedio más de 20.000 m<sup>2</sup> cada año. En promedio, cada habitante rural de los 142 municipios naturalmente boscosos deforesta 1.746 m<sup>2</sup> por año. Es decir, en promedio tardan unos seis años en deforestar una hectárea.

En el gráfico A5 se nota que son los municipios escasamente poblados los que presentan las mayores intensidades de deforestación, mientras los municipios más poblados ya tienen bajas intensidades de deforestación. Esto se debe a tres factores. Primero, en varios de los municipios densamente poblados ya no quedan extensiones boscosas (por ejemplo Warnes, Cotoca, Saavedra y Mineros cerca de Santa Cruz de la Sierra). Segundo, en los municipios densamente poblados, la mayor parte de la tierra ya tiene dueños definidos, mientras que en los municipios escasamente poblados (por ejemplo, Carmen Rivero Torrez, San Rafael y Ascensión de Guarayos) existen extensiones boscosas aparentemente “libres” que puede ser explotadas y/o reclamadas. Tercero, varios de los municipios densamente poblados se ubican en valles cuya topografía impide que haya altas intensidades de deforestación (por ejemplo, Chulumani y Coripata).

*Gráfico A5*  
*Relación entre la intensidad de deforestación y la densidad poblacional rural por municipio en Bolivia (2002-2004)*



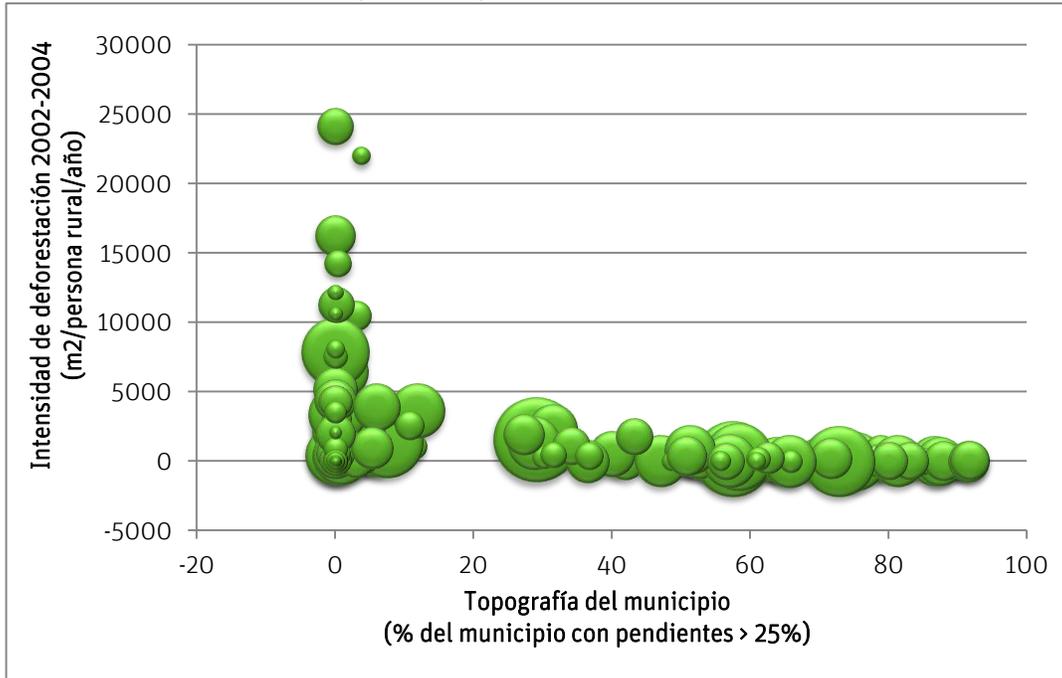
Fuente: IIDEE (2009).

Nota: El tamaño de las burbujas señala el tamaño de la población rural en el municipio en 2001.

Como se muestra en Andersen et al., (2009), una topografía accidentada es una limitación importante para la deforestación. Todos los municipios con altas intensidades de deforestación son casi completamente planos, mientras que todos los municipios con topografía muy accidentada tienen intensidades de deforestación muy bajas (gráfico A6).

