

Vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos hidrológicos al cambio climático en Mesoamérica

Vulnerability of hydrological ecosystem services to climate change in Mesoamerica

Pablo Imbach¹, Luis Molina², Bruno Locatelli³, Lenin Corrales⁴

¹Programa Cambio Climático, CATIE, Turrialba, Costa Rica. E-mail: pimbach@catie.ac.cr

²Programa Cambio Climático, CATIE, Turrialba, Costa Rica. E-mail: lmolina@catie.ac.cr

³CIRAD UPR Forest Policies–CIFOR ENV Program, P.O. Box 0113 BOCBD, 16000 Bogor, Indonesia.

⁴The Nature Conservancy (TNC)–Climate Change Science, P.O. Box 230-1225, San José, Costa Rica.

Resumen

El cambio climático modificará el régimen hidrológico global debido a alteraciones en la distribución y magnitud de la precipitación y temperatura, y su interacción con las condiciones físicas y de vegetación de cada lugar. Estos cambios afectarán los ecosistemas y sus funciones, modificando la provisión de servicios hidrológicos para la sociedad.

Aunque la región mesoamericana es altamente dependiente de la provisión de servicios hidrológicos de los ecosistemas, existe información limitada sobre los impactos del cambio climático en estos servicios. La generación de esta información es un primer paso para que la planificación de la adaptación al cambio climático reconozca el manejo de los ecosistemas y sus servicios como medida de reducción de la vulnerabilidad social.

El artículo presenta una revisión de literatura sobre los servicios hidrológicos y los potenciales impactos del cambio climático en nuestra sociedad, así como una guía para el diseño de estudios que permitan generar este conocimiento a una escala adecuada para la toma de decisiones en la región mesoamericana.

Palabras clave: cambio climático, Mesoamérica, servicios ecosistémicos hidrológicos

Abstract

Climate change will modify the global hydrological regime due to alterations in the distribution and magnitude of precipitation and temperature and its interaction with physical and vegetation conditions on each site. These changes will affect ecosystems and their functions, modifying the provision of hydrological services for society.

Although the Mesoamerican region is highly dependent on the provision of hydrological ecosystem services, information on the impacts of climate change on these services is still limited. Generating information is a first step towards planning adaptation that recognizes the management of ecosystems and their services as a measure for reducing social vulnerability.

The article presents a literature review on hydrological services and the potential impacts of climate change in our society, as well as a guide for designing studies that can generate information at an adequate scale for decision making in the Mesoamerican region.

Keywords: climate change, hydrological ecosystem services, Mesoamerica

1. Introducción

Los ecosistemas terrestres proveen una gran variedad de funciones hidrológicas importantes para el bienestar humano. Estas funciones se convierten en bienes y servicios ecosistémicos cuando son valoradas por el ser humano (de Groot et al. 2002; Limburg et al. 2002) y el desarrollo de la sociedad es dependiente de la provisión sostenida de estos servicios (MEA 2003).

Los servicios hidrológicos incluyen la regulación de caudales para mitigar inundaciones, la recarga de acuíferos que mantienen caudales en la época seca, la purificación de agua y el control de la erosión (MEA 2003). Existen cuantificaciones económicas de los servicios hidrológicos tanto a escalas globales, regionales y locales que sirven para estimar la magnitud de nuestra dependencia (Costanza et al. 1997; Guo et al. 2000; Woodward y Wui 2001; Pattanayak 2004).

Los regímenes hidrológicos serán potencialmente afectados por el cambio climático debido a una combinación de impactos sobre la distribución y funciones de los ecosistemas, cambios en los patrones y la variabilidad de la temperatura y precipitación (Arnell 2003). Estos cambios, combinados con cambios en los patrones de desarrollo (por ejemplo, crecimiento poblacional y desarrollo económico), van a modificar la provisión de servicios hidrológicos a la población en Mesoamérica. De esta manera, se espera que en algunas regiones exista un incremento y en otras una reducción en la provisión de agua para la población (Arnell 2004).

El objetivo de este artículo es presentar elementos relacionados con los impactos potenciales del cambio climático sobre los ecosistemas y sus servicios hidrológicos, con énfasis en los métodos y modelos disponibles.

