



Universidad
Rafael Landívar
Trascendiendo fronteras

37
Serie técnica 35

Cambio climático y biodiversidad

Elementos para analizar
sus interacciones en Guatemala
con un enfoque ecosistémico



Guatemala, octubre de 2011

iarna

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR



Universidad
Rafael Landívar
Trascendiendo fronteras

37

Serie técnica 35

**Cambio climático
y biodiversidad.**
Elementos para analizar
sus interacciones en Guatemala
con un enfoque ecosistémico

iarna

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

Guatemala, octubre de 2011

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

Autoridades institucionales

Rector

Rolando Alvarado, S.J.

Vicerrectora académica

Lucrecia Méndez de Penedo

Vicerrector de investigación y proyección

Carlos Cabarrús, S.J.

Vicerrector de integración universitaria

Eduardo Valdés, S.J.

Vicerrector administrativo

Ariel Rivera

Secretaria general

Fabiola Padilla de Lorenzana

Director IARNA

Juventino Gálvez

Elaboración del documento

Coordinación general

Juventino Gálvez

Investigadores

Juan Carlos Rosito

Gerónimo Pérez

Alejandro Gándara

Ottoniel Monterroso

Raúl Maas

Edición

Cecilia Cleaves, Juventino Gálvez e Idalia Monrroy

Impresión
Serviprensa, S.A.
3ª. avenida 14-62, zona 1
PBX: (502) 22458888
gerenciaventas@serviprensa.com
Guatemala, Centroamérica



Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). (2011). **Cambio climático y biodiversidad. Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico.** Guatemala: autor.

Documento 37, Serie técnica 35

ISBN: 978-9929-587-45-8

xii, 99 p.

Descriptor: cambio climático y sus efectos, calentamiento global, efecto invernadero, zona de convergencia inter-tropical, oscilación del Sur El Niño, oscilación del Atlántico Norte, Corredor Biológico Mesoamericano, sequía, efectos hidroclimáticos, zonas de vida de Guatemala.

Publicado por: El proceso de elaboración del presente documento es responsabilidad del Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL).

Su objetivo es proveer insumos para la elaboración de estrategias territoriales de adaptación al cambio climático, así como definir y evaluar la amenaza que constituye el cambio climático para la biodiversidad y ecosistemas críticos de Guatemala, en el contexto regional mesoamericano. Se describen, asimismo, los factores climáticos específicos que afectan esa biodiversidad y se sintetiza el estado actual del conocimiento científico acerca de aspectos climáticos y ecológicos, y cómo éstos se interrelacionan.

Copyright © 2011, IARNA-URL

La reproducción total o parcial, en cualquier formato, de esta publicación está autorizada, para fines educativos o sin fines de lucro, sin necesidad de permiso especial, bajo la condición de que se indique la fuente de la que proviene. El IARNA agradecerá que se le remita un ejemplar de cualquier texto, cuya fuente haya sido la presente publicación.

Disponible en: Universidad Rafael Landívar
Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)
Campus central, Vista Hermosa III, zona 16
Edificio Q, oficina 101
Ciudad de Guatemala, Guatemala
Tels.: (502) 2426-2559 ó 2426-2626, extensión 2657
Fax: extensión 2649
E mail: iarna@url.edu.gt
<http://www.url.edu.gt>
<http://www.infoiarna.org.gt>

Tiraje: 1,000 ejemplares

Fotografía de portada: Raúl Maas

Montaje portada: Gudy González / Serviprensa, S.A.

Diagramación interiores: Elizabeth González / Serviprensa, S.A.

Revisión de textos: Jaime Bran / Serviprensa, S.A.

Publicación gracias al apoyo de:



Reino de los Países Bajos



Impreso en papel 100% reciclado

Tras la verdad para la armonía



Tabla de contenido

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Presentación | ix |
| Siglas y acrónimos | xi |
| Abreviaturas y símbolos | xii |
| Resumen | 1 |
| Summary | 3 |
| Parte 1. Introducción | 5 |
| Parte 2. Aspectos conceptuales | 9 |
| 2.1 ¿Qué es cambio climático? | 11 |
| 2.2 ¿Existe cambio climático? Variables para medirlo y proyecciones | 11 |
| 2.3 ¿A qué se debe el cambio climático abrupto? ¿Cómo se utiliza la información existente? | 13 |
| Parte 3. Cambio climático en Mesoamérica: región de alto riesgo | 15 |
| 3.1 Factores que determinan el clima en la región mesoamericana | 17 |
| 3.1.1 Zona de convergencia intertropical (ITCZ) | 17 |
| 3.1.2 Oscilación del Sur El Niño (ENSO) | 18 |
| 3.1.3 Corrientes de chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ) | 20 |
| 3.1.4 Relaciones entre canícula, zona subtropical de alta presión del Atlántico norte y corrientes de chorro de bajo nivel del Caribe | 21 |
| 3.2 Zona de convergencia intertropical y cambio climático | 22 |
| 3.3 Cambio climático y la oscilación del Sur El Niño (ENSO) | 23 |
| 3.4 Intereacción de los factores controladores del clima en Mesoamérica | 24 |
| 3.5 Relaciones paleoclimáticas: civilización maya y cambio climático | 26 |
| 3.6 Efectos socioeconómicos del cambio climático en Mesoamérica | 29 |
| Parte 4. Impactos globales y regionales del cambio climático | 31 |
| 4.1 Sectores más afectados por el cambio climático | 33 |
| 4.2 Consecuencias hidroclimáticas | 34 |
| 4.3 Consecuencias en los ecosistemas y en la biodiversidad | 35 |



Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

| | | |
|-------|------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.1 | Ciclo del carbono y productividad de ecosistemas | 35 |
| 4.3.2 | Biodiversidad y distribución de ecosistemas | 36 |
| 4.4 | Políticas de adaptación para la conservación de la biodiversidad | 39 |

Parte 5. Impactos del cambio climático en la diversidad biológica de Mesoamérica 41

| | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 | Bosques húmedos y muy húmedos montanos | 43 |
| 5.2 | Bosques muy húmedos, pluviales montanos | 44 |
| 5.3 | Bosques húmedos, muy húmedos y pluviales basales (a menos de 1,000 msnm) | 45 |
| 5.4 | Bosques secos y muy secos | 45 |
| 5.5 | Integración de información | 45 |

Parte 6. Evaluación de los impactos del cambio climático en los ecosistemas de Guatemala 49

| | | |
|-------|----------------------------------|----|
| 6.1 | Marco metodológico | 51 |
| 6.2 | Resultados | 55 |
| 6.2.1 | Establecimiento de la línea base | 55 |
| 6.2.2 | Modelación del escenario A2 | 57 |
| 6.2.3 | Modelación del escenario B2 | 57 |

Parte 7. Consideraciones finales 67

| | |
|--------------|----|
| Bibliografía | 75 |
|--------------|----|

| | |
|--------|----|
| Anexos | 83 |
|--------|----|

Índice de cuadros y recuadros

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 1 | Efectos previsibles del cambio climático en zonas de vida y sus ecosistemas naturales | 46 |
| Recuadro 1 | Metodología para la actualización de las zonas de vida de Guatemala | 52 |
| Recuadro 2 | Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (SRES) y su modelación | 53 |



Índice de figuras

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 | Comportamiento anormal de la temperatura superficial de la Tierra y el océano, a nivel global | 12 |
| Figura 2 | Imagen satelital de la acumulación de nubes que muestra la ubicación de la zona de convergencia intertropical | 17 |
| Figura 3 | Descripción del fenómeno Oscilación del Sur El Niño | 19 |
| Figura 4 | Diagrama de zonas de vida | 52 |
| Figura 5 | Esquematación de los escenarios y principales familias de emisión de CO ₂ | 54 |
| Figura 6 | Mapa de zonas de vida de Guatemala (promedios 1960-2000), Sistema Holdridge | 56 |
| Figura 7 | Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario A2, año 2020 | 57 |
| Figura 8 | Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario A2, año 2050 | 58 |
| Figura 9 | Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario A2, año 2080 | 60 |
| Figura 10 | Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario B2, año 2020 | 61 |
| Figura 11 | Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario B2, año 2050 | 62 |
| Figura 12 | Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario B2, año 2080 | 63 |
| Figura 13 | Modelación del área afectada por los cambios de las zonas de vida, de acuerdo con los escenarios A2 y B2 | 65 |
| Figura 14 | Cambios de las zonas de vida para el año 2050, en los escenarios A2 y B2 | 66 |
| Figura 15 | Cambios de las zonas de vida agrupadas por provincia de humedad para el año 2080, escenarios A2 y B2 | 66 |



Índice de Anexos

Anexo 1

Mapas de temperatura y precipitación para los escenarios A2 y B2. Años 2020, 2050 y 2080

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo 1.1 | Temperatura media anual de acuerdo con el escenario A2 y B2. Años 2020, 2050 y 2080 | 86 |
| Anexo 1.2 | Precipitación anual de acuerdo con el escenario A2 y B2. Años 2020, 2050 y 2080 | 87 |

Anexo 2

Comparación de cambios de temperatura y precipitación entre los datos actuales y los escenarios A2 y B2. Años 2020, 2050 y 2080

| | | |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Anexo 2.1 | Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario A2, año 2020 | 88 |
| Anexo 2.2 | Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario A2, año 2050 | 89 |
| Anexo 2.3 | Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario A2, año 2080 | 90 |
| Anexo 2.4 | Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario B2, año 2020 | 91 |
| Anexo 2.5 | Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario B2, año 2050 | 92 |
| Anexo 2.6 | Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario B2, año 2080 | 93 |
| Anexo 2.7 | Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario A2, año 2020 | 94 |
| Anexo 2.8 | Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario A2, año 2050 | 95 |
| Anexo 2.9 | Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario A2, año 2080 | 96 |
| Anexo 2.10 | Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario B2, año 2020 | 97 |
| Anexo 2.11 | Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario B2, año 2050 | 98 |
| Anexo 2.12 | Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario B2, año 2080 | 99 |



Presentación

Mesoamérica es tanto un puente de tierra entre dos grandes continentes como una barrera entre dos principales océanos. La unión de Norte y Sur América, hace cerca de tres millones de años, posibilitó el “Gran Intercambio Biótico de América”, facilitando la migración de especies, que al mismo tiempo produjo altos niveles de especiación y biodiversidad (Heller & Zavaleta, 2009). Debido a este historial biogeográfico y a las condiciones climáticas, esta región es considerada uno de los 25 puntos de alta biodiversidad (*hot spots*) a nivel mundial (Myers *et al.*, 2000), es decir, una proporción relativamente elevada de la biota de la Tierra se encuentra en sus ecosistemas -más del 7% de las especies conocidas en menos del 0.5% de la superficie terrestre del planeta-. Asimismo, es el hábitat de más de 5,000 especies de plantas vasculares y 210 mamíferos endémicos (FAO, 2009; Deepak, Welch, Lawton & Nair, 2006).

Por la historia de intervención humana, a través de la domesticación de germoplasma y la abundancia de sistemas de cultivo, y la alta diversidad de plantas cultivadas en la actualidad; esta región ofrece un escenario singular para la conservación de la biodiversidad en paisajes. Por ello, se han puesto en marcha iniciativas de conservación que integran las necesidades de uso con las de conservación (Declerk *et al.*, 2010).

Sin embargo, esta riqueza biológica y fitogenética está seriamente amenazada, entre otras causas, porque en Centroamérica los liderazgos políticos no han sido capaces, o bien, no han tenido interés en impulsar esquemas de desarrollo social que otorguen a la naturaleza el valor estratégico que tiene para este fin. Más bien, se han promovido esquemas de estricto crecimiento

económico, cuyo saldo ha sido el agotamiento, degradación y contaminación de la dimensión ambiental, así como pobreza y marginación en la dimensión social.

Por tal razón, en la región no existen oportunidades equitativas para una población que crece a una tasa de más de 2 por ciento al año, y como consecuencia se han producido los niveles más altos de pobreza en Latinoamérica. Asimismo, con la pérdida anual sostenida de alrededor del 2 por ciento de los bosques, esta región expone una de las más altas tasas mundiales de deforestación (FAO, 2009; Deepak, Welch, Lawton y Nair, 2006).

Es altamente probable que el cambio climático abrupto, del cual ya hay manifestaciones, establezca nuevas condiciones de interacción entre la sociedad y la biodiversidad (de ecosistemas, especies y genes), resultando en presiones adicionales sobre ésta. En un contexto como el esbozado, no sólo es estratégico, sino urgente, analizar y comprender las características de los cambios y sus implicaciones para poder conceptualizar, diseñar y poner en marcha estrategias de adaptación que permitan darle viabilidad a la nación en el más amplio sentido de la palabra. Es decir, al establecimiento de condiciones de vida dignas para todos los ciudadanos y al impulso de pautas que conserven una base razonable de bienes y servicios naturales, integrados en un círculo virtuoso que privilegia la vida en todas sus formas.

El presente trabajo, desarrollado con el más alto interés de aportar al propósito anteriormente descrito, pretende, en un sentido más práctico, proveer información e ideas para clarificar las



Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

implicaciones del cambio climático para nuestro país. Más allá de los enfoques apocalípticos, el estudio pretende llamar la atención acerca de probables cambios en nuestro territorio, los cuales, por su envergadura, anticipan drásticas variaciones de la oferta natural que hasta hoy hemos tenido y administrado deficientemente y que obligan a pensar, desde ya, en la forma a través de la cual, la sociedad va a enfrentar

escenarios de mayores demandas sociales con bienes y servicios naturales más escasos o, en el mejor de los casos, con territorios y condiciones climáticas más hostiles.

Esperamos que el trabajo sea adecuadamente estudiado por múltiples sectores y sirva de motivación para debatir más y con mejor sustento sobre nuestro futuro común.

Juventino Gálvez

Director

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente

Universidad Rafael Landívar



Siglas y acrónimos

| | |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CBM | Corredor Biológico Mesoamericano |
| CLLJ | Corrientes de chorro de bajo nivel del Caribe (por sus siglas en inglés) |
| CMNUCC | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático |
| COI | Comisión Oceanográfica Intergubernamental |
| ENSO | Oscilación del Sur El Niño (por sus siglas en inglés) |
| ETP | Evapotranspiración potencial |
| GEI | Gases de efecto invernadero |
| GISS | Instituto Goddard de Estudios Espaciales (por sus siglas en inglés) |
| IPCC | Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés) |
| ITCZ | Zona de convergencia intertropical (por sus siglas en inglés) |
| LGM | Último máximo glacial (por sus siglas en inglés) |
| MSD | Sequía de mediados de verano (por sus siglas en inglés) |
| NAO | Oscilación del Atlántico Norte (por sus siglas en inglés) |
| NASA | Agencia de Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés) |
| NASH | Zona de alta presión del Atlántico Norte (por sus siglas en inglés) |
| NDVI | Índice de vegetación de diferencia normalizada (por sus siglas en inglés) |
| OMM | Organización Meteorológica Mundial |
| PNE | Productividad neta del ecosistema |
| PNUMA | Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente |
| SIG | Sistema de información geográfica |
| SRES | Reporte especial sobre escenarios de emisiones (por sus siglas en inglés) |



Abreviaturas y símbolos

| | |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| A2 | Emisiones relativamente altas de GEI (tendenciales) |
| B2 | Emisiones relativamente bajas de GEI |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| ETP | Evapotranspiración potencial |
| HCCPR-HADCM3 | Modelo de circulación atmosférica, <i>Hadley Center for climate prediction and research</i> |
| HR | Humedad relativa |
| mm | Milímetros |
| msnm | Metros sobre el nivel del mar |
| N | Norte |
| pH | Potencial de hidrógeno |
| PP | Precipitación pluvial |
| S | Sur |
| T | Temperatura |
| °C | Grado centígrado |
| °W | Grado oeste |
| < | Menor que |
| > | Mayor que |
| ≤ | Menor o igual que |
| ≥ | Mayor o igual que |

Zonas de vida

| | |
|---------|-------------------------------------------|
| bh-MBT | bosque húmedo montano bajo tropical |
| bh-MT | bosque húmedo montano tropical |
| bh-PMT | bosque húmedo premontano tropical |
| bh-T | bosque húmedo tropical |
| bmh-MBT | bosque muy húmedo montano bajo tropical |
| bmh-MT | bosque muy húmedo montano tropical |
| bmh-PMT | bosque muy húmedo premontano tropical |
| bmh-T | bosque muy húmedo tropical |
| bms-T | bosque muy seco tropical |
| bp-MT | bosque pluvial montano tropical |
| bp-PMT | bosque pluvial premontano tropical |
| bs-MBT | bosque seco montano bajo tropical |
| bs-PMT | bosque seco premontano tropical |
| bs-T | bosque seco tropical |
| mp-SAT | monte pluvial o páramo subalpino tropical |



Resumen

Los efectos negativos atribuidos al “cambio climático global”, dentro de los que están desde ya, las hambrunas, cuantiosas pérdidas económicas -incluyendo infraestructura estratégica-, y hasta muertes, son un tema de actualidad que viene para quedarse.

La evidencia científica señala que en los últimos años la temperatura ha incrementado exponencialmente, sobre todo a partir de la década de los 90. Por esta razón, Lewis (2006), hace referencia a un “cambio climático abrupto”, ya que en ninguna otra década de la historia geológica de la Tierra se ha presenciado un cambio tan drástico. Es previsible que durante los próximos cien años se observen cambios similares a las fluctuaciones climáticas que han ocurrido en los últimos miles de años, especialmente de temperatura.

Existe una amplia y sólida base científica para afirmar que **el norte de Mesoamérica es una de las regiones que enfrentará mayores cambios**. Entre las principales consecuencias para el presente siglo están el aumento de entre 3 y 7.5°C de temperatura, la alta variabilidad climática y la modificación del ciclo hidrológico.

Los países más afectados por el cambio climático serán aquellos con mayor vulnerabilidad, derivada de carencias sociales y déficit en la gestión de los componentes ambientales. Durante la segunda mitad del siglo XXI podrían ocurrir grandes cambios climáticos aunados a un aumento significativo de vulnerabilidad, por lo que se considera urgente atender el tema de adaptación (Patt, et al., 2010). En Guatemala, dicho fenómeno es un factor de presión y una

limitante adicional para alcanzar el desarrollo, ya que afecta a los ecosistemas naturales, así como a los subsistemas social, económico e institucional.

Las regiones con niveles críticos de cambio en Guatemala, en el corto y mediano plazo (2020 y 2050), serán los cinturones este-oeste en el centro de Petén (Arco de la Libertad), la franja transversal del norte y los valles de las cuencas Motagua-Cuilco y Selegua, así como los sistemas montañosos. Se prevé que **más del 50% del territorio guatemalteco haya cambiado sus condiciones bioclimáticas para el 2050, y más del 90% para el año 2080**. Entre los principales impactos en los ecosistemas y la biodiversidad se espera la expansión de bosques secos y muy secos, los cuales probablemente cubrirán más del 65% del territorio en 2080. Paralelamente, se observará la reducción de la cobertura de los bosques húmedos, muy húmedos y pluviales; de 80%, disminuirá a 60% en 2050 y menos de 35% en 2080.

Lo anterior, **adicionado al deterioro actual de la cobertura de los ecosistemas naturales y altas tasas de deforestación**; provoca desde ya, una **progresiva y acelerada erosión genética y simplificación de los ecosistemas naturales**, acompañados de altas tasas de mortalidad, extinciones masivas, sobre todo de especies endémicas y de distribución restringida, así como de los ecosistemas de bosque nuboso y bosque latifoliado de tierras bajas. En tal sentido, los efectos del cambio climático y la degradación del medio natural en Guatemala pueden significar, en el mediano plazo (2050 - 2080), la pérdida del 50%, o mucho más, de la diversidad



genética con la que actualmente cuenta. Entre los **sitios críticos** se encuentran los relictos de ecosistemas “viables”, especialmente la Reserva de la Biosfera Maya y la Sierra de las Minas.

Se advierte la alta probabilidad de **perder de los servicios ecosistémicos asociados**, principalmente la captación y regulación hidrológica, la productividad primaria neta, la biodiversidad de importancia económica y la retroalimentación positiva del ciclo de carbono –es decir la liberación del carbono de los ecosistemas–, entre otros. Es destacable que Guatemala, que actualmente es un país excedentario de agua, pasará a ser un país con marcados déficits hídricos.

Bajo este contexto, es fundamental enfocar esfuerzos de políticas públicas con visiones y horizontes claramente establecidos, procesos definidos para alcanzarlos y estructuras institucionales renovadas y dinamizadas en torno de la **prevención y adaptación local al cambio climático abrupto**. Por ello, es necesario realizar

un profunda reforma del Estado guatemalteco para dotarlo de un sistema institucional funcional que sea capaz, no sólo de organizar las capacidades nacionales para detener las trayectorias actuales de agotamiento, deterioro y contaminación de nuestros componentes ambientales; sino también, para conceptualizar, diseñar y poner en marcha estrategias de adaptación para los eventos inducidos por el cambio climático y que tendrán su expresión en la modificación profunda de nuestro entorno natural. Es importante hacer énfasis en la necesidad de asumir, desde ahora, una nueva forma de pensar con respecto al cambio climático y las implicaciones que este tendrá en la vida cotidiana de todos los guatemaltecos. Sin dejar de reivindicar las obligaciones entre países ricos y pobres a **escala global**, debemos reconocer las obligaciones entre los sectores más solventes y los más vulnerables a **escala nacional**. Enfrentar la sinergia entre la realidad ambiental local y el cambio climático global, requiere de otro cambio: el socioeconómico e institucional.



Summary

The negative impacts of “global climate change”, among them acute malnutrition, great economic losses including the loss of strategic infrastructure and even human lives, have become topics that are here to stay.

Scientific evidence shows that during the last few years, temperature has drastically increased, more so during the nineties. Based on this, Lewis (2006) calls it an “abrupt climate change” given that no other decade in the history of the Earth has suffered such a dramatic change.

There is solid and ample scientific evidence to say that **northern Mesoamerica is one of the regions that will face the biggest changes.** Among the main consequences for the current century is the raise of temperature by 3 and 7.5°C; high climate variations and changes in the water cycle.

The countries where climate change will have a stronger impact will be those with higher vulnerability due to social deficiencies and with poor environmental management. During the second half of the XXI century we could face great climate change and increased vulnerability and thus the importance of working towards adaptation to such changes (Patt, *et al.*, 2010). In the Guatemalan context, the effects of climate change will add pressure and obstacles to achieve development, given the impact they will have on natural ecosystems as well as on the social, economic and institutional subsystems.

The regions most affected by change in Guatemala, in the short and medium terms (2020 and 2050) will be the east-west belt in the center of Peten (Arco de la Libertad), the northern transversal band and the valleys of the Motagua-Cuilco and Selegua basins as well as the mountain system. We estimate that **by 2050 the changes in bio-climate conditions will surpass 50% in the Guatemalan territory and by 2080 that percentage will grow to over 90%.** Among the main impacts expected to take place regarding the ecosystems and biodiversity are increased areas of dry and very dry forests, which will probably cover over 65% of the territory in 2080. At the same time, the area of rain forest (including different categories within it) will decrease from 80% to 60% and less than 35% for the years 2050 and 2080 respectively.

The above expected changes **added to the current depletion of forest cover in natural ecosystems and the high rate of deforestation** will result in **progressive and speeded genetic erosion and simplification of natural ecosystems.** We can expect to see high mortality rates, massive extinctions, mostly of endemic species and species of restricted distribution as well as of cloud forests and broadleaf forests in the lowlands. In this scenario, the effects of climate change and degradation of the natural environment in Guatemala will translate, in the medium term (2050-2080), in the loss of 50% or more of the current genetic biodiversity. Among the **critical sites** are the relicts of viable ecosystems, especially the Mayan Biosphere Reserve and Sierra de las Minas.



Warnings of the high probability of **loosing environmental services from associated ecosystems** should be made, most importantly regarding the availability of water and the water cycle as we know it, the loss of biodiversity that has economic value and the positive feedback of the carbon cycle, or in other words, carbon release from ecosystems. We should note that Guatemala will change from being a country with abundant water to one with water deficiencies.

Given the previous context it is most important to focus on developing public policies with clear visions and horizons; to define the processes to achieve the previous and to renovate and inject new life to institutions towards the **prevention and adaptation to abrupt local climate change**. It is of essence to conduct a deep reform to the Guatemalan Government to

provide it with an institutional functioning system capable of organizing national capabilities to stop the current depletion, degradation and pollution of our environment. We also need a Government that can create the concept, design and implement strategies to adapt to the events that can be expected from climate change and that will be felt mostly as a deep change in the environment. It is relevant to note the importance of assuming from now on a new way of thinking regarding climate change and its implications upon the day-to-day of all Guatemalans. Without leaving behind the responsibilities of rich and poor countries at the **global scale**, we need to enhance the obligations of the wealthiest sectors and the most vulnerable sectors at the **national scale**. Facing the synergy between local environmental reality and global climate change requires one more change: the social-economic and institutional change.





Parte
1

Introducción

1

Introducción

Los objetivos del presente documento se centran en definir y evaluar la amenaza que constituye el cambio climático para la biodiversidad y ecosistemas críticos de Guatemala, en el contexto regional mesoamericano. Para ello, se aporta la base conceptual del cambio climático global, se describen los factores climáticos que afectan a la biodiversidad y se sintetiza el estado del conocimiento científico actual sobre aspectos tanto climáticos como ecológicos, así como su interrelación.

En tal sentido, se realizó una extensa revisión de literatura científica acreditada nacional e internacionalmente, y se utilizó la base de datos del programa Agora (*Access Global online Research in Agriculture*). Se priorizaron estudios y aspectos descriptivos de los factores que controlan el clima en la región del Caribe y Mesoamérica.

En la primera parte del presente estudio se describen aspectos conceptuales del cambio climático y su impacto en la biodiversidad y ecosistemas, fundamentándose en observaciones empíricas y modelaciones de escenarios futuros. Luego, se incluye la base científica que define a Mesoamérica como una de las áreas con mayor riesgo y más vulnerable al cambio cli-

mático, tanto en la región tropical como a nivel global, con base en el análisis detallado de los factores que controlan el clima en Mesoamérica. Posteriormente, se analiza el conocimiento científico respecto a los efectos observados y esperados del cambio climático abrupto actual, para lo cual el análisis se divide en dos de los componentes más afectados: el sector hidroclimático, y el de biodiversidad y ecosistemas. Por último, se presenta una síntesis de los posibles impactos en la biodiversidad de Guatemala, clasificando la información acorde a las zonas de vida propuestas por la metodología de Holdridge (1971).

Dicha información es básica para la modelación climática a nivel geográfico, que se aborda en la segunda parte, como una aproximación para comprender el efecto del cambio climático en la biodiversidad y ecosistemas, en el corto (año 2020), mediano (2050) y largo plazo (2080).

El fin último de este esfuerzo es brindar a la sociedad y tomadores de decisión, información estratégica para definir políticas de adaptación, que contribuyan a la preservación del patrimonio natural del país y disminuir el impacto del cambio climático abrupto en la sociedad.



Parte

2

Aspectos
conceptuales

2.1 ¿Qué es cambio climático?

Se define como la variación del valor medio del estado del clima que ha persistido durante largos periodos, generalmente decenios o más años, y que es identificable mediante pruebas estadísticas. El cambio climático de la Tierra puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropogénicos constantes en la composición de la atmósfera o del uso de la tierra (IPCC, 2007).

La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, en el artículo 1, define el cambio climático como “el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”. La CMCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a fenómenos naturales y el que es alterado por las actividades humanas (IPCC, 2007).

El entendimiento científico del cambio climático ha variado sustancialmente desde la primera evaluación del ámbito climático global, realizada por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en 1990, hasta la más reciente publicada en 2008. Los nuevos conocimientos proporcionan: a) una actualización de las observaciones de variables climáticas; para lo cual, es importante remarcar el concepto de variabilidad climática, el cual denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas del clima (desviación típica, sucesos extremos, etcétera), a diversas escalas espaciales y temporales (IPCC, 2007); b) mejor vinculación del cambio climático actual con factores antropocéntricos y naturales; c) análisis más precisos sobre los cambios climáticos prehistóricos; d) mayor entendimiento del ciclo del carbono; y e) nuevas proyecciones de cambios futuros, debidos a eventos extremos (Füssel, 2009).

2.2 ¿Existe cambio climático? Variables para medirlo y proyecciones

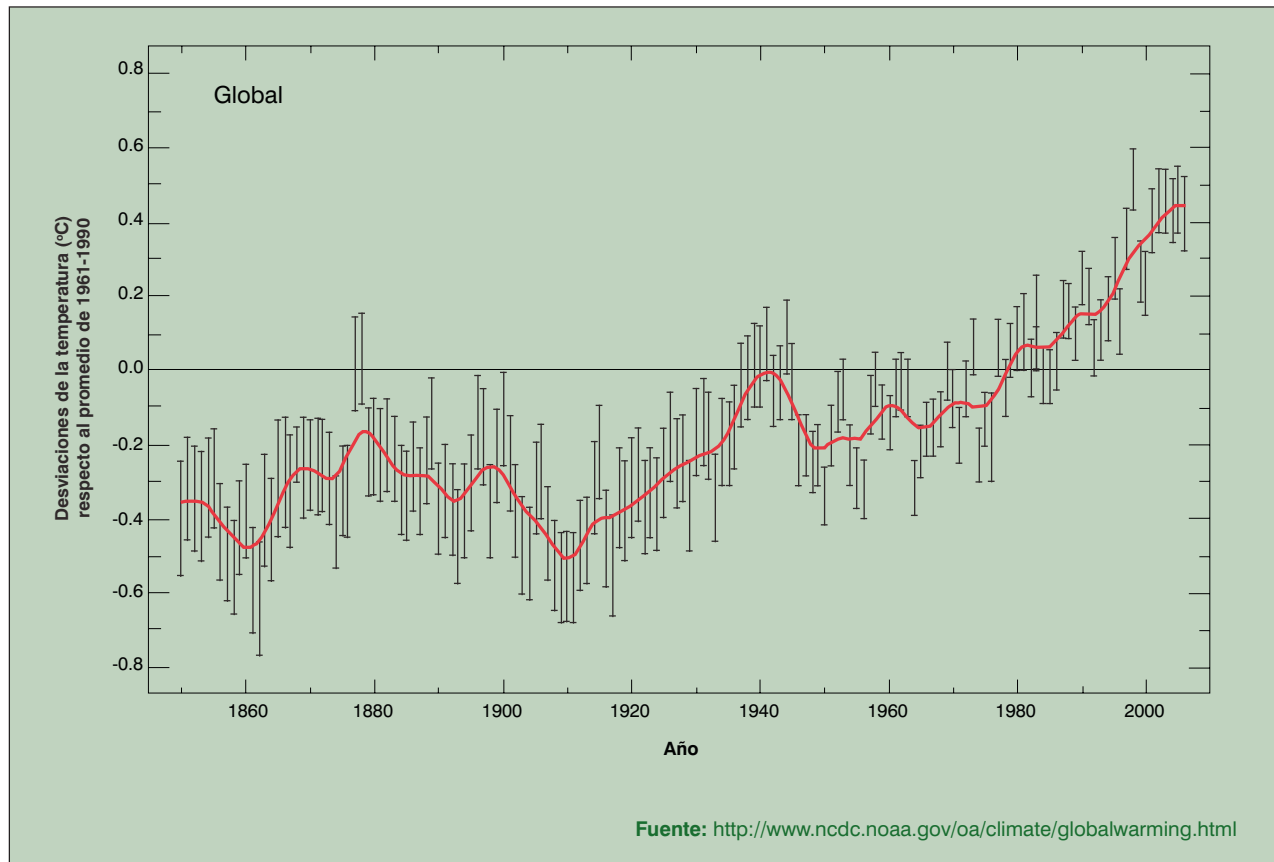
Muchos sistemas físicos y biológicos en todos los continentes y en algunos océanos, han sido afectados por cambios climáticos regionales. Las alteraciones observadas son coherentes con el calentamiento del sistema climático, cuyos efectos son implacables, como lo evidencia la fusión generalizada de nieves y hielos y el aumento del

promedio mundial del nivel del mar, así como de la temperatura del aire (Figura 1) y de las capas superficiales del océano. Otro indicador es el incremento del dióxido de carbono (CO₂) desde 1750, producido principalmente por actividades humanas, lo cual también ha intensificado la acidez de las capas superficiales del océano (IPCC, 2007).



