

Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático de bosques de montaña en Latinoamérica:

un punto de partida para su gestión adaptativa



Supported by:



Federal Ministry for the
Environment, Nature Conservation,
Building and Nuclear Safety

based on a decision of the German Bundestag

**Initiative
20x20**

Bringing **20 million**
hectares of degraded land in
Latin America & the Caribbean
into restoration by **2020**



Serie técnica
Informe técnico no. 406

Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático de bosques de montaña en Latinoamérica:

un punto de partida para su gestión adaptativa

Diego Delgado, Bryan Finegan
Marjorie Martin, Miguel Acosta
Fernando Carrillo, Tomás Hernández
Luis Bejarano, Víctor Nieto
Diana Lara, Jaime Ribalaygua

CATIE no asume la responsabilidad por las opiniones y afirmaciones expresadas por los autores en las páginas de este documento. Las ideas de los autores no reflejan necesariamente el punto de vista de la institución. Se autoriza la reproducción parcial o total de la información contenida en este documento, siempre y cuando se cite la fuente.

© Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2016

ISBN 978-9977-57-668-8

Handle <http://hdl.handle.net/11554/8496>

363.737

A532 Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático de bosques de montaña en Latinoamérica: un punto de partida para su gestión adaptativa / Diego Delgado... [et al.]. – 1^o ed. – Turrialba, C.R. : CATIE, 2016.
54 p. : il. – (Serie técnica. Informe técnico / CATIE ; no. 406)

ISBN 978-9977-57-668-8

Handle <http://hdl.handle.net/11554/8496>

También como: Gestión Integrada de Recursos Naturales a Escala de Paisaje

1. Cambio climático – Factores de riesgo – América Latina. 2. Cambio climático – Adaptación
3. Bosques – Análisis de riesgos. 4. Bosques – Ordenación de tierras - América Latina.
I. Delgado, Diego. II. Finegan, Bryan. III. Martin, Marjorie. IV. Acosta, Miguel. V. Carrillo, Fernando. VI. Hernández, Tomás. VII. Bejarano, Luis. VIII. Nieto, Víctor. IX. Lara, Diana.
X. Ribalaygua, Jaime. XI. CATIE. XII. Título. XIII. Serie.

Diego Delgado, CATIE; ddelgado@catie.ac.cr

Bryan Finegan, CATIE; bfinegan@catie.ac.cr

Marjorie Martin, INFOR; mmartin@infor.cl

Miguel Acosta, INIFAP; acostamm@colpos.mx

Fernando Carrillo, INIFAP; fernando.carrillo877@gmail.com

Tomás Hernández, INIFAP; hernandez.tomas@inifap.gob.mx

Luis Bejarano, ESNACIFOR; luis.bejarano88@yahoo.com

Víctor Nieto, CONIF; victornieto@conif.org.co

Diana Lara, CONIF; dianalara@conif.org.co

Jaime Ribalaygua, FIC; fic@ficlima.org

Foto portada:

Darío Veintimilla, Cordillera de Talamanca, Costa Rica.

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) mediante la iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático (SECCI por sus siglas en inglés). La preparación del documento contó con el aporte del proyecto de apoyo a la iniciativa 20x20 financiado por el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear de Alemania.

Índice

| | |
|--|----|
| Resumen | 5 |
| Introducción | 7 |
| Vulnerabilidad al cambio climático | 9 |
| Exposición | 10 |
| Sensibilidad | 10 |
| Impacto potencial | 13 |
| Capacidad adaptativa | 14 |
| Vulnerabilidad | 14 |
| Adaptación al cambio climático | 15 |
| Análisis de la vulnerabilidad de bosques de montaña | 17 |
| Propuesta metodológica | 17 |
| Climiforad y los territorios priorizados | 17 |
| La vulnerabilidad en los territorios | 20 |
| La exposición en los territorios | 20 |
| La sensibilidad según tipos de bosque | 22 |
| Capacidad adaptativa en los territorios | 29 |
| Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad | 36 |
| Exposición | 36 |
| Capacidad adaptativa | 40 |
| Análisis de la vulnerabilidad | 44 |
| Medidas de gestión forestal adaptativa | 46 |
| Conclusiones | 48 |
| Literatura citada | 49 |
| Anexo 1. Simulaciones climáticas para los territorios | 54 |

Resumen

Los bosques de montaña, sobre todo en los trópicos, son considerados particularmente vulnerables a los efectos del cambio climático. La pérdida y degradación de estos bosques a causa del cambio climático tendría consecuencias graves en su biodiversidad y en los servicios ecosistémicos que actualmente ofrecen a millones de personas. No obstante, existe poco conocimiento concreto de cuáles pueden ser los cambios ecológicos en estos bosques y cuáles medidas de gestión serían apropiadas para facilitar la adaptación al cambio climático. Debido a esto, el programa regional *Impactos potenciales del cambio climático en ecosistemas forestales en cordilleras iberoamericanas y herramientas para la adaptación de la gestión* (Climiforad) diseñó una herramienta para el análisis de la vulnerabilidad al cambio climático de bosques en cordilleras y la aplicó en cinco territorios de Latinoamérica, en condiciones tropicales (Honduras, Colombia y Costa Rica), subtropicales (México) y templadas (Chile) y bajo diferentes modelos de gestión (bosques modelo y áreas protegidas). El análisis de la vulnerabilidad es un primer paso en la gestión para la adaptación ya que establece las bases para el planteamiento de medidas concretas de gestión forestal adaptativa.

La propuesta toma como base el marco de análisis de vulnerabilidad del cuarto informe de evaluación del IPCC, aplicado ampliamente en los últimos años. La evaluación de la exposición se hizo mediante simulaciones de climas potenciales futuros utilizando un enfoque de *downscaling* estadístico. La propuesta, en particular, desarrolló un enfoque innovador para estimar la sensibilidad ecológica de los bosques, partiendo del ensamblaje de especies arbóreas dominantes y su respuesta potencial al cambio climático. En el análisis de sensibilidad de bosques se evaluó, para cada especie arbórea dominante, una serie de atributos o rasgos funcionales ligados a su respuesta potencial al cambio climático. Además, se consideró la extensión de la distribución altitudinal de la especie en el territorio. El grado de sensibilidad se determinó mediante la combinación entre el tipo funcional de la especie y su distribución altitudinal. La capacidad adaptativa se evaluó por medio de herramientas

estándares para la medición de la efectividad de gestión de los territorios, la determinación de características socioeconómicas y la capacidad de respuesta de poblaciones humanas al cambio climático.

En todos los territorios habrá potencialmente un aumento en las temperaturas máximas y mínimas durante todo el siglo XXI. Las simulaciones muestran que es probable que los cambios más importantes en el clima ocurran para las variables relacionadas con temperatura, más que las de precipitación. La alta exposición de los territorios tropicales al cambio de temperatura, combinada con la alta sensibilidad de las especies dominantes, sugiere que tendrán un alto impacto potencial. Las especies arbóreas se pueden ubicar en un gradiente de sensibilidad: en un extremo del espectro hay un grupo de especies adquisitivas y de distribución amplia calificadas como poco sensibles al cambio climático, mientras que al otro extremo hay especies conservativas y de distribución restringida calificadas como altamente sensibles. Se encontró que la sensibilidad de los bosques es mayor en los territorios del trópico y, dentro de estos, es más pronunciada en las partes más bajas y más altas de las cordilleras.

La capacidad adaptativa, combinada con el impacto potencial, determina el grado de vulnerabilidad de un territorio. La capacidad adaptativa en los territorios se consideró entre media y baja pues ni gestores ni pobladores cuentan con el conocimiento suficiente sobre cambio climático, adaptación y mitigación; tampoco se planifica ni se invierten recursos para mitigar impactos. Tales temas están ausentes en los planes de manejo. Como punto de partida, se propone una lista de especies dominantes altamente sensibles al cambio climático para cada territorio, como especies focales para la implementación de medidas de adaptación. Esperamos que la herramienta propuesta apoye los esfuerzos de conservación de ecosistemas ante los efectos del cambio climático, principalmente mediante la aplicación del enfoque para la estimación de la sensibilidad ecológica del ensamblaje de especies arbóreas dominantes.

Introducción

Es un hecho ineludible que el cambio climático exacerbado por las acciones humanas está teniendo impactos en especies silvestres y ecosistemas, así como en los servicios que estos brindan a la humanidad (IPCC 2007, Corlett 2012, Parmesan *et ál.* 2013). Ante este escenario, la pregunta a responder a la mayor brevedad posible es ¿qué medidas se deben tomar para contribuir a la adaptación de la biota del mundo al cambio que se espera en el clima durante el presente siglo? No es posible aguardar hasta tener resultados de años de investigación para identificar las medidas de gestión más convenientes. Por lo tanto, es prioritario proponer y validar medidas inmediatas, de manera que se implementen estrategias de adaptación, se evalúen sus efectos y se mejore continuamente el proceso de gestión. El análisis de la vulnerabilidad es la primera medida de un proceso de gestión enfocada en la adaptación al cambio climático (Malone y Engle 2011, Metternicht *et ál.* 2014).

En el presente documento mostramos la aplicación de tal análisis, a partir del enfoque propuesto por el IPCC (2007), al caso concreto de bosques de montaña¹ en territorios de Latinoamérica priorizados por el programa Climiforad (*Impactos potenciales del cambio climático en ecosistemas forestales en cordilleras iberoamericanas y herramientas para la adaptación de la gestión*). Climiforad busca proponer medidas específicas de gestión forestal adaptativa que deriven del análisis de vulnerabilidad y ha enfocado su trabajo en bosques de montaña por las siguientes razones.

Los sistemas boscosos de montaña poseen atributos clave en los que se deben enfocar los esfuerzos de gestión sostenible (MRI 2005). Proveen beneficios y recursos de importancia primordial para la sociedad y, para muchos, se han creado instituciones únicas encargadas de su gobierno. Cuentan con una muy alta diversidad de hábitats y biodiversidad asociada que, por la extensión

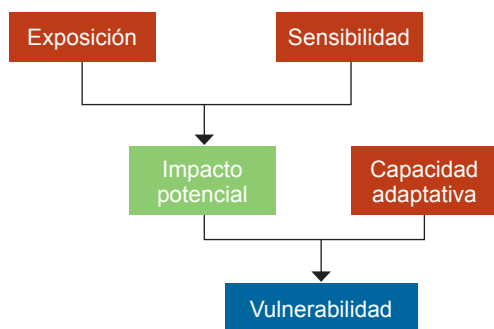
1 Para efectos de este trabajo se consideran bosques de montaña a todos aquellos que se encuentran en zonas de vida iguales o superiores al premontano, de acuerdo con la clasificación de Holdridge (1987).

reducida de muchos parches de hábitat natural más su aislamiento geográfico natural, los hacen globalmente únicos y muy vulnerables. Asimismo, los bosques de montaña en los trópicos están entre los puntos calientes de biodiversidad más vulnerables del mundo a los efectos negativos del cambio climático (Corlett 2012).

Vulnerabilidad al cambio climático

La vulnerabilidad al cambio climático es una medida asociada a la habilidad que tienen los sistemas humanos y ecológicos para responder o hacer frente a los cambios en el clima. Según IPCC (2007), la vulnerabilidad es una función del carácter, la magnitud y la tasa de variación climática a que está expuesto un sistema, su sensibilidad o susceptibilidad al cambio y su capacidad de respuesta y adaptación. En otras palabras, es la inclinación, tendencia o predisposición de un sistema a ser afectado. Las diferencias en el grado de vulnerabilidad entre sistemas derivan de la exposición a condiciones climáticas particulares, de sus características intrínsecas que le confieren diferentes capacidades de respuesta y de desigualdades multidimensionales –por ejemplo, situaciones socioeconómicas de los pobladores producidas por procesos de desarrollo dispares. Esas consideraciones hacen que sean diferentes los riesgos derivados del cambio climático y que, en consecuencia, en su análisis haya que tomar en cuenta la información científica, el conocimiento de la comunidad y la opinión de expertos (Wachenfeld *et ál.* 2007).

Tres elementos componen un análisis de vulnerabilidad al cambio climático: la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa (Figura 1). Es



IPCC 2007, Marshall *et al.* 2010

Figura 1. Modelo operativo de análisis de vulnerabilidad con sus elementos (IPCC 2007)

imprescindible entender estos elementos para evaluar la naturaleza y magnitud de la amenaza, detectar las fuentes de la vulnerabilidad e identificar acciones para reducir o mitigar la amenaza en cada elemento (Marshall *et ál.* 2010). A continuación se detallan aspectos de cada uno de los elementos relacionados con la vulnerabilidad.

Exposición

La exposición representa los eventos y patrones climáticos importantes que cambian —o podrían cambiar— el sistema, ya sea en forma directa o por su impacto en sistemas relacionados (Marshall *et ál.* 2010). En un sentido práctico, es el grado en que una región, recurso o comunidad experimentará cambios potenciales en el clima (IPCC 2007). La exposición tiene que ver con la magnitud, frecuencia, duración y/o distribución espacial y temporal de eventos o patrones climáticos como el cambio en la temperatura y precipitación y en los patrones de las temporadas de tormentas y huracanes (IPCC 2007, Marshall *et ál.* 2010).

Sensibilidad

La sensibilidad se refiere al grado en que un sistema ecológico es, o puede ser, afectado positiva o negativamente por estímulos externos como el cambio climático (IPCC 2007), y es una característica intrínseca de los elementos ecológicos, independientemente de la exposición. Los efectos pueden ser directos, como por ejemplo un cambio en el crecimiento de los árboles en respuesta a una variación de la temperatura media, de los intervalos de temperatura o de la variabilidad de la temperatura (IPCC 2007, Clark *et ál.* 2001, 2003) o indirectos, como los daños causados por una mayor frecuencia de incendios al reducirse la precipitación o aumentar la temperatura.