2. Cambio climático y el régimen hidrológico

A escala global, el aumento de la temperatura hace que aumente la evaporación hacia la atmósfera y la capacidad de carga de agua de la misma, esto hace que el ciclo hidrológico se acelere. El caudal de los ríos o nivel de lagos, lagunas y humedales dependerán principalmente de los cambios en la cantidad, estacionalidad e intensidad de la precipitación. Otros factores como la humedad atmosférica, la velocidad del viento y la radiación afectarán la tasa de evaporación y se combinarán con los cambios de precipitación (en cantidad y distribución temporal) para resultar en impactos sobre los caudales de los ríos. El impacto dependerá también de las características hidrogeológicas, fisiográficas y de recarga de aguas subterráneas (Kundzewicz et al. 2007). Arnell (2003) estudió a escala global el impacto de un escenario de emisiones en el caudal de ríos y encontró resultados opuestos (aumento o disminución del caudal) según el Modelo de Circulación General (MCG) utilizado. Kundzewicz et al. (2007) concluye que los cambios vendrán como un incremento en la estacionalidad de los caudales, con caudales mayores en la época lluviosa y una época seca o de flujo base más extensa. Sin embargo, ninguno de los estudios analizados por Kundzewicz et al. (2007) se realizaron en Mesoamérica.

Se conoce poco de los impactos del cambio climático en las aguas subterráneas. Estos dependen más de cambios en la precipitación que de la temperatura, a menos que sean acuíferos superficiales durante períodos cálidos (Kundzewicz et al. 2007). El tipo de conexión entre acuíferos y aguas superficiales puede hacer que la recarga de los mismos sea más afectada por los niveles de aguas de los ríos que por las tasas de recarga de los mismos. En las zonas semi-áridas y áridas, el incremento en las inundaciones y eventos intensos de precipitación pueden hacer que aumente la recarga de los acuíferos (Kundzewicz et al. 2007). En la región existen estudios localizados sobre la interacción entre las aguas subterráneas y la precipitación (Zadroga 1981; Heyman y Kjerfve 1999; Guswa et al. 2007) y efectos de la extracción de agua de los mismos (Calderon Palma y Bentley 2007).

La calidad del agua que se encuentra en los lagos y reservorios será afectada por el aumento de temperatura y su efecto en el ciclo del oxígeno, estratificación de los lagos, tasas de intercambio de gases, potencial redox y biota en general. En los ríos será disminuida su capacidad de biodegradación que se combinará con un aumento en el flujo de nutrientes, toxinas y patógenos producto del aumento en la intensidad de la precipitación (Kundzewicz et al. 2007). Los impactos en intrusión salina y salinización de aguas subterráneas serán fuertes debido a aumentos en el nivel del mar y de la evapotranspiración respectivamente (Kundzewicz et al. 2007).

Los impactos en las tasas de erosión dependerán de los cambios en la intensidad de la precipitación. Sin embargo, no existen muchos estudios sobre cambios en las tendencias pasadas de este fenómeno. Sería difícil de separar la señal del cambio climático del efecto que tiene el cambio de uso del suelo en el mismo (Kundzewicz et al. 2007), aunque existen esfuerzos en la región para tratar de cuantificar la dimensión y distribución del mismo (Kim et al. 2005; Luijten et al. 2006)

3. El caso de la región mesoamericana

La región Mesoamericana ha experimentado en los últimos años cambios en su clima. Aguilar et al. (2005) reportan, para el periodo 1961–2003, una tendencia al calentamiento de la región con un aumento en la ocurrencia de extremos cálidos máximos y mínimos combinado con un decrecimiento de eventos extremos fríos. La cantidad total de precipitación no ha mostrado cambios, sin embargo, se presenta en eventos lluviosos más intensos (Malhi y Wright 2004; Aguilar et al. 2005).

Mesoamérica es una de las regiones tropicales que será más afectada en el futuro por el cambio climático (Giorgi 2006). Bajo el escenario de emisiones A1B y usando el promedio de 21 MCG, se observan las tendencias futuras de precipitación y temperatura para el fin del siglo. En general, estas tendencias muestran un aumento en la temperatura con una certidumbre y magnitud que se intensifica del sur a norte. La precipitación anual se reducirá en los países al norte de Costa Rica, con menor convergencia entre los modelos en los casos de Costa Rica y Panamá. El cambio será más pronunciado para ambas variables en el trimestre de junio-agosto (Christensen et al. 2007). Rauscher et al. (2008), bajo el mismo escenario y para la segunda mitad del siglo, encuentra que la sequía de medio-verano o canícula se verá intensificada, con reducciones en la precipitación del 20% para los países al norte de Costa Rica, y hasta un 25% en algunas partes de Honduras, Guatemala y El Salvador. Este fenómeno es una de las señales más consistentes en el conjunto de modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP3, por sus siglas en inglés) a escala global (Neelin et al. 2006). La Figura 1 muestra escenarios de precipitación y temperatura de los datos multi-modelo de la fase 3 del Proyecto CMIP3 del Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP, por sus siglas en inglés)¹.