Figura 1

Comportamiento anormal de la temperatura superficial de la Tierra y el océano, a nivel global



De acuerdo con el *Reporte del cambio climático*, denominado AR4 (IPCC, 2007), las variables climáticas que han registrado mayores cambios son:

- Temperatura, que aumentó en al menos 0.74 °C desde 1906 a 2005, lo cual ocurre con mayor énfasis en latitudes altas del hemisferio Norte. Probablemente, los años más recientes han sido los más cálidos en los últimos 13 siglos. Cabe mencionar que se ha evidenciado mayor calentamiento en la litósfera que en la hidrósfera.
- Nivel del mar, que creció a un promedio de 1.8 mm/año, desde 1963 hasta 2007.
- Cobertura de glaciares de montaña y nieve, que disminuyó en los dos hemisferios, con un promedio anual de 2.7%.
- Precipitaciones, que han aumentado de manera notable en algunas regiones de Suramérica y del hemisferio norte; mientras que en otros sitios del planeta han disminuido significativamente, como en el Mediterráneo y algunas regiones de África y Asia (Arnell, 1999; Huntington T., 2006).
- Actividad ciclónica, que se ha incrementado en el océano Atlántico norte y el Caribe.



- f) CO₂ atmosférico, que ha aumentado causando acidificación en el océano.

Estudios científicos evidencian que algunos de estos valores cambian constante y abruptamente, por ejemplo, se ha comprobado durante los

últimos años un incremento exponencial de temperatura a partir de la década de 1990 (Füssel, 2009; Sterling y Apps, 2005). Es previsible que durante los próximos cien años se observen cambios similares a las fluctuaciones climáticas que han ocurrido en los últimos miles de años (Kursar, 1999).

2.3

¿A qué se debe el cambio climático abrupto? ¿Cómo se utiliza la información existente?

La opinión científica generalizada afirma que el calentamiento global que actualmente se observan, es abrupto y se debe principalmente a factores antropocéntricos. Las concentraciones atmosféricas mundiales de CO₂, metano (CH₄) y óxido nítrico (N₂O) han aumentado notablemente a partir de la revolución industrial acaecida alrededor del año 1750. Investigaciones científicas en núcleos de hielo, que contienen información de varios milenios de la época cuaternaria, sustentan lo anterior (IPCC, 2007).

Información actualizada indica que las concentraciones de CO₂ en la atmósfera han incrementando rápidamente en los últimos años, debido a dos procesos. En primer lugar, el crecimiento de la economía mundial a comienzos del año 2000, combinado con el uso intenso del suelo. Al comparar la década de 1990 con el periodo de 2000 a 2006, la tasa de emisiones de CO₂ creció del 1.3% al 3.3% por año. El segundo proceso es la disminución de la eficiencia de fijación de CO₂, tanto en los océanos como en áreas continentales. Esa reducción es coherente con los resultados de los modelos que relacionan el ciclo del carbono con el clima. Sin embargo, la magnitud de los cambios que se observan ahora es mayor a las estimaciones de los modelos recientemente divulgados (IPCC, 2009).

Las previsiones en el aumento de la temperatura para el siglo XXI obedecen, en gran medida, a las estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero. En tal sentido, es necesario comprender que las futuras emisiones dependerán, principalmente, de la modificación de los sistemas económicos, y consecuentemente la restauración de los territorios para incrementar la capacidad de fijación, lo cual evidentemente depende del auxilio de la tecnología moderna. Una de las principales referencias con las que se cuenta para la estimación de emisiones globales de gases de efecto invernadero es el *Reporte especial sobre escenarios de emisiones* (SRES, por sus siglas en inglés), elaborado por el IPCC (2000). Este reporte, a pesar de ser objeto de severas críticas, probablemente por ser el más conocido y por el grado de incertidumbre que genera, ha sido amplia y continuamente utilizado y mejorado por diversos actores de la comunidad científica internacional (McKibbin, Pearce y Stegman, 2009).

Es importante mencionar que, además de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera, existen otros factores que inciden en el cambio climático a diferentes escalas, como mareas solares o el cambio de uso del suelo. Sin embargo, es necesario fortalecer el incipiente conocimiento científico al respecto, de tal manera que se lo-

Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

gre evidenciar cómo estos factores actúan de manera aditiva e integrada, así como diferenciar su efecto (Smith y Lazo, 2001; Varis, Kajander y Lemmel, 2004; IPCC, 2007).

Por otro lado, además de investigar y publicar acerca de los fenómenos climáticos, es muy importante su adecuada divulgación. Generalmente, la información publicada por los medios de comunicación es incongruente con los reportes

científicos respecto a las expectativas sobre el cambio climático. En los medios de comunicación, al menos de Estados Unidos, prevalece la idea de que la información publicada por el IPCC está sobrestimada. Sin embargo, la mayor parte de los reportes científicos evidencian que se subestiman los pronósticos sobre el calentamiento global, y la concentración de CO₂ en la atmósfera y sus efectos (Freudenburg y Muselli, 2010).



Parte

3

Cambio climático
en Mesoamérica:
región de alto riesgo

3.1 Factores que determinan el clima en la región mesoamericana

A continuación, se abordan los conceptos vinculados a los fenómenos climáticos globales y regionales que se consideran como prioritarios para la determinación del clima en Mesoamérica.

3.1.1 Zona de convergencia intertropical (ITCZ)

Esta zona es un cinturón de baja presión atmosférica que circunda el globo terrestre en la región cercana al Ecuador, donde convergen los vientos alisios provenientes de los hemisferios Norte y Sur.

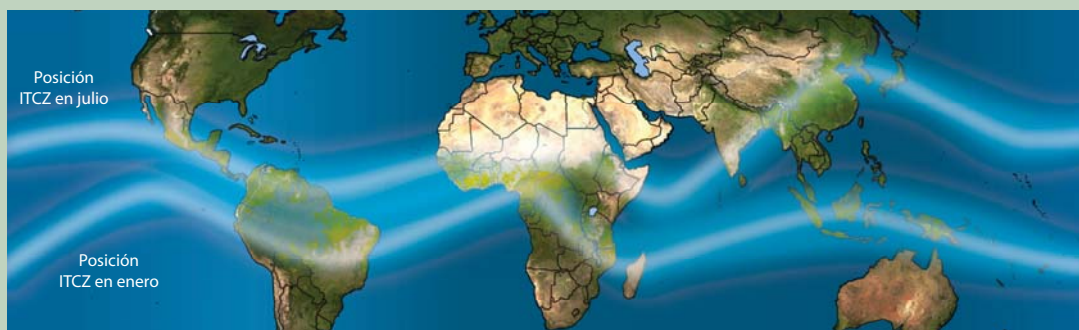
Tales vientos son empujados a la zona por la acción de la célula de Hadley (un rasgo atmosférico a mesoescala que forma parte del sistema planetario de distribución de calor y humedad) y transportados verticalmente hacia arriba, por la actividad convectiva de las tormentas. En tal sentido, se constituye en un cinturón perpetuo, aunque migratorio y discontinuo, de nubes (cumulonimbos, generalmente) que produce precipitaciones en las regiones cercanas al norte y sur del Ecuador (Figura 2).

Figura 2

Imagen satelital de la acumulación de nubes que muestra la ubicación de la zona de convergencia intertropical



Fuente: Con base en <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php>



Fuente: Elaboración propia.

Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

Las posiciones extremas de la ITCZ varían con el ciclo climático estacional, pues ésta se sitúa más hacia el norte ($8^{\circ}N$) durante el verano del hemisferio Norte, y más hacia el sur ($1^{\circ}S$) durante abril (Figura 2). La ITCZ muestra menor dinamismo en las longitudes oceánicas, donde mantiene una posición más o menos estática alrededor del Ecuador. En estas áreas, la lluvia simplemente se intensifica con el aumento de la insolación y disminuye a medida que el Sol ilumina perpendicularmente otras latitudes. La ubicación de la ITCZ define la presencia o ausencia de precipitaciones a nivel de mesoescala. Las regiones influenciadas por la ITCZ reciben precipitación más de 200 días al año, como en el caso de Guatemala y Centroamérica.

Asociado a la ITCZ, existe un ciclo diario regional, en el cual se desarrollan cúmulos convectivos a mediodía, que forman tormentas por la tarde y noche. Un ejemplo típico de este fenómeno es el observado en la bocacosta del sur de Guatemala, donde las bajas presiones causadas en el sistema montañoso local generan condiciones de atracción de nubes cargadas de alta humedad, desde el océano Pacífico hacia regiones continentales. En Mesoamérica, este fenómeno climático contribuye, sobre todo, a la precipitación en el oeste y sur de esta región, es decir en el Pacífico (Rauscher, Giorgi, Diffenbaugh y Seth, 2008).

3.1.2 Oscilación del Sur El Niño (ENSO)

Este fenómeno se refiere a las variaciones anuales y estacionales, al menos desde el inicio del Holoceno, de la temperatura superficial del mar, las lluvias convectivas, la presión del aire superficial y la circulación atmosférica, que se producen en el océano Pacífico ecuatorial. El Niño es llamado así porque, generalmente, alcanza su máxima expresión a finales de año, y los pescadores y primeros habitantes cristianos de la zona oeste de América del Sur ecuatorial lo relacionaron con la época de la celebración del nacimiento de Jesucristo.

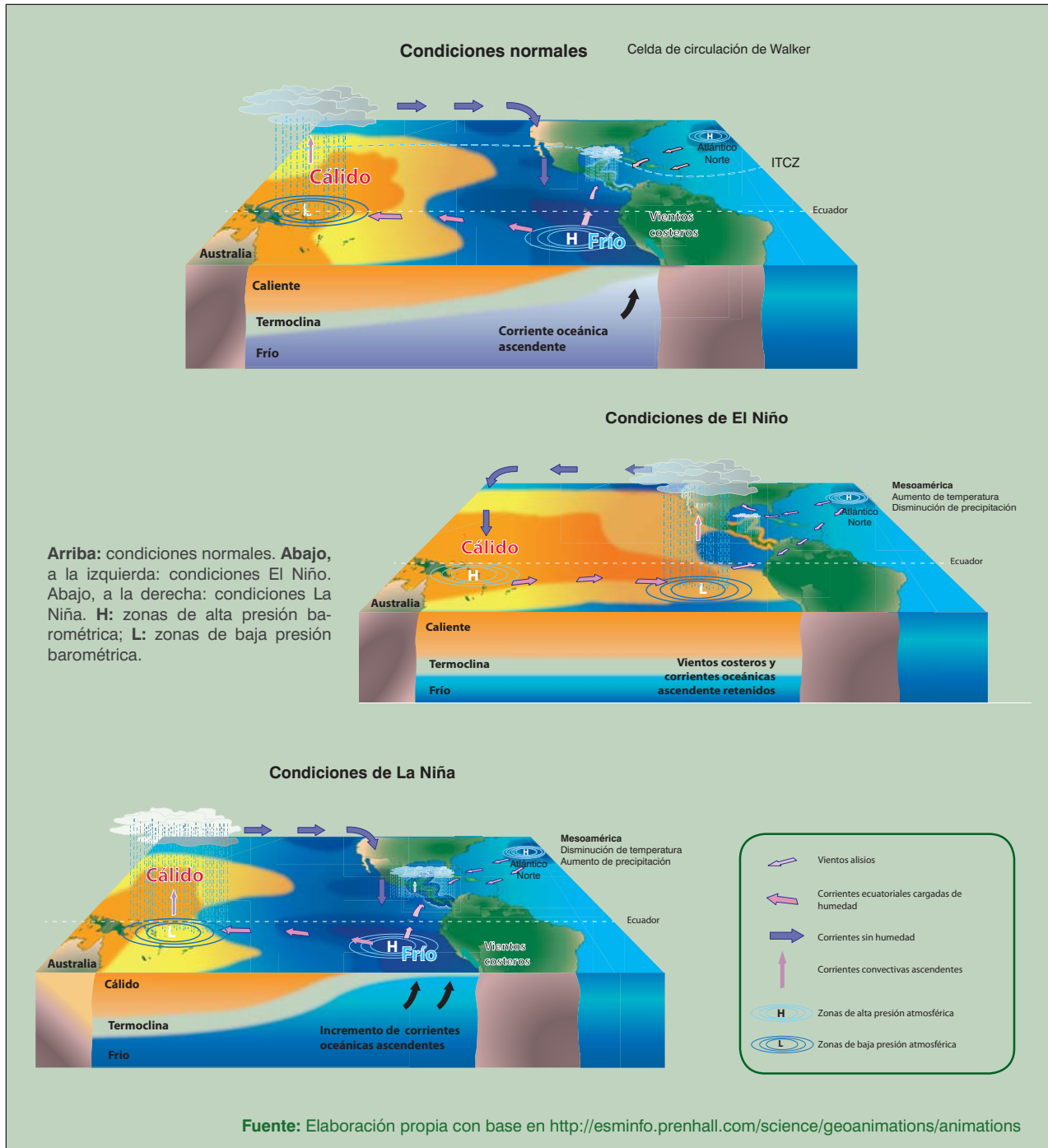
La oscilación del Sur se describe de forma bimodal (con dos picos o modos), es decir, la variación en la presión atmosférica, al nivel del mar, entre las estaciones de observación climática ubicadas en el Pacífico ecuatorial: Darwin (en las Islas Galápagos, Ecuador), y Australia y Tahití (en Indonesia). Durante condiciones normales, los vientos dominantes cerca de la superficie provienen del Este (vientos alisios) en el océano Pacífico tropical, y tienden a acumular las precipitaciones tropicales hacia el lado oeste, es decir, en la región de Indonesia. Dado que la temperatura de superficie del mar es relativamente elevada en esta región (mayor que $28^{\circ}C$), el aire es más ligero (menor presión barométrica), por lo que se origina una atmósfera inestable, causando que la humedad oceánica ascienda, se formen nubes y, consecuentemente, las lluvias sean intensas (Figura 3).

Aunque las causas exactas del inicio de un evento caliente (El Niño) o frío (La Niña) no se conocen totalmente, se observa que los dos componentes principales son la temperatura superficial del mar y la presión atmosférica. Durante un evento de El Niño, los vientos alisios del Este que convergen en el Pacífico ecuatorial se debilitan. Esto a la vez disminuye la corriente oceánica en la costa occidental de América del Sur, por lo que se reduce el afloramiento de aguas profundas, ricas en nutrientes. Además, se muestra un aplanamiento de la termoclina (zona situada debajo de la superficie del océano, donde cambia la temperatura del agua), mientras que en la superficie de esta capa y en aguas profundas la temperatura es relativamente constante. La Niña es el fenómeno, incluidos sus efectos climáticos globales, generalmente inverso al Niño. En este caso las temperaturas oceánicas ecuatoriales son más bajas de lo normal, entre $1^{\circ}C$ y $4^{\circ}C$, por lo que las corrientes atmosféricas y oceánicas se debilitan y convergen en el centro del Pacífico ecuatorial.



Figura 3

Descripción del fenómeno Oscilación del Sur El Niño



Fuente: Elaboración propia con base en <http://esminfo.prenhall.com/science/geoanimations/animations>

Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

El cambio en el gradiente de presión atmosféricas afecta a la temperatura superficial del mar en la región ecuatorial y, a la vez, las temperaturas de la superficie del mar afectan al gradiente de presión. Estos gradientes inciden en el fortalecimiento y debilitamiento de los vientos alisios (vientos tropicales), generando distorsiones climáticas a nivel global debido a las teleconexiones entre estos factores controladores del clima. Para Mesoamérica destaca la relación de la fase de El Niño con el debilitamiento de la ITCZ, cuya consecuencia es la disminución significativa de las precipitaciones y el aumento de la temperatura promedio.

Los episodios de El Niño y La Niña típicamente ocurren cada tres o cinco años. De acuerdo con algunos científicos, el cambio climático abrupto actual puede influir en el aumento de la intensidad y frecuencia del ENSO (*National Ocean and Atmospheric Administration*, 2010). Esta suposición ha sido confirmada por los últimos informes del IPCC (IPCC, 2007), que plantean que la frecuencia, duración e intensidad del ENSO han aumentado durante los últimos 30 años, especialmente en la fase cálida, al compararlos con datos de hace 100 años o más.

3.1.3 Corrientes de chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ)

Estas corrientes (CLLJ, por sus siglas en inglés) se muestran como una característica dominante en el clima de la región del mar Caribe y Centroamérica, sobre todo durante el inicio del verano en el hemisferio Norte. Estas se manifiestan como una moderada intensificación de los vientos alisios del noreste, principalmente, en la cuenca del Caribe occidental (costa atlántica de Centroamérica y sur de México), ubicada entre 70 °W y 80 °W; con un eje este-oeste de 15 °N. Generalmente, presenta una velocidad máxi-

ma de viento cercana a 16 metros por segundo sobre la superficie oceánica (Whyte, Taylor, Stephenson y Campbell, 2008).

Estos vientos son los que controlan principalmente el suministro de humedad y precipitaciones, en gran medida, en el Caribe y Mesoamérica, sobre todo en la primera parte de la estación lluviosa. Normalmente transportan la humedad desde el noreste del mar Caribe durante el verano boreal (de mayo a junio y de septiembre a octubre), específicamente de la región denominada zona de alta presión del Atlántico norte (NASH, por sus siglas en inglés) hasta las costas de Centroamérica, pasando por la región de convergencia del centro del mar Caribe, que a la vez presenta bajas presiones.

De tal manera, se establece un gradiente de presiones y temperaturas oceánicas y atmosféricas que actúa como una banda transportadora de humedad. Sin embargo, al intensificarse los gradientes de presiones por el máximo calentamiento en ambos hemisferios (julio, en el hemisferio Norte y febrero, en el hemisferio Sur) las precipitaciones son escasas (Rauscher, Giorgi, Diffenbaugh y Seth, 2008).

Se ha demostrado una alta correlación entre la variabilidad de la intensidad de la CLLJ y el gradiente de la temperatura superficial del mar, entre la parte oriental del Pacífico ecuatorial y la región del Atlántico norte tropical o ecuatorial. Cuando el gradiente es conducido por el Pacífico (como en un evento de El Niño, acompañado de presiones bajas, en el Pacífico este ecuatorial), los vientos CLLJ se intensifican, desviándose hacia el norte de Estados Unidos (grandes planicies centrales) y al sudoeste del mar Caribe y Centroamérica, lo que disminuye en forma severa las precipitaciones, especialmente al norte de Centroamérica (Whyte, Taylor, Stephenson y



Campbell, 2008). La CLLJ también está vinculada a un máximo de precipitación a lo largo de la costa caribeña de Centroamérica, durante junio y julio. Hay evidencias de que existe un gradiente pronunciado de temperatura sobre el nivel del mar, entre el extremo noreste de la cuenca del mar Caribe y la zona más húmeda de Centroamérica en su costa atlántica, es decir en la región fronteriza de Costa Rica y Nicaragua (Whyte, Taylor, Stephenson y Campbell, 2008; Rauscher, Giorgi, Diffenbaugh y Seth, 2008).

De manera general, se puede afirmar que existe un ciclo estacional entre las CLLJ, las altas presiones de la NASH y las bajas presiones en el Caribe meridional y Pacífico centroamericano, lo cual influye en la migración e intensidad de la ITCZ. Además, hay un ciclo diario asociado con fenómenos de gradientes de temperatura y presiones atmosféricas mar-costa-continente. Ambos ciclos causan lluvias en México y Centroamérica, de mayo a septiembre u octubre, con un lapso intermedio de sequías (canícula, julio y agosto) relacionado con una intensificación de la corriente de chorro en el Caribe central (Cook y Vizzy, 2010).

3.1.4 Relaciones entre canícula, zona subtropical de alta presión del Atlántico norte y corrientes de chorro de bajo nivel del Caribe

Gran parte de la región mesoamericana muestra una distribución bimodal de la precipitación. Las precipitaciones máximas se producen en junio, septiembre y octubre, separadas por una tregua en julio y agosto, de manera similar a la actividad de ciclones tropicales en el Caribe. A este periodo de menor precipitación se le denomina

localmente “canícula”, y científicamente “sequía de mediados de verano” (MSD, por sus siglas en inglés). Por lo general, la MSD se asocia con una intensificación de vientos de la CLLJ, debido al aumento en el gradiente de presión atmosférica entre la zona subtropical de alta presión del Atlántico norte y la disminución de la presión atmosférica en el mar Caribe y el Golfo de México. Esto trae consigo el aumento de la fuerza de los vientos (del Este) sobre la superficie del océano y afecta la disminución de la convección de los vientos del Caribe y del Golfo de México, lo cual reduce la precipitación (Rauscher, Giorgi, Diffenbaugh y Seth, 2008) en las costas y áreas de influencia del Pacífico y Atlántico de Centroamérica.

De tal manera, se puede afirmar que en la región mesoamericana existe una clara teleconexión atmosférica y una estrecha interrelación con los factores controladores del clima en la región ecuatorial del Pacífico y del Atlántico norte (subtropical). Por ejemplo, durante un evento de ENSO cálido se producen menos lluvias en la costa del Pacífico de Centroamérica, debido a que la CLLJ se fortalece con el calor (o se debilita con el frío). La intensificación de la MSD se prolonga cuando el gradiente de la anomalía en la temperatura superficial del mar entre el Pacífico y el Atlántico es negativo (o positivo), lo que resulta en un mayor (o menor) gradiente de presión atmosférica en el istmo. Asimismo, las anomalías en la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical pueden causar mayor impacto durante la última fase de la estación lluviosa, en septiembre y octubre. En el Atlántico, los efectos pueden ser menos marcados.

3.2

Zona de convergencia intertropical y cambio climático

El consenso generalizado es que uno de los principales mecanismos que produce condiciones húmedas y secas en la faja tropical del hemisferio Norte es la migración de la ITCZ (Neff, Pearsall, Jones, Arroyo y Freidel, 2006). En general, el conocimiento científico actual apoya consistentemente la hipótesis de que las precipitaciones de verano en el norte de la región neotropical son controladas por las migraciones estacionales de la ITCZ, especialmente en la vertiente atlántica de la mayor parte de Mesoamérica. Históricamente se ha evidenciado que el límite norte de la ITCZ se ha ubicado más al sur durante periodos extremos de temperatura en los que prevalecieron las condiciones de aridez en el norte del Neotrópico (Hodell *et al.*, 2008; Leduc, Vidal, Tachikaw y Bard, 2009).

Se ha logrado verificar la relación existente entre el desplazamiento de la ITCZ hacia el Sur y el deshielo en el Polo Norte terráqueo, así como entre este fenómeno y las asimetrías en la velocidad del deshielo en ambos polos de la Tierra, lo cual se ha originado a partir de mecanismos físicos que alteran la circulación de corrientes de humedad en la tierra. En tal sentido, es explicable el forzamiento físico de migración de la ITCZ hacia el Sur, especialmente sobre los océanos (Chiang y Bitz, 2005).

En la dinámica y oscilación de la ITCZ, se ha demostrado que la topografía, es decir el relieve

montañoso de Mesoamérica, no es un forzamiento significativo a nivel de mesoescala; más bien es la presión barométrica en el Ecuador la que la dinamiza entre estaciones y años. Es decir, que la presencia de un calentamiento en el Ecuador (fenómeno El Niño) es un factor de forzamiento crítico para el desplazamiento de la ITCZ hacia el Sur. Esto concuerda con la mayoría de las propuestas relacionadas con la migración histórica de la ITCZ (Toma y Webster, 2010). Por ejemplo, estudios paleoclimáticos en el norte de Venezuela han evidenciado la existencia de una relación entre los cambios estacionales, especialmente con ausencia o presencia de lluvias convectivas actuales y la ocurrencia de cambios en la posición del ITCZ (Peterson y Haug, 2006).

En el marco del calentamiento global, las oscilaciones climáticas del Pacífico ecuatorial y el Atlántico norte (asociadas con la migración de la ITCZ), podrían provocar un cambio estacional de la precipitación en Centroamérica durante la temporada de lluvias, especialmente en la canícula (MSD). En tal sentido, si la concentración global de gases de efecto invernadero continúa aumentando a lo largo del siglo XXI, en la región mesoamericana será necesario atender importantes cambios en la gestión de recursos hídricos –y recursos naturales asociados–; tales como la biodiversidad (Rauscher, Giorgi, Diefenbaugh y Seth, 2008).



3.3 Cambio climático y la oscilación del Sur El Niño (ENSO)

Se ha evidenciado que el fenómeno ENSO es un factor importante que controla las variaciones del clima en múltiples escalas de tiempo. También se ha observado que durante los últimos 20 años se han intensificado los esfuerzos científicos para desarrollar mejores registros y seguimiento de este fenómeno, así como la evaluación de sus efectos en diversas áreas del planeta. En este sentido, se ha demostrado que una gran proporción de la variabilidad del clima global está directamente vinculada a la variabilidad del ENSO, a través de los procesos de teleconexión atmosférica con otros fenómenos climáticos globales y regionales (Díaz y Stahle, 2007). Es posible afirmar que las temperaturas medias globales se ven influidas por el ENSO a través de bolsones gigantes de calor que el océano aporta a la atmósfera (Trenberth *et al.*, 2007). Por ejemplo, el ENSO observado durante el periodo 1997-1998 (que produjo las mayores alteraciones en la temperatura de la superficie del océano registradas hasta la fecha) coincidió con la temperatura media global más alta, según los registros del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2007).

De acuerdo con la reconstrucción de eventos, se evidenció que desde 1525 a la fecha el ENSO presentó una naturaleza inusual a finales del siglo XX. Los años con eventos de mayor intensidad de La Niña se produjeron durante los siglos XVI y XIX, coincidiendo con épocas frías. En contraste, el siglo XX se identifica como el perio-

do de máxima actividad del fenómeno El Niño, cuando se registró la época más cálida de los últimos milenios. En general, de los eventos extremos de El Niño ocurridos desde 1525, el 55% se registró en el siglo XX. De esos eventos, sucedidos en el periodo 1525 hasta 2003, aproximadamente el 43% fueron extremos, y el 28% ocurrió en el siglo XX. Cabe destacar que sólo en el periodo de 1940 a 2003 sucedió el 30% de eventos extremos de ENSO. Es posible afirmar, entonces, que El Niño ha aumentado en intensidad y frecuencia durante el último siglo (Gergis y Fowler, 2009).

Asimismo, se ha confirmado que la variabilidad del clima de los océanos Pacífico y Atlántico tiene un impacto significativo en las precipitaciones del Caribe y Centroamérica. Esto, a través de estudios específicos y relaciones de los fenómenos de oscilación climática, especialmente de ENSO y la oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés), así como en gradientes de presión atmosférica y temperatura asociados. Para esta región, ENSO (El Niño/La Niña) tiene efectos opuestos durante las temporadas de lluvia: El Niño causa severas sequías y La Niña, intensas lluvias. El amplio conocimiento de estos fenómenos y su relación son importantes, pues proporcionan la capacidad de predecir el clima para esta región, especialmente la del Caribe-Centroamérica (Gianinni, Kushnir, y Cane, 2001).

Existen también otros estudios que demuestran la recurrente variabilidad climática y ENSO, con la alternancia entre periodos húmedos y secos en Yucatán y Centroamérica. Sin embargo, para Yucatán se propone que la relación con ENSO no es el único factor que genera esta alternancia, sobre todo El Niño (fase de altas temperaturas) y su incidencia en sequías regionales, ya que se ha evidenciado que el cambio de vientos locales puede afectar esta zona. Esta relación parece responder a factores aleatorios o estocásticos, ya que la región se encuentra en un sitio denominado interfase (sitio de intercambios) de vientos del sureste y noreste (Hunt y Elliott, 2005).

Conforme ha avanzado el conocimiento acerca del fenómeno El Niño, también se ha adquirido más capacidad predictiva sobre sus efectos, especialmente en la variabilidad de la precipitación, sobre todo la región del Caribe, Centroamérica y Atlántico norte (Gianinni, Kushnir y Cane, 2001; Varis, Kajander y Lemmel, 2004; Waylen, Quesada y Caviedes, 1994). Asimismo, esta información puede ser utilizada para me-

jorar estrategias de manejo y restauración de ecosistemas degradados. Estudios muestran que ENSO tiene implicaciones determinantes en el funcionamiento de los diferentes ecosistemas, desde desiertos hasta selvas tropicales. Por ejemplo, cuando ENSO produce cambios en la precipitación, es previsible que se afecte la productividad y la cadena trófica, por lo que en algunos ecosistemas semiáridos extra-tropicales donde se ha registrado mayor precipitación, se dará paso a bosques permanentes; y en ecosistemas de bosque tropicales ocurrirá lo contrario (Holmgren, Schefer, Ezcurra, Gutiérrez y Morhen, 2001).

En tal sentido, es una prioridad para el sector científico mejorar el conocimiento actual y lograr establecer cómo opera el ENSO en un mundo con calentamiento global (IPCC, 2007). La comprensión de este fenómeno necesita atención, ya que es especialmente importante para las evaluaciones nacionales de los riesgos socioeconómicos asociados con el cambio climático, principalmente en las regiones más afectadas por dicho fenómeno (Gergis y Fowler, 2009).

3.4

Interacción de los factores controladores del clima en Mesoamérica

Es importante recalcar que Mesoamérica se encuentra bajo la influencia de fenómenos climáticos planetarios, como la Zona de Convergencia Intertropical, la Oscilación del Sur El Niño y la Zona de Alta Presión del Atlántico Norte, que controlan la precipitación y otros factores climáticos en la región tropical del Hemisferio Norte.

La ITCZ atrae vientos y humedad del noreste de Centroamérica, por lo que las costas orientales del istmo se ven afectadas por los vientos alisios

y ondas del Este, así como por ciclones tropicales (Rauscher, Giorgi, Diffenbaugh y Seth, 2008). Además, la convergencia de la ITCZ del Pacífico oriental, que migra hacia el Norte durante el verano del hemisferio norte, produce precipitaciones en la región centroamericana (Hastenrath, 1976, citado por Rauscher, Giorgi, Diffenbaugh y Seth, 2008). Es claro que la topografía de América Central también contribuye, aunque de manera más localizada, a generar precipitaciones, debido a los efectos de barlovento, producidos por las brisas y vientos del mar-tierra, atraídos por



las bajas presiones y temperaturas de las montañas (Hastenrath, 1967; Waylen, 1996; Peña y Douglas, 2002; citados por Rauscher, Giorgi, Diffenbaugh y Seth, 2008).