Dada esta fuerte relación entre topografía y deforestación, nuestras proyecciones de deforestación suponen que no se puede deforestar significativamente en áreas con pendientes mayores al 25%.

*Gráfico A6  
Relación entre intensidad de deforestación y topografía (pendiente),  
por municipio en Bolivia (2004)*

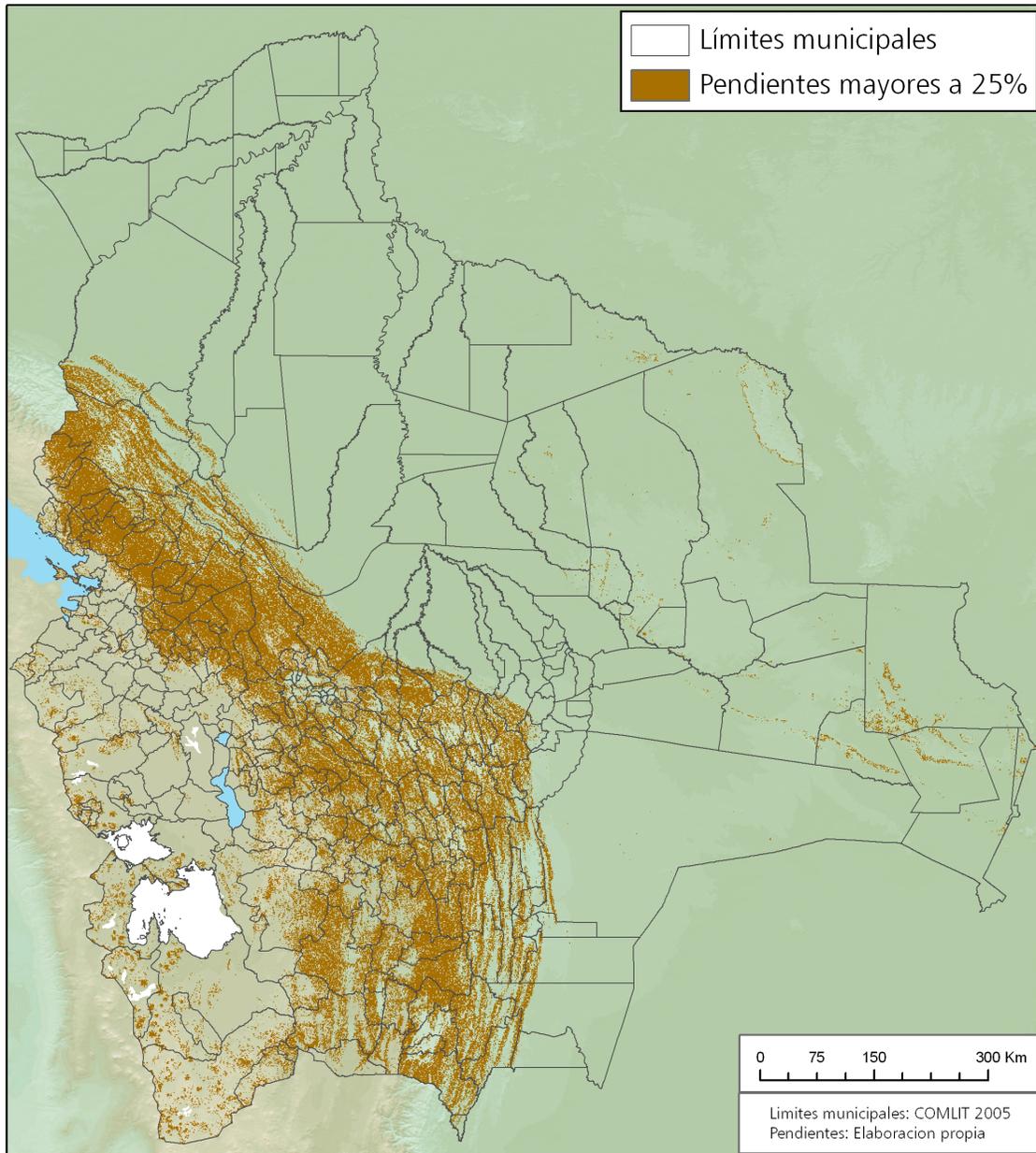


Fuente: IIDEE (2009).