En los bosques, la exposición al cambio climático puede inducir modificaciones en diferentes niveles de organización: a nivel de individuos (p.e., productividad, crecimiento, fenología), de especies (p.e., cambios en distribución, en sus relaciones interespecíficas) y de ecosistemas (p.e., cambios en la estructura del bosque como densidad de tallos y alturas, biomasa y carbono almacenado). Los elementos de cada uno de estos niveles (individuos, especies y ecosistemas) pueden tener una sensibilidad diferente (Corlett

2012, Parmesan *et ál.* 2013). En la práctica, sin embargo, tanto los paradigmas actuales que guían las acciones de conservación en Latinoamérica –con énfasis en la protección de especies animales amenazadas o en peligro– como la atención de los investigadores están centradas, en gran medida, en la sensibilidad y ensamblaje a nivel de especies. Para bosques de montaña, por ejemplo, la posibilidad de que el declive observado en especies y ensamblajes de anfibios se deba al aumento de la temperatura viene generando atención desde la década de 1980 (Chen *et ál.* 2011). Ante esta situación, existe una necesidad urgente de cambiar el énfasis de los análisis de sensibilidad hacia la vegetación que alberga la fauna silvestre y que proporciona los servicios ecosistémicos críticos para los pobladores humanos de la región. Desde esta perspectiva, las consideraciones sobre fauna se vuelcan hacia los animales que participan en las interacciones mutualistas críticas para la resiliencia de las especies de plantas: la polinización y la dispersión de semillas.

Está claro que existen también grupos de plantas altamente sensibles a cambios del clima. El caso de las lianas ha generado mucha atención en años recientes. Estas plantas poseen parénquima en sus tallos y presentan vasos con gran diámetro en el xilema (Carlquist 1991), lo que les confiere una gran capacidad de conducir líquidos hasta los tallos más delgados de la planta (Schnitzer 2005, Schnitzer y Bongers 2011). Su eficiente sistema vascular les proporciona grandes ventajas sobre otras formas de vida en ambientes secos, pero también las hace propensas a congelamiento por temperaturas bajas (Ewers *et ál.* 1991, Schnitzer 2005, van der Geertje y Phillips 2008). Ante el calentamiento de la atmósfera, es posible que se incremente la abundancia y la importancia ecológica de las lianas, tanto en los bosques tropicales como en los templados, con consecuencias en este momento muy difíciles de predecir (Schnitzer 2005, Londré y Schnitzer 2006, Schnitzer y Bongers 2011).

Pero hay que ir más allá del caso específico de las lianas. El auge de la ecología funcional paralelamente al desarrollo de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA 2005) dirige la atención hacia el papel preponderante de las especies dominantes de la vegetación en la determinación de los procesos ecológicos y de los servicios ecosistémicos que se derivan de ellos (Grime 1998, MEA 2005, Díaz *et ál.* 2011). ¿Cuán sensibles son estas especies dominantes ante el cambio climático? Nuestra propuesta para el análisis de la sensibilidad se enfoca en estas especies y representa un vínculo con el impacto potencial del cambio climático en la provisión de servicios ecosistémicos.

En el caso específico de la sensibilidad ecológica de los bosques de montaña, el simple hecho de que las especies individuales y los tipos de comunidades naturales se distribuyan en rangos específicos de altitud sobre el nivel del mar (ver, p.e., Holdridge 1987, Colwell *et ál.* 2008), es una demostración de su sensibilidad ante la variación del clima. Esto se debe a que las distribuciones altitudinales responden, en gran medida, a las gradientes de temperatura asociadas con la altitud. Si se analiza este hecho desde el punto de vista de la sensibilidad al cambio climático, un tipo de bosque particular con una distribución muy restringida en las partes altas de las montañas es sensible a variaciones en el clima por no tener mayores posibilidades de desplazamiento hacia arriba. Algunos investigadores afirman que los rangos de distribución altitudinal son más estrechos en montañas tropicales que en otras biomas del mundo, lo cual puede hacer que la sensibilidad al cambio climático sea aún mayor en paisajes boscosos como los de los territorios evaluados (Janzen 1967, Malhi *et ál.* 2010). Entre más amplia sea la distribución altitudinal de una especie, menos sensible se espera que sea ya que la extensión de dicha distribución representa indirectamente, la amplitud del rango de tolerancia de la temperatura para cada especie. Por otra parte, la sensibilidad de los ecosistemas forestales y de los servicios que proporcionan puede ser elevada en las partes bajas de las gradientes altitudinales si no existen especies adaptadas a los cambios en temperaturas esperados para esos sitios (Colwell *et ál.* 2008). La sensibilidad puede ser descrita en términos de tolerancia fisiológica al cambio. También puede ser medida en términos de *indicadores*, como los ejemplos que se muestran en el Recuadro 1. Para fines del presente documento, definimos “indicador” como una característica medible de un sistema que indirectamente representa otras características no tan fáciles de medir; la medición del indicador es un *sustituto* de la medición directa de la(s) variable(s) de interés (Finegan *et ál.* 2004).

Impacto potencial

El impacto potencial del cambio climático se refiere a las consecuencias esperadas de este fenómeno en los sistemas naturales y humanos sin considerar ninguna acción de adaptación (IPCC 2007). Es el resultado de la exposición a que se verá sometido el sistema en el futuro y la sensibilidad del mismo. El aumento en la probabilidad de cambio de un bosque estacional a un bosque de sabana seco o la proyección del cambio en la distribución de una especie son ejemplos de impactos potenciales.

Recuadro 1. Indicadores potenciales de sensibilidad al cambio climático en bosques

- Zonificación de bosques en gradientes altitudinales, sus características y relaciones con factores de temperatura, nubosidad, precipitación, altitud y latitud
- Procesos ecosistémicos (productividad del bosque y/o de poblaciones de especies, dispersión de semillas, polinización, interacciones planta-animal)
- Biodiversidad taxonómica y funcional del bosque y de las especies arbóreas dominantes
- Composición y estructura a nivel de comunidad y de poblaciones de especies dominantes
- Extensión y distribución de hábitats y especies
- Resistencia y resiliencia a eventos extremos como sequías, incendios y huracanes (p.e. mortalidad de especies sensibles a periodos de sequía)
- Regeneración de las especies arbóreas dominantes

Capacidad adaptativa

Es el potencial, la capacidad o la habilidad de un sistema socioecológico para ajustarse satisfactoriamente a estímulos, efectos o impactos del cambio climático, aprovechar las oportunidades o hacer frente a las consecuencias para reducir los daños (Smit *et ál.* 1996, IPCC 2007). La capacidad adaptativa describe la habilidad para responder a los desafíos mediante el aprendizaje, el manejo de riesgos e impactos, el desarrollo de nuevo conocimiento y de enfoques efectivos de abordaje (Marshall *et ál.* 2010) y puede provenir de acciones planificadas y organizadas o de acciones reactivas e individuales.

En el combate de los efectos del cambio climático, la capacidad adaptativa se considera más un elemento social que ecológico, aunque en el caso de ecosistemas está relacionada a la diversidad genética, la diversidad biológica y la heterogeneidad y conectividad de hábitats dentro de paisajes (Carpenter y Gunderson 2001, Peterson 2002). En los sistemas sociales la capacidad

adaptativa puede ser una característica consciente o involuntaria, reforzada por la existencia de instituciones y de redes que aprenden y almacenan conocimiento y experiencia y crean flexibilidad para experimentar y adoptar soluciones novedosas (Holling y Meffe 1996, Gunderson 2000, Scheffer *et ál.* 2001, Nelson *et ál.* 2007). Puede considerarse también como la capacidad de los gestores de implementar las medidas de adaptación necesarias (Rapport y Gaudet 1998, Adger *et ál.* 2005, Adger 2006).

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad resulta de la combinación del impacto potencial y la capacidad adaptativa, y se puede entender como los impactos del cambio climático que ocurrirían después de implementar acciones de adaptación. Es decir, ante magnitudes similares de impacto potencial, un área silvestre protegida (ASP) será menos vulnerable si su gestión implementa medidas de adaptación adecuadas (p.e., mitigación de impactos no climáticos, redefinición de límites, restauración de ecosistemas), mientras que un ASP tendrá mayor vulnerabilidad si su gestión no toma ninguna medida.

Adaptación al cambio climático

La adaptación al cambio climático refleja los ajustes sociales y ecológicos que surgen como respuesta a los estímulos climáticos o a sus efectos actuales o esperados (Smít *et ál.* 1996). Desde la perspectiva de la gestión, se trata del conjunto de acciones que ejecutan la población y sus organizaciones e instituciones, para ajustar sus medios de vida (MV) a las condiciones cambiantes del clima; es decir, el ajuste de aquellas capacidades y actividades, recursos naturales, materiales y sociales requeridas para desarrollar las actividades productivas, recreativas, espirituales, de relación social que satisfagan una forma de vida (Emery y Flora 2006).

Desde la perspectiva de los procesos naturales, la adaptación puede darse por medio de cambios fenotípicos del organismo, de la adaptación evolutiva en poblaciones de especies, y de cambios en la distribución geográfica hacia nuevas zonas climáticas (ver Lovejoy y Hannah 2005). El entender la capacidad natural de adaptación de las especies y de los ecosistemas de montaña es una de las bases de la gestión para la adaptación; este es un principio básico de nuestra propuesta.

Las medidas de adaptación procuran garantizar el suministro continuo de bienes y servicios ecosistémicos, y deben basarse en un análisis de la vulnerabilidad (Marshall *et ál.* 2010). Antes de establecer medidas de gestión adaptativa es necesario definir objetivos que expresen lo que se quiere lograr con ellas y el fin que se persigue. En el Cuadro 1 se muestran medidas y estrategias de adaptación como resultado de un análisis de vulnerabilidad para fortalecer los sistemas sociales que dependen de ecosistemas marinos tropicales, a fin de que logren enfrentar eventuales cambios climáticos. Con este ejemplo se pretende ilustrar cómo estas medidas y estrategias pueden ser implementadas para abordar las deficiencias encontradas.

Cuadro 1. Medidas y estrategias de adaptación para reducir la vulnerabilidad social al cambio climático

| Resultado de evaluación de la vulnerabilidad | Medida de adaptación | Estrategia de adaptación |
|--|--|--|
| Pobre capacidad para evaluar y manejar el riesgo climático | Mejorar la capacidad de los grupos de interés para que evalúen y manejen el riesgo climático. | Desarrollar planes de acción para la adaptación al cambio climático que aborden directamente los niveles de percepción del riesgo e incertidumbre de las personas, considerando la generación de ingresos a los hogares, los patrones de uso de recursos y la gobernanza. |
| Costos de adaptación elevados para las personas | Reducir los costos de adaptación a un nivel aceptable para las personas. | Desarrollar alianzas entre grupos de interesados a nivel local, regional, nacional e internacional para compartir los costos del cambio. Asegurar que los costos de las opciones y planes de adaptación sean claramente identificados y que se asignen responsabilidades totales o compartidas. |
| Escasa conciencia de los riesgos del cambio climático | Concientizar a la comunidad sobre los posibles impactos del cambio climático en los recursos naturales y sus medios de vida. | Monitorear los cambios en los recursos naturales y los efectos potenciales del cambio climático (p.e., monitoreo participativo de captura de peces) y comunicar esta información periódicamente a la comunidad. Fomentar la conciencia comunitaria y el diálogo sobre el cambio climático. |
| Baja diversidad en los medios de vida | Diversificar medios de vida y reducir la dependencia de actividades vulnerables al cambio climático. | Descubrir, direccionar e implementar formas para mejorar y diversificar los medios de vida. |
| Bajo acceso a tecnología e información climática | Aumentar el acceso de las personas a tecnología e información climática. | Fomentar el diálogo sobre el cambio climático y aumentar la accesibilidad a la información climática, la experiencia y la tecnología para los usuarios de recursos. |

Fuente: Modificado de Marshall *et ál.* (2010)

Análisis de la vulnerabilidad de bosques de montaña

Propuesta metodológica

Climiforad y los territorios priorizados

El programa Climiforad (<http://www.climiforad.org/>) es una iniciativa regional enfocada en la investigación de los impactos potenciales del cambio climático en ecosistemas forestales de cordilleras latinoamericanas y en la contribución al proceso de adaptación. Está conformado por una red de institutos de investigación de Latinoamérica y España (Recuadro 2) y su propósito es desarrollar conocimiento y herramientas específicas que permitan una mejor gestión forestal adaptativa dentro del contexto del cambio climático.

Recuadro 2. Instituciones socias del programa Climiforad

| | |
|-------------------|---|
| CATIE: | Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Costa Rica) - ente ejecutor del programa |
| CONIF: | Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (Colombia) |
| ESNACIFOR: | Escuela Nacional de Ciencias Forestales (Honduras) |
| INIFAP: | Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (México) |
| INFOR: | Instituto Forestal (Chile) |
| UPM: | Universidad Politécnica de Madrid (España) |
| FIC: | Fundación para la Investigación del Clima (España) |

Cinco territorios en Latinoamérica fueron priorizados para las acciones del programa. Su selección se realizó a partir de los siguientes criterios que contemplan aspectos biofísicos, sociales y económicos:

- Espacios geográficos claramente definidos, con sistemas ecológicos, socioeconómicos y políticos bien establecidos para su adecuada gobernanza
- Amplia cobertura de bosques de montaña potencialmente vulnerables a los impactos del cambio climático
- Relevantes desde el punto de vista ecológico y de los servicios ecosistémicos que proveen a las comunidades
- Con extensión de al menos 100 km² para efectos de análisis espaciales

Los territorios priorizados fueron (Figura 2) el Parque Nacional Izta-Popo (México) y el Parque Nacional Cerro Azul Meámbar (Panacam, Honduras); el Bosque Modelo Reventazón (Costa Rica), el Bosque Modelo Comuna de Panguipulli, Región de los Ríos (Chile) y el Bosque Modelo Departamento de Risaralda, cuenca del río Otún (Colombia).