4. Vulnerabilidad y adaptación de la sociedad a problemas de acceso al agua

La vulnerabilidad actual de la sociedad a los cambios en recursos hídricos se verá exacerbada en el futuro por la acción combinada de un incremento en la demanda del recurso debido al aumento de la población y condiciones más secas en muchas cuencas de la región (Magrin et al. 2007). En la región mesoamericana tanto el sector de producción de hidroenergía como de provisión de agua potable son vulnerables a la reducción de la precipitación,

¹ Agradecemos las contribuciones del Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) y el WCRP's Working Group on Coupled Modelling (WGCM) por facilitar los datos del multi-modelo CMIP3 de WCRP. Estos datos son financiados por la Oficina de Ciencia del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América. Department of Energy.

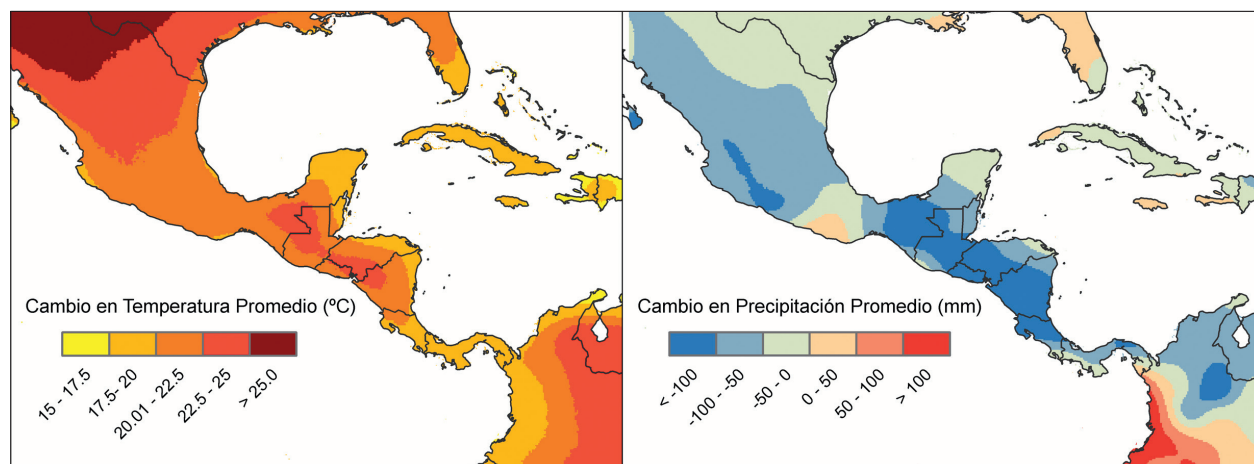


Figura 1. Cambios en la temperatura promedio ($^{\circ}\text{C}$, izquierda) y cambios en la precipitación promedio (mm, derecha) proyectados para el periodo 2080-2100 en Mesoamérica utilizando la simulación de 48 MCG atmósfera-océano (MCGAO) para un escenario de bajas emisiones (B1 o estabilización de 550 ppm de CO_2 atmosférico). (Fuente: Meehl et al. 2007).

tal como ocurrió durante la sequía del año 2001. Esta vulnerabilidad se debe a un efecto sinérgico entre la reducción de la precipitación y la reducción en la capacidad de reserva de los embalses, debido a la acumulación de sedimentos producto de procesos erosivos, con impactos para la producción de energía y el consumo humano (CEPAL 2002). Esto tiene implicaciones importantes para los países en el corto plazo para el suministro de agua y energía (de la cual un porcentaje significativo proviene de esta fuente) y también a largo plazo debido a las inversiones que han realizado los países en infraestructura para la producción de esa energía (Kaimowitz 2005). En general, la percepción de la vulnerabilidad futura de los países mesoamericanos proviene de cambios en la cantidad y distribución temporal del recurso hídrico, esto ligado a la variabilidad climática de la región y la frecuencia de desastres naturales. Bajo diferentes escenarios de cambio climático se espera en algunas zonas una reducción en la disponibilidad del recurso, con impactos en la producción de electricidad, cultivos alimenticios y suministros de agua potable. En otras zonas el problema será debido a inundaciones y fenómenos relacionados con precipitaciones intensas. En Nicaragua, por ejemplo, se identifican problemas de calidad de agua tanto para consumo humano, uso agrícola a través de riego y producción de electricidad (SICA 2002).