Nota: El tamaño de las burbujas señala el tamaño de la población rural en el municipio en 2001.

El mapa A1 muestra las áreas con pendientes mayores al 25%, es decir: las áreas que supuestamente no pueden ser deforestadas en las proyecciones, y que no deben ser deforestadas en la realidad, si queremos evitar erosión, deslizamientos, inundaciones y otros problemas ambientales.

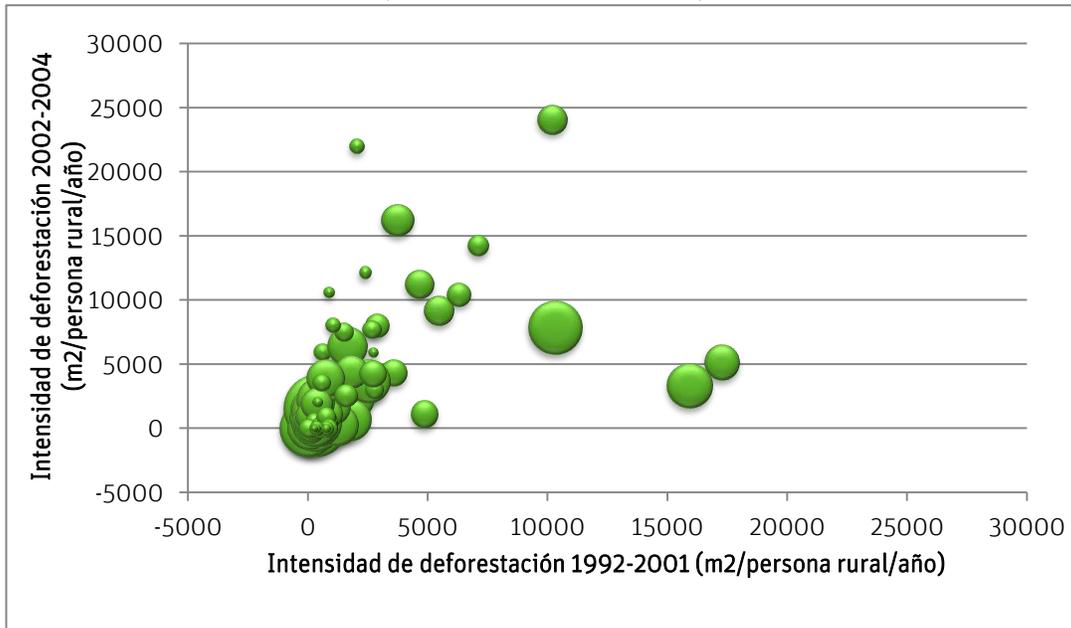
Mapa A1  
Áreas con pendientes mayores al 25% en Bolivia



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico A7 muestra que la intensidad de la deforestación ha aumentado sustancialmente entre el período 1992-2001 y el período 2002-04 en casi todos los municipios. Este aumento refleja cambios en cuanto a la tecnología disponible, al acceso físico, y a las capacidades y los incentivos para la deforestación. Solamente en cuatro municipios (Pailón, Cuatro Cañadas, San Julián, y Okinawa Uno) se han visto descensos significativos en las intensidades de deforestación, y esto se debe a que allí prácticamente se ha acabado el bosque disponible para deforestar.

*Gráfico A7*  
*Intensidad de deforestación en Bolivia, por municipio*  
*(1992-2001 versus 2002-04)*



Fuente: IIDEE (2009).

Nota: El tamaño de las burbujas señala el tamaño de la población rural en el municipio en 2001.