Figura 2. Ubicación de los territorios priorizados

Los territorios se distribuyen a lo largo de Latinoamérica. En el extremo sur se ubica Panquipulli, en una zona de vida templada, con ecosistemas de bosque característicos de esas latitudes (crecimiento lento, baja diversidad –pero única– y dominados por pocas especies). Izta-Popo se ubica en una zona subtropical, con bosques dominados por pinos y encinos, y los tres territorios restantes se encuentran en la zona tropical (Panacam, Reventazón y Risaralda), con bosques altamente dinámicos y de gran diversidad de especies.

La variedad de ecosistemas, de servicios ecológicos y de condiciones climáticas y sociales en los territorios permite abarcar una amplia gama de necesidades y de grados de vulnerabilidad al cambio climático. Los cinco territorios constituyen una plataforma idónea para el desarrollo y la ejecución de propuestas de adaptación, monitoreo y evaluación de resultados; además, servirán de ejemplo en la aplicación de enfoques y herramientas pioneras para catalizar la adaptación en el resto de la región.

Los servicios ecosistémicos que proveen estos bosques son variados. Destacan los servicios de aprovisionamiento de agua y madera, el almacenamiento de carbono y el ecoturismo (Semarnat 2013, AFE-Cohdefor 2000, Clerc y Vaillancourt 2009, Thibaut 2010, SINAC, s. f.). Las cuencas hidrográficas en Panacam, Izta-Popo y Reventazón se encuentran entre las principales a nivel del país respectivo. Panacam forma parte del embalse de la Central Hidroeléctrica Francisco Morazán, la más grande de Honduras, mientras que Izta-Popo y Reventazón suplen de agua a gran parte de la población en las áreas metropolitanas más densamente pobladas (las capitales, Ciudad de México y San José). El caso del Reventazón es excepcional pues forma parte de la masa boscosa continua más extensa de Costa Rica y presenta una topografía abrupta que, combinada con las altas precipitaciones en algunos sectores, de hasta 7000 mm anuales, favorece la presencia de más de 150 ríos. Su red hídrica abastece de agua al 50% de la población del Área Metropolitana de Costa Rica y tiene una gran importancia en la generación de energía hidroeléctrica. Se estima que el aporte actual de la energía hidroeléctrica de la cuenca, a nivel nacional, oscila entre 25-36%.

Risaralda sirve también de área captadora del recurso hídrico para varias ciudades intermedias del país que se encuentran en etapas de desarrollo y crecimiento, con tendencia al incremento en la demanda del recurso. Al constituir un área importante de reserva de biodiversidad, ofrece servicios de

ecoturismo para un gran porcentaje de la población asentada en la región montañosa del país. Panguipulli, por su parte, es un territorio con una alta densidad de población indígena mapuche que se dedica a la producción forestal, agricultura y turismo.

La vulnerabilidad en los territorios

El análisis de la vulnerabilidad se realizó a partir de la evaluación de la exposición climática y la sensibilidad de los tipos de bosques. La combinación de estos elementos (exposición + sensibilidad) establece el impacto potencial a nivel de ecosistema. También se desarrolló un análisis de la capacidad adaptativa para mitigar tales impactos. En conjunto, todos estos elementos determinan el nivel de vulnerabilidad de los principales tipos de bosques que se hallan en los territorios, de acuerdo a la siguiente ecuación (IPCC 2007):

$$[\text{Exposición} + \text{Sensibilidad}] - \text{capacidad adaptativa} = \text{Vulnerabilidad}$$

La metodología de análisis propuesta conlleva una valoración cuantitativa de cada elemento y una calificación del nivel de vulnerabilidad observado. Se propuso la siguiente escala de valoración de los niveles de vulnerabilidad de los tipos de bosque:

- Clase de vulnerabilidad >5 = alta
- Clase de vulnerabilidad ≥ 3 y ≤ 5 = media
- Clase de vulnerabilidad < 3 = baja

A continuación se detalla la metodología seguida.

La exposición en los territorios

Para los territorios, la información para el análisis de exposición provino de un trabajo realizado por investigadores de la Fundación para la Investigación del Clima (FIC) quienes desarrollaron simulaciones regionales de climas potenciales futuros para cada uno de los territorios². El desarrollo de las simulaciones conllevó la aplicación de una técnica de *regionalización estadística* sobre las proyecciones futuras disponibles generadas a partir de modelos climáticos globales, conocida como *downscaling* estadístico Ficlina (Ribalaygua *et ál.* 2013). Se trabajó con cuatro modelos climáticos diferentes del Earth System Model (ESM), los cuales fueron utilizados en el V Informe de Evaluación del

2 Gaitán, E; Torres, L; Monjo, R; Pórtolos. 2014. Generación de escenarios regionales de cambio climático para zonas forestales latinoamericanas mediante downscaling estadístico de modelos asociados al CMIP5. Informe de consultoría.

IPCC: el modelo MPI-ESM-MR del Max Plank Institute, el modelo CanESM2 del *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*, el modelo NorESM1 del *Norwegian Climate Centre* y el modelo GFDL-ESM2M del *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Cada modelo dispone de una simulación histórica (1951-2005) y varias simulaciones para el siglo XXI basadas en los RCP (*Representative Concentration Pathways*) definidos por el IPCC (Collins *et ál.* 2013). El horizonte de tiempo para las simulaciones es del 2070 al 2100, en adelante referido como finales del siglo XXI. Los RCP se refieren al forzamiento radiactivo alcanzado en el 2100 bajo las condiciones hipotéticas de emisiones futuras de gases con efecto invernadero impuestas en cada RCP. Los cuatro ESM disponen de datos procedentes del RCP 2.6 (Van Vuuren *et ál.* 2011), del 4.5 (Thomson *et ál.* 2011) y del 8.5 (Riahi *et ál.* 2011), mientras que los modelos NorESM1 y GFDL-ESM2 disponen además de datos para el RCP 6.0 (Fujino *et ál.* 2006). En total, se cuenta con una base de datos procedentes de los modelos climáticos compuesta por 14 simulaciones futuras para cada variable (Cuadro 2).

Cuadro 2. Modelos climáticos usados y RCP disponibles para cada uno de ellos

| Modelo | Escenarios | Modelo | Escenarios |
|------------|--|------------|---|
| MPI-ESM-MR | Históricos (1951-2005) Futuros: RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 | NorESM1 | Históricos (1951-2005) Futuros: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 |
| CanESM2 | Históricos: (1951-2005) Futuros: RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 | GFDL-ESM2M | Históricos (1951-2005) Futuros: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 |

La regionalización estadística requirió un estudio previo de las observaciones meteorológicas locales, incluyendo controles de calidad exhaustivos. El conjunto de datos usados incluye series diarias de temperatura (máxima y mínima) y de precipitación en las áreas de estudio o sus alrededores. La cantidad de observatorios que se pudieron utilizar tras superar todos los controles de calidad se muestra en el Cuadro 3. Para más detalles sobre los procedimientos, consultar a Ribalaygua *et ál.* (2013).

Cuadro 3. Número de observatorios de precipitación y temperatura utilizados en cada territorio

| Territorio | Observatorios | |
|-------------|---------------|-------------|
| | Precipitación | Temperatura |
| Panguipulli | 1 | 1 |
| Risaralda | 10 | 6 |
| Reventazón | 6 | 3 |
| Panacam | 8 | 5 |
| Izta-Popo | 26 | 26 |

Para evaluar la exposición de los territorios al cambio climático se simularon los cambios potenciales en las siguientes variables climáticas (calculadas a partir de las series diarias generadas por Ficlima): precipitación anual, precipitación relativa estacional, temperatura máxima anual, temperatura mínima anual, temperatura máxima estacional y temperatura mínima estacional. El análisis del cambio estacional se realizó en forma trimestral: diciembre, enero, febrero (DEF); marzo, abril, mayo (MAM); junio, julio, agosto (JJA); septiembre, octubre, noviembre (SON). La significancia del cambio se estimó para mediados de siglo en temperatura y para final de siglo en precipitación, de acuerdo con la escala típica de variabilidad natural. El climatólogo del proyecto (Jaime Ribalaygua) realizó una interpretación del cambio climático proyectado para los cinco territorios y asignó a cada variable climática un valor de 5, 3 ó 1, dependiendo de si el cambio esperado es alto, medio o bajo. El promedio obtenido, considerando todas las variables evaluadas, se tomó como el valor de exposición de cada territorio.

La sensibilidad según tipos de bosque

Climiforad desarrolló una metodología para evaluar la sensibilidad ecológica de los bosques a partir del ensamblaje de especies arbóreas dominantes, por ser las que determinan el funcionamiento de los ecosistemas (Grime 1998, Finegan *et ál.* 2015). La metodología consta de cuatro pasos: la identificación de las especies arbóreas dominantes, su asignación a tipos funcionales, la caracterización de la extensión de sus distribuciones altitudinales, y su asignación a categorías de sensibilidad. Estos pasos se describen a continuación.

1. Identificación de especies arbóreas dominantes en gradientes altitudinales

En cada territorio se establecieron redes de parcelas permanentes de medición (PPM) en bosques naturales ubicados en gradientes altitudinales, como en Reventazón donde el observatorio abarca bosques desde los 430 msnm y 2950 msnm, y en Risaralda que va de los 1700 msnm a los 3500 msnm. Las parcelas fueron establecidas y se miden siguiendo un protocolo estandarizado; en el caso de Izta-Popo, el protocolo fue adaptado a las particularidades del bosque de pinar (Acosta *et ál.* 2014). El área de las parcelas es de 0,25 ha en todos los territorios, excepto en Izta-Popo donde se ubicaron parcelas de 0,16 ha. La vegetación arbórea de ≥ 10 cm de diámetro a la altura del pecho (dap, 1,3 m) se evaluó en las parcelas de 0,25 ha, y de $\geq 7,5$ cm dap en Izta-Popo. Los individuos dentro de las parcelas fueron identificados a nivel de especie por botánicos y parataxónomos calificados. Los tipos de bosque a nivel de territorio fueron identificados a partir de la composición florística (en Reventazón, Panguipulli e Izta-Popo) y a partir de los pisos altitudinales en donde se ubicaron las parcelas (Panacam, Risaralda). Las especies dominantes de los bosques fueron identificadas siguiendo el siguiente procedimiento: para cada parcela establecida en un determinado territorio se calculó el área basal por especie, luego se ordenaron las especies de mayor a menor área basal por parcela y se estimó el área basal acumulada. Las especies que contribuyeron con el 80% del área basal acumulada de la parcela se consideraron dominantes. Una vez realizado este procedimiento para cada parcela se generó una lista única de especies dominantes en el territorio.

2. Caracterización funcional de las especies arbóreas dominantes

Los estudios de ecología aplicada y biología de la conservación muestran que ciertas especies son favorecidas por los impulsores antrópicos de cambio global, mientras que otras no. A nivel global, las especies extintas de mamíferos tienden a haber vivido en rangos geográficos pequeños, en rangos de hogar grandes, con tasas reproductivas bajas y tamaños corporales de medianos a grandes (Davidson *et ál.* 2009). La explotación convencional de madera y los efectos de borde en bosques tropicales fragmentados cambian la composición de especies y las características funcionales de la vegetación hacia estados con mayores tasas de procesos ecosistémicos – sistemas más “rápidos” (Finegan *et ál.* 2015). Los bosques secundarios regenerados en las extensas zonas de potreros degradados y abandonados en América Latina están compuestos por una flora arbórea poco diversa adaptada a estas perturbaciones fuertes; las especies del bosque maduro original casi no se encuentran (Janzen 1988, Chazdon 2014, Granda *et ál.* 2015).

Tomando los resultados de estos estudios como punto de partida, en este trabajo se caracterizaron las especies a partir de rasgos ligados a su respuesta potencial al cambio climático. En dos de los territorios esta tarea fue relativamente simple, ya que contienen pocas especies: en Izta-Popo el pino *Pinus hartwegii*; en Panguipulli, dos de los cinco tipos de bosque son dominados por una especie (*Nothofagus pumilio*). Pero en los territorios del trópico húmedo la situación es otra. En 3,5 ha muestreadas por Climiforad en Panacam, entre 900 y 2080 msnm, se encontraron 231 especies de árboles, palmas y helechos arborescentes con dap >10 cm; en la primera medición de las parcelas del observatorio en el territorio Reventazón, en 8,0 ha muestreadas entre 430 y 2950 msnm, se encontraron 465 especies >10 cm dap. La gestión para la adaptación no puede basarse en el conocimiento individual de tantas especies; esta es una razón adicional por la cual las especies deben de ser agrupadas con base en características clave que definan su respuesta ante la variación ambiental (Díaz y Cabido 2001) y ante el cambio climático en particular.

Climiforad adaptó estos principios para la caracterización de la sensibilidad ecológica al cambio climático. El análisis de sensibilidad realizado consistió en asignar las especies dominantes a tipos funcionales adquisitivos o conservativos (Díaz *et ál.* 2004), según los valores de cinco rasgos ecológicos indicativos de diferentes grados de sensibilidad ante el cambio climático: masa de semillas, método de dispersión, densidad de madera, altura máxima y tasa de crecimiento. Esto se hizo por medio de mediciones directas de rasgos, utilizando protocolos estandarizados (Pérez-Harguindeguy *et ál.* 2013) y consultas con expertos botánicos y parataxónomos.

Los rasgos funcionales son cualquier característica morfológica, fisiológica, bioquímica, estructural, de comportamiento o fenológica, medible a nivel individual para todo organismo (Violle *et ál.* 2007, Díaz *et ál.* 2011, Cadotte *et ál.* 2011). Se relacionan estrechamente con los procesos ecosistémicos e influyen fuertemente en la función de los ecosistemas y en su respuesta a impactos humanos (Díaz y Cabido 1997, 2001). Además, son indicativos del desempeño y rendimiento de las especies, de su función en el ecosistema y del grado de tolerancia ambiental, requerimientos de hábitat y respuestas a perturbaciones; aspectos muy difíciles de evaluar de forma directa, sobre todo cuando se trata de un gran número de especies (Mason *et ál.* 2003).