La adaptación a riesgos en el sector hídrico según Bergkamp et al. (2003) se debe enmarcar en tres ejes prioritarios. El primero, buscar reducir la vulnerabilidad de la sociedad a eventos hidrometeorológicos e incrementos en su variabilidad, principalmente sequías e inundaciones. El segundo, busca restaurar los ecosistemas para recuperar la provisión de servicios ecosistémicos que reducen la vulnerabilidad social al cambio climático. Finalmente, el tercero se refiere a cerrar la brecha que existe entre la oferta y la demanda de los recursos hídricos.

El potencial que tienen los ecosistemas para reducir la vulnerabilidad social al cambio climático está escasamente representado en las políticas de los países de la región (Pérez et al. 2008). Sin embargo, el enfoque de adaptación basada en ecosistemas ya se promueve a nivel nacional e internacional (Locatelli y Kanninen 2009a). Esta alternativa para la adaptación podría ser importante para las metas regionales de desarrollo del sector hídrico establecidas en la Declaración de San José (OMM 1996) y las metas globales como las Metas de Desarrollo del Milenio (UN 2000).

5. El rol de los servicios hidrológicos

Los servicios hidrológicos incluyen diversos servicios (Daily et al. 1997; de Groot et al. 2002) y según Brauman et al. (2007), se pueden dividir en cinco categorías:

- Mejora en la disponibilidad y calidad de agua para extracción con fines de uso residencial, agrícola, industrial y comercial
- Mejora en la disponibilidad y calidad de agua en los ríos y cuerpos de agua para la producción de hidroenergía, la recreación, el transporte y la producción de peces de agua dulce
- Reducción del impacto de eventos hidrológicos como los daños causados por las crecientes e inundaciones, la erosión, la sedimentación, la intrusión de agua salada en los acuíferos y la salinización de tierras en zonas secas
- Servicios culturales como los usos espirituales, la apreciación estética y el turismo
- Servicios de soporte que no son servicios usados directamente por los seres humanos pero que contribuyen a la provisión de otros servicios ecosistémicos. Por ejemplo, la provisión de agua para el mantenimiento a largo plazo de la biodiversidad relacionada o dependiente de hábitats acuáticos

La Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA 2005) hace una síntesis global del status de la provisión de los servicios ecosistémicos y encuentra que la provisión de agua para consumo humano, riego e industria ha decrecido, aunque la cantidad de agua para la producción de energía se mantiene constante con una mejoría en la capacidad de aprovecharla debido a las represas. Los servicios de regulación como control de la erosión, purificación del agua y regulación de amenazas naturales (amortiguadores naturales como humedales y manglares) se han deteriorado. En el caso de la regulación del flujo del agua, su condición es variable dependiendo de su ubicación y cambios en el ecosistema.

Kaimowitz (2005) y Vignola (2009b) hicieron una revisión acerca de los mitos que existen relacionados a la provisión de ciertos servicios por los ecosistemas boscosos, en particular sobre sus efectos en la cantidad de precipitación (incluyendo los bosques nubosos), incremento en la cantidad de agua, control de inundaciones, regulación del caudal base, deslizamientos y sedimentos. Como un ecosistema dado no puede proveer todos los servicios hidrológicos de manera óptima, es importante analizar la compensación entre servicios ecosistémicos tomando en cuenta la capacidad de los ecosistemas de proveer diferentes servicios y el rol de estos servicios para la sociedad.

Para el caso mesoamericano se han hecho estudios sobre la importancia de los ecosistemas para algunos sectores de la sociedad (González et al. 2008; Leguía et al. 2008a; Leguía et al. 2008b). Sin embargo, hace falta analizar el rol de los ecosistemas en la reducción de la vulnerabilidad al cambio climático de manera que se integren en las estrategias de adaptación.