Diversos análisis advierten que la región centroamericana será una de las más afectadas por el cambio climático mundial, especialmente por los incrementos de sequías (Giorgi, 2006), a causa de una mayor variabilidad y disminución significativa de las precipitaciones. Esta tendencia se espera en las regiones subtropicales, según observaciones empíricas y modelos de simulación del clima en el futuro. De hecho, se ha observado que las estaciones secas registran niveles de humedad más bajos, tanto en Centroamérica como en el Caribe (Neelin, Münnich, Su, Meyerson y Holloway, 2006).

Por otro lado, Aguilar (2005) y Guerra (2010) indican que no se han registrado aumentos significativos de precipitación pluvial durante el siglo XX. Sin embargo, coinciden en que las precipitaciones son más intensas y el número de días húmedos consecutivos ha disminuido (Aguilar, 2005).

Neelin *et al.*, (2006), señalan que en el hemisferio Norte la precipitación durante los veranos tiende a disminuir, especialmente en el mar Caribe y ciertas partes de Centroamérica. Esta coherencia entre modelos y observaciones empíricas resaltan la necesidad de analizar tales comportamientos, evaluando por separado las estaciones climáticas, especialmente el caso de las lluvias que se extienden de mayo a octubre.

En presencia de El Niño, la ITCZ se desplaza hacia el Sur, lo cual se asocia a sequías, que van de julio a octubre (Waylen *et al.*, 1996; Hodell 2002; Hastenrath 2002), inclusive un año antes que se dé la fase madura de El Niño; aunque en algunos eventos esta relación se mostró un tanto débil. Asimismo, es importante la influencia de la topografía local (Rauscher, Giorgi, Diffenbaugh y Seth, 2008).

Para explorar las posibles respuestas regionales al calentamiento global se corrieron simulaciones de los cambios esperados, con el modelo denominado CMIP3. Los hallazgos indican una fuerte disminución de la precipitación pluvial, sobre todo entre junio y julio, justo antes del inicio de la canícula. Al respecto, hay una hipótesis que señala que las canículas serán más intensas y se iniciarán precozmente.

Los cambios en la circulación atmosférica muestran una expansión e intensificación de la NASH, lo que genera sequías durante los veranos en el hemisferio Norte, asociadas a fuertes vientos producidos por la CLLJ, derivados del corrimiento de la ITCZ hacia el Sur. Sin embargo, estos eventos se verán favorecidos por la recurrencia de El Niño, así como por el calentamiento de las aguas tropicales del Pacífico oriental y el consecuente aumento de la convección ecuatorial (Rauscher, Giorgi, Diffenbaugh y Seth, 2008).

Los datos sobre precipitación obtenidos en 266 estaciones climatológicas de Guatemala y áreas adyacentes revelan que las lluvias de marzo son notablemente menores (al menos 25 milímetros) en áreas deforestadas que en boscosas, para una misma zona de vida. Al comparar sitios deforestados con los que poseen una cobertura forestal durante la época seca, los primeros presentan temperaturas más altas, días con menor nubosidad, niveles más bajos de humedad en el suelo y menores índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés); en contraste con los segundos (Deepak, Welch, Lawton y Nair, 2006).

Estos resultados confirman que la presencia o ausencia de cobertura forestal es un factor adicional determinante de los cambios climáticos, por lo tanto, constituye un fenómeno de importancia a ser estudiado y comprendido adecuadamente en la región (Lawton, Nair, Pielke y Welch, 2001).

3.5

Relaciones paleoclimáticas: civilización maya y cambio climático

La región mesoamericana ha sido afectada históricamente por cambios climáticos (Hunt y Elliott, 2005) relacionados con las temperaturas globales, tanto bajas (incluidas las glaciaciones) como altas, así como condiciones de humedad contrastantes. En tal sentido, los estudios paleoclimáticos (clima del pasado) confirman la sensibilidad de esta región a dichos cambios globales.

Un estudio indica que a partir de cilindros de sedimentos, obtenidos en lagos de Petén, Guatemala; Yucatán, México, y el norte de Venezuela, se ha elaborado un registro equivalente a 85 mil años de historia climática, que corresponde a la época anterior, durante y después de la última glaciación (punto máximo hace 21 mil años, aproximadamente).

Estos sedimentos se caracterizan por estar formados de arcilla y yeso de manera alterna, lo cual refleja que las condiciones climáticas eran húmedas o secas, respectivamente. En los sedimentos que tienen entre 85 mil y 48 mil años predomina la arcilla, lo que indica condiciones de humedad elevada. Según datos, la primera capa de yeso fue depositada hace 48 mil años, lo que significa que hubo un cambio hacia condiciones hidrológicas secas y empezaron a oscilar las épocas secas y húmedas.

La alternancia durante la última parte del periodo hace 48 ó 23 miles de años a.C. coincide con los registros de temperatura de Groenlandia y el Atlántico norte. Estos fueron reconstruidos a partir de núcleos de cilindros de hielo, sedimentos marinos del Atlántico y valores de precipitación tomados del estudio de La Fosa de Cariaco en

Venezuela (Hodell *et al.*, 2008; Peterson y Haug, 2006).

También se evidenció que en el lago Petén Itzá, los periodos más áridos coinciden con los eventos denominados Heinrich (fenómeno que se da por deshielo o glaciación en regiones templadas), cuando prevalecían temperaturas frías en la superficie del mar en el Atlántico norte. Asimismo, se pudo inferir que la circulación de vientos meridionales se redujo y la ITCZ se desplazó hacia el Sur, durante esos periodos. Se comprobó que una capa de arcilla fue depositada hace 23 a 18 miles de años, lo cual supone la existencia de un lago profundo (alrededor de 7 metros arriba del espejo actual). Además, el polen acumulado durante este periodo indica que la vegetación consistía en un bosque templado de pino-encino.

Se cree que la humedad que dio lugar al aumento significativo de la vegetación se derivó de la mayor precipitación de verano (junio, julio, agosto y septiembre), relacionada con una posición más al Norte de la ITCZ, o precipitación de invierno correspondiente con la frecuencia e intensidad de vientos polares del Norte (Hodell *et al.*, 2008).

Cabe destacar que este hallazgo contradice inferencias de otros estudios, respecto a que el clima era árido durante el punto denominado Último Máximo Glacial (LGM, por sus siglas en inglés). Se afirma que hace 18 mil años el clima cambió; por ejemplo, en Petén las condiciones húmedas pasaron a ser áridas, y entre el periodo de 18 mil a los casi 15 mil años se mantuvieron en la fase del deshielo temprano.



Por otro lado, las condiciones más húmedas prevalecieron durante el calentamiento denominado Bolling-Allerod (periodo de 15 mil a 13 mil años, aproximadamente), con excepción de otra fase de condiciones secas aparecida hace unos 14 mil años, situación que coincide con el periodo Dryas temprano, cuyo inicio, hace 13 mil años, marcó el regreso de las condiciones secas y, por tanto, del yeso. Los datos revelan que el lago siguió acumulando yeso hasta hace más de 10 mil años, cuando las precipitaciones aumentaron notablemente en el Holoceno temprano (Hodell *et al.*, 2008).

Estos estudios sugieren que entre los principales factores determinantes para los cambios climáticos observados en Mesoamérica a partir de la última glaciación se encuentran la posición de la ITCZ, la penetración de masas de aire polar y la precesión de la insolación, es decir, el movimiento de la posición cenit del sol en la región tropical de la Tierra (Bush *et al.*, 2007).

Un análisis sobre sedimentos de la laguna Salpetén, Petén, Guatemala, determina que durante los últimos 4 mil años ocurrieron eventos de tala de bosques. Como consecuencia, aumentó la erosión del suelo, especialmente entre los años 1700 a.C. y 850 d.C. Refiere el estudio que, con el apoyo de radiocarbono de madera, semillas y datación de carbono, con énfasis en el periodo de 1300 a 400 a.C.; se comprobó la coincidencia entre la pérdida de bosques y los cambios registrados en la superficie del lago, entre los años 400 a.C. y 150 d.C. Asimismo, esos datos presentan una adecuada correlación entre el abandono del territorio (disminución de población y actividades culturales) en el periodo del Preclásico tardío (año 150 d.C.) y del Clásico temprano (hasta el año 550 d.C.) con los niveles del lago y, paralelamente, con diversos eventos de relativa sequía. Indicadores de una sequía severa y aridez también vuelven a coincidir con el Clásico terminal (período del declive

maya), entre los años 800 y 900 d.C. A partir de estos eventos y la disminución severa de la población, se observa el inicio de la recuperación del bosque y reanudación de la sedimentación orgánica (Rosenmeier, Hodell, Brenner, Curtis y Guilderson, 2002). Otras investigaciones han logrado evidenciar los mismos patrones de cambio climático durante el periodo Holoceno (era actual, que comprende el periodo interglacial, que inicia después de la última glaciación, hace 11,784 años).

Para el ámbito caribeño y del altiplano andino, se han utilizado métodos paleolimnológicos y datos paleoambientales. Estos también muestran similitudes entre el contexto climático de los mayas (Península de Yucatán) y Tiwanaku (Bolivia-Perú, altiplano). Se demuestra que existió una fase de inicio, donde se expandieron los cultivos, y una fase posterior cuando éstos se desplomaron, antes del contacto con los europeos en el año 1500 d.C. En un contexto general, en la región Caribe también hay evidencias de que los datos paleoclimáticos son correspondientes con un periodo árido del Pleistoceno tardío (más o menos en el año 10500 a.C.). Posteriormente, aumentaron las concentraciones de humedad, a mediados del periodo Holoceno (9000 a 4000 a.C.). Probablemente, estos cambios se relacionan con grandes diferencias entre el verano y la insolación de invierno (Brenner, Hodell, Resenmeier, Curtis, Binford y Abbott, 2007).

En tal sentido, es posible afirmar que el asentamiento y una marcada expansión de la población maya datan del periodo Preclásico medio (de 1000 a 300 a.C.), que se puede asociar con una menor estacionalidad y alta humedad. De manera consistente, diversos estudios muestran que el episodio más seco del Holoceno se produjo en las tierras bajas mayas, entre los años 800 y 1000 d.C., lo cual coincide con el colapso maya, aproximadamente en el año 850 d.C.

Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

(Brenner, Hodell, Resenmeier, Curtis, Binford y Abbott, 2007). Otro estudio realizado en el manglar denominado El Manchón, en el suroccidente de Guatemala, mediante análisis de polen y registros de fitolitos, determinó la existencia de cambios climáticos sincrónicos en el Neotrópico. Se definió una relación especial entre los cambios climáticos de las tierras bajas del sur del Pacífico de Mesoamérica, como la Fosa de Cariaco, con los lagos al norte de Yucatán, México, y los del centro de Petén, Guatemala. Estos sitios coinciden en su ubicación cercana al límite norte de la posición normal actual de verano de la ITCZ. En este contexto, y con un registro equivalente a 6,000 años para tierras bajas de la vertiente del Pacífico de Mesoamérica, se deduce que en esta región los seres humanos han enfrentado cambios climáticos desde tiempos arcaicos (año 3000 a.C.) hasta el Posclásico (que finaliza en el año 1500 d.C.). Dicho registro histórico también establece una fuerte relación entre la variación del clima y los niveles de población humana, así como su correspondiente evolución cultural (Neff, Pearsall, Jones, Arroyo y Freidel, 2006; Mueller, *et al.* 2009).

La respuesta de la población y cambios culturales fueron inducidos no sólo por los cambios climáticos, sino también por los niveles de población y la evolución social. Por ejemplo, la rápida propagación de la población humana hace 4 mil años coincide con las condiciones climáticas estables y el aumento de la humedad, a partir de un periodo anterior relativa-

mente seco. Esto propició un patrón de adaptación “positivo”, con lo que ocurrió la primera ocupación y expansión humana significativa en la costa del Pacífico de Mesoamérica. Se evidencian también logros impresionantes en el arte y la arquitectura, y se inicia la época denominada Formativa y Clásica, durante un periodo de 1,600 años de condiciones climáticas favorables, excepto por un periodo intermedio de condiciones desfavorables (sequía), al final del periodo formativo (alrededor del año 100 d.C.), también conocido como Preclásico. Asimismo, se afirman patrones de colapsos sociales y culturales, debido a la escasa capacidad de adaptación (probablemente por conflictos sociales generalizados), alrededor del año 800 d.C., que coincide con el declive de otros grupos sociales, tanto en esta como en otras regiones de Mesoamérica (Neff, Pearsall, Jones, Arroyo y Freidel, 2006; Mueller *et al.*, 2009).

Las cuatro fases de intensa sequía durante los periodos Preclásico, Clásico y Postclásico de la civilización maya, fueron producidas porque la ITCZ no logró avanzar desde el Ecuador hacia el Norte durante el verano en el hemisferio Norte (Haug, Günther, Peterson, Sigman, Hughen y Aeschliman, 2003). En otras palabras, las lluvias en Centroamérica y Venezuela fueron escasas. Si estas condiciones ocurrieron en periodos multianuales en diferentes regiones de las tierras bajas mayas, el efecto en la población debió ser devastador (Gill, 2008).



3.6 Efectos socioeconómicos del cambio climático en Mesoamérica

Dado que Centroamérica es una de las regiones más vulnerables a los embates del cambio climático, es previsible que el aumento de la temperatura atmosférica y del mar, la reducción e inestabilidad en el régimen de lluvias y la subida del nivel de las aguas del mar impacten la producción, la infraestructura, los medios de vida y la salud de la población (CEPAL, 2009).

Estimaciones de los efectos del cambio climático para los años 2020, 2030, 2050, 2070 y 2100, indican que se observarán impactos negativos sobre la producción agropecuaria. Los cambios en la temperatura y la precipitación repercutirán en la capacidad regional para la producción de alimentos y, consecuentemente, se sufrirán pérdidas económicas, las cuales se proyectan en alrededor del 19% del Producto Interno Bruto (PIB) anual de la región (CEPAL, 2010).

Estos hallazgos evidencian la necesidad de atender las posibles pérdidas que se presentarán en los niveles de producción, las cuales, en algunos casos, ya se están manifestando como consecuencia del cambio climático. Es indispensable diseñar e implementar medidas de adaptación que ayuden a los productores y sus parcelas a reducir los impactos de este fenómeno global. Entre las posibles acciones, se sugieren:

- a) Fomentar la producción bajo invernadero;
- b) Aplicar métodos de manejo y recuperación de los suelos, para elevar los rendimientos por unidad de área;
- c) Modificar el calendario de siembras;
- d) Impulsar sistemas de irrigación;
- e) Introducir variedades de mayor rendimiento y más resistentes a las sequías;
- f) Hacer énfasis en la reconversión de cultivos.

Para ello, se considera fundamental continuar desarrollando e implementando políticas públicas agropecuarias y ambientales, con el propósito de adaptarse a los efectos que el cambio climático podría generar sobre los beneficios sociales y económicos que proporciona la agricultura, en especial para productores de bajos ingresos (CEPAL, 2010), donde figuran los agricultores de subsistencia.

Este proceso de adaptación demanda la utilización de modelos sociológicos y económicos, integrados a los conceptos propios de la ecología, a partir de la complejidad de los sistemas de usos de la tierra en Mesoamérica y de los efectos a largo plazo de eventos extremos de precipitación, tales como el huracán Mitch y la tormenta tropical Stan. Es importante prever que estos fenómenos se presentarán cada vez en ciclos más cortos (Kok y Winograd, 2001).

Parte

4

**Impactos globales
y regionales del
cambio climático**

4.1 Sectores más afectados por el cambio climático

A nivel global, se prevé que los países más afectados por el cambio climático sean aquellos con menor desarrollo socioeconómico. Los mayores cambios en el clima y un aumento significativo de vulnerabilidad podrían ocurrir en la segunda mitad del siglo XXI. Ante tales conjeturas, se considera urgente atender el tema de adaptación (Patt *et al.*, 2010).

Como consecuencia del aumento de la temperatura media global, actualmente se observa que los efectos adversos también se han incrementado, en particular sobre los siguientes sectores: recursos costeros, biodiversidad y ecosistemas marinos. Algunos de estos sectores –en particular, la agricultura, la productividad de ecosistemas terrestres y, posiblemente, el sector forestal–, son caracterizados por una relación parabólica entre los cambios en la temperatura y sus impactos, es decir, que habrá beneficios con cambios bajos, y daños con cambios altos. Por otro lado, en los sectores de recursos hídricos, salud y energía, los impactos son aún inciertos. Sin embargo, se generaliza el concepto de que con el aumento de la temperatura de 3°C a 4°C en el presente siglo, todos los sectores serán afectados, excepto, probablemente, el forestal, en algunas regiones particulares (Hitz y Smith, 2004).

The U.S. Country Studies Program (Smith y Lazo, 2001) elaboró una extensa recopilación de los impactos que podrían ocurrir por el cambio climático, en más de 50 países a nivel mundial. A continuación, se citan de manera general:

- a) Aumento del nivel del mar. Podría causar inundaciones y erosión significativa en las tierras ubicadas en las zonas costeras. En tal sentido, la protección de las áreas desarrolladas sería económicamente sano.
- b) Rendimiento de los cultivos. Las estimaciones revelan que en este sector habría impactos mixtos. En los países africanos y asiáticos, especialmente los del sur de Asia, podrían disminuir los rendimientos actuales; mientras que en otras regiones aumentaría el rendimiento de algunos cultivos, especialmente en Europa y América Latina (por ejemplo, caña de azúcar). En general, mientras algunos países podrían sufrir pérdidas, otros observarían cambios favorables, dependiendo de sus actividades productivas. Estas conclusiones son consistentes con las del IPCC, que determina que lo más probable es que la agricultura mundial proporcionará productos suficientes para alimentar al mundo, pero podrían haber variaciones significativas en la producción, de acuerdo con cambios geográficos.
- c) Recursos hídricos. Las previsiones dadas para estos recursos generan incertidumbres, por ejemplo, cómo serían afectados los patrones de precipitación. Los estudios tienden a mostrar que la escorrentía presenta una alta sensibilidad al cambio climático, lo que aumentaría las sequías o inundaciones. Aún no se cuenta con análisis profundos acerca de la capacidad de adaptación a esa posible variabilidad y a la disponibilidad de recursos hídricos.

d) Praderas naturales y pastizales de ganado. Estos sistemas presentarían impactos mixtos; sin embargo, en los pocos países estudiados parecen tener una gran capacidad de adaptación.

A continuación, se describen los efectos hidrológicos y en la biodiversidad o ecosistemas.

4.2

Consecuencias hidroclimáticas

Existen datos empíricos que demuestran el vínculo entre el calentamiento global y la intensificación del ciclo hidrológico mundial. Esto corresponde a una mayor e intensa evaporación en los océanos (mayor humedad atmosférica), junto a un aumento de las precipitaciones continentales o la disminución de la evaporación continental. Este proceso, finalmente, puede aumentar la escorrentía continental global, probablemente caracterizada por una alta variabilidad estacional (Labat, Godd, Probst y Guyot, 2004).

Huntington (2006) analizó los avances actuales de la ciencia relacionados con tendencias históricas de las variables hidrológicas, tales como la precipitación, la escorrentía, el vapor de agua troposférico, la humedad del suelo, el balance de masa glaciar, la evaporación, la evapotranspiración y la duración del periodo de crecimiento de las plantas. De manera concluyente, refiere que los datos son, a menudo, incompletos en los ámbitos espacial y temporal a escalas regionales. Los hallazgos son variables y a veces contradictorios. Asimismo, diversos documentos científicos recomiendan la sistematización en la recopilación y análisis de la información empírica, así como la definición de modelos para mejorar la capacidad predictiva, especialmente a escalas regionales (Huntington T., 2006; Kaushal *et. al.*, 2010; Gardner,

2009; IPCC, 2007; Smith y Lazo, 2001; Varis, Kajander y Lemmel, 2004), en sitios vulnerables a la desertificación y en los ecosistemas tropicales (Henderson-Sellers, Irannejad y McGuffie, 2008).

Es previsible un efecto negativo sobre la disponibilidad de recursos hídricos en algunas regiones del planeta. La distribución espacial y temporal, así como la disponibilidad estacional de recursos hídricos, serán severamente afectadas (Varis, Kajander y Lemmel, 2004). Cabe destacar que una de las principales preocupaciones respecto al cambio climático es el aumento de eventos extremos, como temperaturas muy altas o bajas, y precipitaciones intensas de manera más recurrente (Easterling, Meehl, Parmesan, Changnon, Karl y Mearns, 2010).

La modelación de la disponibilidad de agua superficial a nivel global indica que ésta aumentará en las latitudes altas, pero disminuirá en las latitudes medias, por ejemplo en las regiones subtropicales (entre 23° y 40° de latitud). Se estima que para el año 2025, debido al cambio climático, aumentará considerablemente el número de personas (entre 53 millones y 113 millones) que vivirán en países con estrés hídrico (Arnell, 1999).

En cuanto a los efectos que causará el aumento del nivel del mar, se predice que un mayor número de personas serán afectadas por mareas de tormenta en un año típico (horizonte temporal de 2080), ya que las inundaciones serán más frecuentes, lo que causará migraciones y se necesitará mayor inversión para implementar medidas de protección. Las zonas más vulnerables a inundaciones son: el sur del Mediterráneo, África, y el sur y sudeste de Asia. Sin embargo, el Caribe, las islas del océano Índico y el océano Pacífico (especialmente las pequeñas), pueden experimentar mayor grado de riesgo.



En la década de 2080, el aumento del nivel del mar podría causar la pérdida de hasta un 22% de los humedales costeros del mundo, que podría llegar al 70%, al combinarse con otras pérdidas directas, debidas a la acción humana (Nichols, Hoozemans y Marchand, 1999).

Para generar información precisa acerca de los escenarios de disponibilidad de agua es fundamental considerar, además del cambio climático, otros factores como la socioeconomía, el paisaje, la ecología y las cuentas de agua. En tal sentido, para la construcción de escenarios y la planificación de recursos hídricos deben promoverse enfoques multidisciplinarios, así como la evaluación del impacto del cambio climático a escala de cuencas hidrológicas (Varis, Kajander y Lemmel, 2004). En relación con los caudales de estiaje o caudales mínimos, los cuales están asociados a la variabilidad climática y eventos de sequía, las investigaciones son escasas, a pesar de su importancia. Tales estudios podrían llevarse a cabo, sobre todo, a escalas regionales (mesoescala) y locales, a nivel de cuencas y subcuencas (Smakhtin, 2001; Huntington, 2003).

Dichos trabajos se han efectuado en áreas templadas del hemisferio Norte, los cuales evidencian severos cambios del ciclo hidrológico y han contribuido al desarrollo de propuestas de políticas hídricas para la adaptación al cambio climático. Sin embargo, en los países en desarrollo (subdesarrollados) las propuestas para implementar políticas hídricas que incluyan el cambio climático son escasas. En tal sentido, se considera importante reforzar este tema (Tomer y Schiling, 2009; Pallottino, Sechib y Zuddasb, 2005; Kim, 2005; Gardner, 2009; Easterling, Meehl, Parmesan, Changnon, Karl y Mearns, 2010; Huntington T., 2003; Labat, Godd, Probst y Guyot, 2004; Nichols, Hoozemans y Marchand, 1999; Teegavarapu, 2010; Sharma, Vorosmarty y Moore, 2000; Arnell, 2004).

4.3 Consecuencias en los ecosistemas y en la biodiversidad

Entre los sectores que se verán seriamente afectados por el cambio climático, especialmente por el aumento de la temperatura media global, se encuentran la biodiversidad y la productividad de los ecosistemas (Hitz y Smith, 2004; Holmgren, Schefer, Ezcurra, Gutiérrez y Morhen, 2001; IPCC, 2007; IPCC, 2009). Al respecto, se analizan con mayor profundidad los cambios previsibles, como se mencionan a continuación.

4.3.1 Ciclo del carbono y productividad de ecosistemas

Las concentraciones de carbono en los bosques tropicales juegan un papel importante en el ciclo global de este elemento. De hecho, las selvas tropicales contienen aproximadamente el 20% del carbono terrestre del mundo y representan el 30% de la producción primaria neta mundial. Los ecosistemas tropicales influyen significativamente en las variaciones interanuales del balance global del carbono (Prentice *et al.*, 2001). Estas fluctuaciones interanuales se derivan de los cambios en la fotosíntesis y la respiración, debido principalmente a las variaciones climáticas (Fearnside, 2004).

Cuando se exceden los límites máximos de temperatura, los cuales ya están cerca de los máximos posibles en el trópico, disminuye la productividad primaria neta, la cual está relacionada con la cantidad de CO₂ que los ecosistemas pueden capturar, por lo que es previsible que se reduzca significativamente durante los próximos 50 años. Esto incidirá en la fijación de carbono de los ecosistemas a nivel global (White, Cannel y Friend, 1999).

Asimismo, se ha evidenciado que la variabilidad interanual de las precipitaciones y la temperatura, relacionadas directamente con la ocurrencia de El Niño (intensidad fuerte), reducen significativamente la actividad fotosintética y, por lo tanto, también disminuye la fijación de carbono en la vegetación de bosques tropicales. El papel del cambio climático en los procesos fisiológicos de la vegetación es muy importante, pero lo es más en los cambios de la radiación solar incidente, al menos en los ecosistemas tropicales evaluados en la cuenca del Amazonas y el sureste de Asia (Nagai, Ichii y Morimoto, 2007).

Es probable que el actual papel del bosque tropical como sumidero de carbono continúe tal y como lo conocemos. Incluso, este ecosistema puede convertirse en una fuente importante de liberación de carbono, a través de una o más de las cuatro rutas posibles:

- a) Cambios (disminución) en las tasas de fotosíntesis y respiración;
- b) Cambios significativos en la biodiversidad y composición de especies en los bosques menos alterados, prevaleciendo aquellas especies que sean capaces de tolerar altas concentraciones de CO₂ en la atmósfera;
- c) Colapso de los bosques, debido a sequías generalizadas; y
- d) Colapso extendido de los bosques, ocasionado por la recurrencia de incendios forestales.

Cada uno de estos escenarios puede generar procesos de retroalimentación positiva en el ciclo del carbono, cuya situación es potencialmente peligrosa, ya que podría acelerar e intensificar de forma dramática el cambio climático (Lewis, 2006; IPCC, 2009).

Cabe destacar también que la eficiencia de los océanos para capturar CO₂ está disminuyendo, probablemente debido a las altas concentraciones de este gas en la atmósfera (IPCC, 2009).

Estas alteraciones pueden generar un efecto de cascada en la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y cambios abruptos de los ecosistemas marinos y terrestres (IPCC, 2009).

4.3.2 Biodiversidad y distribución de ecosistemas

La evidencia proporcionada por estudios de monitoreo a largo plazo, es que la variación del clima en décadas recientes, incluida la actual, es anormal en comparación con el clima de centurias, incluso milenios, anteriores a este periodo. Asimismo, se ha demostrado que las recientes tendencias climáticas y atmosféricas ya están afectando la fisiología, distribución y fenología en la vegetación (Hughes, 2000). Por extensión, los sistemas naturales más afectados serán aquellos que no se han protegido adecuadamente, ya que la composición de los bosques y la biomasa, sobre todo en ecosistemas tropicales, se reduciría drásticamente (Smith y Lazo, 2001).

Existe amplia documentación que advierte que un cambio gradual en el clima puede afectar la abundancia de poblaciones, la distribución de especies, así como la morfología y el comportamiento de las comunidades bióticas e incluso alterar la estructura y funciones de los ecosistemas, sobre todo los tropicales. Sin embargo, se encuentra menos estudiado el efecto de los enlaces entre los niveles de pequeña y gran escala, y los papeles de éstos en el cambio climático, y su comparación con la variabilidad climática y eventos extremos (Easterling, Meehl, Parmesan, Changnon, Karl y Mearns, 2010; Medvigya, Wofsyb, Mungerb y Moocrofta, 2010).

Entre las razones que prevalecen para preocuparse de la alteración de ecosistemas terrestres, destacan las siguientes: incremento significativo del riesgo de extinción de ecosistemas únicos y amenazados; aumento de la contingencia de



fenómenos climáticos extremos; distribución irregular de los impactos (dificultad para su predicción); daños agregados a otras variables de degradación (por ejemplo, deforestación); y riesgos de discontinuidad en los ecosistemas a gran escala (IPCC, 2009).

Es claro que el calentamiento global reducirá de manera significativa el hábitat para especies endémicas o de distribución geográfica restringida, además de propiciar condiciones de forzamiento para que muchas especies colonicen nuevos terrenos para sobrevivir (McLachlan, Hellman y Schwartz, 2007). Asimismo, se ha evidenciado el aumento en la tasa de enfermedades y, consecuente, la disminución de algunas poblaciones de especies en diversos ecosistemas naturales, pero se desconoce el umbral de tolerancia y de irreversibilidad de estos procesos en muchos ecosistemas (Acevedo-Whitehouse y Duffus, 2009).

Para definir los niveles de tolerancia de las especies y poblaciones a los impactos del cambio climático se ha acudido a ciencias como la paleoecología y la paleoclimatología, y se ha profundizado en el conocimiento de las características fisiológicas de las especies actuales (Kursar, 1999; Davis, Shaw y Etterson, 2005). Estudios sobre el clima del pasado han coincidido en que la evolución de este factor es un proceso lento. Al relacionarlo con el cambio climático abrupto actual, se prevé que la primera respuesta biótica de los ecosistemas y las diferentes especies conformantes no sea la adaptación, sino que podrían ocurrir otras, como: a) persistencia *in situ*, si el clima cambiante se mantiene entre los límites de tolerancia de la especie; b) cambios de rango (migración) a las regiones donde el clima esté entre los límites de tolerancia de la especie; y c) extinción (Davis, Shaw y Etterson, 2005).

Se prevé que el cambio climático tendrá efectos devastadores en los ecosistemas más grandes del planeta. Por ejemplo, hay indicios de que en

ecosistemas, como el del río Amazonas, se puede romper el autociclo hidrológico, lo que cambiaría la estructura y composición de la cobertura vegetal. Asimismo, El Niño puede entrar en una fase de activación (aumento de intensidad y frecuencia) y alterar de manera drástica las condiciones climáticas de regiones como Centroamérica (IPCC, 2009).

En años recientes, se han realizado estudios sobre las consecuencias en la productividad, la plasticidad genética y la adaptabilidad de poblaciones específicas de importancia económica o indicadoras de ecosistemas. Por ejemplo, se ha proyectado que *Pinus contorta* mostrará cambios no sólo en los márgenes de su distribución, sino que en otros aspectos, sobre todo en su productividad. Es previsible que en sitios ubicados en latitudes altas aumente la productividad de esta especie, y que su adaptabilidad ocurra en pocas centurias (200 años); mientras que en latitudes bajas su productividad disminuirá, y su capacidad de adaptación será en un plazo mayor, más de un milenio (1,200 años) (Rehdfeldt, Wykoff y Ying, 2001).

Es preocupante la escasa investigación que se ha hecho respecto al grado en que han cambiado las comunidades de la selva tropical durante los últimos milenios. Como consecuencia, no hay pruebas del desarrollo de esas poblaciones ni de los cambios en los rangos de distribución de las distintas especies tropicales, como resultado del cambio climático (Kursar, 1999).