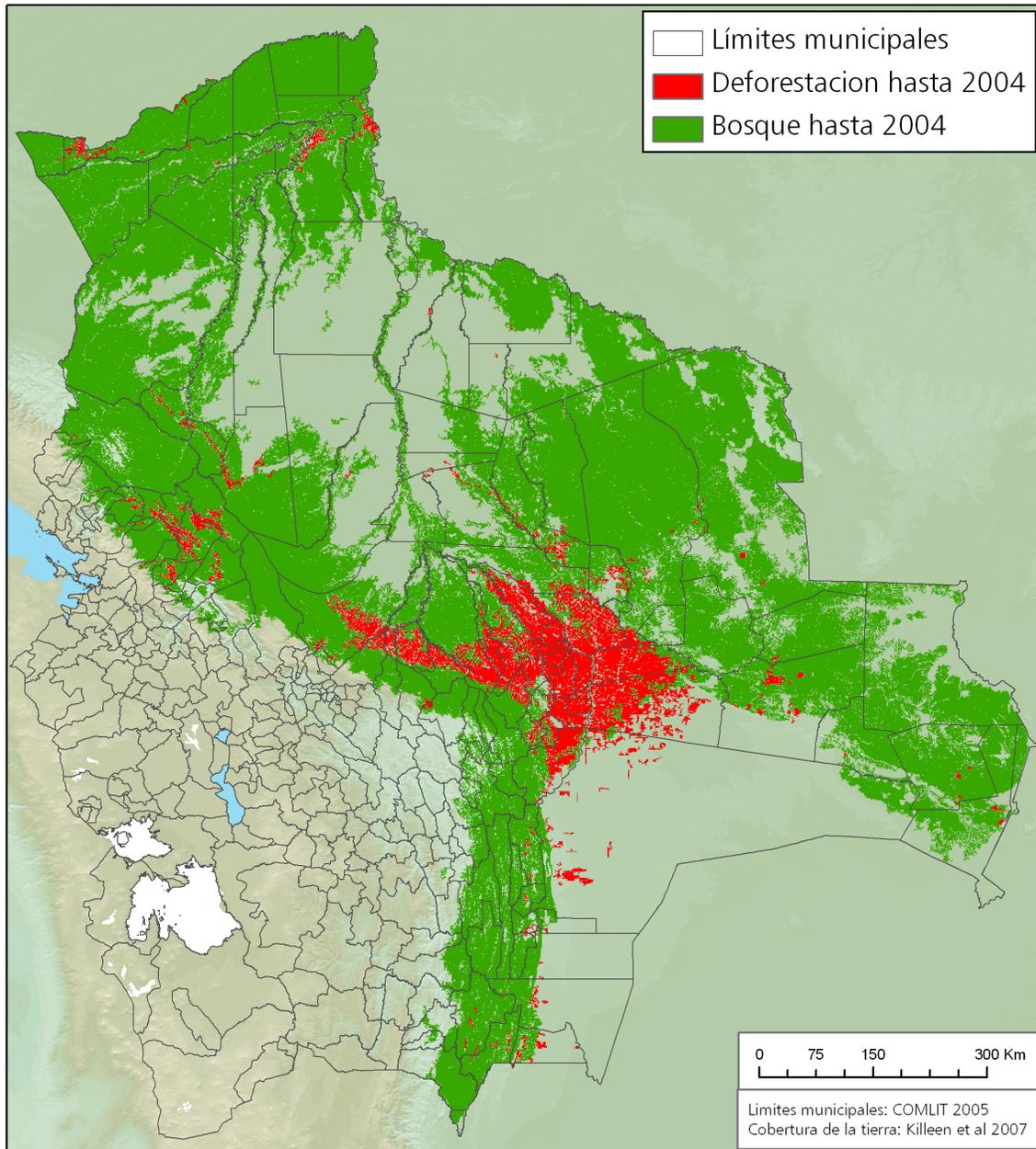
Para el propósito de las proyecciones hasta el año 2100, se supone que las intensidades de deforestación en cada municipio siguen duplicándose cada década debido a una variedad de procesos que incluyen más riqueza (lo que permite más inversión en deforestación y preparación de suelos), más caminos (lo que da acceso a nuevas áreas boscosas) y más demanda para productos agropecuarios (lo que aumenta los precios y hace más rentables las actividades agropecuarias).

Este supuesto tiende a ser conservador, ya que las altas intensidades de deforestación no se dispersan hasta los municipios con cero deforestaciones inicialmente. Supone que los productores no son muy móviles, y que una vez que se acaba el bosque disponible en su propio municipio ellos se quedan y usan más intensivamente la tierra ya deforestada, en vez de trasladarse a otro municipio para convertir bosque virgen. El supuesto es razonable en una situación con una población rural decreciente, como es el caso de la mayor parte del resto del siglo XXI en Bolivia.