6. Impacto del cambio climático sobre los servicios hidrológicos

Los ecosistemas son vulnerables al cambio climático y a otras presiones antrópicas como la degradación de tierras, cambio de uso del suelo y contaminación. Algunas de estas presiones pueden actuar en sinergia y tienen consecuencias sobre la diversidad de los ecosistemas y sus procesos ecológicos. Esto a su vez tiene un impacto

en los servicios ecosistémicos que estos proveen, sin embargo, algunas de estas relaciones todavía requieren conocerse (Sala et al. 1999). El cambio climático puede afectar directamente las características funcionales (p.e. Fearnside 2004) y estructurales (p.e. Weng y Zhou 2006) de los ecosistemas, así como sus dinámicas (p.e. Goldammer y Price 1998). La amenaza más importante depende de cada ecosistema y la función o servicio específico de interés (p.e. Sala et al. 2000 para la biodiversidad), además de las condiciones del ecosistema y su entorno. En lugares donde la deforestación tiene tasas muy bajas, otras amenazas como el cambio climático pueden ser las más importantes para la provisión de los servicios ecosistémicos.

Los servicios hidrológicos se pueden ligar a ciertos atributos que son modificados por procesos ecohidrológicos de los ecosistemas. Brauman et ál. (2007) ordenan estos atributos en cuatro clases y Krauze y Wagner (2007) proporcionan algunos ejemplos:

- **Cantidad:** se refiere al flujo y almacenamiento de agua subterránea y superficial determinado por la interacción con el clima local y el consumo de agua por la vegetación; con potenciales efectos sobre el agua total disponible
- **Calidad:** se refiere a los flujos de patógenos, nutrientes, salinidad y sedimentos determinados por la capacidad de infiltración de la vegetación, estabilización del suelo y procesos bioquímicos de los ecosistemas
- **Ubicación del recurso:** se refiere a la disponibilidad de agua a nivel superficial o subterráneo, en las partes altas o bajas de la cuenca y dentro o fuera del curso de los ríos. Está determinada por la vegetación y los suelos, las propiedades superficiales del suelo o las propiedades de los bancos en los ríos
- **Temporalidad:** se refiere a los picos de caudales, los caudales de base y la velocidad de los caudales, que afectan el caudal de los ríos durante la época seca, la intensidad o frecuencia de las inundaciones y el potencial de eutrofización de las aguas. Está determinada por el almacenamiento de agua en el corto o largo plazo en los ecosistemas, la estacionalidad en el uso del agua por los ecosistemas y el control del flujo de agua (por ejemplo, la infiltración)

El impacto del cambio climático en estos atributos hidrológicos dependerá en parte del impacto directo en los ecosistemas. Dudley (1998) propone una tipología de impactos posibles sobre ecosistemas forestales:

- **Perturbación:** a las perturbaciones actuales, principalmente humanas, se podrían sumar perturbaciones por eventos extremos como tormentas y por cambios graduales en patrones de lluvias o temperaturas, que impactarían el funcionamiento, la composición y la estructura del bosque (Condit 1998)
- **Simplificación:** dado el crecimiento lento y las bajas capacidades de migración de los árboles en comparación con otras plantas, el cambio climático podría favorecer las especies de crecimiento rápido, de ciclo de vida corto (como las hierbas) e invasoras, lo que reducirá la biodiversidad de los bosques
- **Migración:** los ecosistemas se podrían mover, generalmente hacia los polos o hacia mayores alturas. Estudios en Costa Rica y Nicaragua (Halpin et al. 1995) mostraron que se van a mover las zonas climáticas asociadas a ciertos tipos de vegetación. Sin embargo, los movimientos reales dependerán de la capacidad de dispersión de las especies y de las barreras a la migración (Pearson 2006). Estos cambios de vegetación tienen implicaciones en el régimen hidrológico de un lugar

- **Reducción de edad:** los fuegos, los ataques de plagas, la migración y las otras perturbaciones causarían el reemplazo de bosques maduros por bosques más jóvenes, lo que tendría implicaciones importantes sobre la biodiversidad, ya que muchas especies se encuentran solamente en bosques adultos
- **Extinción:** algunos ecosistemas o especies podrían desaparecer por causa del cambio climático. En el bosque nuboso tropical de altura en Monteverde (Costa Rica), cambios en la elevación de las nubes ya ha causado la desaparición de varias especies de anfibios (Pounds et al. 1999)