A medida que la población humana de los países tropicales aumente (probablemente en dos mil millones en los próximos 25 años), se sustituirán grandes extensiones de bosques maduros tropicales por tierras de agricultura. Considerando que el 18% de los bosques húmedos tropicales y el 9% de bosques secos tropicales cuentan con protección gubernamental, los paisajes tropicales del futuro estarán constituidos por islas



Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

de bosque (principalmente bosque secundario) y bosques protegidos, aislados por grandes extensiones de tierra destinada a la agricultura y a otros usos. Esto se asemejará a los paisajes que ahora resaltan en el clima templado, salvo que sobreviva una mayor proporción de bosques en los trópicos. Sin embargo, los bosques primarios se verán sometidos a una reestructuración y recomposición masiva (Wright, 2005).

Respecto al Neotrópico, incluida Centroamérica, es previsible que el factor dominante en el cambio de uso del suelo en las regiones actualmente forestadas sea la influencia de la sociedad, especialmente por el aumento de pasturas para ganadería (Wasswaaara, Gerbera, Vergurg, Rosalesa, Ibrahimc y Steinfelda, 2007) o por la demanda de tierras en sitios montañosos para la agricultura, incluso promovida por el cambio climático (Foster, 2001).

Otro de los ecosistemas de mayor vulnerabilidad al cambio climático es el bosque nublado de los trópicos. Casi todos los componentes de este ecosistema, desde el ciclo hidrológico hasta la composición de especies de plantas y animales, son afectados por su inmersión recurrente en neblinas o nubosidad (Foster, 2001). Por tanto, es altamente probable que ocurran altas tasas de extinción de este tipo de bosque. Además, se verá afectado por otros cambios, en particular en los patrones de la formación de nubes. En Costa Rica ya se ha evidenciado científicamente este tipo de cambios y su relación con extinciones de anfibios y otros grupos biológicos (Foster, 2001; Bruijnzeel, 2004).

Como resultado final, se prevé la pérdida de biodiversidad, la migración de las especies a otras altitudes y la recomposición de la comunidad, y posiblemente altas tasas de mortalidad y poca capacidad de recuperación de muchas especies en estos bosques. La literatura, a menudo, sugiere que todos los factores descritos se com-

binan para hacer del bosque nublado un sitio probable para la observación de los efectos del cambio climático en el futuro próximo (Foster, 2001; IPCC, 2009).

Los cambios se pueden explicar con base en el siguiente ejemplo: las epífitas son características del bosque nuboso y desempeñan un papel importante en los ciclos hidrológicos y de nutrientes propios de este tipo de bosque. Estas son muy sensibles al cambio climático atmosférico, especialmente a las variaciones de humedad, ya que pueden ocupar nichos ecológicos increíblemente pequeños, tal como las ramas de la copa de los árboles. Incluso, pequeños cambios en el clima pueden causarles marchitamiento o la muerte. Del mismo modo, la redistribución de la fauna del bosque dependerá de los cambios climáticos. La muerte tanto de animales como de plantas epífitas puede generar efectos de cascada en las cadenas alimenticias del bosque nublado (Foster, 2001).

Es destacable que estudios ecológicos recientes evidencian que el cambio climático será aún más severo que el pronosticado por el IPCC. A pesar de que existen previsiones a nivel global, los mayores cambios serán sensibles a escalas regionales y locales; asimismo, éstos serán diferenciados a nivel de especies, poblaciones, comunidades y ecosistemas debido a que la fisiología, tolerancia a la sombra, reacción ante cambios de temperatura y humedad (máximos, mínimos, estacionales y anuales) son diferentes para cada especie.

Investigaciones recientes respecto de las tasas de deforestación y los cambios ecológicos en los bosques en buen estado de conservación, así como de las implicaciones para la biodiversidad debido al cambio climático, han definido lo siguiente:

- a) El bosque tropical intervenido se ha constituido en un agente liberador de carbono a la atmósfera y se evidencia una gran pérdida de especies debida a la deforestación;



- b) Los bosques que se encuentran bien conservados se han convertido en un sumidero de carbono, por lo tanto, se ha acelerado el dinamismo de estos sistemas; y
- c) En consecuencia, existen cambios generalizados en la biodiversidad (Lewis, 2006).

Se ha comprobado que el acelerado cambio en el uso del suelo (especialmente de bosque natural a otros usos) es la causa principal de la extinción masiva de especies. Incluso se prevé que en el presente siglo se observe el evento denominado “sexta extinción masiva en la historia de la Tierra” (Lewis, 2006).

Para conocer con mayor grado de confiabilidad los efectos previstos en los ecosistemas y la biodiversidad, es necesario analizar de manera integrada el cambio climático y el cambio en el uso del suelo, ya que ambos factores modifican la biodiversidad y se interrelacionan (De Chazal y Rounsevel, 2009; Wright, 2005). Al respecto, prevalece mucha incertidumbre; sin embargo, es necesario diseñar políticas específicas para la adaptación de los ecosistemas y del ser humano al cambio climático. Dichas políticas deben ser acompañadas y retroalimentadas por esfuerzos sistemáticos de monitoreo ecológico y social.

4.4

Políticas de adaptación para la conservación de la biodiversidad

Es evidente la preocupación que existe por el futuro de la diversidad biológica en el marco del cambio climático. A continuación, se abordan algunas propuestas vertidas por la investigación científica multidisciplinaria y se definen diversas políticas, con el fin de contrarrestar los efectos de los cambios previstos para el clima.

Entre los principales retos a enfrentar se encuentran: la planificación regional (mesoescala) y la gestión de ecosistemas a escala de sitio, así como la adecuación continua de los actuales planes y objetivos de conservación del ambiente. Estos procesos deben ir acompañados de un apoyo más específico de las ciencias biológicas. Asimismo, es necesaria una mayor integración de las ciencias sociales y ecológicas (Heller y Zavaleta, 2009).

McLachlan, Hellman y Schwartz (2007) plantean que, dentro de las alternativas de adaptación

ante el inminente cambio climático, resaltan las que se vinculan a la migración asistida de especies y comunidades. Para ello, son indispensables los ejercicios de planificación exhaustiva y de conservación de especies a nivel regional, a ser realizados por diversos sectores. Si bien se considera una práctica impostergable, aún no ha sido abordada adecuadamente por la comunidad científica. Entre los aspectos fundamentales que deben implementarse están:

- a) Definir el papel de las perturbaciones e intervenciones humanas en las transiciones de las especies;
- b) Revisar los objetivos e intereses sociales de la conservación; y
- c) Vincular a la conservación y a la naturaleza con los medios de vida, derechos de la propiedad privada y gobernabilidad.

Proponen una agenda de investigación primordial para la generación de políticas de conservación (Hagerman, Dowlatalabadi, Satterfield y McDanniels, 2009; Klenner, Arsenault, Brockerhoff y Vyse, 2009). Entre las estrategias que se plantean para alcanzar los objetivos de conservación de las especies, vinculados con necesidades sociales, se encuentran las siguientes:

- a) Protección y manejo de agua y suelos;
- b) Manejo directo de especies;
- c) Monitoreo y planificación regional;
- d) Actualización de legislación y políticas afines.

Mawdsley, O'Malley y Ojima (2009) indican que estas herramientas son similares o idénticas a las utilizadas actualmente por conservacionistas en todo el mundo, entre las cuales destacan: prácticas de conservación de tierras y agua; restauración ecológica; esquemas agroambientales; translocación de especies; propagación en cautiverio; monitoreo; planificación de recursos naturales y legislación/regulación. Aunque los encargados del fomento y administración de recursos naturales renovables ya cuentan con muchas herramientas que pueden ser utilizadas para atender los efectos del cambio climático, éstas tendrán que aplicarse de manera innovadora, para enfrentar los retos sin precedentes que plantea.

Como ejemplo, se puede mencionar que, ante la expectativa de que la especie *Pinus oocarpa* cambie su rango altitudinal en un promedio de 150 metros de altitud en México y Guatemala, se definió la necesidad de inducir la transferencia

de las semillas y plántulas. Paralelamente, deben realizarse esfuerzos para lograr el mejoramiento genético de los árboles, así como la restauración y conservación de fuentes semilleras. Para ello, se sugieren directrices basadas en la delimitación de las tres zonas altitudinales para la distribución de semillas con un ancho de 200 metros (Sáenz-Romero, Guzmán y Rehfeldt, 2006).

Smith y Lazo (2001) plantean que, aunque la comunidad científica y política internacional han orientado sus esfuerzos a ampliar el conocimiento sobre las causas y efectos del cambio climático durante los últimos años, es necesario profundizar sobre algunos aspectos:

- Generar modelos de circulación atmosférica general, que hagan énfasis en los efectos a escalas regionales. Los modelos existentes no suelen simular adecuadamente comportamientos climáticos regionales, por lo que sus estimaciones deben ser tratadas cautelosamente.
- Profundizar los análisis de vulnerabilidad, diferenciando por regiones, países desarrollados, en desarrollo y en transición.
- Integración de los impactos en todos los sectores. Por ejemplo, una reducción en los suministros de agua puede limitar las labores de riego y, en consecuencia, generar efectos en cadena sobre los sistemas sociales y naturales. La mayoría de las evaluaciones existentes son segregadas y cualitativas.
- Los resultados de investigaciones científicas deben definir con mayor claridad y especificidad cuáles son los mecanismos posibles y factibles de adaptación.



Parte

5

**Impactos del cambio
climático en la diversidad
biológica de Mesoamérica**

Es destacable, por un lado, la singularidad biológica de Mesoamérica y, por el otro, su grado de vulnerabilidad ante cambios en el uso del suelo y en el clima. Una proporción relativamente elevada de la biota mundial se encuentra en los ecosistemas de esta región, que abarca menos del 0.5% de la superficie terrestre del planeta, y en donde se reporta más del 7% de las especies conocidas. En contraste, presenta una de las tasas mundiales más altas de deforestación, cuya pérdida es de alrededor del 2% de los bosques/año (FAO, 2009; Deepak, Welch, Lawton y Nair, 2006). En tal sentido, dicha región ha sido definida como uno de los principales “sitios” (*hot-spot*) para implementar medidas de conservación, a nivel mundial. Adicionalmente, se ha evidenciado que es altamente sensible a cambios climáticos globales, especialmente por las agudas y variables sequías que la afectan.

En este acápite se describen de manera general los mayores impactos que el cambio climático tendrá sobre la biodiversidad de Guatemala y Mesoamérica, entre los que destacan los siguientes:

- a) Cambios en la distribución de las especies a lo largo de gradientes, especialmente altitudinales, de humedad y temperatura;
- b) Cambios particulares en el calendario de eventos del ciclo biológico, o la fenología;
- c) Desacoplamiento de las interacciones de coevolución, como la relación planta- polinizador;
- d) Cambios diferenciados de las tasas demográficas de las especies, tal como la supervivencia y fecundidad;
- e) Reducciones en el tamaño de poblaciones;
- f) Extinción o extirpación de especies con poblaciones de rango restringido o aisladas;
- g) Pérdida directa de hábitats. Entre algunos factores de presión se encuentran el aumento del nivel del mar, los brotes de plagas y enfermedades, etc.;

- h) Aumento en la propagación de enfermedades de la fauna, parásitos y zoonosis;
- i) Aumento de la propagación de especies invasoras o no nativas, incluidas plantas, animales y agentes patógenos (Mawdsley, O'Malley y Ojima, 2009).

Con base en esta información y, tomando como referencia el sistema de zonas de vida propuesta por Holdridge (1971), se describen los posibles efectos del cambio climático sobre los principales ecosistemas mesoamericanos. Al final de este capítulo se integra esa información en una matriz (Cuadro 1), donde se plantean los principales indicadores de cambio en los ecosistemas y los efectos en la productividad primaria neta del ecosistema y su grado de resiliencia.

5.1

Bosques húmedos y muy húmedos montanos

En Mesoamérica, uno de los ecosistemas indicadores de los bosques húmedos y muy húmedos montanos es el bosque de pino-encino de montaña (arriba de 1,000 msnm). Estudios realizados en México y Centroamérica han determinado la posibilidad de impactos negativos en las poblaciones naturales de especies de importancia económica, como *Pinus patula* y *P. tecunumanii* a causa del cambio climático. Algunas predicciones suponen un impacto significativo del calentamiento global sobre la distribución de las poblaciones naturales de ambas especies; sin embargo, es previsible que demuestren un buen desempeño en una amplia variedad de climas, incluidos aquellos que actualmente se muestran como no aptos para su existencia. Esto sugiere que las especies de pino que se encuentran en su hábitat natural estarán mejor adaptadas al cambio climático, si se comparan con poblaciones manejadas en plantacio-

nes. En el corto plazo, parece ser más urgente contrarrestar la vulnerabilidad a la fragmentación de *P. tecunumanii*, debida a la urbanización y a la agricultura, que al cambio climático.

En conclusión, estas comunidades presentan una alta resiliencia a los cambios en el clima, cuya mayor amenaza son los factores de presión antropogénica sobre los ecosistemas naturales que las conforman (Van Zonneveld, Jarvis, Dvroat, Lemma y Leibin, 2009).

Estudios sobre la adaptabilidad de la especie *Pinus oocarpa*, basados en modelos de cambios climáticos regionales (con aumentos en la temperatura media anual de 3.8 °C a 8 °C, humedad relativa anual de 26% y aridez), proyectados para el año 2090, revelaron que el periodo más difícil para la adaptación de sus poblaciones será entre los años 2030 y 2060, cuando se espera que será más pronunciado el aumento de la aridez. Cambios de esta magnitud probablemente alterarán la distribución natural de la especie y crearían un retraso en la adaptación, al ser mayores las tasas de cambio del clima que las de adaptación biológica (Sáenz-Romero, Guzmán y Rehfeldt, 2006).

5.2

Bosques muy húmedos, pluviales montanos

Como resultado del cambio climático, en los bosques nublados se prevé la pérdida de biodiversidad, modificaciones en la altitud de las especies y recomposición de la comunidad –posiblemente altas tasas de mortalidad y poca capacidad de recuperación de muchas especies–. Esto por sí solo, sugiere una completa sustitución o extinción de muchos bosques que cuentan con altos grados de aislamiento (Foster, 2001).

Bajo un escenario de cambio climático para finales del siglo XXI, caracterizado por un aumento de 2 °C y un descenso del 20% de la precipitación en la región este de México, se logró predecir una contracción drástica en la distribución de la especie *Fagus grandiflora* var. *mexicana*. Cabe mencionar que esta especie es indicadora de bosques húmedos y muy húmedos montanos, así como del ecosistema de bosque nuboso en la región mesoamericana. Además, se llegó a estimar que la mayor parte de las poblaciones naturales de esta especie se localiza en áreas de reserva. Sin embargo, las ubicaciones modeladas están fuera de áreas protegidas. En consecuencia, estos resultados destacan la importancia de considerar los efectos de los posibles cambios climáticos futuros sobre la selección de áreas de conservación natural y la urgencia de conservar algunos parches remanentes de bosques nublados existentes (Téllez-Valdés, Vila-Aranda y Lira-Saade, 2006).

Modelos espaciales, generados en un sistema de información geográfica, fueron utilizados para predecir los cambios en la distribución y diversidad de los bosques tropicales en Costa Rica, en respuesta al cambio climático. De acuerdo con los escenarios analizados, se definió que las zonas de vida de alta elevación son las más sensibles a los cambios de temperatura, que a la vez, corresponden a los bosques que mayor endemismo presentaron (bosque pluvial montano, bosque pluvial montano bajo y bosque pluvial premontano). En tal sentido, este grupo será el más afectado en su composición y estructura y, en relación con otros ecosistemas, se prevén los más altos impactos por una severa disminución del hábitat, y por ende, de diversidad y endemismo (Enquist, 2002).

Una muestra de la riqueza de estos ecosistemas, su vulnerabilidad al cambio climático y la influencia del ser humano, se presenta en un es-



tudio realizado en Costa Rica, donde en un área de 19 kilómetros cuadrados en la cordillera de Talamanca y el volcán Barva, se listaron 104 especies de helechos. Sin embargo, al comparar estudios realizados antes de 1950 y a finales del siglo XX, se comprobó que muchas de las especies ya no se encuentran en este sitio (Mehltreter, 1995). De igual manera, diversidad de estudios reportan la sensibilidad al cambio climático de anfibios y epífitas en Costa Rica, Centroamérica y sur de México (Foster, 2001; Holz y Gradstein, 2005).

5.3

Bosques húmedos, muy húmedos y pluviales basales (a menos de 1,000 msnm)

De acuerdo con modelaciones realizadas para Costa Rica, se prevé que el bosque muy húmedo tropical será la zona de vida más impactada por el cambio climático, tanto en términos porcentuales de cobertura, como en el área total absoluta que cambia a otra zona de vida. En términos porcentuales, son las zonas de vida más sensibles porque sufren el mayor impacto producido por el cambio en las variables climáticas, bajo los escenarios (tendencial y optimista) evaluados recientemente (Jiménez, 2009).

5.4

Bosques secos y muy secos

En la región mesoamericana, los ecosistemas seco y muy seco son basales generalmente, o sea que se ubican en altitudes menores a los 1,000 msnm.

Representan los ecosistemas más amenazados en las regiones tropicales, y siguen siendo uno de los ambientes más apetecidos para la colonización humana, producción agrícola e industrial. A pesar de ello, este tipo de bosque es uno de los menos estudiados entre los hábitats tropicales (Stoner y Sánchez-Azofeifa, 2009).

Pueden considerarse entre los ecosistemas que resultarán más afectados por el cambio climático local, ya que son muy sensibles a la disminución de la precipitación y presentan altas tasas de endemismo (Enquist, 2002). Por otro lado, existen evidencias (Jiménez, 2009) que determinan, por medio de modelaciones climáticas y análisis de zonas de vida, que los bosques seco y muy seco serán las zonas de vida con mayor expansión territorial, debido a cambios en el clima.

5.5

Integración de información

Según el análisis e integración de la información científica de índole climática, hidrológica, paleoclimática, arqueológica, ecológica, geográfica y con la aplicación de modelaciones de cambios climáticos, económicos, de emisiones futuras de CO₂, entre otras; se han definido ciertos efectos previsibles del cambio climático en los ecosistemas de Guatemala y Mesoamérica. Para este proceso, se preparó una matriz que agrupa a los ecosistemas según datos bioclimáticos y una metodología para estudiar zonas de vida (Cuadro 1). Asimismo, se presenta un análisis de los factores críticos que producirán cambios en los ecosistemas y una lista de los mayores efectos esperados. Finalmente, se citan los principales indicadores de respuesta para interpretar si la escala y los cambios son favorables o no.

Cuadro 1

Efectos previsibles del cambio climático en zonas de vida y sus ecosistemas naturales

| Zonas de vida, formación típica en Guatemala | Especies/ ecosistemas indicadores | Factor de cambio climático (actuarán de forma aditiva) | | | | Efectos previsibles (los más probables para los años 2050-2100) | Resiliencia natural de los ecosistemas actuales / Cambios en la productividad neta del ecosistema (PNE) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | Temperatura – medias – extremas – variabilidad interanual – estacionalidad | Precipitación – medias – extremas – variabilidad interanual – estacionalidad – días de lluvia | Eventos extremos – sequías – tormentas – huracanes – incendios – inundaciones | Ecofisiología – Concentración de CO ₂ atmosférico – Concentración de CO ₂ en sistemas hídricos (pH) – Otros | | |
| Bosques en las provincias de humedad: seco, muy seco (evapotranspiración potencial mayor que la precipitación pluvial ETP>PP). | | Aumento abrupto de temperaturas medias y extremas, especialmente máximas diarias y de estacionalidad. | Alta variabilidad interanual y estacional de precipitación. Disminución de días de lluvia (intensificación del ciclo hidrológico). | Aumento considerable de sequías, aridez, incendios e inundaciones. | Aumento de concentración de CO ₂ atmosférico. Aumento de respiración (estrés). Reducción de biotemperatura. | <ul style="list-style-type: none"> • Expansión territorial de las zonas de vida de esta provincia de humedad. • Cambios de composición biológica (reformulación específica) y fenología. • Migración de especies. • Simplificación de ecosistemas (en composición, estructura y funcionalidad). • Tendencia gradual a la predominancia de especies del bosque secundario, especies pioneras y resistentes a una mayor variabilidad climática (especialmente a largos periodos de sequía y mayor aridez). • Aumento de tasas de mortalidad de individuos, especialmente en los bordes de fragmentos de bosque. • Pérdida de carbono en el suelo por falta de cobertura boscosa. • Menor productividad neta de los ecosistemas. • Aumento de incendios. | <p>Resiliencia</p> <p>PNE</p> |
| Bosques basales (hasta 1,000 msnm) en provincias de humedad: húmedo, muy húmedo y pluvial tropical y subtropical (precipitación pluvial mayor que la evapotranspiración PP>ETP). | Bosques latifoliados o tropicales de tierras bajas. | Aumento abrupto de temperaturas altas y medias, y de estacionalidad. | Alta variabilidad interanual y estacional de la precipitación. Disminución de días de lluvia (intensificación del ciclo hidrológico). | Aumento considerable de sequías, aridez, incendios, inundaciones y tormentas. | Aumento de concentración de CO ₂ atmosférico. Aumento de respiración (estrés). Reducción de biotemperatura. | <ul style="list-style-type: none"> • Reducción significativa o colapso de los ecosistemas. • Altas probabilidades de que esta zona de vida ocupe rangos altitudinales superiores. • Severa reformulación específica y cambios en la fenología. • Tendencia de transformación hacia bosques secos (biotemperaturas cercanas al límite superior). • Regeneración secundaria tendiente a tipos de bosques más secos (sabana/bosques secos). • Migración de especies hacia sitios con mayor altitud o sitios con PP>ETP. • Elevada erosión genética y simplificación de la estructura y composición florística. • Aumento de tasas de mortalidad y de espacios abiertos dentro del bosque • Mayor valor de importancia de especies tolerantes a la luz (lianas, etcétera), y en contraste, disminución de especies tolerantes a la sombra. • Incremento de emisiones netas de CO₂ y pérdida de C del suelo por la disminución de biomasa. • Aumento de incendios, plagas y enfermedades. | <p>Resiliencia</p> <p>PNE</p> |

| Zonas de vida, formación típica en Guatemala | Especies/ ecosistemas indicadores | Factor de cambio climático (actuarán de forma aditiva) | | | | Efectos previsibles (los más probables para los años 2050-2100) | Resiliencia natural de los ecosistemas actuales / Cambios en la productividad neta del ecosistema (PNE) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | Temperatura – medias – extremas – variabilidad interanual – estacionalidad | Precipitación – medias – extremas – variabilidad interanual – estacionalidad – días de lluvia | Eventos extremos – sequías – tormentas – huracanes – incendios – inundaciones | Ecofisiología – Concentración de CO ₂ atmosférico – Concentración de CO ₂ en sistemas hídricos (pH) – Otros | | |
| Bosques montano bajo y montano arriba de 1,000 msnm) en provincias de humedad: húmedo y subtropical (frío) (PP>ETP). | Bosques mixtos o de coníferas. | Aumento de temperaturas medias, y de estacionalidad. | Alta variabilidad interanual y estacional (intensificación del ciclo hidrológico). | Aumento de sequías, incendios y tormentas. | – Aumento de concentración de CO ₂ atmosférico, de respiración (estrés) y de biotemperatura. | <ul style="list-style-type: none"> • Altas posibilidades de que esta zona de vida ocupe rangos altitudinales superiores. • Especies conformantes con altos niveles de persistencia, sobre todo alta tolerancia a sequías (coníferas y encinos). • Esta zona de vida será la que mejor conserve su composición, estructura y funcionalidad. • Aumento de incendios, plagas y enfermedades. • Crecimiento de la productividad primaria neta (PPN). • Especies de importancia económica, tal como el pino, pueden verse beneficiadas en algunos aspectos por el cambio climático. | Resiliencia PNE |
| Bosque montano (arriba de 1,800 msnm) en provincias de humedad: muy húmedo y pluvial (PP>2ETP). | Selvas de montaña, bosques nuboso, mixtos o de coníferas de alta montaña. | Aumento de temperaturas medias, máximas (factor crítico), estacionalidad y variabilidad interanual. | Alta variabilidad interanual y estacional (intensificación del ciclo hidrológico). Estación seca bien definida. En estación lluviosa, aumento drástico de la intensidad diaria de lluvia. | Sequías, aumento en altitud de la nube y nubosidad, incendios y tormentas. | – Aumento de concentración de CO ₂ atmosférico, de respiración (estrés) y de biotemperatura. | <ul style="list-style-type: none"> • Reducción significativa o colapso de esta zona de vida y ecosistemas conformantes, especialmente la asociación atmosférica de bosque nuboso. • Reducción crítica o extinción del ecosistema representativo, por habitar en partes altas de montaña. • Extinción masiva de especies endémicas y selectivas de condiciones climáticas. • Cambios críticos en la estructura y composición florística, y severa reformulación específica del ecosistema. • Cambios drásticos en la fenología. • Especies invasoras sobre todo de ecosistemas de bosques mixtos y de coníferas. • Tendencia al aumento de altitud de la zona basal. • Disminución de nubosidad, de entradas de lluvia y de humedad relativa. Aumento de salidas de agua (evapotranspiración) y de temperatura. Es decir, cambios drásticos del balance hídrico en un ecosistema dependiente de las condiciones climáticas actuales. • Las tasas de cambio serán mayores que la capacidad de adaptación de las especies y comunidades, especialmente al déficit hídrico estacional. • Aumento de incendios, plagas y enfermedades. • Disminución crítica de la capacidad de captación y regulación hidrológica de los ecosistemas conformantes. • Aumento de disponibilidad de nutrientes del suelo. | Resiliencia PNE |

Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

Según el Cuadro 1, las zonas de vida se agrupan en cuatro categorías, de acuerdo con sus características de altitud topográfica (basales: menos de 1,000 msnm, y montano –premontano, montano bajo y montano–: más de 1,000 msnm) y de la disponibilidad de agua (provincias de humedad), que se consideran como indicadores críticos para definir o inferir las características de estructura y composición de los ecosistemas. Dichas zonas, además, son fundamentales para evaluar los efectos en los ecosistemas a partir del calentamiento global.

En dicho cuadro se utiliza la escala de semáforo, en donde los colores verdes significan aspectos positivos, los amarillos intermedios, y los rojos, negativos.

Entre los indicadores de respuesta de los ecosistemas al cambio climático está la resiliencia, es decir, la capacidad de esos sistemas para mantener su equilibrio y autorregulación (homeóstasis) –según las condiciones actuales–, y la productividad neta, o capacidad de los organismos autótrofos del ecosistema para producir materia orgánica a partir de la fotosíntesis.

En el cuadro 1, los bosques seco y muy seco están representados de color naranja respecto a la resiliencia, lo que implica que son sensibles a los cambios climáticos y que se verán afectados. Respecto a la respuesta de los ecosistemas a la productividad neta, la cual presenta color rojo, se considera que esa capacidad se verá drásticamente disminuida, ya que es muy sensible al aumento de temperatura. Cabe destacar que se espera una expansión del área territorial donde se encuentran esas zonas de vida.

Los bosques basales (hasta 1,000 msnm) y algunos premontanos y montano bajos, ubicados en las provincias de humedad: húmedo, muy húmedo y pluvial (precipitación mayor que la eva-

potranspiración potencial –ETP–), cuya principal asociación indicadora es el bosque latifoliado de planicie; manifestarán reducción de su cobertura territorial y presentarán baja resiliencia (color rojo), por lo que sufrirán severos cambios en su composición y estructura. También presentarán una disminución muy fuerte de la productividad primaria neta (color rojo). Cabe destacar que estos ecosistemas son muy sensibles al aumento de temperatura, ya que los umbrales de tolerancia se encuentran muy cerca de sus límites máximos.

Los bosques montanos no basales (arriba de 1,000 msnm), ubicados en provincias de humedad: húmedo y muy húmedo (precipitación mayor que la evapotranspiración potencial), y cuyas principales asociaciones indicadoras son bosques de coníferas y mixtos (pino-encino), manifestarán cierta migración de su cobertura territorial y su resiliencia será regular (color naranja). Por ende, presentarán algunos cambios en su composición y estructura, así como un aumento en la productividad primaria neta (color verde). Esto podría significar oportunidades para ciertos sectores, como el agrícola y el forestal.

Los bosques montanos ubicados arriba de 1,800 msnm, situados en provincias de humedad: húmedo, muy húmedo y pluvial (precipitación mayor que 2 ETP), y cuyas principales asociaciones indicadoras son los bosques de pino de montaña y los bosques nubosos, presentarán una reducción considerable de su extensión territorial y un estado crítico de resiliencia (color corinto); consecuentemente, habrá una extinción masiva de sus especies y comunidades. Asimismo, presentarán una severa disminución de la productividad primaria neta (color rojo). Estos ecosistemas tienen altos valores de especiación y endemismo, por lo que se verán drásticamente afectados, así como su capacidad de regulación hidrológica.



Parte

6

**Evaluación de los
impactos del cambio
climático en los
ecosistemas de
Guatemala**

Como se ha evidenciado, el cambio climático afectará significativamente a todos los componentes del sistemas socioecológico en Guatemala (sub-sistema natural, económico, social e institucional). Para enfrentar los retos que el cambio climático impone es necesario analizar los cambios específicos previsible, a una escala de estudio adecuada a las necesidades de cada región, y así contar con capacidad predictiva respecto a las probables consecuencias e impactos a nivel local.

Para lograr este objetivo, se ha desarrollado un ejercicio de modelación climática que relaciona el clima, en un momento o periodo dado, con las formas de vida vegetales, acorde a la clasificación de zonas de vida propuesta por Leslie Holdridge (1971) (Recuadro 1).

La aplicación del sistema de Clasificación de Zonas de Vida de Holdridge resulta muy útil, ya que la precipitación y la temperatura son utilizadas como variables centrales. En tal sentido, se desarrolló una actualización del mapa de zonas de vida para Guatemala, aprovechando las mejores posibilidades tecnológicas recientes. Esto permitió obtener un buen nivel de precisión y un marco de referencia para comparar los ecosistemas actuales (zonas de vida) y la influencia que ejercerá el cambio climático del presente siglo, a partir de modelaciones de uso generalizado, tal como HADCM3 del Centro Hadley de Inglaterra, el cual ha sido utilizado en diversas investigaciones similares a nivel internacional.

6.1 Marco metodológico

El primer paso fue el establecimiento de la línea base. Para ello clasificaron y delimitaron las zonas de vida de Guatemala, acorde a la metodología propuesta por Holdridge (1971). La información climática se obtuvo de la plataforma cartográfica de Worldclim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones y Jarvis, 2005), que incluye temperaturas y precipitaciones promedio mensuales y anuales para el periodo 1960-2000. Con estos datos se determinaron las variables: biotemperatura, precipitación y relación de precipitación/evapotranspiración potencial. Posteriormente, se delimitaron cartográficamente las zonas de vida de Guatemala, generando un “mapa actual”, con una resolución espacial de un kilómetro cuadrado por píxel.