La caracterización funcional para la determinación de la sensibilidad se basó en los siguientes principios:

- La convivencia y supervivencia de las especies vegetales en los bosques se asocia a dos estrategias ecológicas contrastantes: la adquisitiva y la conservativa, que definen las dos grandes categorías de tipos funcionales (Díaz *et ál.* 2004). Un tipo funcional contiene un conjunto de especies que comparten rasgos funcionales similares y, por tanto, exhiben una similar respuesta a condiciones ambientales y producen un efecto similar en los procesos ecosistémicos (Díaz y Cabido 1997).
- Las especies arbóreas de tipo funcional adquisitivo se caracterizan, en términos generales, por ser pioneras y con semillas pequeñas dispersadas por el viento o por vertebrados voladores generalistas; su tasa de crecimiento es relativamente rápida, así como su capacidad de adquisición de recursos; su madera es de baja densidad, con baja concentración de lignina y altos contenidos de nitrógeno (Díaz *et ál.* 2004, Poorter *et ál.* 2008); sus hojas grandes, delgadas, suaves, ricas en nutrientes tienen un área foliar específica (AFE) alta y bajo contenido foliar de materia seca (CFMS) (Díaz *et ál.* 2004, Poorter *et ál.* 2008).
- Las especies arbóreas de tipo funcional conservativo son de crecimiento lento y tienden a conservar recursos (los retienen en su biomasa aérea y radicular) (Díaz *et ál.* 2004). Tienen una AFE baja, alta densidad de madera, hojas duras muchas veces pequeñas y con bajo contenido de nutrientes (Kühner y Kleyer 2008); las semillas son grandes y dispersadas principalmente por aves y mamíferos medianos y grandes.
- El tamaño del árbol adulto es un rasgo funcional clave, casi siempre independiente de los demás rasgos (Poorter *et ál.* 2008). En los territorios tropicales (Panacam, Reventazón y Risaralda), por ejemplo, hay especies adquisitivas de tamaño mediano cuando adultas (*Cecropia* spp., *Heliocarpus* spp.) y conservativas del mismo tamaño (*Elaeagia* spp., *Ardisia* spp.). Asimismo, entre las especies de dosel superior o emergentes, figuran especies adquisitivas (*Magnolia yoroconte*, *Vochysia* spp.) y también conservativas (*Hirtella triandra*, *Carapa guianensis*).

Estos tipos funcionales de especies pueden coexistir en el mismo sitio, pero en nichos diferentes, ante procesos de cambio en el ambiente y perturbaciones (Kühner y Kleyer 2008). En el marco desarrollado por Climiforad, una evaluación cualitativa de cómo el cambio climático puede impactar de forma negativa o positiva a estos tipos funcionales (variaciones en tasas de mortalidad, crecimiento, reproducción, diseminación y distribución geográfica) contribuyó a la caracterización de la sensibilidad y sirvió de base para el diseño e implementación de medidas de adaptación orientadas a conservar especies y sus funciones.

Las especies adquisitivas serían potencialmente favorecidas si el cambio en las condiciones del clima propicia un aumento en la productividad ecológica (p.e., aumento de temperatura y radiación solar en climas fríos y nublados, o de precipitación en climas secos). Del mismo modo, si una mayor exposición climática propicia cambios de distribución geográfica potencial, la alta capacidad de dispersión y de crecimiento de estas especies también las favorece. La consideración de la dispersión debe tomar en cuenta la posibilidad de efectos indirectos del cambio climático en la fauna dispersora de semillas. En este sentido, las especies adquisitivas pueden ser menos sensibles pues las semillas de muchas de ellas son dispersadas por el viento o por vertebrados generalistas, a diferencia de las conservativas que dependen más de animales relativamente grandes para trasladar sus también grandes semillas.

3. Determinación de la distribución geográfica de las especies

La extensión de la distribución geográfica (Rabinowitz 1981) es un criterio de importancia primordial para la evaluación de la sensibilidad de una especie (ver www.iucnredlist.org). Se estimó para cada una de las especies dominantes, el rango altitudinal donde se encuentran y el nivel de distribución dentro del territorio (restringida, intermedia o amplia). Los criterios considerados fueron los siguientes: número de zonas de vida de Holdridge (1987) donde se ubican (Reventazón), número de pisos altitudinales en que se encuentran (Panacam, Risaralda) y número de tipos forestales en que se hallan (Panguipulli, Izta Popo). Así, si una especie se encuentra en una zona de vida o un piso altitudinal o un tipo forestal se considera de *distribución restringida*; si se encuentra en dos zonas de vida o dos pisos altitudinales o dos tipos forestales es de *distribución intermedia*, y si se encuentra en tres o más zonas de vida, pisos altitudinales o tipos forestales es de *distribución amplia*. Debido a la estrecha relación entre la altitud sobre el nivel del mar y la temperatura, el rango altitudinal donde actualmente se encuentran las especies es una medida indirecta de la amplitud de su rango de tolerancia a la temperatura.

La extensión de la distribución altitudinal de las especies se evaluó en función del territorio. Ninguno de los territorios se extiende desde el nivel del mar, pero es probable que algunas de las especies arbóreas evaluadas tengan distribuciones desde el nivel del mar hasta las franjas inferiores de los territorios. En estos casos, la calificación del rango de distribución altitudinal variaría; no obstante, los territorios representan unidades de gestión y consideramos que la sensibilidad debe referirse a este ámbito. Además, una mayoría de los territorios están rodeados por áreas agropecuarias, de manera que sus distribuciones altitudinales efectivas son delimitadas por los límites de los territorios.

4. La sensibilidad de los bosques como producto del tipo funcional y de la distribución geográfica de las especies

La combinación de las características: *tipo funcional y distribución de la especie* se consideró como un indicativo de su nivel de sensibilidad a cambios en el clima, lo que permite el siguiente agrupamiento de especies:

- Las especies conservativas y de distribución restringida se consideran altamente sensibles a cambios climáticos.
- Las especies conservativas y de distribución intermedia se consideran de sensibilidad media.
- Las especies conservativas y de distribución amplia se consideran de sensibilidad baja.
- Las especies adquisitivas y de distribución restringida se consideran de sensibilidad media.
- Las especies adquisitivas y de distribución intermedia y amplia se consideran de sensibilidad baja.

El análisis de sensibilidad se hizo para cada uno de los tipos de bosques identificados en los territorios, según estudios específicos realizados por Veintimilla (2013) para el caso de Reventazón; clasificaciones florísticas establecidas (Izta-Popo y Panguipulli), y los bosques delimitados en franjas altitudinales en Panacam y Risaralda. Para cada tipo de bosque se registró la proporción de especies dominantes con sensibilidad alta, media y baja.

La sensibilidad por tipo de bosque se calificó multiplicando la proporción de especies de cada agrupamiento por un valor de escala de 5, 3 ó 1 según su nivel de sensibilidad (alto, medio, o bajo, respectivamente). Luego se sumó dentro de cada tipo de bosque el resultado de los productos para obtener el nivel de sensibilidad por ecosistema. La fórmula empleada fue la siguiente:

$$\text{Calificación} = \sum \left(\frac{\text{No. de especies en un determinado agrupamiento}}{\text{No. total de especies dominantes}} * \text{Valor de escala} \right)$$

Se propone la siguiente escala de **valoración de la sensibilidad** de los tipos de bosque:

- *Clase de sensibilidad baja (≤ 2.0)*. De acuerdo con la fórmula propuesta, este valor indica que aproximadamente $\leq 30\%$ de las especies dominantes del bosque son de sensibilidad alta o media. Esto sugiere que en el tipo de bosque predominan especies de distribución intermedia o amplia, de tipo funcional adquisitivo; se esperan relativamente pocos cambios en las poblaciones de las especies dominantes en cuanto a su abundancia, distribución y crecimiento por efectos del cambio climático.
- *Clase de sensibilidad media (>2.0 y ≤ 3.0)*. Este valor indica que entre un 30-65% de las especies dominantes del bosque son de sensibilidad alta o media. En el tipo de bosque, la proporción de especies con distribución restringida o intermedia es mayor que en el caso anterior. Esto sugiere que se esperan mayores cambios en las poblaciones de las especies dominantes en cuanto a su abundancia, distribución y crecimiento por efectos del cambio climático.
- *Clase de sensibilidad alta (>3.0)*. Más de un 65% de las especies dominantes del bosque son de sensibilidad alta o media, y predominan especies de tipo funcional conservativo y de distribución restringida. Bajo este escenario se esperan cambios importantes en las poblaciones de las especies dominantes en cuanto a su abundancia, distribución y crecimiento por efectos del cambio climático.

En el Cuadro 4 se presenta un ejemplo hipotético.

Cuadro 4. Número y proporción de especies dominantes (entre paréntesis) por tipo de bosque dentro de un territorio para diferentes clases de sensibilidad según tipo funcional y categoría de distribución geográfica

| Agrupamiento de especies | Clase de sensibilidad | Valor de escala | Bosque 1 | Bosque 2 | Bosque 3 |
|--|-----------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| Conservativo/ restringido | Alta | 5 | 17 (0,17) | 30 (0,30) | 40 (0,40) |
| Adquisitivo/ restringido Conservativo/ intermedio | Media | 3 | 13 (0,13) | 35 (0,35) | 30 (0,30) |
| Conservativo/ amplio Adquisitivo/ amplio Adquisitivo/ intermedio | Baja | 1 | 70 (0,70) | 35 (0,35) | 30 (0,30) |
| Total de especies | | | 100 | 100 | 100 |
| Calificación de sensibilidad | | | 1,94 | 2,90 | 3,20 |
| Grado de sensibilidad según calificación | | | Baja | Media | Alta |

Capacidad adaptativa en los territorios

Para efectos del análisis de la capacidad adaptativa se adaptó la metodología propuesta por SINAC (2013), la cual considera cuatro criterios:

1. La capacidad de gestión de los territorios (bosque modelo, parque nacional)
2. La gestión de los elementos en el territorio (áreas silvestres protegidas, corredores biológicos)
3. La conectividad para la migración de especies entre ASP y áreas naturales y seminaturales no protegidas
4. La capacidad adaptativa de las poblaciones humanas locales

Todos estos criterios se relacionan con la capacidad para actuar de los gestores del territorio y de los pobladores locales. Los dos primeros se enfocan en temas relacionados con el cambio climático y la adaptación, así como la planificación y mitigación de impulsores antrópicos, climáticos y no climáticos, que aumentan la sensibilidad de los ecosistemas a los procesos climáticos. El Criterio 3 es clave para los procesos ecológicos que contribuyen a la resiliencia y la adaptación, tales como los movimientos de agentes de polinización y dispersión de semillas y las migraciones. El Criterio 4 se basa en la medición de las características clave de la población local para la adaptación al cambio climático, incluyendo aspectos socioeconómicos y de dependencia de recursos potencialmente impactados por cambio climático.

Para SINAC (2013), en un territorio que tenga objetivos y acuerdos claros con los pobladores en cuanto al manejo de los recursos y donde, a la vez, los pobladores tienen sus necesidades básicas satisfechas, reciben información y se encuentran organizados, la capacidad de adaptación e implementación de estrategias de adaptación será mucho mayor que en un territorio donde no se den esas condiciones. Este análisis, como componente de la evaluación de la vulnerabilidad, complementa el análisis de la sensibilidad ecológica, antes descrito.

A continuación se analizan en detalle los criterios que definen la capacidad adaptativa y la forma de abordarlos para el estudio.

Criterio 1. La gestión del territorio (bosque modelo o parque nacional)

Para evaluar la capacidad de gestión de los territorios se utilizaron herramientas específicas diseñadas para determinar el desempeño del manejo del bosque modelo o parque nacional. En los tres territorios que contienen bosques modelo (Panguipulli, Risaralda y Reventazón) se recopiló información por medio del *‘estándar para el monitoreo y evaluación de bosques modelo’* (Cuadro 5). Este estándar permite integrar las generalidades y particularidades de cada bosque modelo en cuanto a aspectos sociales, ambientales y económicos, de modo que se puedan identificar sus fortalezas y debilidades, así como el estado de progreso de su gestión y proponer medidas correctivas en caso de ser necesarias. Este mismo instrumento se usó también para evaluar el Parque Nacional Izta-Popo, en vista de que México no cuenta con un instrumento para evaluar la gestión de áreas protegidas.

Cada indicador fue evaluado mediante consultas a gestores en los cuatro territorios. La escala empleada fue: 5= *bueno (estado adecuado del indicador)*; 3= *regular (existen avances pero algunos aspectos deben mejorar)*; 1= *deficiente (muy poco avance, mal estado del indicador)*. La calificación obtenida se justificó debidamente con los comentarios de los entrevistados. El producto final del análisis de la capacidad de gestión es la presentación de los resultados de la evaluación del estándar, así como las fortalezas y deficiencias en el desempeño de la gestión.