### 13.5 Proyecciones de deforestación, 2001-2100

El mapa A2 muestra la deforestación que ya se ha observado hasta el año 2004 y el bosque que aún queda. En total, el área naturalmente boscosa suma a cerca de 50 millones hectáreas, o la mitad del territorio nacional. Sin embargo, se ha excluido el bosque del Chaco, lo cual aumentaría unos 7 millones de hectáreas boscosas.

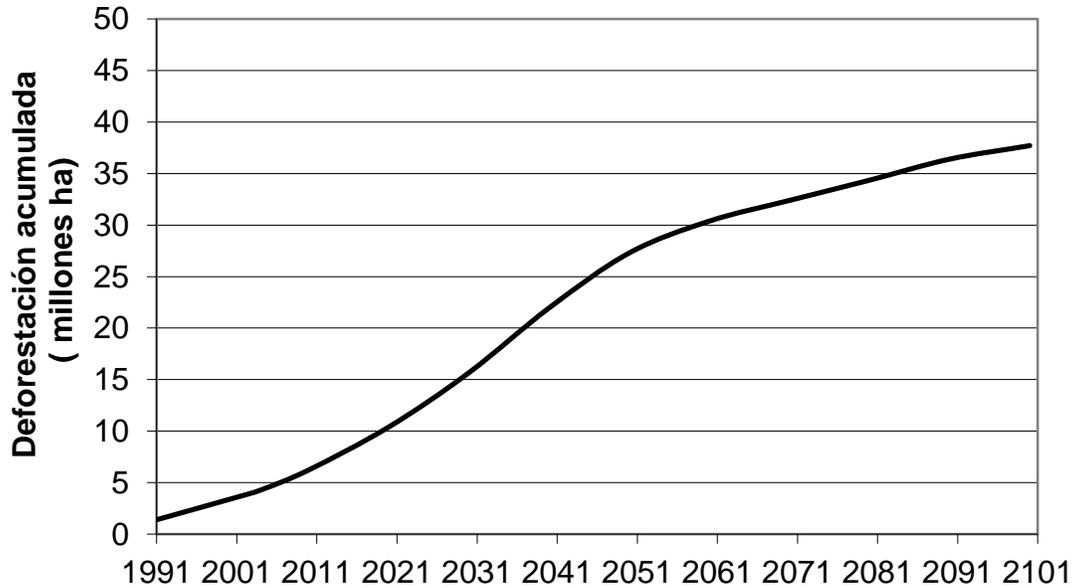
Mapa A2  
Deforestación hasta 2004 y bosque remanente



Fuente: Elaboración propia.

Con los supuestos anteriormente descritos sobre el crecimiento de la población rural, la evolución de las intensidades de deforestación per cápita y las restricciones naturales para la deforestación, la proyección total de deforestación llegaría a ser de 37 millones de hectáreas en el año 2100 (véase el gráfico A8). Se nota un punto de inflexión a mediados del siglo, que se debe al hecho de que en muchos municipios no habría más bosque disponible para deforestar. Al final del siglo, quedarían aproximadamente 6 millones de hectáreas de bosque en áreas relativamente planas y casi 7 millones de hectáreas de bosque en áreas con pendientes mayores al 25%.

*Gráfico A8*  
*Proyección de deforestación acumulada en 142 municipios*  
*naturalmente boscosos en Bolivia (2001-2100)*



Fuente: Elaboración propia.

La proyección obviamente es sensible a los supuestos considerados, y se podrían haber efectuado proyecciones con diferentes supuestos o diferentes metodologías. Sin embargo, esta proyección parece plausible, dadas las tendencias que se puede esperar en los factores que determinan el nivel de deforestación, y esta es la proyección que se utiliza como escenario base en el presente documento. En base a los cálculos de este estudio, la deforestación promedio anual para el resto del siglo sería similar a la tasa de deforestación anual que se experimentó durante el año 2007 (aproximadamente de 345.000 hectáreas).<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Dato de la Superintendencia Forestal.





[www.iadb.org/cambioclimatico](http://www.iadb.org/cambioclimatico)  
Síguenos en twitter @BIDcambioclima