Entre las ventajas que presenta la clasificación de zonas de vida se encuentra su objetividad, por las siguientes razones: a) parte de datos cuantitativos y georreferenciados; b) está basado en los principios de clasificación climática y de vegetación; c) refleja el efecto de los factores que controlan los ecosistemas, en tal sentido, el principal factor controlador es el clima, luego el suelo, la geomorfología y los factores bióticos; d) es confiable para expandir o contraer escalas y niveles de complejidad; e) es pertinente para anticipar el efecto del cambio climático; f) acepta nuevos datos empíricos, para mejorar resultados; g) ha sido ampliamente validado y aplicado en varias regiones del mundo, a diversas escalas.

Recuadro 1

Metodología para la actualización de las zonas de vida de Guatemala

De acuerdo con Holdridge, una “zona de vida” es un grupo de asociaciones vegetales dentro de una división natural del clima, que se forma tomando en cuenta las condiciones edáficas y las etapas de sucesión, y tiene una fisonomía similar en cualquier parte del mundo. Para dicho sistema, la asociación es la unidad funcional y se define como un ámbito de condiciones ambientales, fisonomía de las plantas y actividad e interacciones entre plantas y animales que se puede considerar como único (*Ecología basada en zonas de vida*, L.R. Holdridge, 1987). Este sistema está basado en la fisonomía o apariencia de la vegetación y no en la composición florística. Los factores que se tienen en cuenta para la clasificación de una región son aspectos bioclimáticos (valores medios anuales) de la biotemperatura, precipitación y relación de evapotranspiración potencial.

Para el presente estudio, se tomó como base los datos de temperatura y precipitación generados por el *WorldClim*, cuya característica principal son sus valores históricos de los años 1950 a 2000. Estos provienen de estaciones meteorológicas situadas alrededor del mundo, y fueron procesados mediante un modelo de interpolación que toma en cuenta la altitud de un modelo de elevación digital, elaborado por la Agencia de Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA).

Proceso para obtener la información climática

- Temperatura y precipitación: se obtuvieron las capas geográficas de temperatura media y precipitación (24 capas en total) de la base de datos del *WorldClim* para cada mes del año.

- Biotemperatura: se utilizó la fórmula planteada por Lugo *et al.* (1999), la cual es una adaptación de la original propuesta por Holdridge (1982). Para calcular la biotemperatura de Guatemala, la fórmula aplicada fue la siguiente:

$$T^{bio} = \frac{\sum (Tm [i] \text{ si } 0 < 30; \text{ sino } 0)}{12 \text{ (i=1 ... 12)}}$$

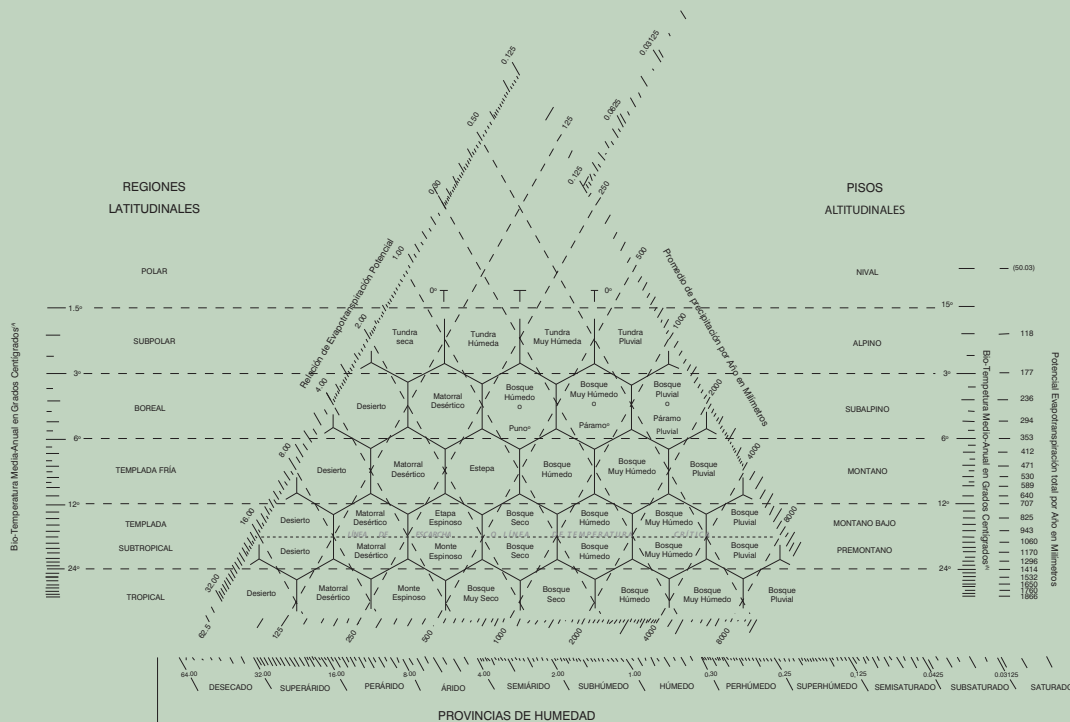
Donde:

- T°bio = biotemperatura media anual
- i= meses de enero a diciembre
- Tm[j]= temperatura media mensual

Debido a que en Guatemala ningún mes registra temperaturas menores de 0 °C ni superiores a 30 °C, la T°bio = Tm.

- Región latitudinal: se calcularon las biotemperaturas medias al nivel del mar en ambos litorales (Atlántico y Pacífico), así como las de todos los puntos del país. Los valores obtenidos se cotejaron en la escala izquierda del diagrama de Zonas de Vida de Holdridge (Figura 4), donde se establecen las regiones latitudinales.
- Zona de vida: posterior a la determinación de la región latitudinal se procedió a definir el hexágono a partir de los datos de precipitación: biotemperatura y evapotranspiración potencial, de acuerdo con el diagrama triangular propuesto por Holdridge.

Figura 4 Diagrama de zonas de vida



Fuente: Basado en Holdridge, 1971.



Por otro lado, entre las principales desventajas se encuentran las limitantes para incluir otros factores (climáticos y/o no climáticos) asociados con el cambio climático global abrupto, principalmente, cambios de CO₂ en la atmósfera, estacionalidad y variabilidad climática, y dinámica local de la cobertura del suelo. Sin embargo, algunas de estas debilidades pueden contrarrestarse con la determinación de asociaciones

edáficas, climáticas y topográficas, entre otras a mayor escala (Chen, Zhang y Li, 2003; Lugo, Brown, Dodson y Smith, 1999).

A partir del mapa actual de zonas de vida se emplearon las plataformas cartográficas de escenarios de cambio climático A2 y B2 del IPCC para los años 2020, 2050 y 2080 (Recuadro 2). Los escenarios se obtuvieron del modelo elabo-

Recuadro 2

Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (SRES) y su modelación

En 1990 y 1992, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) desarrolló varios escenarios de emisiones a largo plazo, que han sido utilizados para el análisis de un posible cambio climático, sus repercusiones y las opciones para mitigar sus efectos. En 1995, fueron superados al incorporar la dinámica de los factores que rigen las emisiones. A estos nuevos escenarios se les conoce como SRES (Reporte especial de escenarios de emisiones, por sus siglas en inglés).

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de complejos sistemas dinámicos movidos por fuerzas determinantes como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico, el cambio tecnológico, entre otros. Los escenarios son imágenes alternativas futuras, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán esas fuerzas en las emisiones, así como para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis.

El desarrollo de un conjunto de este tipo de escenarios tiene por objeto reflejar los conocimientos actuales sobre los márgenes de incertidumbre subyacentes. Estos escenarios están basados en una extensa evaluación de las fuerzas determinantes y tipos de emisiones descritos en los estudios publicados, en una serie de enfoques alternativos para elaborar los modelos, y en un "proceso abierto" que recaba la participación de diversos actores y la formulación de observaciones (Figura 5).

- **Línea evolutiva y familia de escenarios A1:** describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y luego disminuye, y una breve introducción de nuevas y más eficientes tecnologías. Sus características distintivas son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales, en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía.
- **Línea evolutiva y familia de escenarios A2:** describe un mundo heterogéneo. Sus características son la autosuficiencia y la conservación de identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El de-

sarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, mientras que el crecimiento económico por habitante y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

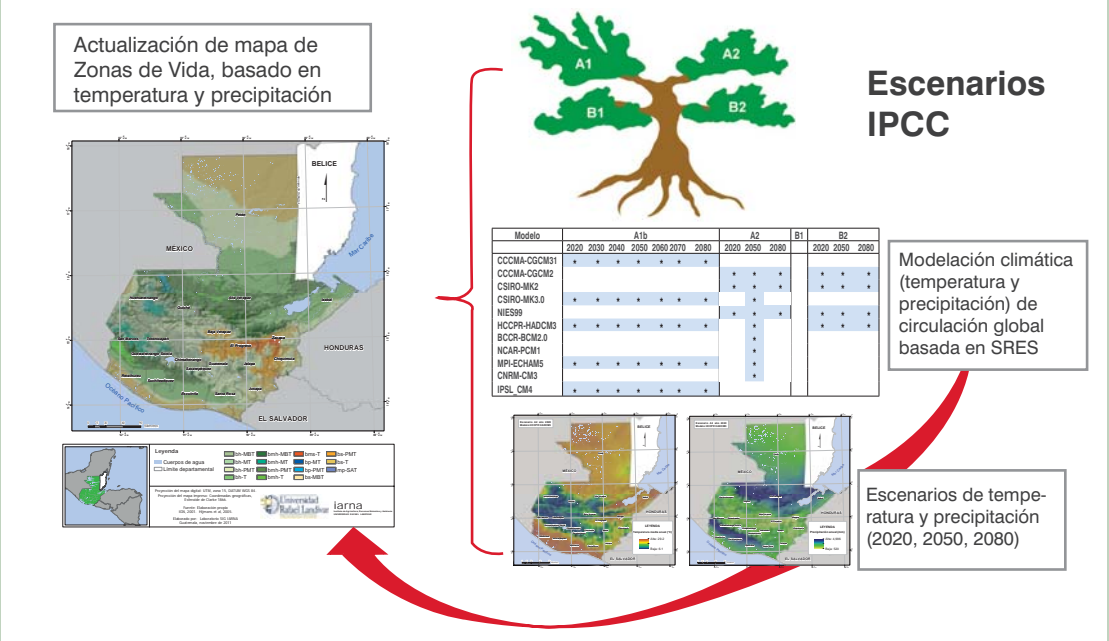
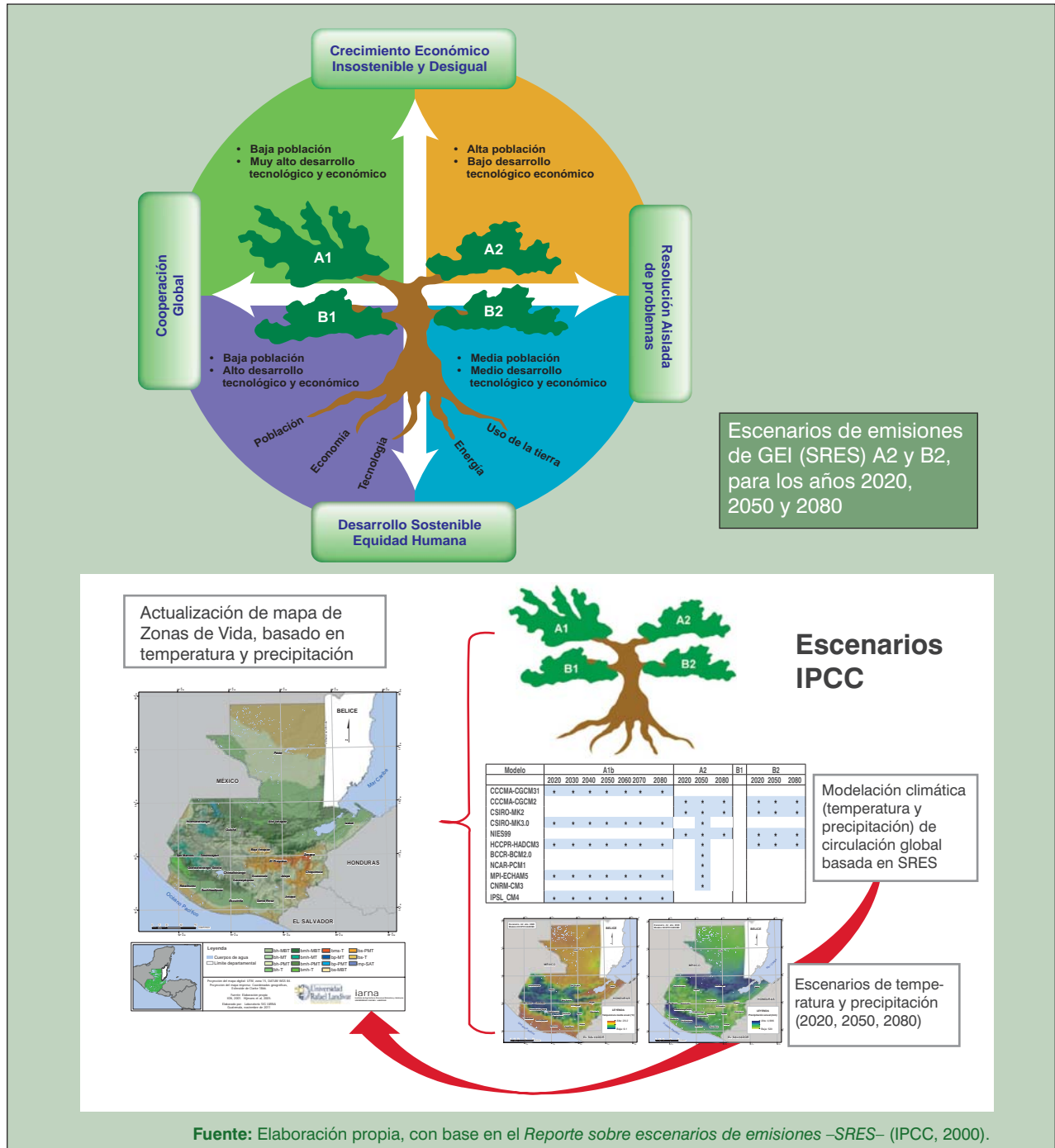
- **Línea evolutiva y familia de escenarios B1:** describe un mundo convergente con una misma población mundial, que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1; pero presenta rápidos cambios orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias, con un aprovechamiento eficaz de los recursos. Da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales relacionadas con el clima.
- **Línea evolutiva y familia de escenarios B2:** describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta en forma progresiva, a un ritmo menor que en el escenario A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios y un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del ambiente y a la igualdad social, se centra en los niveles local y regional.

Modelo HADCM3

Es un modelo de circulación del clima global elaborado por el Hadley Center del Reino Unido, que incluye la relación atmósfera-océano. Entre sus características más sobresalientes están: la resolución atmosférica del modelo dispone de 19 niveles con una resolución de 2.5° x 3.5°, los cuales equivalen a unos 417 x 278 kilómetros en el Ecuador, y unos 295 x 278 km a 45° de latitud, aproximadamente. Dispone de 6 bandas espectrales para longitudes de onda corta y 8 para longitudes de onda larga. Los efectos de los gases como el CO₂, el vapor de agua y el ozono están representados de manera explícita, además incluye una simple categoría de parámetros para los aerosoles. Es decir, a partir de la concentración estimada de gases de efecto invernadero en la atmósfera es capaz de modelar temperaturas y precipitación, cuya base de análisis es la circulación climática global.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Esquematzación de los escenarios y principales familias de emisión de CO₂



Fuente: Elaboración propia, con base en el Reporte sobre escenarios de emisiones –SRES– (IPCC, 2000).



rado por el Centro Hadley de Inglaterra, específicamente el denominado HCCPR-HADCM3 y fueron procesados con los algoritmos del *WorldClim*, lo cual permite obtener un mapa con resolución espacial de un kilómetro cuadrado por píxel (Ramírez y Jarvis, 2010).

El modelo HCCPR-HADCM3 analiza la circulación atmosférica global, y fue seleccionado entre la diversidad de modelos disponibles, debido a que presenta modelaciones sistemáticas de varias décadas, desde 2020 hasta 2090; es de uso generalizado; permite hacer comparaciones con otros estudios realizados; y es considerado como un modelo que expresa adecuadamente el clima de la región mesoamericana (Jiménez, 2009). Esta plataforma cartográfica presenta los datos necesarios para modelar las variables climáticas que se necesitan –de precipitación y temperatura–, para establecer los cambios probables de distribución de las zonas de vida en el futuro, de acuerdo con los escenarios y años indicados.

En los anexos 1 y 2 se muestran los mapas que sirvieron de base para la generación de los escenarios de zonas de vida.

6.2 Resultados

6.2.1 Establecimiento de la línea base

El primer paso fue definir un mapa actualizado de las zonas de vida de Guatemala, el cual fue considerado como línea base, y en donde se clasifican un total de 15 zonas de vida¹ (Figura 6).

¹ Mayor disponibilidad de información y mejores posibilidades tecnológicas permitieron clasificar 15 zonas de vida, a diferencia de las 14 mostradas en el mapa ampliamente difundido de De la Cruz (1982).

Para analizar las regiones bioclimáticas del país y sus posibles cambios, se tomó como elemento de análisis las regiones de humedad expresadas en las zonas de vida. Las provincias de humedad (sub húmedas y semiáridas), es decir bosque seco y muy seco, se presentan en tonalidades café y rojas en las figuras 6 a la 12.

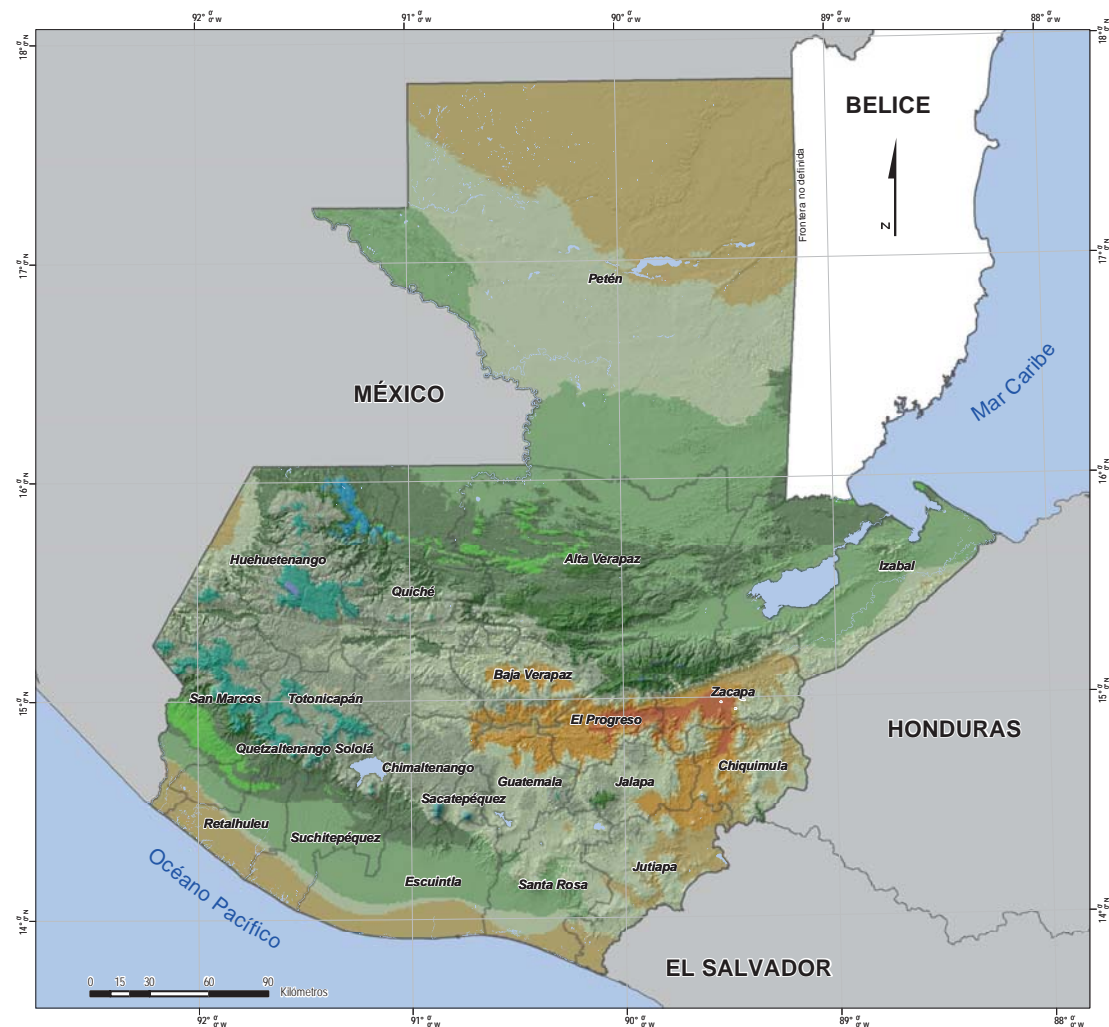
En estas provincias de humedad es destacable que la relación: evapotranspiración potencial/precipitación es mayor que uno (bosque seco es ≥ 1 y ≤ 2 ; bosque muy seco ≥ 2 y ≤ 4), lo cual indica que el ecosistema presenta un balance hídrico no excedente de agua, ya que tiende a consumir el agua de precipitación que ingresa al sistema (estas provincias generalmente presentan valores relativamente bajos de biodiversidad). Estas zonas de vida actualmente abarcan casi el 20% del territorio.

Las provincias de humedad: húmedas y perhúmedas, es decir los bosques húmedos y muy húmedos (con valores de relación de evapotranspiración potencial/precipitación menores a 1) se presentan con matices verdes. Es destacable que estos bosques pertenecen a provincias de humedad excedentarias de agua, es decir, los ecosistemas reciben más agua por precipitación que la que el ecosistema consume. Los valores de biodiversidad en estos ecosistemas son relativamente altos.

La provincia de humedad: Superhúmeda tiene valores de relación de evapotranspiración potencial-precipitación menores a 0.25, es decir que el ecosistema recibe cuatro veces más agua que la que potencialmente consume. Estos bosques pluviales se muestran en matices turquesa en el Mapa de Zonas de Vida y están ubicados principalmente al norte de los departamentos de Huehuetenango y Quiché.

Figura 6

Mapa de zonas de vida de Guatemala, Sistema Holdridge



| | | | | | |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|
| | Legenda ■ Cuerpos de agua □ Límite departamental | ■ bh-MBT ■ bh-MT ■ bh-PMT ■ bh-T | ■ bmh-MBT ■ bmh-MT ■ bmh-PMT ■ bmh-T | ■ bms-T ■ bp-MT ■ bp-PMT ■ bs-MBT | ■ bs-PMT ■ bs-T ■ mp-SAT |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001. Hijmans et al, 2005. Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, noviembre de 2011 | | | | |

Nota: Ver significado de abreviaturas en la página xii.

Fuente: Elaboración propia



Cabe destacar que en la actualidad, los territorios excedentarios de agua abarcan cerca del 80% del territorio nacional.

6.2.2 Modelación del escenario A2

Para facilitar el análisis de la información se utilizará, sobre todo, el año 2050 como referencia. Para ese año se espera un aumento de la temperatura de 0.5°C a 2.5°C. Se prevé una disminución de la precipitación de entre el 0-10% en la región sur, el altiplano occidental, los departamentos de Huehuetenango y Quiché, el norte de Baja Verapaz y la región occidental de Alta Verapaz; y de entre 10 y 20%, en la región central (Chimaltenango, Sacatepéquez y Guatemala) y nororiente del país, decreciendo hacia el norte de Petén. Por tanto, se esperan cambios drásticos en el territorio, que se pueden expresar en nuevas definiciones potenciales de vida.

Habrà una disminución de más del 40% de los bosques húmedos y muy húmedos, más del 30% de los bosques montanos, y más del 50% de los bosques pluviales. Al mismo tiempo, se podrá observar un incremento de más del 50% de los bosques secos. Este escenario prevé un cambio radical en la humedad del país, dando lugar a un ambiente para que los bosques secos se expandan considerablemente en Petén, y los muy secos en una buena parte de los departamentos de El Progreso, Zacapa,

Chiquimula y Jalapa. Las condiciones actuales de los bosques secos que se encuentran en el departamento de El Progreso se van a extender a lo largo del río Motagua hasta Totonicapán, y afectarán entre el 30% y 40% de los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez y Chimaltenango, así como el sur de Quiché (Figuras 7, 8 y 9). En síntesis, con este escenario, los bosques secos, donde ocurre déficit hídrico, podrían llegar a ocupar el 40% del territorio nacional.

6.2.3 Modelación del escenario B2

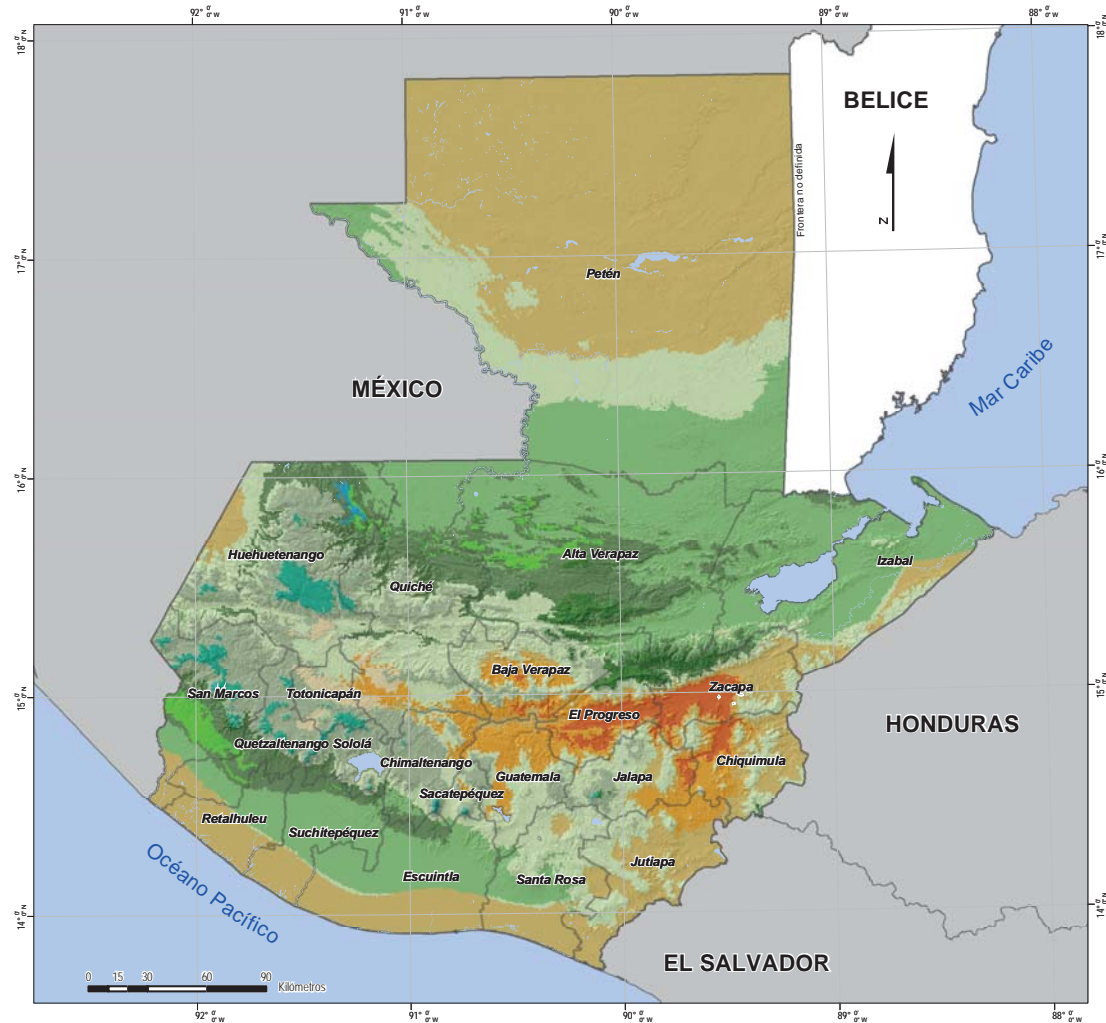
Para el 2050, se espera un aumento de temperatura de entre 0.5°C a 2°C y un incremento de 0% a 10% de la precipitación en la mayor parte de departamentos, así como una reducción de entre el 0% a 15% en los departamentos de Chiquimula, Zacapa, Izabal, el nororiente de Alta Verapaz y Petén, disminuyendo como en el escenario anterior hacia el norte de Petén.

En las figuras 10, 11 y 12 se evidencia, principalmente, la disminución de más del 50% de los bosques húmedos y muy húmedos, más del 50% de los bosques montanos, más del 55% de los bosques pluviales; pero también un incremento de más del 55% de los bosques secos y muy secos. Sin embargo, es previsible que, a nivel general, la reducción de la humedad en el país sea mucho menor que lo que ocurriría en el escenario A2.



Figura 7

Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario A2, año 2020



| | | | | |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| | Legenda ■ Cuerpos de agua □ Límite departamental | ■ bh-MBT ■ bh-MT ■ bh-PMT ■ bh-T | ■ bmh-MBT ■ bmh-MT ■ bmh-PMT ■ bmh-T | ■ bms-T ■ bp-MT ■ bp-PMT ■ bp-SAT ■ bs-PMT ■ bs-T ■ bs-MBT |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001. CIAT, 2010. Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, noviembre de 2011 | Universidad Rafael Landívar Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR | | |

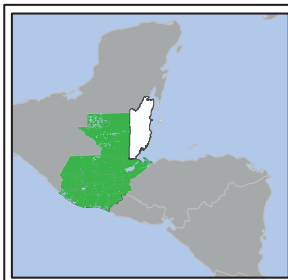
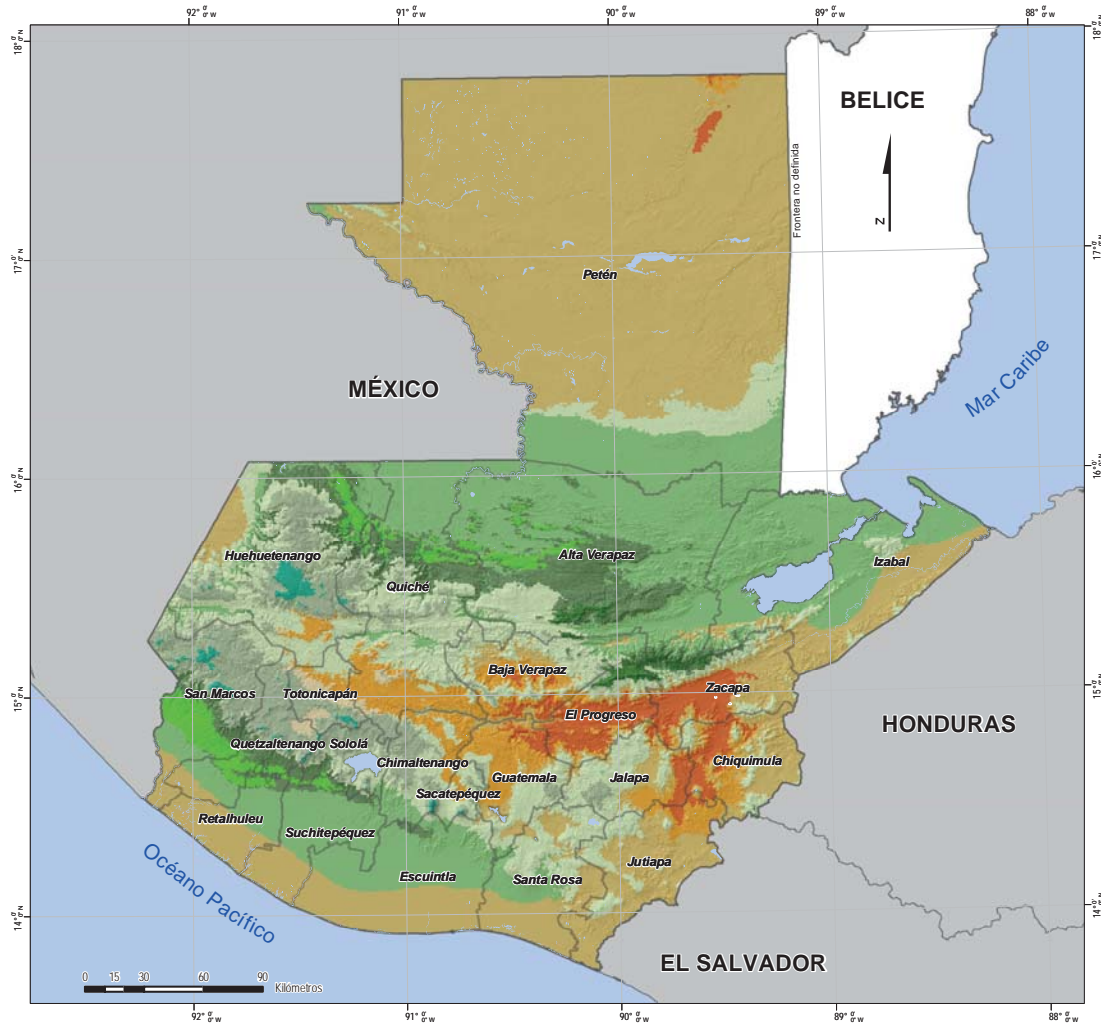
Nota: Ver significado de abreviaturas en la página xii.