Cuadro 5. Principios del estándar para el monitoreo y evaluación de bosques modelo utilizado para evaluar la capacidad de gestión en los territorios Reventazón, Risaralda, Panguipulli e Izta-Popo

| Principios | Número de criterios | Número de indicadores |
|---|---------------------|-----------------------|
| 1. Asociación: cada bosque modelo es un foro neutral que acoge la participación voluntaria de quienes representan los intereses y valores de los actores en relación con el paisaje. | 5 | 11 |
| 2. Paisajes: cada bosque modelo es una extensa área biofísica que representa una amplia gama de valores del bosque, incluyendo valores sociales, culturales, económicos y ambientales. | 3 | 8 |
| 3. Compromiso con la sostenibilidad: los actores se comprometen con la conservación y gestión sostenible de los recursos naturales y paisajes boscosos. | 4 | 12 |
| 4. Gobernanza: el manejo de los bosques modelo es inclusivo, participativo, transparente y responsable, y promueve la colaboración entre las partes. | 5 | 14 |
| 5. Programa de actividades: las actividades en un bosque modelo reflejan la visión, necesidades y valores de los actores y los desafíos de la gestión. | 5 | 13 |
| 6. Intercambio de conocimientos, construcción de capacidades y trabajo en red: un bosque modelo genera entre sus actores la capacidad de comprometerse con el manejo sostenible de los recursos naturales, colaborar con los otros y compartir sus resultados y lecciones aprendidas a través del trabajo en redes. | 4 | 10 |

Fuente: Dumet *et ál.* (2012)

Para la evaluación de la capacidad de gestión del territorio Panacam se usó el *'Manual para la aplicación de la metodología de monitoreo de efectividad de manejo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Honduras'* (AFE-Cohdefor 2007). Este consiste en un conjunto de 35 indicadores que evalúan aspectos sociales (comunicación, participación, tenencia de la tierra y educación), administrativos (equipo, infraestructura, personal, planificación), recursos naturales (aprovechamiento, control y protección, conocimiento de los recursos del área), político-legal (marco legal, marco institucional, relaciones entre organizaciones) y económico-financiero (autosuficiencia, producción de bienes y servicios, beneficios a usuarios). Se usó la misma escala de evaluación de los indicadores de gestión empleada en los otros territorios.

Las calificaciones finales del criterio 'capacidad de gestión del territorio' (CGT) se obtuvieron con el procedimiento y las fórmulas siguientes:

1. Una calificación para cada criterio partiendo de las calificaciones de los indicadores que lo conforman:

$$\text{Calificación de cada criterio} = \frac{\text{Suma de notas de indicadores del criterio}}{\text{No. de indicadores del criterio}}$$

2. Una calificación para cada principio partiendo de las calificaciones de los criterios que lo conforman:

$$\text{Calificación de cada principio} = \frac{\text{Suma de calificaciones de cada criterio dentro de un principio}}{\text{No. de criterios en el principio evaluado}}$$

3. Una calificación general para la CGT:

$$\text{Calificación de la CGT} = \frac{\text{Suma de calificaciones de cada principio}}{\text{No. de principios}}$$

| | |
|--------------------|---|
| Criterio 2. | La gestión de los elementos en el territorio (áreas silvestres protegidas y corredores biológicos) |
|--------------------|---|

Este criterio se evaluó a partir de elementos clave a nivel de territorio que permiten una adaptación planificada. Como base se usó el planteamiento de Welch (2005), el cual consta de cinco indicadores (Cuadro 6).

Cuadro 6. Indicadores para la evaluación de la gestión de elementos en el territorio

| Indicadores de la gestión de elementos en los territorios (ASP, CB) | Justificación/aspectos a considerar |
|--|--|
| 1. Nivel de conocimiento del personal, actores y poblaciones locales acerca de los principales impactos del cambio climático en el entorno | <ul style="list-style-type: none"> • Conocimiento de actores clave sobre impactos del cambio climático en el territorio • Eventos de capacitación realizados en temas de CC y sus impactos • Organizaciones encargadas de realizar capacitaciones y su desempeño en tales actividades |
| 2. Nivel de conocimiento del personal, actores y poblaciones locales sobre las bases para la adaptación al cambio climático | <ul style="list-style-type: none"> • Conocimiento de actores clave sobre el tema de adaptación al CC • Eventos de capacitación realizados en temas de adaptación al CC • Organizaciones encargadas de realizar capacitaciones y su desempeño en tales actividades |
| 3. Nivel de inclusión de temas relacionados con el cambio climático y adaptación en los planes de manejo, investigación y monitoreo | <ul style="list-style-type: none"> • Revisión de planes de manejo (áreas protegidas, parques nacionales, corredores biológicos) y verificación de inclusión de temas relacionados con el CC en los planes de manejo, investigación y monitoreo • Organizaciones realizan investigación y monitoreo del CC en el territorio |
| 4. Manejo de ecosistemas que mitigan amenazas no climáticas (p.e. contaminación, manejo forestal sostenible) | <ul style="list-style-type: none"> • Revisión de planes de manejo (áreas protegidas, parques nacionales, corredores biológicos) en cuanto a temas de control y mitigación de impactos por contaminación, manejo sostenible de recursos naturales, etc. • Existencia de planes de manejo de contaminantes, manejo forestal sostenible, y su efectiva aplicación en el territorio • Valoración general del manejo que se ejecuta (de contaminantes y de recursos naturales) |
| 5. Revisión de límites y zonificación del territorio considerando aspectos de adaptación al cambio climático | <ul style="list-style-type: none"> • Modificaciones a la zonificación o límites del territorio y sus componentes (corredores biológicos, áreas protegidas, etc.) con el fin de impulsar la adaptación; p.e., incorporar a un corredor biológico los ecosistemas o poblaciones humanas amenazadas por el CC |

Fuente: Adaptado de Welch (2005)

La calificación final del criterio 'gestión de los elementos del territorio' (GET) se obtuvo con la fórmula siguiente:

$$\text{Calificación de la capacidad de GET} = \frac{\text{Suma de notas de indicadores}}{\text{No. de indicadores}}$$

Criterio 3. La conectividad entre áreas silvestres protegidas para la migración de especies

La conectividad entre ASP para la migración de especies se evaluó mediante un análisis de los indicadores que se detallan en el Cuadro 7. La escala de evaluación fue la misma empleada con los dos criterios anteriores.

Cuadro 7. Indicadores para la evaluación de la conectividad entre áreas silvestres protegidas para la migración de especies

| Indicadores de conectividad entre ASP para la migración de especies | Justificación/ aspectos a considerar |
|--|---|
| 1. El diseño del corredor biológico facilita la dispersión de la biota bajo condiciones cambiantes del clima | <ul style="list-style-type: none"> Los corredores biológicos deben contar con un diseño adecuado que facilite los movimientos de una mayoría de la biota presente bajo condiciones climáticas actuales y futuras. Se debe considerar el nivel de representatividad de ecosistemas de la región y la gradiente altitudinal que el territorio abarca (entre mayor abarque, mejor el diseño). |
| 2. Las características del corredor biológico contribuyen a la migración de especies ante el cambio climático: tamaño, rango altitudinal, punto de mayor altitud | <ul style="list-style-type: none"> Consideraciones de conectividad entre hábitats naturales (qué tan fragmentados se encuentran, proporción de usos del suelo, tamaño del corredor). |

La calificación final del criterio 'conectividad para la migración de especies' (CME) se obtuvo con la fórmula siguiente:

$$\text{Calificación de la CME} = \frac{\text{Suma de notas de indicadores}}{\text{No. de indicadores}}$$

Criterio 4. La capacidad adaptativa de las poblaciones locales

La capacidad adaptativa de las poblaciones locales considera aspectos propuestos por Wongbusarakum y Loper (2011) y Adger *et ál.* (2004), quienes parten de las condiciones socioeconómicas de los pobladores clave para determinar la capacidad de adaptación al cambio climático. Los indicadores usados incluyen la evaluación de la pobreza, la provisión de servicios básicos, aspectos de actividades productivas, acceso a información y capacidad organizativa. Para efectos del análisis se solicitó a los encuestados respuesta y discusión de una serie de preguntas previamente establecidas (Cuadro 8). Para los indicadores 1 y 2 se usó la escala: 1= alto; 3= medio; 5= bajo. Para los demás indicadores se aplicó la escala: 5= bueno; 3= regular; 1= deficiente.

Cuadro 8. Indicadores para la evaluación de la capacidad adaptativa de las poblaciones locales

| Indicadores de la capacidad adaptativa de las poblaciones locales | Justificación/ aspectos a considerar |
|---|---|
| 1. Proporción de grupos humanos demográficamente vulnerables que requieren más apoyo para la adaptación al cambio climático | ¿Cuál es la proporción de grupos vulnerables al cambio climático que necesitan mayor atención? |
| 2. Proporción de la población que depende de los recursos naturales/ servicios ecosistémicos más sensibles al cambio climático para sostener sus medios de vida | ¿Qué proporción de las poblaciones humanas depende de recursos naturales y/o servicios ecosistémicos particularmente sensibles al cambio climático? (agua, madera, turismo) |
| 3. Acceso y uso de conocimientos relacionados con el clima por parte de los pobladores | ¿Cuál es el capacidad de acceso a conocimientos relacionados con el clima por parte de los pobladores? (información meteorológica, publicaciones científicas, planes de manejo) ¿En qué medida apoyan a la toma de decisiones en el territorio los conocimientos relacionados con el cambio climático? |
| 4. Capacidad de organización de la comunidad frente a los impactos potenciales del cambio climático | ¿Está la comunidad preparada para afrontar impactos provocados por el cambio climático? ¿Cuál es el nivel de organización que actualmente tienen? ¿Es suficiente para mitigar impactos? |
| 5. Acceso equitativo a los recursos y servicios que permiten una mayor capacidad adaptativa a los pobladores locales | ¿Qué tan equitativo es el acceso a recursos y servicios que permiten una mayor capacidad de adaptación al cambio climático? (crédito, educación, capacitación, distribución de red vial) |

La calificación final del criterio 'capacidad adaptativa de poblaciones locales' (CAPL) se obtuvo con la fórmula siguiente:

$$\text{Calificación de la CAPL} = \frac{\text{Suma de notas de indicadores}}{\text{No. de indicadores}}$$

La calificación global de la capacidad adaptativa (CA) en los territorios se hizo combinando los resultados de las evaluaciones realizadas a los cuatro criterios, por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Calificación de la CA} = \frac{\text{Suma de calificaciones de los 4 aspectos evaluados}}{4}$$

Resultados de la evaluación de la vulnerabilidad

Exposición

Las simulaciones climáticas para finales del siglo XXI desarrolladas muestran una exposición alta en Reventazón, Risaralda e Izta-Popo; media para Panacam y baja para Panguipulli (Cuadro 9). Los cambios más importantes en el clima, con respecto al periodo histórico 1951-2005, es probable que se den en las variables relacionadas con temperatura, más que con la precipitación. Las temperaturas máximas y mínimas experimentarán aumentos progresivos durante el siglo en todos los territorios; como es de esperar, los mayores ascensos se tendrán en los meses de verano. La precipitación, por su parte, tenderá también a aumentar, excepto en Panguipulli donde las proyecciones indican que se reducirá. Resultados detallados de las simulaciones climáticas para los territorios se encuentran en el Anexo 1.

Cuadro 9. Calificación de la exposición climática en los territorios

| Variables | Territorios | | | | |
|---|-------------|------------|------------|------------|-------------|
| | Reventazón | Risaralda | Panacam | Izta-Popo | Panguipulli |
| Precipitación anual | 5 | 5 | 1 | 5 | 3 |
| Precipitación relativa estacional (DEF) | 5 | 5 | 1 | 5 | 3 |
| Precipitación relativa estacional (MAM) | 5 | 5 | 1 | 3 | 1 |
| Precipitación relativa estacional (JJA) | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| Precipitación relativa estacional (SON) | 5 | 5 | 3 | 5 | 3 |
| Temperatura máxima anual | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Temperatura mínima anual | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| Temperatura máxima estacional (DEF) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Temperatura máxima estacional (MAM) | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| Temperatura máxima estacional (JJA) | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| Temperatura máxima estacional (SON) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Temperatura mínima estacional (DEF) | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| Temperatura mínima estacional (MAM) | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Temperatura mínima estacional (JJA) | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| Temperatura mínima estacional (SON) | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| Calificación promedio exposición climática | 5,0 | 5,0 | 3,8 | 4,6 | 2,9 |

Sensibilidad

Del total de 17 tipos de bosque identificados en los cinco territorios, seis de ellos muestran sensibilidad alta debido a que una gran proporción de sus especies dominantes son de tipo funcional conservativo y tienen distribución altitudinal restringida (Cuadro 10). Se espera que estos bosques sufran cambios importantes a nivel de las poblaciones de especies dominantes (abundancia, distribución y crecimiento) por efectos del cambio climático. Todos los bosques con sensibilidad alta se encuentran en territorios del trópico (Reventazón, Panacam y Risaralda), mientras que en condiciones subtropicales (Izta-Popo) y templadas (Panguipulli) predominan los bosques de sensibilidad baja, con especies dominantes principalmente de tipo adquisitivo y de distribución

altitudinal media o amplia. Panacam es el territorio con mayor sensibilidad global, ya que de los cuatro bosques allí identificados, tres tienen sensibilidad alta y uno sensibilidad media. En Izta-Popo, los dos tipos de bosques identificados (pino y pino-encino) muestran sensibilidad baja.

Tanto en Reventazón como en Panacam, los bosques a menor elevación (entre 430 -620 msnm en Reventazón y 900-1200 msnm en Panacam) presentan una sensibilidad alta. Estos bosques tienen una alta proporción de especies conservativas que únicamente se encuentran a estas elevaciones dentro de las gradientes. En Reventazón, dichas especies son *Brosimum guianense*, *B. lactescens*, *Carapa guianensis*, *Minquartia guianensis*, *Protium pittieri*, *P. ravenii*, *P. panamensis*, especies del género *Guarea* (*G. glabra*, *G. bullata*, *G. rhopalocarpa*), especies del género *Virola* (*V. koschnyi*, *V. macrocarpa*, *V. multiflora*, *V. sebifera*) y las palmas *Welfia regia* y *Socratea exorrhiza*; en Panacam, las especies en cuestión son *Dialium guianensis*, *Podocarpus guatemalensis* y *Nectandra membranacea*.