Fuente: Elaboración propia



Figura 8

Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario A2, año 2050



Legenda

■ Cuerpos de agua
□ Límite departamental

- bh-MBT
- bh-PMT
- bh-T
- bmh-MBT
- bmh-MT
- bmh-PMT
- bmh-T
- bms-T
- bp-MT
- bp-PMT
- bs-T
- bs-MBT
- bs-PMT

Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84.
Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas,
Esferoide de Clarke 1866.

Fuente: Elaboración propia
IGN, 2001. CIAT, 2010.

Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA
Guatemala, noviembre de 2011



iarna
Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR

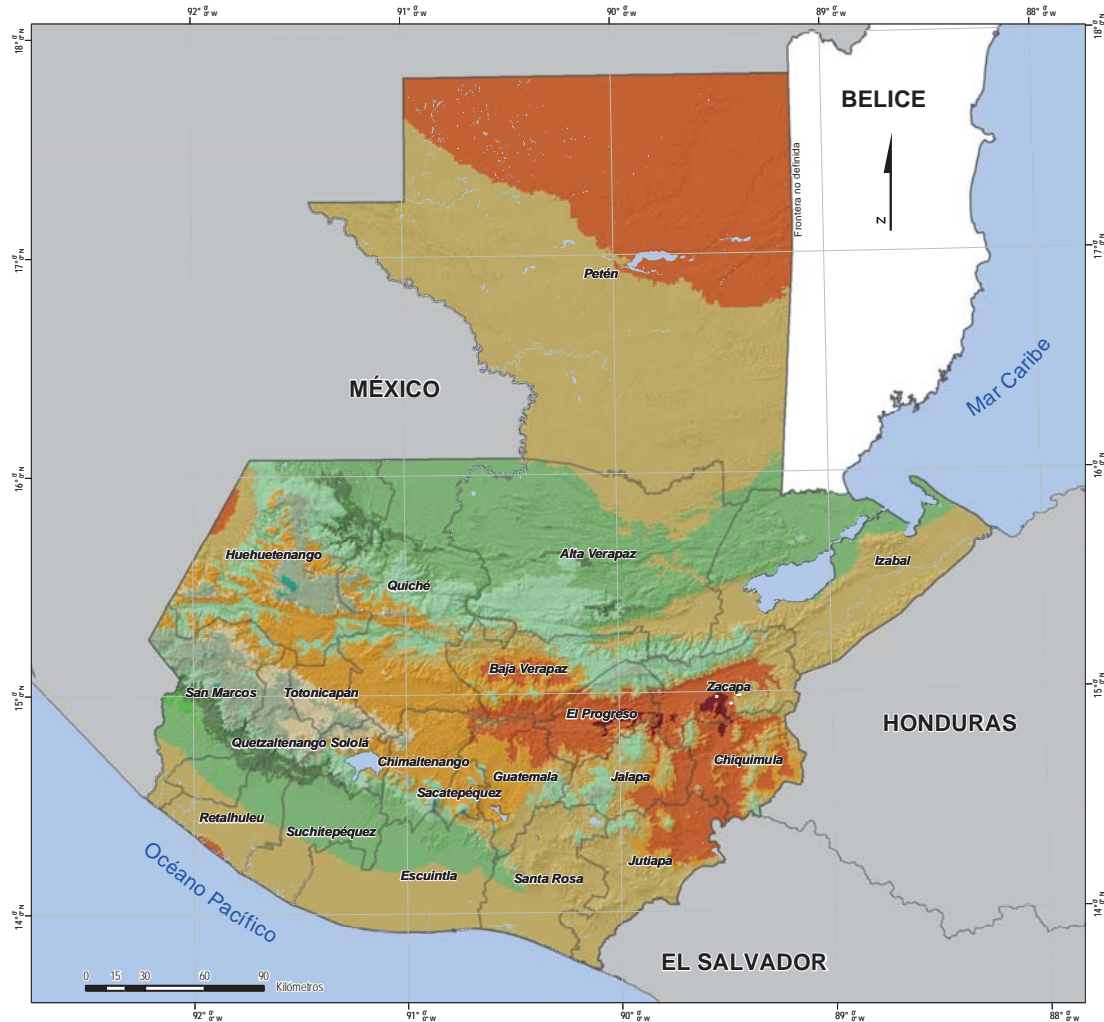
Nota: Ver significado de abreviaturas en la página xii.

Fuente: Elaboración propia



Figura 9

Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario A2, año 2080



| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Legenda | |
| | <ul style="list-style-type: none"> Cuerpos de agua Límite departamental | <ul style="list-style-type: none"> bh-MBT bh-PMT bh-T bmh-MBT |
| <p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p> <p>Fuente: Elaboración propia IGN, 2001. CIAT, 2010.</p> <p>Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, noviembre de 2011</p> | | |
| | | |

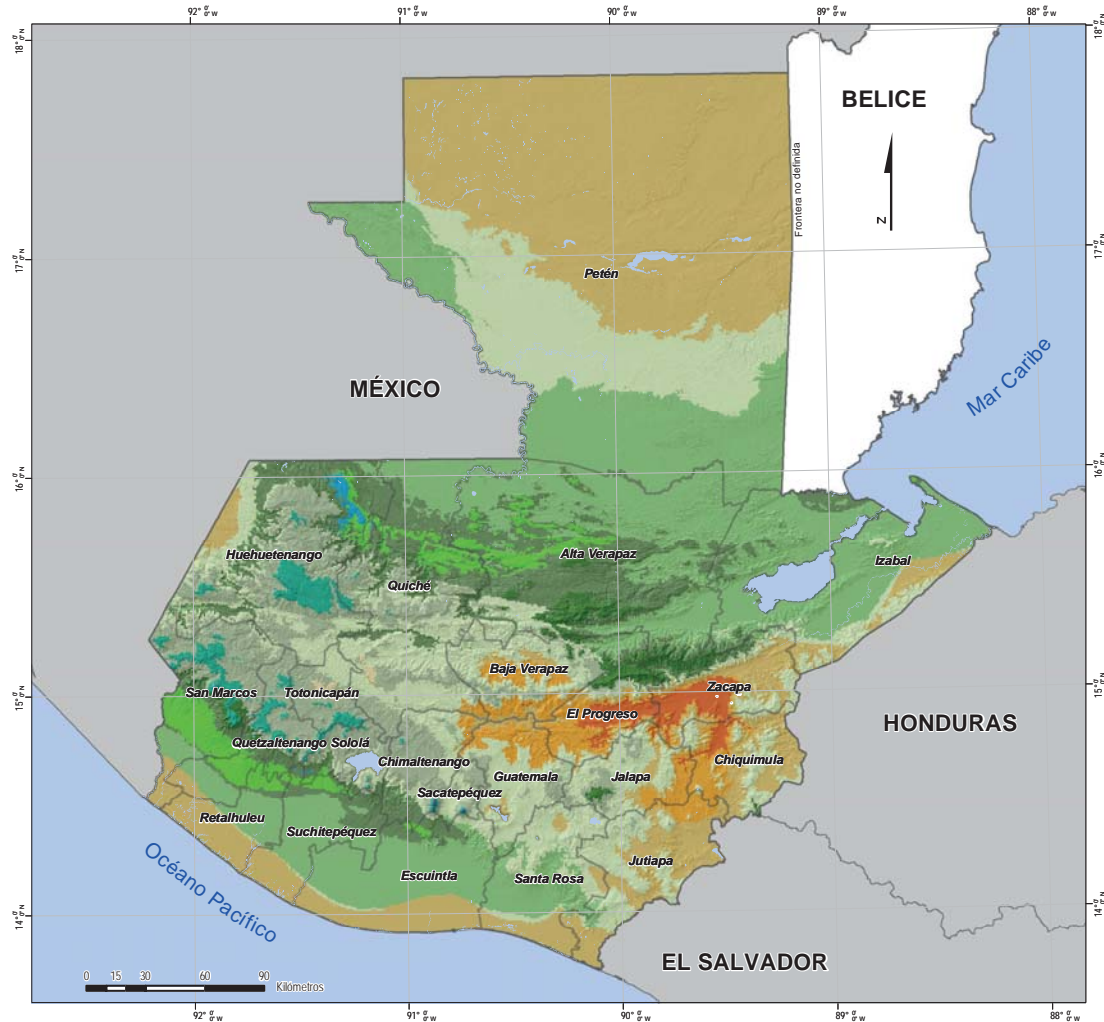
Nota: Ver significado de abreviaturas en la página xii.

Fuente: Elaboración propia



Figura 10

Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario B2, año 2020



| | | | | |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| | Legenda ■ Cuerpos de agua □ Límite departamental | ■ bh-MBT ■ bh-PMT ■ bh-T ■ bmh-MBT | ■ bmh-MT ■ bmh-PMT ■ bmh-T ■ bms-T | ■ bp-MT ■ bp-PMT ■ bs-MBT ■ bs-PMT ■ bs-T |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001. CIAT, 2010. Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, noviembre de 2011 | | | |

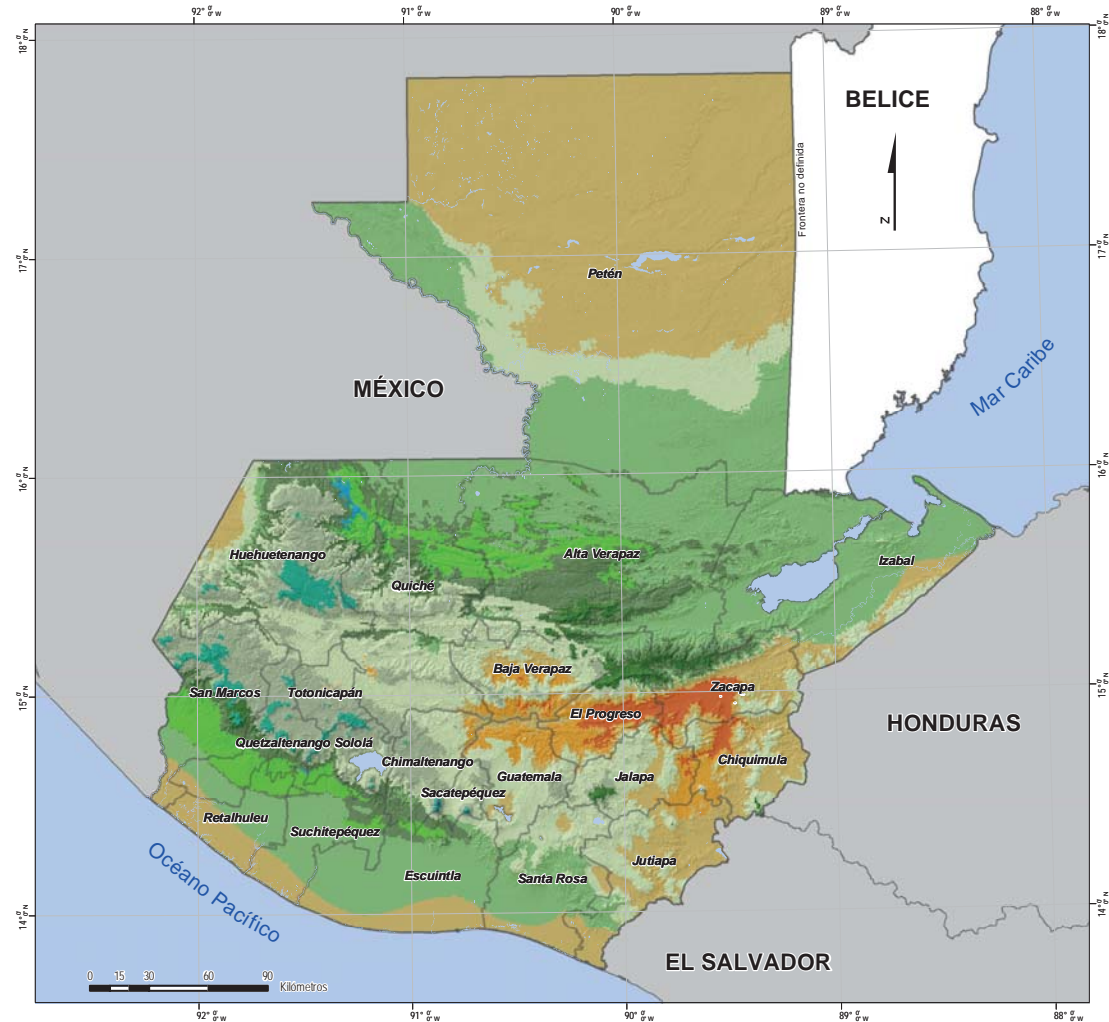
Nota: Ver significado de abreviaturas en la página xii.

Fuente: Elaboración propia



Figura 11

Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario B2, año 2050



| | | | | | |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------|
| | Legenda Cuerpos de agua Límite departamental | bh-MBT bh-PMT bh-T bmh-MBT | bmh-MT bmh-PMT bmh-T bms-T | bp-MT bp-PMT bs-MBT bs-PMT | bs-T |
| | <p>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.</p> <p>Fuente: Elaboración propia IGN, 2001. CIAT, 2010.</p> <p>Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, noviembre de 2011</p> | | | | |

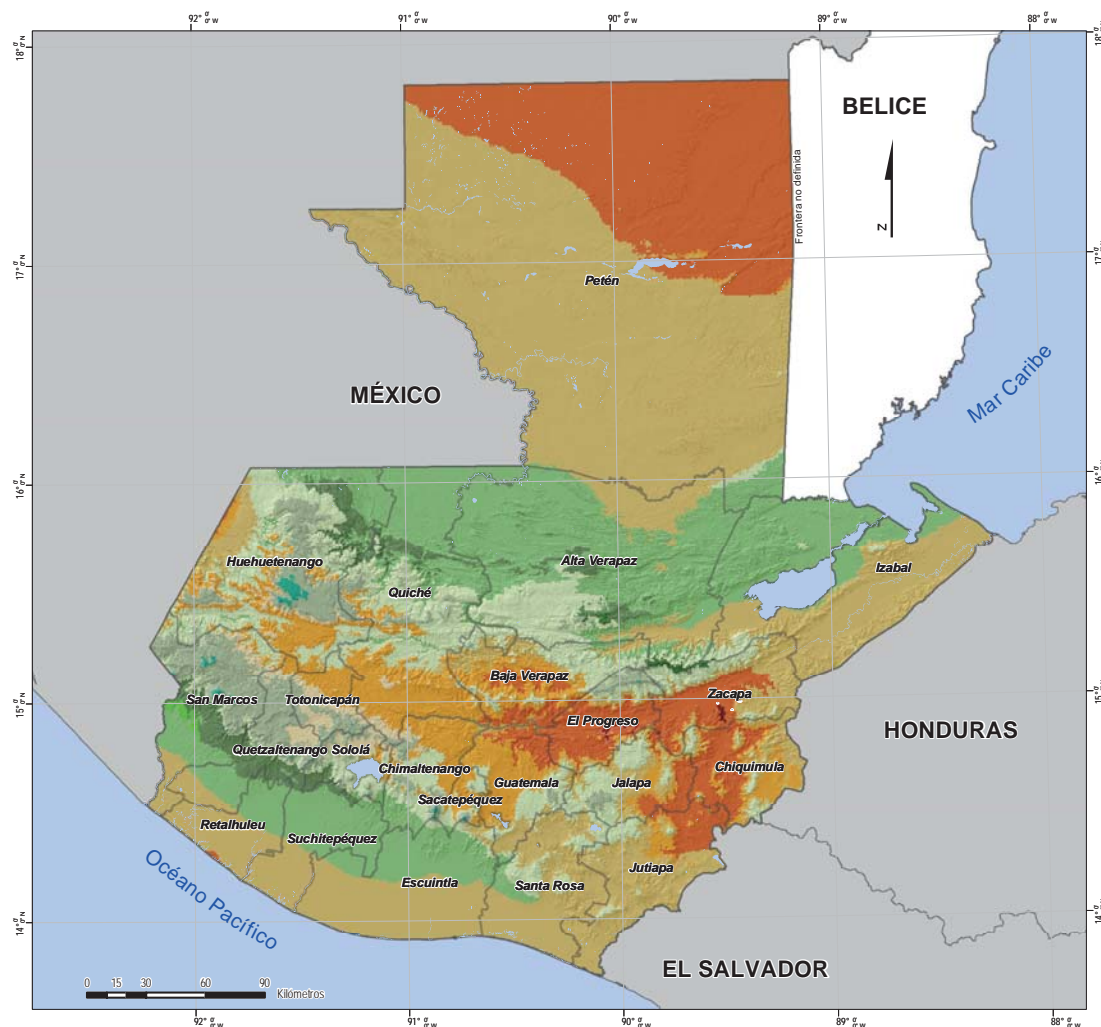
Nota: Ver significado de abreviaturas en la página xii.

Fuente: Elaboración propia



Figura 12

Modelación de la distribución de las zonas de vida, de acuerdo con el escenario B2, año 2080



Leyenda

| | | | | |
|----------------------|---------|---------|--------|------|
| Cuerpos de agua | bh-MBT | bmh-MT | bs-MBT | me-T |
| Límite departamental | bh-PMT | bmh-PMT | bs-PMT | |
| | bh-T | bmh-T | bs-T | |
| | bmh-MBT | bms-T | me-PMT | |

Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84.
Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esteroide de Clarke 1866.

Fuente: Elaboración propia
IGN, 2001. CIAT, 2010.

Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA
Guatemala, noviembre de 2011

Universidad Rafael Landívar
Trascendiendo fronteras

iarna
Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR

Nota: Ver significado de abreviaturas en la página xii.

Fuente: Elaboración propia



Cambio climático y biodiversidad.

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico

Como se puede apreciar en las figuras 13 y 14, el escenario en el que son previsibles mayores cambios para el año 2050 es, evidentemente, el A2. Para esta fecha, las zonas que mayor expansión territorial presentarán son el Bosque Seco Tropical (bs-T), aumentando del 20% al 40% en el escenario A2 y a 30% en el escenario B2. Las zonas de vida que mayor contracción mostrarán son el Bosque Húmedo Premontano (bh-PMT), el Bosque muy Húmedo Premontano (bmh-PMT) y el Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MBT), reduciéndose los tres en un 50% para ambos escenarios.

Se estima que para el año 2050, en ambos escenarios (A2 y B2), existirá una faja este-oeste continua que vinculará los bosques secos existentes en el oriente y occidente de Guatemala, a través de los ríos Motagua y Cuilco, entre otros, ubicados en la parte central del país (Figura 14). Para esta fecha, de manera general, los cambios se aprecian drásticos y muy similares en cuanto a la modificación de las zonas de vida de Guatemala, tendientes a la expansión de las condiciones bioclimáticas propias de los bosques secos y muy secos, incluso con la aparición de zonas de vida áridas donde la evapotranspiración potencial es de 4 a 8 veces mayor que la precipitación. Esto indica un cambio

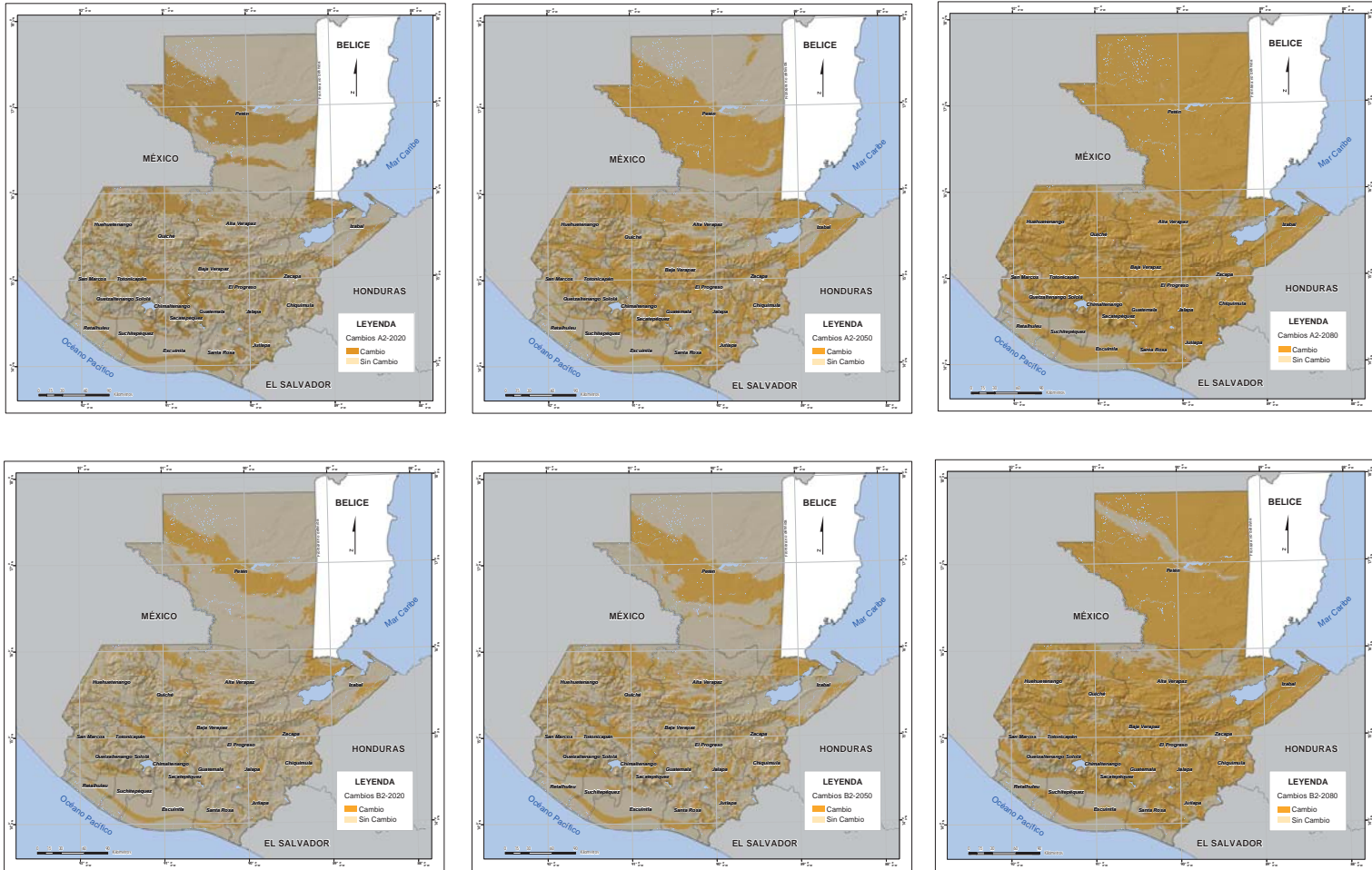
drástico en las condiciones bioclimáticas del país, en alrededor del 90% de su extensión, lo que disminuiría la disponibilidad hídrica de los ecosistemas, con repercusiones en los mismos y en la biodiversidad, así como en los sistemas productivos.

Este hallazgo se confirma al agrupar las zonas de vida por regímenes o provincias de humedad, de acuerdo con la metodología de Holdridge (Figura 15), ya que se estima que el conjunto de zonas de vida subhúmedas, semiáridas y áridas, es decir, el grupo de bosques secos (subhúmedos, ETP/P entre 1 y 2), muy secos (semiáridos, ETP/P entre 2 y 4) y monte espinoso (áridos, ETP/P entre 4 y 8); aumentará cerca de 3 millones de hectáreas actuales a aproximadamente 7 millones para ambos escenarios (A2 y B2). Los bosques húmedos, muy húmedos y pluviales disminuirán en iguales proporciones. En tal sentido, es muy probable que Guatemala pase de ser actualmente un país excedentario de agua, a afrontar grandes déficit hídricos en el futuro cercano, es decir que la evapotranspiración potencial será mucho mayor que la precipitación. Esto traería consecuencias negativas en cuanto a abastecimiento hídrico, tanto en los ecosistemas como en los sistemas productivos y la sociedad.



Figura 13

Modelación del área afectada por los cambios de las zonas de vida, de acuerdo con los escenarios A2 y B2



Fuente: Elaboración propia

Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico. Cambio climático y biodiversidad.

Figura 14

Cambios de las zonas de vida para el año 2050, en los escenarios A2 y B2

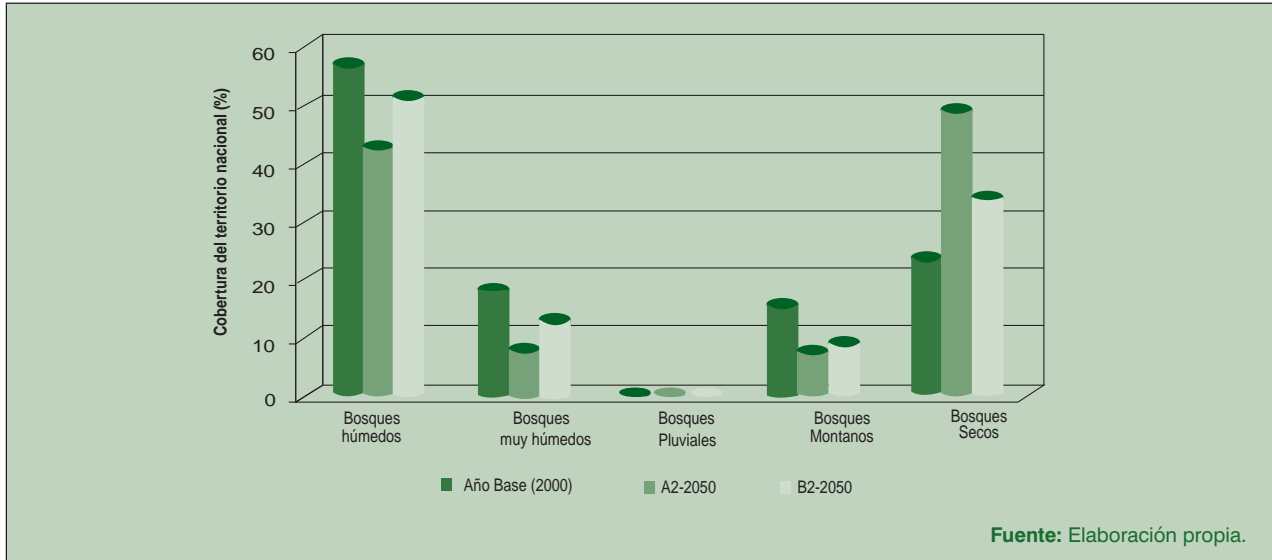
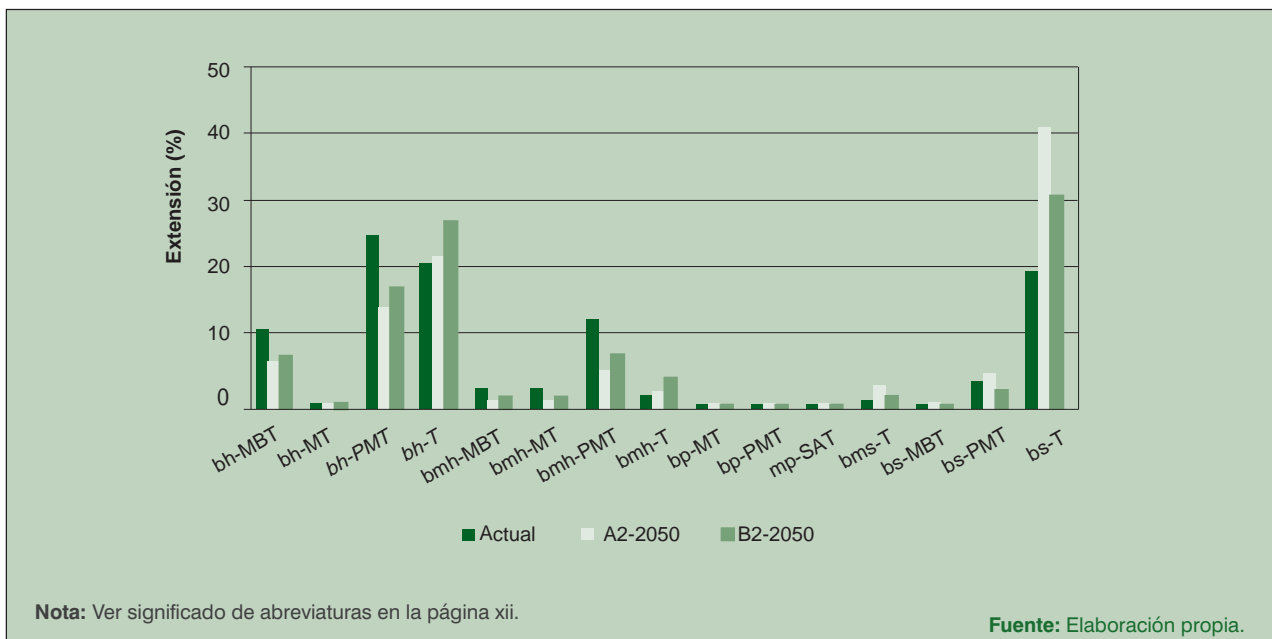


Figura 15

Cambios de las zonas de vida agrupadas por provincia de humedad para el año 2080, escenarios A2 y B2



Parte

7

Consideraciones finales

Consideraciones finales

1. En el marco del cambio climático (abrupto) que actualmente se evidencia, existe una amplia y sólida base científica para afirmar que la teleconexión atmosférica y la interrelación de los factores controladores del clima **hacen del norte de Mesoamérica una de las regiones que mayores cambios enfrentará a nivel global**. Entre las principales consecuencias para el presente siglo están el aumento de temperatura entre 3 °C y 7.5 °C, la alta variabilidad climática y la intensificación del ciclo hidrológico. Esto se explica, especialmente, por la migración recurrente hacia el sur durante el verano de la zona de convergencia intertropical (ITCZ) en el hemisferio Norte, y los consecuentes efectos de “rebote”. Asimismo, se prevé que los eventos ENSO ocurrirán con mayor frecuencia e intensidad, especialmente fases cálidas (El Niño).
2. Los impactos del cambio climático ya son evidentes, y tendrán consecuencias drásticas en el corto y mediano plazos (2020, 2050 y 2080) en los ecosistemas y biodiversidad de Guatemala. **Los principales efectos negativos del clima en los ecosistemas** están relacionados con el **aumento de la temperatura, lo cual implica mayores demandas de agua de la vegetación (por evapotranspiración), y una drástica disminución de la disponibilidad hídrica, debido a sequías y patrones irregulares de precipitación**. Es altamente probable que dichos cambios en las condiciones bioclimáticas sean más rápidos que la capacidad de los ecosistemas de adaptarse.
3. **Las regiones con niveles críticos de cambio en Guatemala**, en el corto y mediano plazo (2020 y 2050), serán los cinturones este-oeste en el centro de Petén (Arco de La Libertad), la Franja Transversal del Norte y los valles de las cuencas Motagua, Cuilco y Selegua, así como los sistemas montañosos.
4. Se prevé que **para el 2050 hayan cambiado las condiciones bioclimáticas de más del 50% del territorio guatemalteco y de más del 90% para el año 2080**. Entre los principales impactos específicos en los ecosistemas y biodiversidad se espera la expansión de bosques secos y muy secos, los cuales actualmente cubren cerca del 20% del país; y para los años 2050 y 2080 su extensión puede incrementarse a 40% y más de 65%, respectivamente. Además, existirán condiciones para el apareamiento y expansión de la zona de vida monte espinoso (zona árida). Es importante recalcar que todos los ecosistemas anteriores, potencialmente, consumen toda el agua que ingresa al ecosistema en forma de precipitación y presentan valores relativamente bajos de biodiversidad.
5. Paralelamente, se observará la disminución de la cobertura de los bosques húmedos, muy húmedos y pluviales; los cuales actualmente cubren casi el 80% del territorio nacional, extensión que llegará a 60% y menos de 35% para los años 2050 y 2080, respectivamente. Esto implica una reducción considerable de los ecosistemas excedentarios de agua.