Contrario a lo que se esperaba, a mayores elevaciones en Reventazón, Panacam, Panguipulli e Izta-Popo, los bosques presentan sensibilidad media y baja, mientras en Risaralda el bosque de altura sí mostró sensibilidad alta. Las especies dominantes en las cumbres de las cordilleras tienden a ser conservativas: en Reventazón, el roble blanco (*Quercus bumelioides*) es muy abundante en los robledales que se forman a partir de los 2000 msnm; otras especies presentes son *Ocotea austinii*, *Styrax argenteus* y *Weinmannia pinnata*. En Panacam dominan los robles *Quercus laurina* y *Quercus salicifolia*; en Panguipulli, la especie forestal conocida como lenga (*Nothofagus pumilio*) y en Risaralda, *Weinmannia mariquitae*, *Miconia bracteolata*, *M. myrtilifolia*, *Vaccinium floribundum* y *Brunellia goudotii*. La condición conservativa se asocia con una alta sensibilidad; sin embargo, muchas de las especies conservativas dominantes en bosques de partes altas de los territorios tienden a tener distribuciones altitudinales intermedias o incluso amplias. Esta característica les da su condición de sensibilidad media. En Izta-Popo, por el contrario, la especie ampliamente dominante en los bosques de pino y pino-encino a elevaciones altas es *Pinus hartwegii*, una adquisitiva de distribución intermedia, de ahí la baja sensibilidad de estos tipos de bosque.

Cuadro 10. Análisis de sensibilidad por tipo de bosque en los territorios evaluados

| Territorio | Tipo de bosque | Agrupamiento de especies * | | | Total de especies dominantes | Calificación de sensibilidad** | Grado de sensibilidad según calificación |
|-------------|-------------------------------|--|---|---|------------------------------|--------------------------------|--|
| | | Conservativa restringida (sensibilidad alta, valor de la escala = 5) | Adquisitiva restringida, conservativa intermedia (sensibilidad media, valor de la escala = 3) | Conservativa amplia, adquisitiva amplia, adquisitiva intermedia (sensibilidad baja, valor de la escala = 1) | | | |
| Reventazón | Tropical (360-500 msnm) | 25 (0,66) | 5 (0,13) | 8 (0,21) | 38 | 3,9 | Alta |
| | Premontano (1000-1200 msnm) | 0 (0) | 7 (0,41) | 10 (0,59) | 17 | 1,8 | Baja |
| | Montano bajo (1200-1600 msnm) | 4 (0,20) | 7 (0,35) | 9 (0,45) | 20 | 2,5 | Media |
| | Montano (2200-3000 msnm) | 0 (0) | 6 (0,86) | 1 (0,14) | 7 | 2,7 | Media |
| Panacam | Bosque 1 (900-1200 msnm) | 13 (0,48) | 8 (0,30) | 6 (0,22) | 27 | 3,5 | Alta |
| | Bosque 2 (1200-1500 msnm) | 13 (0,37) | 20 (0,57) | 2 (0,06) | 35 | 3,6 | Alta |
| | Bosque 3 (1500-1800 msnm) | 10 (0,28) | 20 (0,55) | 6 (0,17) | 36 | 3,2 | Alta |
| | Bosque 4 (1800-2080 msnm) | 8 (0,24) | 17 (0,50) | 9 (0,26) | 34 | 3,0 | Media |
| Risaratda | Bosque 1 (1700-2000 msnm) | 2 (0,40) | 2 (0,40) | 1 (0,20) | 5 | 3,4 | Alta |
| | Bosque 2 (2000-2500 msnm) | 1 (0,20) | 0 (0) | 4 (0,80) | 5 | 1,8 | Baja |
| | Bosque 3 (2500-2600 msnm) | 0 (0) | 1 (0,20) | 4 (0,80) | 5 | 1,4 | Baja |
| | Bosque 4 (3000-3500 msnm) | 3 (0,60) | 1 (0,20) | 1 (0,20) | 5 | 3,8 | Alta |
| Panguipulli | Roble-Raulí-Coigüe | 0 (0) | 3 (0,50) | 3 (0,50) | 6 | 2,0 | Baja |
| | Coigüe-Raulí-Tepa | 0 (0) | 3 (0,50) | 3 (0,50) | 6 | 2,0 | Baja |
| | Lenga | 1 (0,33) | 1 (0,33) | 1 (0,33) | 3 | 3,0 | Media |
| Izta-Popo | Pino-encino | 0 (0) | 3 (0,50) | 3 (0,50) | 6 | 2,0 | Baja |
| | Pino | 0 (0) | 3 (0,50) | 3 (0,50) | 6 | 2,0 | Baja |

* Número de especies dominantes por tipo de bosque y proporción con respecto al total de especies dominantes entre paréntesis.

** La calificación de la sensibilidad se obtiene sumando dentro de cada tipo de bosque el producto de la proporción de especies dominantes por el valor de la escala de sensibilidad

Capacidad adaptativa

Para la evaluación de la capacidad adaptativa de los territorios se entrevistaron personas de los directorios de los bosques modelo y parques nacionales correspondientes, así como de instituciones del gobierno (representantes municipales y del Servicio Forestal), de universidades, asociaciones ambientalistas y comunales, ONG, líderes indígenas, empresas privadas y consultores privados vinculados con la gestión de los recursos naturales y el trabajo con comunidades locales.

Además, se revisaron los planes de manejo de las principales áreas protegidas en los territorios: Semarnat (2013) para Izta Popo; AFE-Cohdefor (2000) para Panacam; en Reventazón se revisaron los planes de manejo del Parque Nacional Barbilla (Clerc y Vaillancourt 2009, Thibaut 2010), Parque Nacional Tapantí (SINAC, sf), documentos sobre la gestión del bosque modelo (McTavish *et ál.* 2014) y sobre aspectos de vulnerabilidad de comunidades locales (Ríos *et ál.* 2012).

En términos generales, existe una adecuada gestión a nivel de territorio (Criterio 1) (Cuadros 11 y 12). Los principios de 'paisaje', 'programa de actividades' e 'intercambio de conocimientos, construcción de capacidades y trabajo en red' son los mejor calificados. Los directorios de los bosques modelo cuentan con una adecuada representación de actores clave, como redes locales, corredores biológicos, ONG y gobierno, y se han hecho esfuerzos exitosos en sinergias y trabajo en redes con tales actores. No obstante, otros actores, como las comunidades indígenas, se encuentran poco representadas y atendidas. La ejecución y coordinación de actividades no son expeditas debido a la falta de financiamiento y de personal estable y remunerado, lo que provoca un lento avance en la gestión y en el proceso de comunicación entre los miembros (principio de 'gobernanza'). Esta situación repercute en el impacto de la gestión de los recursos naturales y en el fortalecimiento de las comunidades. Por falta de recursos, más que implementar actividades propias, los bosques modelo facilitan y apoyan otras iniciativas en marcha, como los corredores biológicos en Reventazón. Hace falta incidir más en aspectos de capacitación y educación ambiental y formación de recurso humano. Izta-Popo tuvo una baja calificación en el principio de 'asociación' debido a que no se toma en cuenta la opinión de los pobladores, sino que el control es vertical desde la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).

Cuadro 11. Calificación de los principios del estándar para el monitoreo y evaluación de bosques modelo en los territorios donde se aplicó el estándar

| Principios | Calificaciones | | | |
|---|----------------|------------|-------------|------------|
| | Reventazón | Risaralda | Panguipulli | Izta-Popo |
| 1. Asociación | 4,6 | 4,6 | 4,5 | 2,5 |
| 2. Paisajes | 4,6 | 4,7 | 3,7 | 4,5 |
| 3. Compromiso con la sostenibilidad | 3,3 | 3,9 | 3,3 | 2,9 |
| 4. Gobernanza | 3,8 | 5,0 | 3,0 | 3,4 |
| 5. Programa de actividades | 4,1 | 5,0 | 3,2 | 4,2 |
| 6. Intercambio de conocimientos, construcción de capacidades y trabajo en red | 3,9 | 4,4 | 3,0 | 3,6 |
| Calificación del Criterio 1 | 4,1 | 4,6 | 3,4 | 3,5 |

Cuadro 12. Calificación en el territorio Panacam de los ámbitos definidos por AFE-Cohdefor (2007)

| Ámbito | Calificación |
|------------------------------------|--------------|
| Social | 3,5 |
| Administrativo | 3,3 |
| Recursos naturales | 3,2 |
| Político-legal | 4,0 |
| Económico-financiero | 3,2 |
| Calificación del Criterio 1 | 3,4 |

El Criterio 2, relacionado con la gestión de los elementos en los territorios (áreas silvestres protegidas y corredores biológicos), muestra deficiencias en prácticamente todos los territorios (Cuadro 13), principalmente en Izta-Popo. En general, tanto la población como los gestores saben poco del cambio climático y de los procesos de adaptación. Estos temas no se encuentran incluidos en los planes de manejo de las áreas protegidas ni en programas de investigación y monitoreo. El tema de corredores biológicos (Criterio 3) únicamente es atendido en Reventazón, donde existen corredores que enlazan los diversos

hábitats naturales existentes en el territorio. El Corredor Biológico Cordillera Central-Talamanca contiene una alta variedad de ecosistemas y presenta un gradiente altitudinal importante que conecta dos de las principales cordilleras del país, lo que hace que sea clave para el desplazamiento altitudinal de organismos silvestres. En cuanto a la capacidad adaptativa de las poblaciones locales (Criterio 4), una alta proporción de los pobladores en los territorios dependen de recursos del bosque que son susceptibles al impacto del cambio climático, como el agua para consumo y para la producción hidroeléctrica, la belleza escénica que atrae el turismo y los productos no maderables de los bosques que abastecen a comunidades indígenas. En Risaralda, a diferencia de los demás territorios, los pobladores tienen un adecuado acceso y uso de conocimientos relacionados con el clima, lo que les da una mayor capacidad adaptativa. Las calificaciones de los criterios 2, 3 y 4 para cada territorio se muestran en los Cuadros 13, 14 y 15, respectivamente.

Cuadro 13. Calificación de los indicadores del Criterio 2: gestión de los elementos en los territorios

| Indicador | Calificaciones | | | | |
|--|----------------|------------|-------------|------------|------------|
| | Reventazón | Risaralda | Panguipulli | Izta-Popo | Panacam |
| 1. Nivel de conocimiento del personal, actores y poblaciones locales acerca de los principales impactos del cambio climático en el entorno | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 2. Nivel de conocimiento del personal, actores y poblaciones locales sobre las bases para la adaptación al cambio climático | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3. Nivel de inclusión de temas relacionados con el cambio climático y adaptación en los planes de manejo, investigación y monitoreo | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| 4. Manejo de ecosistemas que mitigan amenazas no climáticas (p.e. contaminación, manejo forestal sostenible) | 3 | 5 | 3 | 3 | 1 |
| 5. Revisión de límites y zonificación del territorio considerando aspectos de adaptación al cambio climático | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| Calificación del Criterio 2 | 1,8 | 3,0 | 1,8 | 1,4 | 1,8 |

Cuadro 14. Calificación de los indicadores del Criterio 3: gestión de la conectividad entre áreas silvestres protegidas para la migración de especies

| Indicador | Calificaciones | | | | |
|--|----------------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| | Reventazón | Risaralda | Panguipulli | Izta-Popo | Panacam |
| 1. El diseño del corredor biológico facilita la dispersión de la biota bajo condiciones cambiantes del clima | 3 | NA | NA | NA | NA |
| 2. Las características del corredor biológico contribuyen a la migración de especies ante el cambio climático: tamaño, rango altitudinal, punto de mayor altitud | 3 | NA | NA | NA | NA |
| Calificación del Criterio 3 | 3,0 | NA | NA | NA | NA |

Cuadro 15. Calificación de los indicadores del Criterio 4: capacidad adaptativa de las poblaciones locales

| Indicador | Calificaciones | | | | |
|---|----------------|------------|-------------|------------|------------|
| | Reventazón | Risaralda | Panguipulli | Izta-Popo | Panacam |
| 1. Proporción de grupos humanos demográficamente vulnerables que requieren más apoyo para la adaptación al cambio climático | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2. Proporción de la población que depende de los recursos naturales/ servicios ecosistémicos más sensibles al cambio climático para sostener sus medios de vida | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 3. Acceso y uso de conocimientos relacionados con el clima por parte de los pobladores | 1 | 5 | 3 | 1 | 3 |
| 4. Capacidad de organización de la comunidad frente a los impactos potenciales del cambio climático | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 5. Acceso equitativo a los recursos y servicios que permiten una mayor capacidad adaptativa a los pobladores locales | 3 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| Calificación del Criterio 4 | 1,4 | 3,4 | 1,3 | 1,0 | 1,4 |

El resultado final del análisis de la capacidad adaptativa de los territorios (Cuadro 16) se obtiene al promediar las calificaciones de los cuatro criterios. En términos generales el análisis de la capacidad adaptativa destaca las debilidades siguientes:

- Planes de manejo deficitarios en temas de cambio climático.
- Falta de fondos para la gestión de los territorios.
- Poco conocimiento de gestores y pobladores sobre el cambio potencial del clima en los territorios y sobre las posibles consecuencias en la biodiversidad, servicios ecosistémicos y medios de vida.
- Necesidad de incorporar los corredores biológicos en cuatro de los cinco territorios.
- Alta dependencia de los pobladores de servicios que se verán afectados por el cambio climático.

Cuadro 16. Calificación de diferentes criterios y promedio de la capacidad adaptativa en los territorios

| Criterio | Reventazón | Risaralda | Panguipulli | Izta-Popo | Panacam |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1. La gestión de los territorios | 4,05 | 4,60 | 3,45 | 3,52 | 3,40 |
| 2. La gestión de los elementos en los territorios | 1,80 | 3,00 | 1,80 | 1,40 | 1,80 |
| 3. La conectividad entre ASP para la migración de especies | 3,00 | NA* | NA | NA | NA |
| 4. La capacidad adaptativa de las poblaciones locales | 1,40 | 3,40 | 1,30 | 1,00 | 1,40 |
| Calificación capacidad adaptativa | 2,56 | 3,67 | 2,18 | 1,97 | 2,20 |

*NA: no aplica. Puesto que no se han establecido corredores biológicos en los territorios, no es posible evaluar sus características. Para estos casos, la calificación se obtiene promediando las notas de los criterios 1, 2 y 4.

Análisis de la vulnerabilidad

Cinco de los 17 tipos de bosques identificados muestran una alta vulnerabilidad al cambio climático, nueve muestran vulnerabilidad media y tres presentan vulnerabilidad baja (Cuadro 17). Los bosques más vulnerables están en territorios del trópico. Panacam y Reventazón son los territorios con mayor vulnerabilidad a nivel de tipos de bosque y Panguipulli el menos vulnerable. Destacan por su alta vulnerabilidad dos tipos de bosque ubicados en la parte baja de la gradiente altitudinal y otros dos en la parte alta en Reventazón y Risaralda.

Cuadro 17. Análisis de la vulnerabilidad por tipos de bosque en los territorios evaluados

| Territorio | Tipo de bosque | Calificaciones | | | | Nivel de vulnerabilidad |
|-------------|-------------------------------|----------------|--------------|----------------------|----------------|-------------------------|
| | | Exposición | Sensibilidad | Capacidad adaptativa | Vulnerabilidad | |
| Reventazón | Tropical (360-500 msnm) | 5,00 | 3,90 | 2,56 | 6,34 | Alta |
| | Premontano (1000-1200 msnm) | 5,00 | 1,82 | 2,56 | 4,26 | Media |
| | Montano bajo (1200-1600 msnm) | 5,00 | 2,45 | 2,56 | 4,89 | Media |
| | Montano (2200-3000 msnm) | 5,00 | 2,71 | 2,56 | 5,15 | Alta |
| Panacam | Bosque 1 (900 a 1200 msnm) | 3,80 | 3,52 | 2,20 | 5,12 | Alta |
| | Bosque 2 (1200 a 1500 msnm) | 3,80 | 3,62 | 2,20 | 5,22 | Alta |
| | Bosque 3 (1500 a 1800 msnm) | 3,80 | 3,22 | 2,20 | 4,82 | Media |
| | Bosque 4 (1800 a 2080 msnm) | 3,80 | 2,96 | 2,20 | 4,56 | Media |
| Risaralda | Bosque 1 (1700 – 2000 msnm) | 5,00 | 3,40 | 3,67 | 4,73 | Media |
| | Bosque 2 (2000 – 2500 msnm) | 5,00 | 1,80 | 3,67 | 3,13 | Media |
| | Bosque 3 (2500 – 2600 msnm) | 5,00 | 1,40 | 3,67 | 2,73 | Baja |
| | Bosque 4 (3000 – 3500 msnm) | 5,00 | 3,80 | 3,67 | 5,13 | Alta |
| Panguipulli | Roble-raulí-coigüe | 2,90 | 2,00 | 2,18 | 2,72 | Baja |
| | Coigüe-raulí-tepa | 2,90 | 2,00 | 2,18 | 2,72 | Baja |
| | Lenga | 2,90 | 3,00 | 2,18 | 3,72 | Media |
| Izta-Popo | Pino-encino | 4,60 | 2,00 | 1,97 | 4,63 | Media |
| | Pino | 4,60 | 2,00 | 1,97 | 4,63 | Media |

Medidas de gestión forestal adaptativa

A continuación se ofrece una propuesta de medidas de gestión forestal adaptativa para los cinco territorios (Cuadro 18). Su objetivo es fortalecer la capacidad de la sociedad civil y de los gestores de los recursos naturales en el territorio para hacer frente a los impactos del cambio climático, procurando el mantenimiento de los procesos ecológicos y la salvaguarda de la biodiversidad y de los servicios ecosistémicos que proveen los bosques.

Estas medidas fueron formuladas tomando como punto de partida los resultados del análisis de vulnerabilidad, y tienen énfasis en la gestión de conocimiento y acuerdos institucionales. Están por desarrollar aún medidas más orientadas a los aspectos de adaptación de los medios de vida locales.

Cuadro 18. Medidas de gestión forestal adaptativa propuestas para los territorios priorizados

| Aspecto de la vulnerabilidad a fortalecer | Medida propuesta |
|---|---|
| La capacidad de planificación para la ejecución de medidas de adaptación en cada territorio | <ul style="list-style-type: none"> • A partir de los análisis de vulnerabilidad realizados en este estudio, elaborar planes de adaptación socioecológicos específicos para el territorio. |
| La agenda de investigación y de monitoreo de impactos del cambio climático en cada territorio | <ul style="list-style-type: none"> • Incorporar planes de adaptación, monitoreo e investigación en los planes de gestión de cada territorio. |
| La base científica para la determinación de cambios futuros en el clima | <ul style="list-style-type: none"> • Establecer una red de estaciones meteorológicas funcional para monitorear el clima a diferentes niveles altitudinales y que esté asociada a la red de parcelas permanentes en bosques. • Establecer convenios con instituciones que administran estaciones climáticas para el acceso a la información climática. • Desarrollar modelos de cambio climático específicos para cada territorio y adecuados para la toma de decisiones. |

| | |
|---|--|
| <p>La generación de conocimiento sobre ecología y respuesta de especies sensibles al cambio climático</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar modelos de envolturas climáticas para especies focales sensibles al cambio climático³ e importantes para procesos y servicios ecológicos, identificadas en los análisis de sensibilidad. • Desarrollar investigación aplicada y monitoreo sobre el estado y la dinámica de poblaciones de especies focales sensibles al cambio climático, su distribución altitudinal, relación con el ambiente (p.e., incendios) y regeneración. • Desarrollar experimentos de migración asistida con especies focales sensibles al cambio climático, socialmente aceptadas, en diferentes puntos de la gradiente altitudinal. |
| <p>La generación de conocimiento sobre impactos del cambio climático en procesos y servicios ecosistémicos básicos de los bosques</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar estudios de impactos en procesos como ciclaje de nutrientes, descomposición de hojarasca, producción y dispersión de semillas, biodiversidad, producción de agua, producción de biomasa, cobertura del bosque. |
| <p>Implementación de medidas tempranas para la conservación de especies sensibles al cambio climático</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Incorporar especies sensibles al cambio climático, socialmente aceptadas, en programas de incentivos (PSA, certificación, programas ambientales de empresas). |
| <p>La capacidad de gestión territorial en mitigación y adaptación al cambio climático</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Procurar financiamiento para el fortalecimiento de capacidades y gestión de elementos en los territorios (ASP, CB, BM) con un enfoque de adaptación al cambio climático; son de particular relevancia los temas de coordinación, planificación e implementación de acciones, comunicación y monitoreo. • Establecer un programa interinstitucional con financiamiento sostenible para el tema del cambio climático. |
| <p>El conocimiento de comunidades y actores clave en temas de cambio climático, impactos y medidas de adaptación</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar e implementar planes de comunicación para diversos actores y grupos interesados (sociedad civil, asociaciones comunales, administradores de acueductos, clase política, gestores de áreas protegidas, gestores ambientales de empresas privadas, grupos indígenas). • Incorporar en el currículum de escuelas, colegios y universidades temas de cambio climático, impactos, mitigación y adaptación. |
| <p>La capacidad de adaptación al cambio climático de elementos de los territorios (ASP, CB, BM), su biodiversidad y servicios ecosistémicos</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Incorporar dentro de los planes de gestión de ASP, CB, BM y los planes de gestión ambiental de empresas privadas, el tema de mitigación y adaptación al cambio climático y el monitoreo de impactos. • Monitorear insumos, procesos y resultados de la implementación de acciones. |
| <p>La conectividad para el movimiento de especies silvestres</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Mejorar la conectividad en los territorios. Establecer corredores que respondan a objetivos específicos e intereses de actores locales. • En acciones de conectividad, priorizar tipos forestales amenazados. En Panguipulli se propone la creación de un corredor para bosques de Araucaria araucana en el límite austral de distribución. • Revisar el diseño de los corredores ya definidos, analizar correspondencia con su potencial para mitigar impactos del cambio climático en especies y ecosistemas, y realizar los ajustes necesarios. |
| <p>La capacidad de adaptación al cambio climático de poblaciones vulnerables</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollar e implementar planes para mitigar impactos del cambio climático en bienes y servicios ecosistémicos clave para poblaciones. • Desarrollar capacidades en poblaciones vulnerables al cambio climático, dada su relación con servicios ecosistémicos sensibles a impactos. |

3 En la página 38, donde se detallan los resultados del análisis de sensibilidad, se señalan algunas de esas especies en los territorios evaluados

Conclusiones

- El enfoque de ecología funcional ofrece un enorme potencial para la implementación de análisis de sensibilidad al cambio climático de una gama amplia de tipos de bosques en cordilleras latinoamericanas, entre ellos los de muy elevada diversidad de especies. Los agrupamientos de especies dominantes establecidos con base en características funcionales relacionadas con aspectos reproductivos, capacidad de dispersión, crecimiento y respuesta a cambios ambientales, pueden ser aplicados para el análisis de la sensibilidad ecológica en el contexto del análisis de vulnerabilidad. Esto es particularmente importante en el caso de ecosistemas altamente diversos como los bosques tropicales, donde es difícil anticipar las respuestas individuales de tantas especies.
- Los bosques en cordilleras latinoamericanas muestran diferentes niveles de sensibilidad ante el cambio climático. Los bosques en territorios tropicales, principalmente en las zonas a altitudes menores, tienden a ser más sensibles que bosques en latitudes mayores, esto porque tienen una mayor proporción de especies conservativas y de distribución altitudinal restringida. Estas especies pueden considerarse focales para efectos de implementar medidas de gestión adaptativa.
- Nuestro trabajo sugiere que, entre instituciones ligadas a la gestión de bosques en cordilleras latinoamericanas ante el cambio climático, predominan capacidades adaptativas medianas y bajas. En este sentido, los análisis de vulnerabilidad realizados indican una necesidad de fortalecer la capacidad adaptativa en los países de la región. La prueba y validación de la herramienta de análisis de sensibilidad ecológica que aquí se propone puede formar parte de las iniciativas de fortalecimiento.

Literatura citada

- Acosta, M; Carrillo, F; Delgado, D; Velasco, E. 2014. Establecimiento de parcelas permanentes para evaluar impactos del cambio climático en el Parque Nacional Izta-Popo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(26):6-28.
- Adger, WN. 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change* 16:268-281.
- Adger, WN; Brooks, N; Bentham, G; Agnew, M; Eriksen, S. 2004. New indicators of vulnerability and adaptive capacity. Norwich, United Kingdom, Tyndall Centre for Climate Change Research. 122 p. (Technical Report 7).
- Adger, WN; Arnell, NW; Tompkins, EL. 2005. Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change* 15:77-86.
- AFE-Cohdefor (Administración Forestal del Estado – Corporación Hondureña de Desarrollo Forestal). 2000. Plan de manejo, proyecto de áreas protegidas, Parque Nacional Cerro Azul Meámbar. Siguatepeque, Honduras.
- AFE-Cohdefor (Administración Forestal del Estado – Corporación Hondureña de Desarrollo Forestal). 2007. Manual para la aplicación de la metodología de monitoreo de efectividad de manejo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Honduras (SINAPH). s. l. 101 p.
- Cadotte, M; Carscadden, K; Mirotnick, N. 2011. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. *Journal of Applied Ecology* 48:1079-1087.
- Carlquist, S. 1991. Anatomy of vine and liana stems: a review and synthesis. In Putz, F; Mooney, HA (eds). *The biology of vines*. New York, United States of America, Cambridge Univ. Press. p. 53-72.
- Carpenter, S; Gunderson, L. 2001. Coping with collapse: ecological and social dynamics in ecosystem management. *Bioscience* 51:451-457.
- Chazdon, R. 2014. *Second growth: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation*. Chicago, United States of America, The University of Chicago Press. 204 p.
- Chen, IC; Hill, JK; Shiu, HJ; Holloway, JD; Benedick, S; Chey, VK; Barlow, HS; Thomas, CD. 2011. Asymmetric boundary shifts of tropical montane Lepidoptera over four decades of climatic warming. *Global Ecology and Biogeography* 20:34-45.
- Clark, DA; Brown, S; Kicklighter, DW; Chambers, JQ; Thomlinson, JR; Ni, J; Holland, EA. 2001. Net primary production in tropical forest: An evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications* 11:371-384.
- Clark, DA; Piper, SC; Keeling, CD; Clark, DB. 2003. Tropical rain forest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to inter-annual temperature variation during 1984-2000. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100:5852-5857.
- Clerc, J; Vaillancourt, L. 2009. Plan de manejo del Parque Nacional Barbilla. San José, Costa Rica, SINAC.