6. Todo lo anterior, **adicionado al deterioro actual de la cobertura de los ecosistemas naturales y altas tasas de deforestación**, causan, desde ya, una **progresiva y acelerada erosión genética y simplificación de los ecosistemas**. Esto implica altas tasas de mortalidad y extinciones masivas, sobre todo de especies endémicas y de distribución restringida, y de los ecosistemas de bosque nuboso y bosque latifoliado de tierras bajas. En tal sentido, los efectos del cambio climático y la degradación del medio natural en Guatemala pueden significar, en el mediano plazo (2050-2080), la pérdida del 50% o mucho más, de la diversidad genética con la que actualmente se cuenta. Entre los **sitios críticos** se encuentran los relictos de ecosistemas “viables” con los que aún dispone Guatemala, especialmente la Reserva de la Biósfera Maya y la Sierra de las Minas (IARNA-URL, 2010), cabe destacar que ambos ecosistemas son muy vulnerables a las variaciones del clima.
7. Derivado de lo anterior, será evidente **la pérdida de los servicios ecosistémicos asociados**, principalmente la captación y regulación hidrológica; la productividad primaria neta; la biodiversidad de importancia económica, alimentaria y medicinal; la retroalimentación positiva del ciclo de carbono, es decir que existirá la liberación del carbono almacenado en los ecosistemas; entre otros. Es destacable que Guatemala, de ser actualmente un país excedentario de agua (mayor precipitación que evapotranspiración potencial), pasará a ser un país con marcados déficit hídricos (en más del 65% de la extensión territorial), al incrementarse la evapotranspiración potencial sobre la precipitación. En consecuencia, los efectos catastróficos serán no sólo sobre la biodiversidad, sino también en los sistemas productivos y en el abastecimiento hídrico para todos los usos de la sociedad.
8. En este contexto, es fundamental enfocar esfuerzos de políticas públicas con visiones y horizontes claramente establecidos, procesos definidos para alcanzarlos y estructuras institucionales renovadas y dinamizadas, en torno de la **prevención y adaptación local al cambio climático abrupto**. Estos desafíos urgentes, asumidos por el Estado guatemalteco, así como la formación de capacidades locales, son mucho más importantes que las contribuciones de la cooperación internacional por sí mismas; las cuales, por lo general son parciales y temporales, y están enfocadas a la mitigación. Entre los elementos en materia de adaptación, que deben ser recogidos a través de esas políticas públicas e implementados de manera prioritaria y en el corto plazo, destacan:
 - La necesidad de una profunda reforma del Estado guatemalteco para dotarlo de un sistema institucional funcional competente, no sólo de organizar las capacidades nacionales para detener las trayectorias actuales de agotamiento, deterioro y contaminación de nuestros componentes ambientales; sino también para conceptualizar, diseñar y poner en marcha estrategias de adaptación de los eventos inducidos por el cambio climático, y que tendrán su expresión en la modificación profunda de nuestro entorno natural, tal como se evidencia con el presente estudio. Es necesario tener claro que las amenazas inducidas por el cambio climático tienen efectos aditivos a los que ya percibimos, debido a marcadas deficiencias en la gestión ambiental nacional. Esos efectos se relacionan, en la actualidad, con las carencias de agua, espacios productivos, energía, calidad del aire, por ejemplo, y que afectan a más de la mitad de la población guatemalteca.



- Este sistema institucional renovado deberá ser apto también de identificar, con precisión territorial, los efectos inducidos por el cambio climático y desarrollar capacidades de seguimiento y evaluación sobre cuya base deberán descansar nuestras destrezas predictivas (anticipar impactos en cada uno de los subsistemas del sistema socioecológico: social, económico, natural e institucional), y de prevención y adaptación local. No debe prescindirse del seguimiento y evaluación de la modelación de variables climáticas, y su relación con la oscilación del Sur El Niño, la oscilación del Atlántico norte, y la migración norte-sur de la zona de convergencia intertropical; así como el establecimiento de alertas tempranas a sequías, inundaciones y deslizamientos. Estos elementos deben desarrollarse a nivel local, y ser la base para la adaptación periódica de todas las dinámicas sociales y económicas.
 - Bajo el criterio de establecer las necesarias “reservas ambientales” para amortiguar los cambios progresivos en las condiciones ambientales, el país deberá proteger y restaurar su *stock* ambiental a niveles que satisfagan las necesidades cotidianas de las personas, en materia de bienes y servicios ambientales. Asimismo, el país deberá encaminar esfuerzos para regular los flujos entre la naturaleza y la economía, a fin de evitar la transgresión de límites que potencialicen las amenazas del cambio climático. La consideración de los *stocks*, los flujos y las relaciones entre ellos, son fundamentales para propiciar la sostenibilidad del país en medio de las nuevas condiciones impuestas por el cambio climático. Dentro de los esfuerzos por lograr reservas ambientales no sólo deberá consolidarse el sistema nacional de áreas protegidas, sino también deberán garantizarse ciertos niveles de calidad ambiental en el agua y la atmósfera. Los grados de resiliencia de las reservas ambientales serán fundamentales para la adaptación social al cambio climático.
 - Para el caso específico del Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas (SIGAP), su fortalecimiento, administrativo y funcional deberá promoverse en sintonía con el potencial de las áreas individuales, para: reducir el impacto de los desastres; regular el ciclo hidrológico, clave para el abastecimiento de la demanda; proveer estabilidad en las zonas marino-costeras y facilitar ciclos de vida de poblaciones marinas; proveer soporte para nuevos sistemas de producción, incluida la domesticación de especies silvestres; proveer medicinas, material genético y materiales para la construcción, entre otros aspectos. Como parte integrante de este esfuerzo, deberá preverse la implementación de corredores biológicos (basados principalmente en matrices de cobertura forestal y uso del suelo) mediante la conexión de áreas protegidas viables y representativas, a nivel de mesoescala e integrando esfuerzos internacionales (México, Belice, Honduras y El Salvador); la restauración de ecosistemas degradados y el fomento de sistemas agroforestales. Es de especial relevancia establecer la interconexión de los ecosistemas de planicies con ecosistemas de montaña, a través de gradientes de humedad, temperatura y altitud.
- Conducir la adaptación a las nuevas condiciones ambientales, a partir de uni-



dades territoriales diferenciadas. Estas unidades deben ser el escenario para la aplicación de las políticas públicas en materia de adaptación. A partir de las demandas sociales y los escenarios derivados del crecimiento poblacional, deberán hacerse los respectivos balances con la oferta hídrica, oferta energética y de espacio productivo para la producción de alimentos de cada territorio. De igual manera, ese territorio será la base para la gestión del riesgo a desastres (derrumbes e inundaciones, por ejemplo) y a eventos extremos, como las sequías y las heladas.

- Particularmente, por la amenaza de cambios profundos en el ciclo hidrológico, se hace urgente e imperativo impulsar tanto una política de gestión integral del agua como una política hidráulica. La segunda, subordinada a la primera, encaminada a almacenar y conducir agua, lo cual está íntimamente ligado al desarrollo de obras físicas. La primera, y con un enfoque más integral, se refiere al conjunto de acciones de la administración pública, a distintos niveles (nacional, regional, municipal y cuenca) y en distintos ámbitos (usos, conservación, almacenamiento, conducción, tratamiento, entre otros), que orientan el desarrollo, asignación, preservación y gestión de los recursos hídricos para el mayor alcance social.
- El sistema institucional renovado también deberá prever la revitalización de las capacidades nacionales en materia de investigación para el desarrollo de tecnologías apropiadas a las nuevas condiciones ambientales, con miras a enriquecer los sistemas de producción que se elijan para cada territorio. Algunas líneas de trabajo sugeridas son: mejoramiento ge-

nético de especies, para su resistencia a sequías y plagas asociadas; adaptación de especies de importancia económica y social; fomento de la producción bajo ambientes controlados (invernaderos, por ejemplo); métodos de manejo y recuperación de suelos, que logren elevar los rendimientos; modificación de fechas de siembras; mejoramiento e implementación de sistemas de riego; y reconversión de cultivos.

- Promover una adaptación progresiva e inteligentemente conducida de la economía nacional a fin de garantizar el mejor uso del territorio conforme las prioridades sociales dominantes y el bien común. Para ello, el sistema institucional renovado y dinamizado deberá hacer uso de instrumentos económicos, normativos y de sensibilización, para persuadir a los diferentes grupos de interés a que asuman las orientaciones de política pública establecidas. Es decir, las actividades productivas no sólo serán las de mayor viabilidad en el nuevo contexto climático, sino las de mayor alcance social.
- Para apoyar las iniciativas productivas de campesinos excedentarios, de subsistencia y de infrasubsistencia, será deseable que el Estado diseñe e implemente, siempre conforme a las prioridades y particularidades territoriales, y con un rol diferenciado según el tipo de campesino, un sistema de soporte integrado al menos por: i) asistencia técnica e investigación adaptativa; ii) capacitación; iii) apoyo a la organización social y a la producción; iv) asesoría para obtener financiamiento rural y acceso a mercados; v) apoyo para el diseño y desarrollo de cadenas de producción; vi) desarrollo de infraestructura productiva y de beneficio



- público, como los caminos rurales.
 - A la luz de las necesidades actuales y aquellas que se derivan de las nuevas condiciones que impone el cambio climático, es evidente que el país necesita más recursos financieros para hacer frente a sendos desafíos. En este sentido, es importante resaltar la necesidad imprescindible de retomar el debate fiscal para mejorar la base impositiva, no como un fin en sí mismo, sino como el medio para corregir las carencias humanas, físicas y financieras, base de una adecuada gestión de dichas condiciones. Estos propósitos deben ser superiores a otros que promueven gastos superfluos o con intenciones electorales.
9. Finalmente, es importante hacer énfasis en la necesidad de asumir, desde ahora, una nueva forma de pensar con respecto al cambio climático y las implicaciones que éste tendrá, y tiene de alguna forma, en la vida cotidiana de todos los guatemaltecos. Sin dejar de reivindicar las obligaciones entre países ricos y pobres a **escala global**, debemos reconocer las obligaciones entre los sectores más solventes y los más vulnerables a **escala nacional**. Enfrentar la sinergia entre la realidad ambiental local y el cambio climático global requiere de otro cambio: el socioeconómico e institucional, como bien se ha tratado de indicar en los párrafos previos.



Bibliografía

1. Acevedo-Whitehouse, K. & Duffus, A. (2009). Effects of environmental change on wildlife health. *Philosophical Transaction of the Royal Society* 364, 3429-3438.
2. Aguilar, E., Peterson T. C., Ramírez, P., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M. *et al.* (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research* D23107 (110), 1-10.
3. Arnell, N. (1999). Climate change and global water resources. *Global environmental change* (9), S31-S49.
4. Arnell, N. (2004). Climate change and global water resources: SRES emissions and socioeconomic scenarios. *Global environmental change* (14), 31-52.
5. Brenner, M., Hodell, D., Resenmeier, M., Curtis, J., Binford, M. & Abbott, M. (2007). Abrupt climate change and pre-columbian cultural collapse. In U. O. Florida. *Climate Change and Pre-Columbian* (Chapter 6). Florida: University of Florida.
6. Bruijnzeel, S. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing. *Agriculture, ecosystem and environment* (104), 185-228.
7. Bush, M., Correa-metrio, A., Hodell, D., Brenner, M., Anselmetti, F. & Ariztegui, D. *et al.* (2007). Re-evaluation of climate change in lowland Central America during the last glacial maximum using new sediment cores from lake Petén Itzá, Guatemala. In Vimcux, F. *et al.* (2009). *Past climate variability in South America and surrounding* (Chapter 6). Amsterdam: Springer Science.
8. CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2009). *Estudio de factibilidad. Economía del cambio climático en Centroamérica*. México: Autor.
9. CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2010). *Istmo centroamericano: efectos del cambio climático sobre la agricultura*. México: Autor.
10. Chen, X., Zhang, X. S. & Li, B.-L. (2003). The possible response of life zones in China under global climate change. *Global and planetary change* 38, 327-337.
11. Chiang, J. & Bitz, C. (2005). Influence of high latitude ice cover on the marine intertropical convergence zone. *Climate Dynamics* (25), 477-496.
12. Cook, K. & Vizy, E. (2010). Hydrodynamics of the caribbean low-level jet and its relation with precipitation. *Journal of climate* (23), 1477-1494.
13. Davis, M., Shaw, R. & Etterson, J. (2005). Evolutionary responses to changing climate Ecology. *Ecology* 84, 1704-1714.
14. De Chazal, J. & Rounsevel, M. (2009). Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: A review. *Global environmental change* (19), 306-315.

15. Declerck, F., Chazdon, R., Holl, K., Milder, J., Finegan, B. & Martínez-Salas, A. *et al.* (2010). Biodiversity conservation in human-modified landscapes of Mesoamerica: Past, present and future. *Biological Conservation*, In press.
16. Deepak, R., Welch, R., Lawton, R. & Nair, U. (2006). Dry season clouds and rainfall in northern Central America: Implications for the Mesoamerican Biological Corridor. *Global and Planetary Change* 54, 150–162.
17. Díaz, H. & Stahle, D. (2007). Climate and cultural history in the Americas: An overview. *Climatic Change* (83), 1-8.
18. Easterling, D., Meehl, G., Parmesan, C., Changnon, S., Karl, T. & Mearns, L. (2010). Climate extremes: Observations, modeling and impacts. *Science* (289), 2067-2074.
19. Enquist, C. (2002). Predicted regional impacts of climate change on the geographical distribution and diversity of tropical forests in Costa Rica. *Journal of Biogeography* (29), 519-534.
20. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2003, octubre 1). *Acces to global online research in agriculture*. Recuperado de Junio-diciembre 2010, from AGORA: <http://www.aginternetwork.org>
21. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2009). *State of the world forest*. Rome: Author.
22. Fearnside, P. (2004). Are climate change impacts already affecting tropical forest biomass? *Global Environmental Change* (14), 299-302.
23. Foster, P. (2001). The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forest. *Earth science reviews* (75), 73-106.
24. Freudenburg, W. Muselli, V. (2010). Global warming estimates, media expectations and the asymmetry of scientific challenge. *Global environmental change* (20), 483-491.
25. Füssel, H.-M. (2009). An updated assessment of the risks from climate change based on research published since the IPCC Fourth, Assessment Report. *Climatic Change* 97, 467-492.
26. Gardner, L. (2009). Assessing the effect of climate change on mean annual runoff. *Journal of Hydrology* (379), 351-359.
27. Gergis, J. & Fowler, A. (2009). A history of ENSO events since A.D. 1525: implications for future climate change. *Climatic Change* (92), 343–387.
28. Gianinni, A., Kushnir, Y. & Cane, M. (2001). Seasonality in the Impact of ENSO and the North Atlantic High on Caribbean rainfall. *Physics and Chemistry of the Earth* 26 (2), 143-147.
29. Gill, R. (2008). *Las grandes sequías mayas. Agua, vida y muerte*. México: Fondo de Cultura Económica.
30. Giorgi, F. (2006). Climate Change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33, 1-4.
31. Guerra, A. (2010). *Climate-related disaster risk in mountain areas: the guatemalan highlands at the start of th 21st Century*. Oxford: Oxford University Press.
32. Guo, Q. (2000). Climate change and biodiversity conservation in great plains agroecosystems. *Global environmental change* (10), 289-298.



33. Hagerman, S., Dowlatalabadi, H., Satterfield, T. & McDanniels, T. (2009). Expert views on biodiversity conservation in an era of climate change. *Global environmental change* (20), 192-207.
34. Haug, G., Günther, L., Peterson, D., Sigman, K., Hughen, K. & Aeschliman, B. (2003). Climate and collapse of Maya civilization. *Science* 169, 1731-1735.
35. Heller, N. & Zavaleta, E. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* (142), 14-32.
36. Henderson-Sellers, A., Irannejad, P. & McGuffie, K. (2008). Future desertification and climate change: The need for land-surface system evaluation improvement. *Global and Planetary Change* 64, 129-138.
37. Hijmans, T., Cameron, S., Parra, J., Jones, P. & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25, 1965-1978.
38. Hitz, S. & Smith, J. (2004). Estimating global impacts from climate change. *Global Environmental Change* 14, 201-218.
39. Hodell, D., Anselmetti, F., Ariztegui, D., Brenner, M., Curtis, J. & Gilli, A. *et al.* (2008). An 85-ka record of climate change in lowland Central America. *Quaternary Science Reviews* (27), 1152-1165.
40. Holdridge, L. (1971). *Ecología basada en zonas de vida*. Turrialba, Costa Rica: Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA).
41. Holmgren, M., Schefer, M., Ezcurra, E., Gutiérrez, J. & Morhen, G. (2001). El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in ecology and evolution* 16 (2), 89-92.
42. Holz, I. & Gradstein, R. (2005). Phytogeography of the bryophyte floras of oak forests and páramo of the Cordillera de Talamanca, Costa Rica. *Journal of Biogeography* (32), 1591-1609.
43. Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already. *Tree* 15 (2), 56-61.
44. Hunt, B. & Elliott, T. (2005). A simulation of the climatic conditions associated with the collapse of the maya civilization. *Climatic Change* (69), 393-404.
45. Huntington, T. (2003). Climate warming could reduce runoff significantly. *Agricultural and Forest Meteorology* (117), 193-201.
46. Huntington, T. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle, evidence nad sinthesis. *Journal of Hydrology* 319, 83-95.
47. Banguat y IARNA-URL (Banco de Guatemala e Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar). (2010). *Cuenta Integrada de Tierras y Ecosistemas. Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica Integrada de Guatemala* (Serie divulgativa No. 8). Guatemala: autor.
48. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2000). Resumen para responsables de políticas. En: *Reporte especial de los escenarios de emisiones del IPCC*. New York: Autor.
49. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución*

de los grupos de trabajo I, II y III para el cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

50. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2009). Earth's ecosystems. In IPCC y C. McMullen (Eds.), *Climate Change Science Compendium*. New York: Author.
51. Jiménez, M. (2009). *Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de Costa Rica al cambio climático*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
52. Kaushal, S., Pace, M., Groffman, M., Band, L., Belt, K. & Mayer, P. *et al.* (2010). Land use and climate variability amplify contaminant pulses. *EOS Transactions, American Geophysical Union* 91 (25), 221-228.
53. Kim, J. (2005). A projection of the effects of the climate change induced by increased CO₂ on extreme hydrologic events in the western U.S. *Climatic Change* (68), 153-168.
54. Klenner, W., Arsenault, A., Brockerhoff, E. & Vyse, A. (2009). Biodiversity in forest ecosystems and landscapes: A conference to discuss future directions in biodiversity management for sustainable forestry. *Forest Ecology and Management* (258S), S1-S4.
55. Kok, K. & Winograd, M. (2002). Modelling land-use change for Central America, with special reference to the impact of hurricane Mitch. *Ecological Modelling* 149, 53-69.
56. Kursar, T. (1999). Relating tree physiology to past and future changes. *Climatic Change* (39), 339-363.
57. Labat, D., Godd, Y., Probst, J. & Guyot, J. (2004). Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* (27), 631-642.
58. Lawton, R. O., Nair, U. S., Pielke, R. A. & Welch, R. V. (2001). Climatic Impact of Tropical Lowland Deforestation on Nearby Montane Cloud Forests. *Science* 294, 584-587.
59. Leduc, G., Vidal, L., Tachikaw, K. & Bard, E. (2009). ITCZ rather than ENSO signature for abrupt climate changes across the tropical Pacific? *Quaternary Research* 72, 123-131.
60. Lewis, S. (2006). Review: Tropical forests and the changing earth system. *Philosophical Transactions* 361, 195-210.
61. Lindner, M., Sonhgen, B., Joyce, L., Price, D., Bernier, P. & Karjalainen, T. (2002). Integrated forestry assessment for climate change impact. *Forest Ecology and Management* (190), 117-136.
62. Lugo, A. E., Brown, S. L., Dodson, R. & Smith, T. S. (1999). The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. *Journal of Biogeography* (26), 1025-1038.
63. Mawdsley, J., O'Malley, R. & Ojima, D. (2009). A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation Biology* 23 (5), 1080-1089.
64. McKibbin, W., Pearce, D. & Stegman, A. (2009). Climate change scenarios and long term projections. *Climatic Change* (97), 23-47.



65. McLachlan, J., Hellman, J. & Schwartz, M. (2007). A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Biology Conservation* 21 (2), 197-202.
66. Medvigya, D., Wofsyb, S., Mungerb, W. & Moocrofta, P. (2010). Responses of terrestrial ecosystems and carbon budget to current and future environmental variability. *PNAS Ecology*, 8275-8280.
67. Mehltreter, K. (1995). Species richness and geographical distribution of montane pteridophytes of Costa Rica, Central America. *Feddes Repertorium* (108), 563-584.
68. Mueller, A., Islebe, G., Hillesheim, M., Grzesik, D., Anselmetti, F. & Ariztegui, D. *et al.* (2009). Climate drying and associated forest decline in the lowlands of northern Guatemala during the late Holocene. *Quaternary Research* 71, 133-141.
69. Nagai, S., Ichii, K. & Morimoto, H. (2007). Interannual variations in vegetation activities and climate variability caused by ENSO in tropical rainforests. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (6), 1285-1297.
70. National Ocean and Atmospheric Administration. (2010, october 25). *ENSO Technical Discussion*. Recuperado el 30 de octubre de 2010, de: <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-tech.php>
71. Neelin, J., Münnich, M., Su, H., Meyerson, J. & Holloway, C. (2006). Tropical drying trends in global warming models and observations. *PNAS* 103 (16), 6110-6115.
72. Neff, H., Pearsall, D., Jones, J., Arroyo, B. & Freidel, D. (Eds.). (2006). Climate change and population history in the pacific lowlands of southern Mesoamerica. *Quaternary Research* (65), 390-400.
73. Nichols, R., Hoozemans, F. & Marchand, M. (1999). Increasing food risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analysis. *Global Environmental Change* 9, S69-S87.
74. Pallottino, S., Sechib, G. & Zuddas, P. (2005). A DSS for water resources management under uncertainty by scenario analysis. *Environmental Modelling y Software* 20, 1031-1042.
75. Patt, G., Tadross, M., Nussbaumer, P., Asant, K., Metzger, M. & Rafael, J. *et al.* (2010). Estimating least-developed countries' vulnerability to climate-related extreme events over the next 50 years. *Sustainability science* 107 (4), 1333-1337.
76. Peterson, L. & Haug, G. (2006). Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (94), 97-113.
77. Prentice, I., Farquhar, G., Fasham, M., Goulden, M., Heimann, M. & Jaramillo, V. *et al.* (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: Y. Houghton, D. Ding, M. Griggs, M. Noguer, V. D. Linden, X. Dai *et al.*, *Climate change 2001: the scientific basis. contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Oxford University Press.
78. Ramírez, J. y Jarvis, A. (2010). *Downscaling global circulation model outputs: the delta method decision and policy analysis* (Working paper 1). Recuperado el 20 de septiembre de 2010, de: <http://ccafs-climate.org/docs/downscaling-WP-01.pdf>.

79. Rauscher, S., Giorgi, F., Diffenbaugh, N. & Seth, A. (2008). Extension and intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century. *Climatic Dynamics* (31), 551-571.
80. Rehdfeldt, G., Wykoff, W. & Ying, C. (2001). Physiologic plasticity, evolution and impact of a changing climate on *Pinus contorta*. *Climatic Change* (50), 355-376.
81. Rosenmeier, M., Hodell, D., Brenner, M., Curtis, J. & Guilderson, T. (2002). A 4000-year lacustrine record of environmental change in the southern maya lowlands, Petén, Guatemala. *Quaternary Research* 57, 183-190.
82. Sáenz-Romero, C., Guzmán, R. & Rehdfeldt, G. (2006). Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico. Implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management* 226, 340-350.
83. Sharma, K., Vorosmarty, C. & Moore, B. (2000). Sensitivity of the himalayan hydrology. *Climatic Change* (47), 117-139.
84. Smakhtin, V. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* (147), 147-186.
85. Smith, J. & Lazo, J. (2001). A summary of climate change impact assessment from the U.S. country studies program. *Climatic Change* 50, 1-29.
86. Sterling, W. & Apps, M. (2005). Assessing the consequences of the climate change for food and forest resources. *Climatic Change* 70, 165-189.
87. Stoner, K. & Sánchez-Azofeifa, A. (2009). Ecology and regeneration of tropical dry forests in the Americas: implications for management. *Forest Ecology and Management* (258), 903-906.
88. Teegavarapu, R. (2010). Modeling climate change uncertainties in water resources management models. *Environmental Modelling y Software* (25), 1261-1265.
89. Téllez-Valdés, O., Vila-Aranda, P. & Lira-Saade, R. (2006). The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandifolia* var. *mexicana*, an important species of the cloud forest in Eastern Mexico. *Biodiversity and Conservation* (15), 1,095-1,107.
90. Toma, V. & Webster, P. (2010). Oscillations of the Intertropical Convergence Zone and the genesis of easterly waves Part II: numerical verification. *Climate Dynamics* (34), 605-613.
91. Tomer, M. & Schiling, K. (2009). A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. *Journal of Hydrology* (376), 24-33.
92. Van Zonneveld, M., Jarvis, A., Dvroak, W., Lemma, G. & Leibin, C. (2009). Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in Mexico and Central America. *Forest Ecology and Management* (257), 1566-1576.
93. Varis, O., Kajander, T. & Lemmel, R. (2004). Climate and water: from climate models to water resources management and viceversa. *Climatic Change* (66), 321-344.
94. Wasswenaar, T., Gerbera, P., Vergurg, M., Rosalesa, M., Ibrahimc, M. & Steinfelda, H. (2007). Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture



- expansion into forest. *Global environmental change* (17), 86–104.
95. Waylen, P., Quesada, M. & Caviedes, C. (1994). The effects of El Niño-Southern Oscillation on precipitation in San José, Costa Rica. *International Journal of Climatology* 14, 559-568.
96. White, A., Cannel, M. G. & Friend, A. (1999). Climate change impacts on ecosystems and the terrestrial carbon sink: a new assessment. *Global environmental change* (9), S21-S30.
97. Whyte, F., Taylor, M., Stephenson, T. & Campbell, J. (2008). Features of the Caribbean low level jet. *International Journal of Climatology* (28), 119–128.
98. Wright, J. (2005). Tropical forests in a changing environment. *Trends in ecology and evolution* 20 (10), 553-559.





Anexos

Anexos

El anexo presenta una serie de mapas climáticos para las variables temperatura y precipitación anual, de acuerdo con los escenarios de predicción A2 y B2 del IPCC para los años 2020, 2050 y 2080. Los escenarios se obtuvieron, como se indicó en la segunda parte de este documento, del modelo HCCPR HADCM3 elaborado por el Centro Hadley de Inglaterra (Hadley Centre for Climate Prediction and Research Inglaterra) y procesado con los algoritmos del WorldClim, lo cual permite obtener un mapa con resolución espacial de 1 km² por píxel.

Estos mapas fueron la base para la elaboración de los mapas de las zonas de vida en los escenarios y años indicados, y también aportan información valiosa sobre el comportamiento de

las variables en los distintos escenarios y años estudiados.

El anexo 1 presenta los mapas con las variables anuales, obtenidos de las capas mensuales de cada variable, escenario y año del modelo utilizado. Las leyendas incluyen las variaciones de temperatura y precipitación, así como sus respectivos valores máximos y mínimos.