- Colwell, RK; Brehm, G; Cardelús, CL; Gilman, AC; Longino, JT. 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science* 322(5899):258-261.
- Collins, M; Knutti, R; Arblaster, J; Dufresne, JL; Fichefet, T; Friedlingstein, P; Gao, X; Gutowski, WJ; Johns, T; Krinner, G; Shongwe, M; Tebaldi, C; Weaver, AJ; Wehner, M. 2013. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In: Stocker, TF; Qin, D; Plattner, GK; Tignor, M; Allen, SK; Boschung, J; Nauels, A; Xia, Y; Bex, V; Midgley, PM (eds.). *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of IPCC*. New York, United States of America, Cambridge University Press.
- Corlett, RT. 2012. Climate change in the tropics: the end of the world as we know it? *Biological Conservation (Special Issue)*:151:22-25.
- Davidson, AD; Hamilton, MJ; Boyer, AG; Brown, JH; Ceballos, G. 2009. Multiple ecological pathways to extinction in mammals. *PNAS* 106(26):10702–10705.
- Díaz, S; Cabido, M. 1997. Plant functional types and ecosystem function in relation to global change: a multiscale approach. *Journal of Vegetation Science* 8:463-474.
- Díaz, S; Cabido, M. 2001. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution* 16(11):646-655.
- Díaz, S; Hodgson, JG; Thompson, K; Cabido, M; Cornelissen, JHC; Jalili, A; Montserrat-Martí, G; Grime, JP; Zarrinkamar, F; Asri, Y; Band, SR; Basconcelo, S; Castro-Díez, P; Funes, G; Hamzehee, B; Khoshnevi, M; Pérez-Harguindeguy, N; Pérez-Rontomé, MC; Shirvany, F; Vendramini, F; Yazdani, S; Abbas-Azimi, R; Bogaard, A; Boustani, S; Charles, M; Dehghan, M; de Torres-Espuny, L; Falczuk, V; Guerrero-Campo, J; Hynd, A; Jones, G; Kowsary, E; Kazemi-Saeed, F; Maestro-Martínez, M; Romo-Díez, A; Shaw, S; Siavash, B; Villar-Salvador, P; Zak, MR. 2004. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science* 15:295-304.
- Díaz, S; Quétier, F; Cáceres, DM; Trainor, SF; Pérez-Harguindeguy, N; Bret-Harte, MS; Finegan, B; Peña-Claros, M; Poorter, L. 2011. Linking functional diversity and social actor strategies in a framework for interdisciplinary analysis of nature's benefits to society. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108:895-902.
- Dumet, R; Villalobos, R; Carrera, F; de Camino, R; Rivera, JO. 2012. Estándar para el monitoreo y evaluación de bosques modelo: propuesta para orientar la gestión de iniciativas de la Red Iberoamericana de Bosques Modelo. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 36 p. (Serie Técnica, Boletín Técnico no. 56).
- Emery, M; Flora, C. 2006. Spiraling-up: mapping community transformation with community capitals framework. *Journal of the Community Development Society* 37(1):19-35.
- Ewers, FW, Fisher, JB, Fichtner, K. 1991. Water flux and xylem structure in vines. In: Putz, FE; Mooney, HA. (Eds.). *The biology of vines*. New York, United States of America, Cambridge University Press. p. 127–160.
- Finegan, B; Peña-Claros, M; de Oliveira, A; Alarcón, A; Ascarrunz, N; Bret-Harte, S; Carreño-Rocabado, G; Casanoves, F; Díaz, S; Eguiguren, P; Fernández, F; Lorenzo, L; Salgado, B; Vaz, M; Poorter, L. 2015. Does functional trait diversity predict aboveground biomass and productivity of tropical forests? Testing three alternative hypotheses. *Journal of Ecology* 103:191-201.

- Finegan, B; Hayes, J; Delgado, D; Gretzinger, S. 2004. Monitoreo ecológico del manejo forestal en el trópico húmedo: una guía para operadores forestales y certificadores con énfasis en bosques de alto valor para la conservación. San José, Costa Rica, WWF/CATIE. 116 p.
- Fujino, J; Nair, R; Kainuma, M; Masui, T; Matsuoka, Y. 2006. Multi-gas Mitigation Analysis on Stabilization Scenarios Using Aim Global Model. *The Energy Journal* 27(Special Issue: Multi-Greenhouse Gas Mitigation and Climate Policy (2006)):343-354.
- Geertje, M; Phillips, OL. 2008. What controls liana success in Neotropical forests? *Global Ecology and Biogeography* 17(3):372-383.
- Granda, V; Finegan, B; Ramos, Z; Detlefsen, G; Molina, A. 2015. Potencial de manejo de bosques restaurados por sucesión natural secundaria en Guanacaste, Costa Rica: composición, diversidad y especies maderables. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 52 p. (Serie Técnica, Boletín Técnico no. 78).
- Grime, JP. 1998. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology* 86:902-910.
- Gunderson, L. 2000. Ecological resilience, in theory and application. *Annual Review of Ecological Systems* 31:425-439.
- Holdridge, LR. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica, IICA. 216 p.
- Holling, CS; Meffe, GK. 1996. Command and control and the pathology of natural resource management. *Conservation Biology* 10:328-337.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2007. *Cambio Climático 2007: Base de ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC*. New York, United States of America, Cambridge University Press.
- Janzen, DH. 1967. Why mountain passes are higher in the Tropics. *The American Naturalist* 101(919):233-249.
- Janzen, DH. 1988. Tropical ecological and biocultural restoration. *Science* 239:243-244.
- Kühner, A; Kleyer, M. 2008. A parsimonious combination of functional traits predicting plant response to disturbance and soil fertility. *Journal of Vegetation Science* 19:681-692.
- Londré, RA; Schnitzer, SA. 2006. The distribution of lianas and their change in abundance in temperate forests over the past 45 years. *Ecology* 87:2973-2978.
- Lovejoy, TE; Hannah, L. 2005. *Climate change and biodiversity*. New Haven, United States of America, Yale University. 418 p.
- Malhi, Y; Silman, M; Salinas, N; Bush, M; Meir, P; Saatchi, S. 2010. Elevation gradients in the tropics: Laboratories for ecosystem ecology and global change research. *Global Change Biology* 16(12):3171-3175.
- Marshall, N; Marshall, P; Tamelander, J; Obura, D; Malleret-King, D; Cinner, J. 2010. A framework for social adaptation to climate change sustaining tropical coastal communities and industries. Gland, Switzerland, IUCN.
- Malone, E.L; Engle N.L. 2011. Evaluating regional vulnerability to climate change: purposes and methods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2(3): 462-474. doi: 10.1002/wcc.116
- Mason, N; MacGillivray, K; Steel, JB; Wilson, J. 2003. An index of functional diversity. *Journal of Vegetation Science* 14:571-578.
- McTavish, H; Manchego, C; Villalobos, R; Quirós, L; Castillo, M. 2014. *Plan estratégico 2011-2015, Bosque Modelo Reventazón: Uniendo gente y ambiente*. San José, Costa Rica, SINAC.

- MEA (Millenium Ecosystem Assessment). 2005. Ecosystems and human well-being: Biodiversity Synthesis. Washington, D.C., WRI.
- Metternicht, G.; Sabelli, A.; Spensley, J. 2014. Climate change vulnerability, impact and adaptation assessment. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 6:442–476.
- MRI (Mountain Research Initiative). 2005. Global change and mountain regions research strategy. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001471/147170E.pdf>
- Nelson, DR; Adger, WN; Brown, K. 2007. Adaptation to environmental change: contributions of a resilience framework. *Annual Review of Environment and Resources* 32:395-419.
- Parmesan, C; Burrows, MT; Duarte, CM; Poloczanska, ES; Richardson, AJ; Schoeman, DS; Singer, MC. 2013. Beyond climate change attribution in conservation and ecological research. *Ecology Letters* 16:58-71.
- Pérez-Harguindeguy, N; Díaz, S; Garnier, E; Lavorel, S; Poorter, H; Jaureguiberry, P; Bret-Harte, M; Cornwell, W; Craine, J; Gurvich, D; Urcelay, C; Veneklaas, E; Reich, P; Poorter, L; Wright, I; Ray, P; Enrico, L; Pausas, J; de Vos, A; Buchmann, N; Funes, G; Quétier, F; Hodgson, J; Thompson, K; Morgan, H; ter Steege, H; van der Heijden, M; Sack, L; Blonder, B; Poschlod, P; Vaieretti, M; Conti, G; Staver, A; Aquino, S; Cornelissen, J. 2013. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 61:167–234.
- Peterson, GD. 2002. Estimating resilience across landscapes. *Conservation Ecology* 6(1):17. Disponible en <http://www.ecologyandsociety.org/vol6/iss1/art17/>
- Poorter, L; Wright, SJ; Paz, H; Ackerly, DD; Condit, R; Ibarra-Manriques, G; Harms, KE; Licona, JC; Martínez-Ramos, M; Mazer, SJ; Muller-Landau, HC; Peña-Claros, M; Webb, CO; Wright, IJ. 2008. Are functional traits good predictors of demographic rates? Evidence from five Neotropical forests. *Ecology* 89:1908-1920.
- Rabinowitz, D. 1981. Seven forms of rarity. In Syngé, H (ed.). *The biological aspects of rare plant conservation*. Chichester, United Kingdom, John Wiley. p. 205-217.
- Rapport, DJ; Gaudet, C. 1998. Evaluating landscape health: integrating societal goals and biophysical process. *Journal of Environmental Management* 53:1-15.
- Riahi, K; Rao, S; Krey, V; Cho, C; Chirkov, V; Fischer, G; Kindermann, G; Nakicenovic, N; Rafaj, P. 2011. RCP 8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109(1-2):33-57. doi: 10.1007/s10584-011-0149-y.
- Ribalaygua, J; Torres, L; Pórtoles, J; Monjo, R; Gaitán, E; Pino, MR. 2013. Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theor Appl Climatol* 114:253–269.
- Ríos, S; Louman, B; Jiménez, M. 2012. Vulnerabilidad al cambio climático en comunidades indígenas cabécares de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 63:21-29.
- Scheffer, M; Carpenter, S; Foley, JA; Folke, C; Walker, B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413:591-596.
- Schnitzer, SA. 2005. A mechanistic explanation for global patterns of liana abundance and distribution. *The American Naturalist* 166:262-276.
- Schnitzer, SA; Bongers, F. 2011. Increasing liana abundance and biomass in tropical forests: emerging patterns and putative mechanisms. *Ecology Letters* 14:397-406.
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MX). 2013. Programa de manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. México, DF, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 186 p.

- SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación, Costa Rica). 2013. Análisis de vulnerabilidad al cambio climático de las áreas silvestres protegidas terrestres. San José, Costa Rica. 73 p. + anexos
- SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación, Costa Rica). s.f. Plan de manejo del Parque Nacional Tapantí-Macizo de la Muerte. San José, Costa Rica.
- Smit, B; McNabb, D; Smithers, J. 1996. Agricultural adaptation to climatic variation. *Clim. Change* 33:7–29.
- Thibaut, F. 2010. Plan de control y protección del Parque Nacional Barbilla. San José, Costa Rica, SINAC.
- Thomson, A; Calvin, KV; Smith, SJ; Kyle, G; Page, G; Volke, A; Patel, P; Delgado-Arias, S; Bond-Lamberty, B; Wise, MA; Clarke, LE; Edmonds, JA. 2011. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* 109(1-2):77-94. doi: 10.1007/s10584-011-0151-4.
- Van Vuuren, DP; Stehfest, E; Elzen, M; Kram, T; Vliet, J; Deetman, S; Isaac, M; Klein GK; Hof, A; Mendoza, A; Oostenrijk, R; Ruijven, B. 2011. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change* 109(1-2):95-116. doi: 10.1007/s10584-011-0152-3.
- Veintimilla, D. 2013. Identificación y caracterización de tipos de bosque tropical sobre un gradiente altitudinal en Costa Rica: el caso “Caribe-Villa Mills” Tesis. MSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 125 p.
- Violle, C; Navas, ML; Vile, D; Kazakou, E; Fortunel, C; Hummel, I; Garnier, E. 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* 116:882-892.
- Wachenfeld, D; Johnson, JE; Skeat, A; Kenchington, R; Marshall, PA; Innes, J. 2007. Introduction to the Great Barrier Reef and climate change. In Johnson, JE; Marshall, PA (eds.). *Climate change and the Great Barrier Reef: a vulnerability assessment*. Sydney, Australia, Great Barrier Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office. p. 1–75.
- Welch, D. 2005. What should protected area managers do in the face of climate change? *George Wright Forum* 22:75–93.
- Wongbusarakum, S; Loper, A. 2011. Indicators to assess community-level social vulnerability to climate change: An addendum to SocMon and SEM-Pasifika regional socioeconomic monitoring guidelines. s. I. CRISP. 41 p.

Anexo 1. Simulaciones climáticas para los territorios

De acuerdo con la metodología downscaling estadístico Ficlina, empleada en este estudio, es muy probable que los territorios evaluados muestren las siguientes variaciones en temperatura y precipitación a mediados y finales del siglo XXI.

| Territorio | Temp. anual max. | | Trimestre más afectado | Temp. anual min. | | Trimestre más afectado | Precipitación* | | Trimestre más afectado |
|-------------|------------------|--------------|------------------------|------------------|--------------|------------------------|--|---------------------------------|------------------------|
| | Mitad s. XXI | Final s. XXI | | Mitad s. XXI | Final s. XXI | | Mitad s. XXI | Final s. XXI | |
| Panguipulli | ↑0,4 – 0,7°C | ↑0,7 - 2°C | DEF SON | ↑0,3 – 0,5°C | ↑0,3 - 1°C | DEF | ↓5-7% (0,3 mm/día) | ↓2-17% (0,2 – 0,6 mm/día) | MAM JJA |
| Risaralda | ↑0,6 - 1°C | ↑0,6 – 1,8°C | DEF | ↑0,5 – 0,8°C | ↑0,5 – 2,1°C | JJA | ↑8-9% a 14-15% (0,3- 0,6 mm/día) | ↑8-9% a 30% (0,3-1,6 mm/día) | MAM JJA |
| Reventazón | ↑0,3 – 0,5°C | ↑0,4 – 1,8°C | MAM | ↑0,8 – 1,5°C | ↑0,8 – 3,5°C | MAM JJA | ↑17-18% (1- 1,3 mm/día) | ↑18-30% (1-2,1 mm/día) | DEF JJA |
| Panacam | ↑0,6 - 1,3°C | ↑0,7 – 3,2°C | DEF -MAM | | | | ↑5% (0,3 mm/día) | ↑15% (0,7 mm/día) | SON |
| Izta-Popo | ↑0,6 – 1,3°C | ↑0,7 – 3,2°C | DEF -MAM | ↑0,7 a 1,0°C | ↑0,8 a 2,9°C | | ↑10% (0,2 mm/día) | ↑8-20% (0,2-0,5 mm/día) | SON |

*La variabilidad en los valores depende del RCP considerado.

↑ incremento ↓ disminución

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela, el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) y el Estado de Acre en Brasil.



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

Sede Central, CATIE
Cartago, Turrialba, 30501
Costa Rica
Tel. (506) 2558-2000

www.catie.ac.cr

ISBN: 978-9977-57-668-8