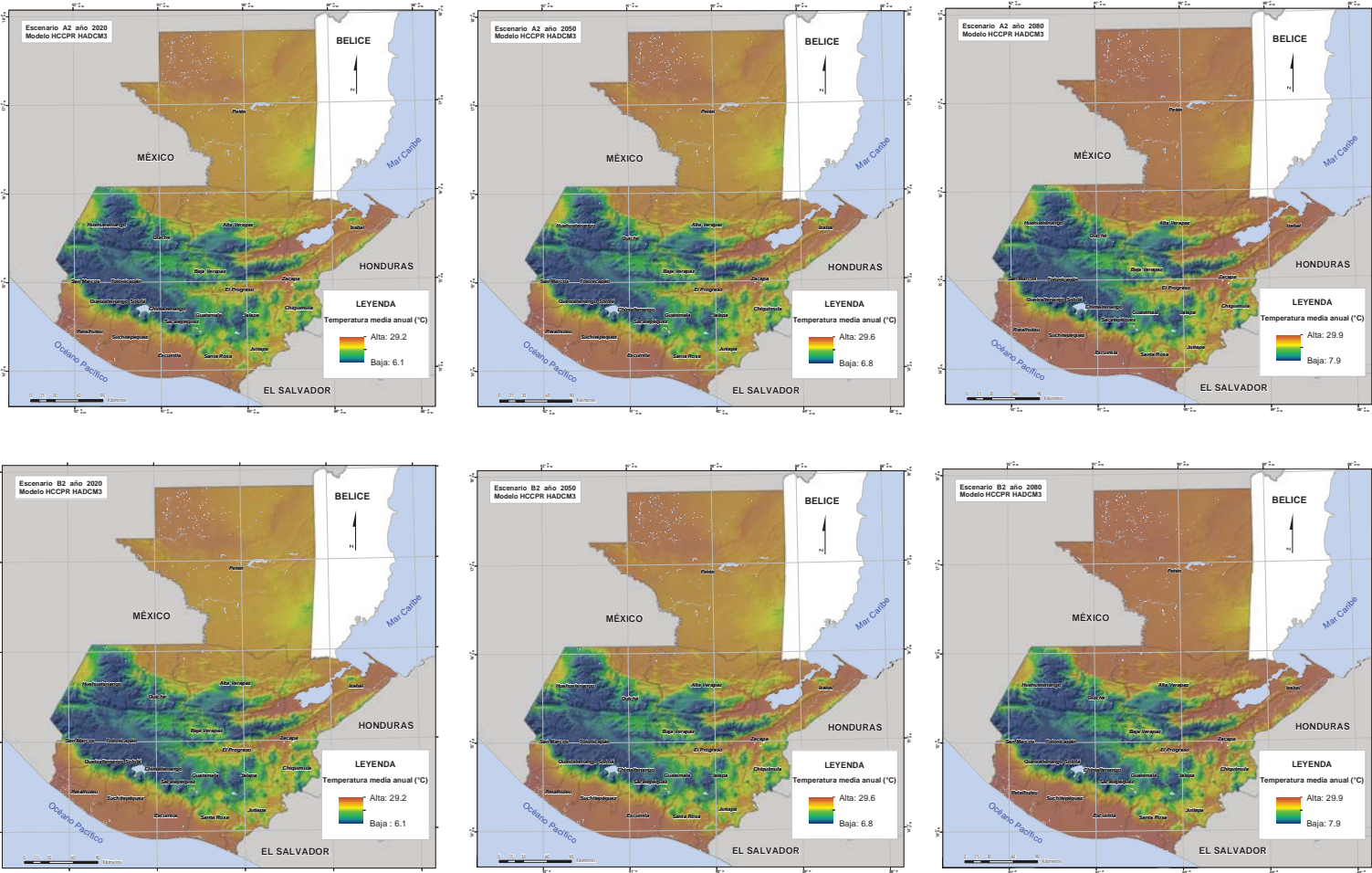
El anexo 2 presenta una comparación visual de los datos de temperatura y precipitación actuales con cada variable de los escenarios estudiados. Se muestran las zonas de incremento de temperatura (en porcentaje) y las zonas de disminución de precipitación (también en porcentaje).



Anexo 1 Mapas de temperatura y precipitación para los escenarios A2 y B2. Años 2020, 2050 y 2080

Anexo 1.1

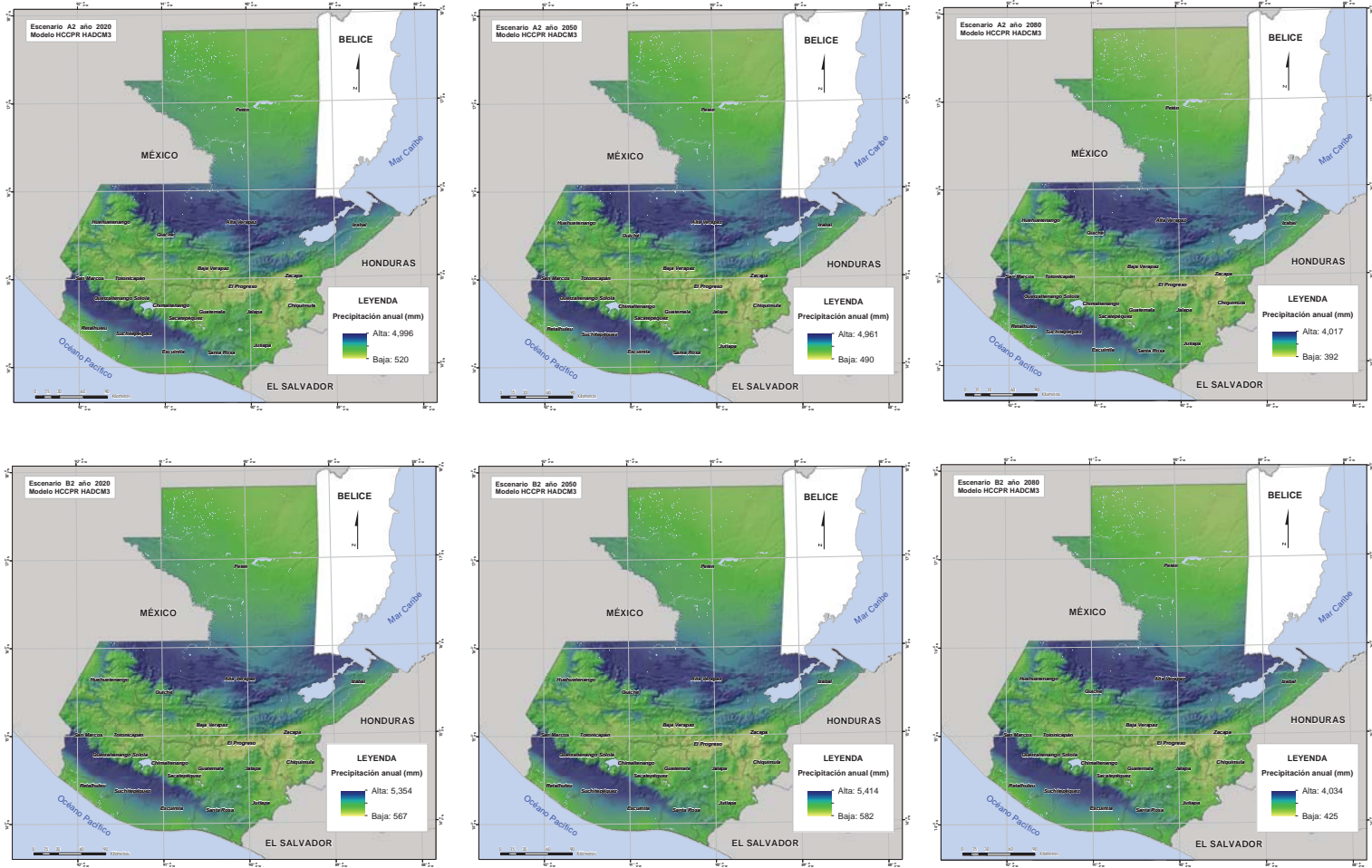
Temperatura media anual de acuerdo con el escenario A2 y B2. Años 2020, 2050 y 2080



Fuente: Elaboración propia

Anexo 1.2

Precipitación anual de acuerdo con el escenario A2 y B2.
 Años 2020, 2050 y 2080



Fuente: Elaboración propia

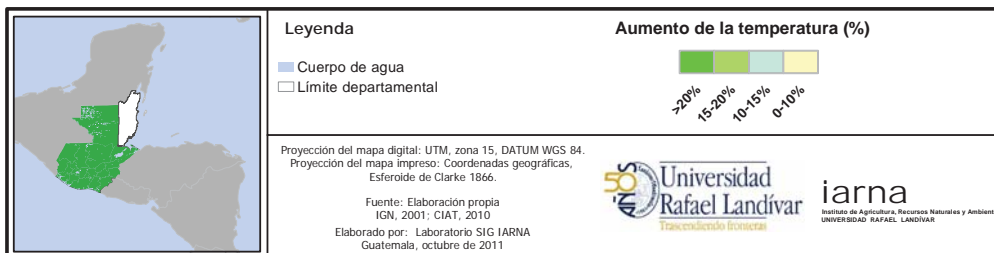
Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico.
 Cambio climático y biodiversidad.

Anexo 2

Comparación de cambios de temperatura y precipitación entre los datos actuales y los escenarios A2 y B2. Años 2020, 2050 y 2080

Anexo 2.1

Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario A2, año 2020



Fuente: Elaboración propia



Anexo 2.2

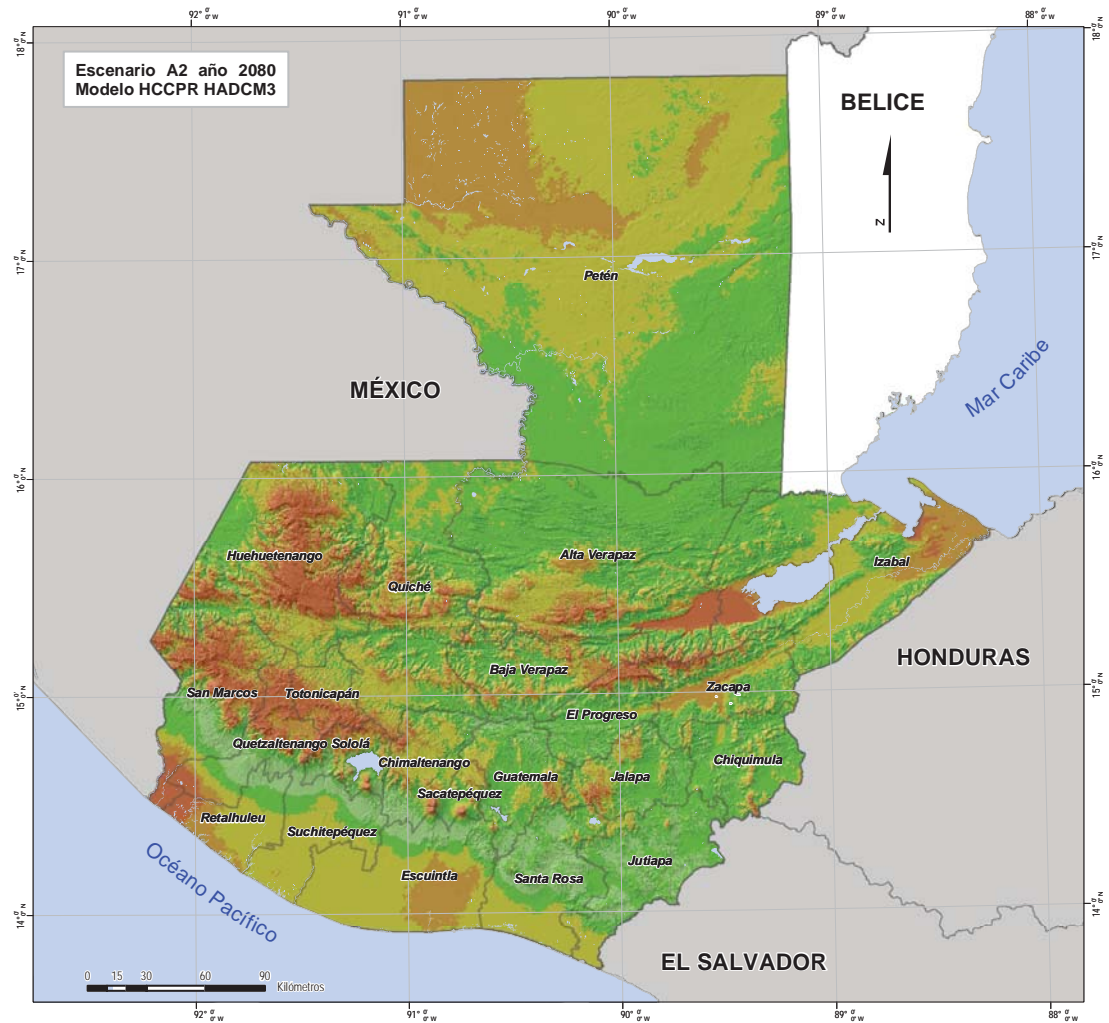
Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario A2, año 2050



| | | |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| | Leyenda Cuerpo de agua Límite departamental | Aumento de la temperatura (%) |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001; CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011 | |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.3 Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario A2, año 2080



Legenda

- Cuerpo de agua
- Límite departamental

Aumento de la temperatura (%)

Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84.
Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866.

Fuente: Elaboración propia
IGN, 2001; CIAT, 2010

Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA
Guatemala, octubre de 2011

iarna

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR

Fuente: Elaboración propia



Anexo 2.4

Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario B2, año 2020



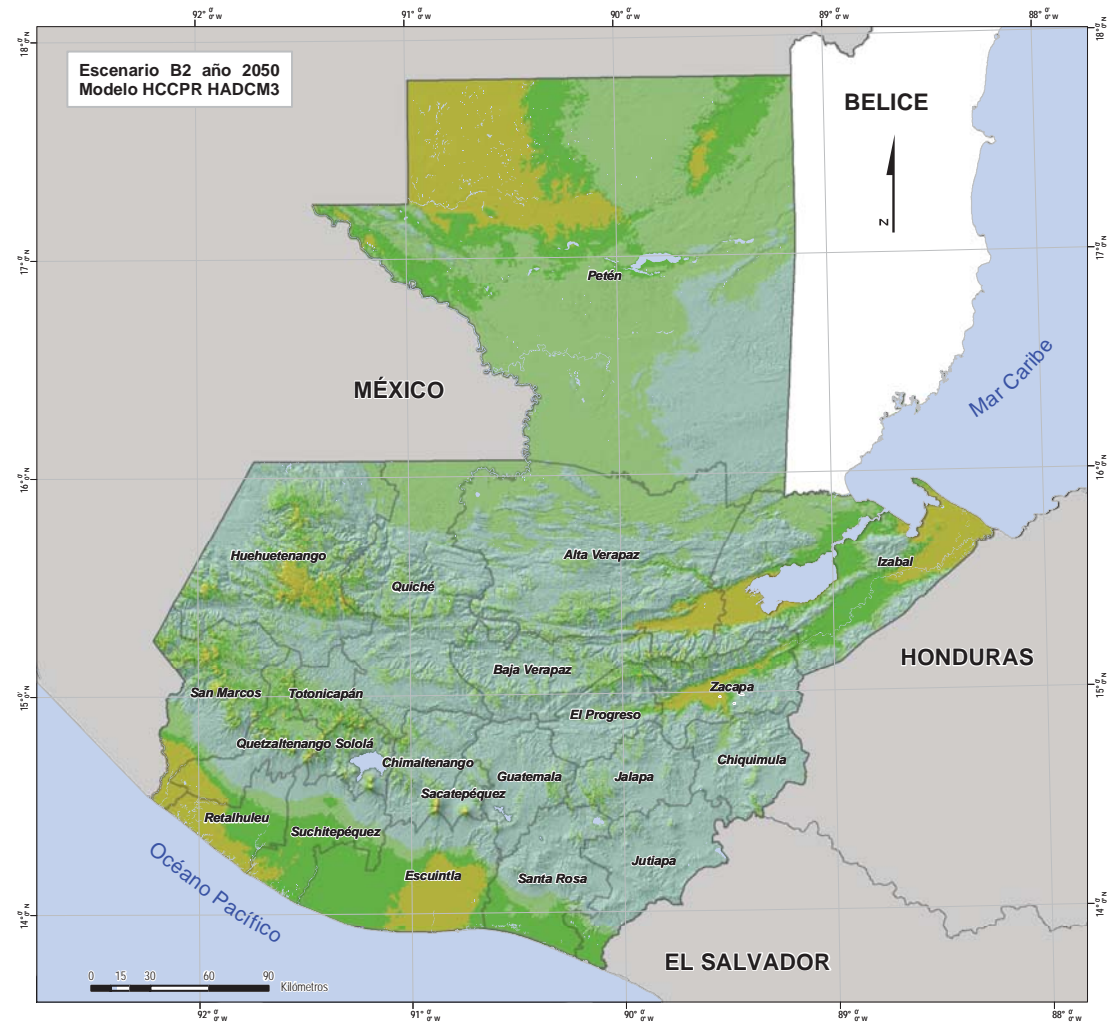
| | | |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| | Legenda Cuerpo de agua Límite departamental | Aumento de la temperatura (%) |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001; CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011 | |

Fuente: Elaboración propia



Anexo 2.5

Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario B2, año 2050



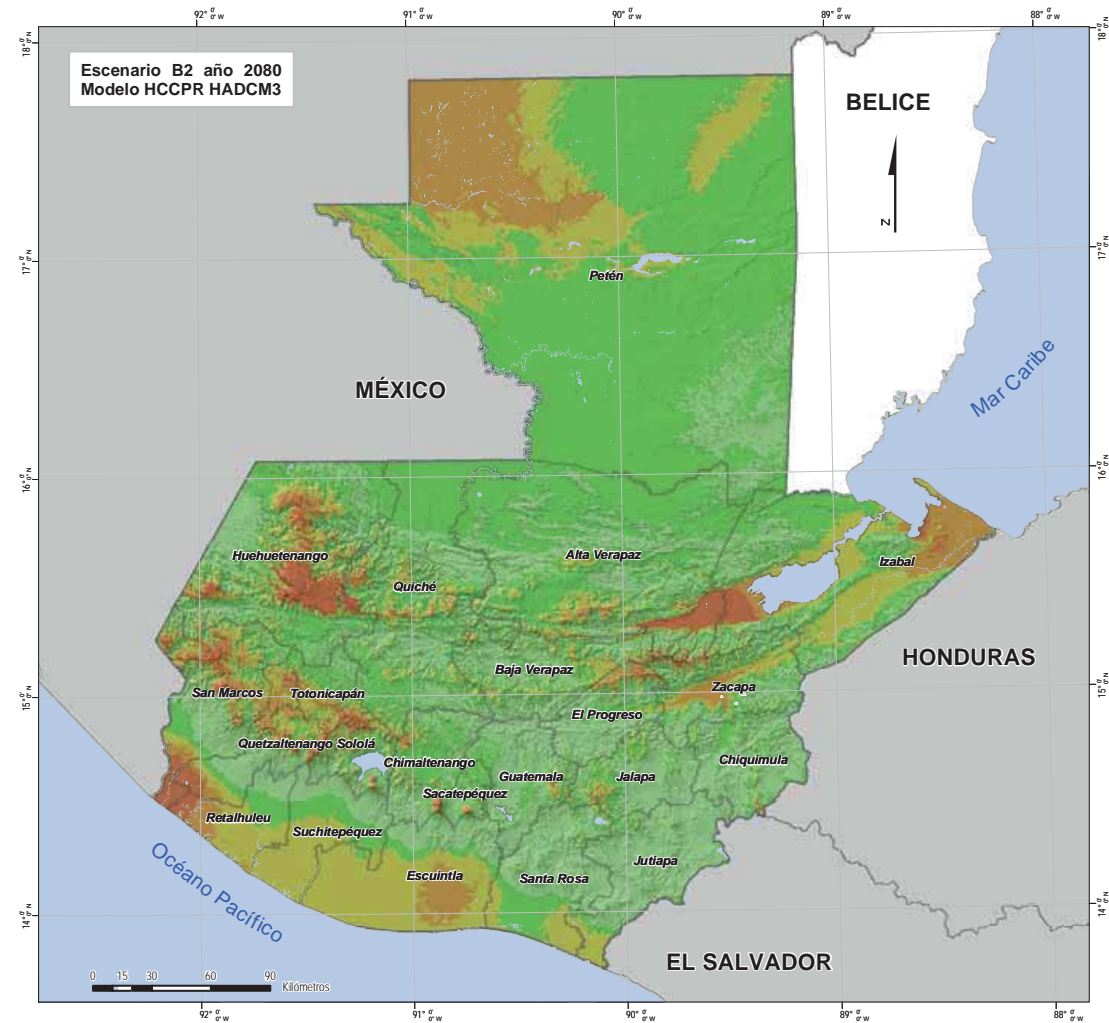
| | | |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| | Leyenda Cuerpo de agua Límite departamental | Aumento de la temperatura (%) |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001; CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011 | |

Fuente: Elaboración propia



Anexo 2.6

Aumento de la temperatura, de acuerdo con el escenario B2, año 2080



| | | |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| | Legenda Cuerpo de agua Límite departamental | Aumento de la temperatura (%) |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001; CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011 | |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.7

Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario A2, año 2020



| | | |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Legenda Cuerpo de agua Límite departamental | Disminución de la precipitación (%) 0-5% 5-10% >10% |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001; CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011 | |
| | | Universidad Rafael Landívar Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente <small>UNIVERSIDAD RAFAEL LANDIVAR</small> |

Fuente: Elaboración propia



Anexo 2.8

Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario A2, año 2050

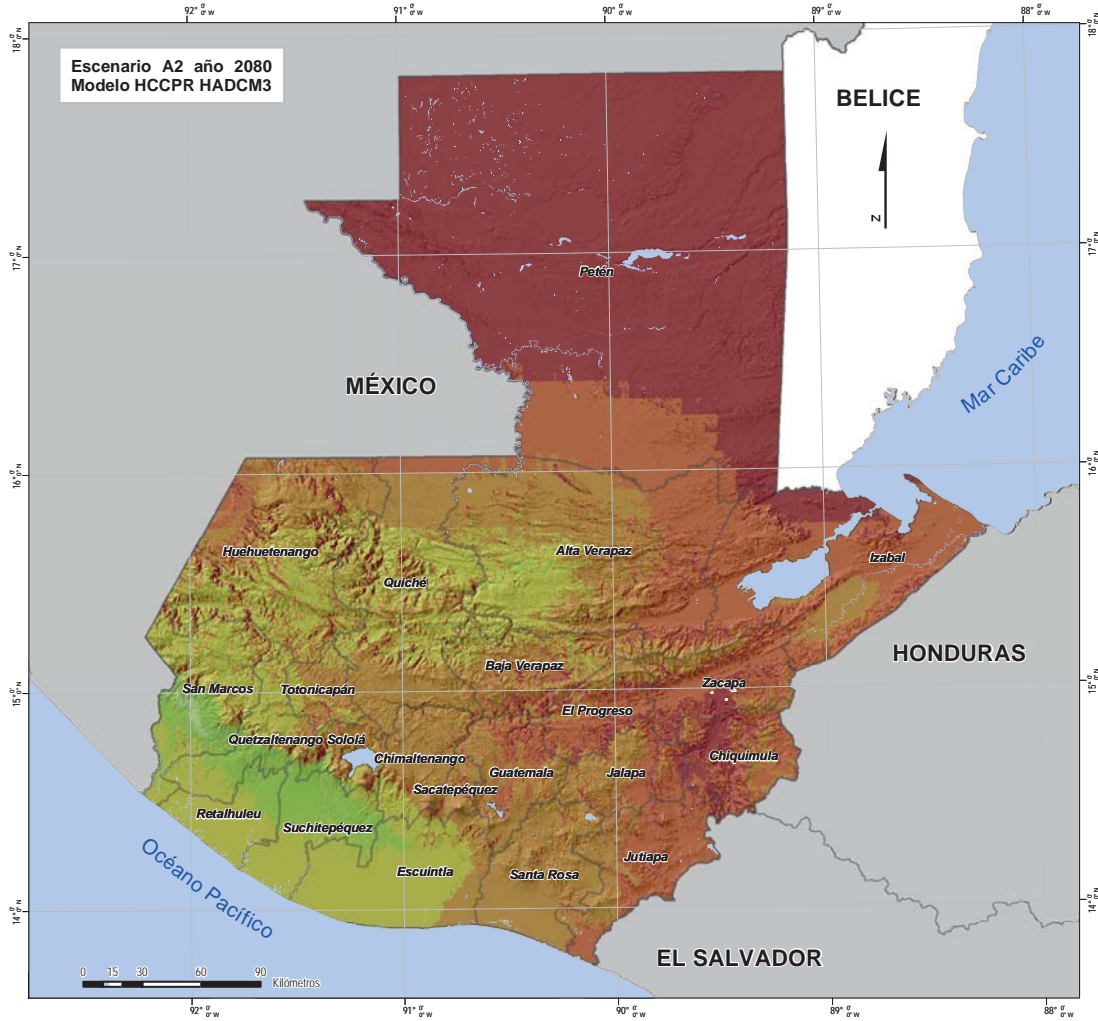


| | | |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| | Legenda Cuerpo de agua Límite departamental | Disminución de la precipitación (%) |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001; CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011 | |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.9

Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario A2, año 2080



| | | |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| | Legenda Cuerpo de agua Límite departamental | Disminución de la precipitación (%) |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001; CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011 | |

Fuente: Elaboración propia



Anexo 2.10

Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario B2, año 2020



| | | |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Leyenda Cuerpo de agua Límite departamental | Disminución de la precipitación (%) -10.0% 0.5% -5% (El valor negativo indica un aumento en el porcentaje de lluvias) |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001; CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011 | |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2.11

Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario B2, año 2050



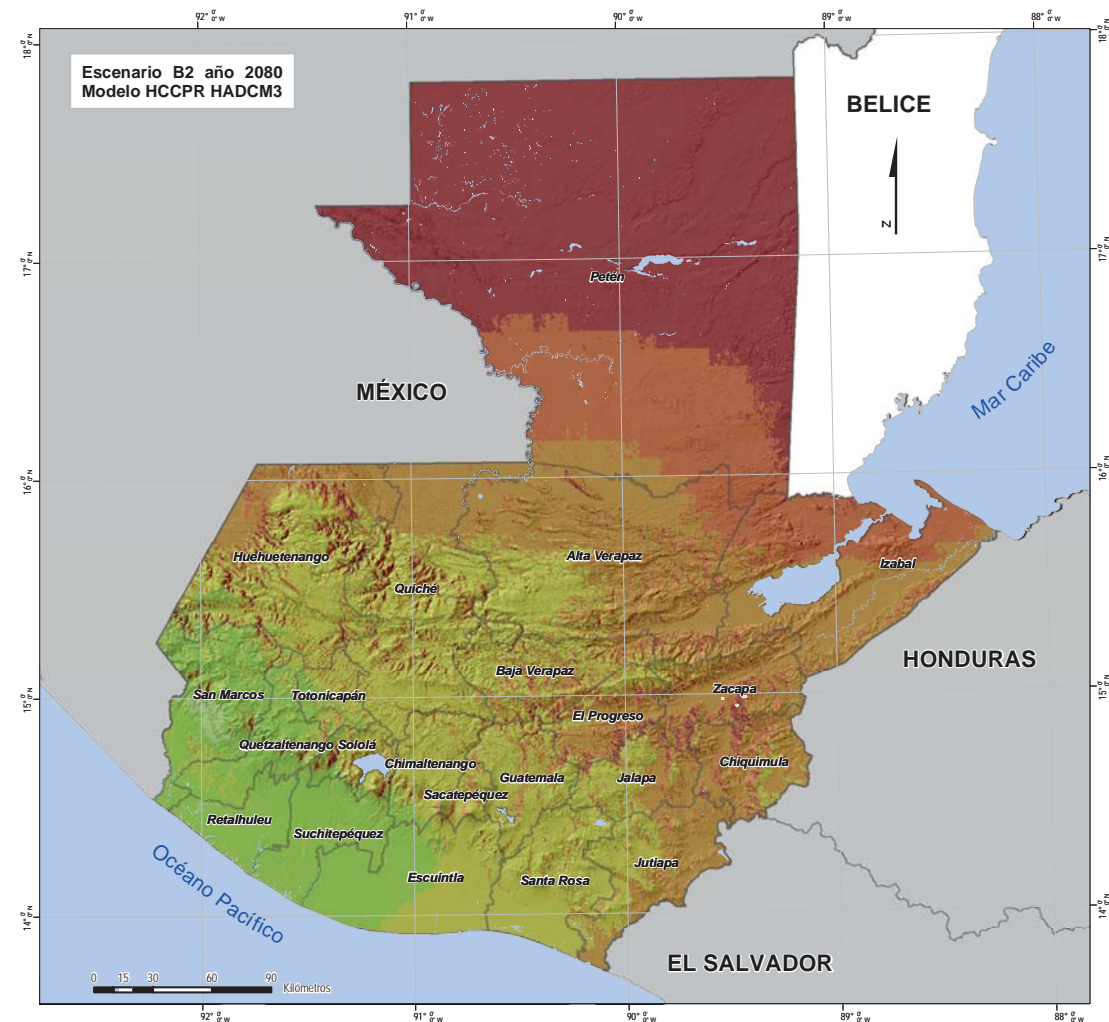
| | | |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Legenda Cuerpo de agua Límite departamental | Disminución de la precipitación (%) <small>(El valor negativo indica un aumento en el porcentaje de lluvias)</small> |
| | <small>Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001: CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011</small> | |

Fuente: Elaboración propia



Anexo 2.12

Disminución de la precipitación, de acuerdo con el escenario B2, año 2080



| | | |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| | Legenda Cuerpo de agua Límite departamental | Disminución de la precipitación (%) |
| | Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84. Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas, Esferoide de Clarke 1866. Fuente: Elaboración propia IGN, 2001; CIAT, 2010 Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, octubre de 2011 | |

Fuente: Elaboración propia

Acerca de esta publicación

La presente publicación tiene como objetivo proveer insumos para la elaboración de estrategias territoriales de adaptación al cambio climático, así como definir y evaluar la amenaza que constituye este fenómeno para la biodiversidad y ecosistemas críticos de Guatemala, en el contexto regional mesoamericano. Se describen, asimismo, los factores climáticos específicos que afectan esa biodiversidad y se sintetiza el estado actual del conocimiento científico acerca de aspectos climáticos y ecológicos, y cómo éstos se interrelacionan.

Otras publicaciones del IARNA

1. PROPIAS:

- **Serie Perfil Ambiental:** consta de las ediciones del *Perfil Ambiental de Guatemala*, cuyo objetivo es presentar el estado de los recursos naturales y las condiciones ambientales del país.
- **Serie técnica:** tiene como objetivo difundir estudios, resultados de investigaciones, compilaciones y otro tipo de material relacionado con agricultura, recursos naturales y ambiente.
- **Serie educativa:** tiene como objetivo divulgar información sobre agricultura, recursos naturales y ambiente, a través de material de apoyo para el sector docente, o bien, material mediado pedagógicamente para lectores de todo nivel.
- **Serie divulgativa:** incluye materiales promocionales e informativos, a través de los cuales se da a conocer el quehacer del Instituto, o bien se divulgan temas particulares relacionados con agricultura, recursos naturales y ambiente; editados para lectores de todo nivel.
- **Artículos:** publicados en revistas nacionales e internacionales.

2. COMPARTIDAS:

- **Boletines de prensa:** estudios publicados en medios de comunicación escrita (insertos), relacionados con la temática ambiental, la agricultura y los recursos naturales.
- **IARNA-otros autores (coediciones):** contiene documentos elaborados, en conjunto, por el IARNA y otras instituciones, con la finalidad de reproducir información relevante acerca de investigaciones, estudios o temas de actualidad sobre agricultura, recursos naturales y ambiente.

Impresión gracias
al apoyo de:



Reino de los Países Bajos

iarna

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

Campus Central
Vista Hermosa III, zona 16
Edificio Q, oficina 101
01016 Guatemala, C.A.
Apartado postal 39-C
Teléfono: (502) 2426 2559
ó 2426 2626
Ext. 2657
Ext. Fax: 2649
iarna@url.edu.gt

www.url.edu.gt/iarna
www.infoiarna.org.gt

Suscríbese a la Red iarna:
red_iarna@url.edu.gt

ISBN: 978-9929-587-45-8



9 789929 587458