Los servicios hidrológicos podrían ser afectados a raíz de cambios en las funciones hidrológicas de los bosques, tales como la intercepción de lluvias o la infiltración en el suelo. Por ejemplo, el incremento de los incendios asociados con el aumento de las condiciones secas puede reducir el estrato superficial de sustancias orgánicas. Esto causaría menor infiltración y mayor escorrentía a nivel del bosque, y caudales mínimos o máximos más extremos a nivel de la cuenca (Townsend et al. 2004). Los cambios en ecosistemas impactarán también el servicio de regulación de la calidad del agua, especialmente en lo que concierne la concentración de elementos químicos o biológicos y el transporte de partículas sólidas (erosión).

En el caso mesoamericano es necesario profundizar sobre los potenciales impactos del cambio climático en la provisión de estos servicios ecosistémicos tanto a nivel local como regional, debido a los esfuerzos de integración de desarrollo existentes (por ejemplo, el Corredor Biológico Mesoamericano o el Plan Puebla Panamá) y el grado en que los recursos hídricos son compartidos y cuyos conflictos potenciales (Wolf et al. 2003) se podrían acentuar.

7. Métodos para estudiar el impacto del cambio climático sobre los servicios hidrológicos

Bonell (1998) destaca dos frentes de progreso en el modelaje hidrológico relacionado con el cambio climático. El primero se enfoca en usar los escenarios climáticos producidos por los MCG en modelos simples de balance hídrico o modelos de proceso más complejos. Este grupo enfrenta los problemas de incertidumbre y resolución de los MCG y trata de mejorar los modelos hidrológicos de proceso. El segundo trata de mejorar la identificación de parámetros de la superficie terrestre en los MCG. Actualmente muchos de estos estudios se basan en cambios en la climatología y no en cambios en la variabilidad climática (por ejemplo, eventos extremos), debido al reto de contar con la información necesaria de los MCG (Huntingford et al. 2006), aunque estos pueden ser cambios importantes desde la perspectiva hidrológica.

Los estudios deben incorporar no solo el cambio en los parámetros climáticos, sino también otros cambios que pueden ser significativos en los cambios en la provisión de los servicios hidrológicos (por ejemplo, cambio de uso del suelo) (Piao et al. 2007). También son importantes los cambios de la cobertura vegetal que ocurren en escalas de tiempo cortas (para los flujos de gases y de energía), intermedias (para el almacenamiento de agua y la fenología) y largas (para los disturbios y el crecimiento) (Foley et al. 2000).

Xu y Singh (2004) distinguen tres tipos de modelaje para evaluar los recursos hídricos bajo clima estático:

- Método del balance hídrico a largo plazo que evalúa la distribución de la precipitación entre la evapotranspiración y el caudal en los ríos a escala multi-anual. Este enfoque tiene la desventaja de no poder evaluar la disponibilidad del recurso a nivel estacional o mensual. En zonas secas, como el caudal es muy bajo, se presentan problemas debido a que los errores de estimación de la evapotranspiración y precipitación pueden ser mayores que los valores de caudales

- Modelos conceptuales agrupados que evalúan el balance hídrico de la cuenca considerando la humedad del suelo, generalmente a escala diaria o mensual, de manera que permite ver la estacionalidad del recurso. Tratan de simular los flujos entre los diferentes compartimentos de almacenamiento de agua. En estos modelos se simula la evapotranspiración usando ecuaciones simples de extracción de agua del suelo relacionadas a la evapotranspiración potencial. Métodos más recientes se apoyan también en índices de vegetación que reflejan el crecimiento de la vegetación y sus patrones (Fisher et al. 2008). Además se simulan los diferentes componentes de la escorrentía (componentes de flujo rápido o lento)
- Modelos hidrológicos espaciales asistidos por Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten evaluar cuencas grandes, modelar diferentes escenarios (por ejemplo, de cambio de uso del suelo) e impacto de fuentes contaminantes, por lo que tienen gran atractivo para trabajos de planificación. En estos entra en juego la resolución espacial asociada a los parámetros y ecuaciones del modelo. La cuenca se puede subdividir en celdas espaciadas equitativamente o en “unidades ecológicas de respuesta” que tienen respuestas con características similares

Bajo escenarios de clima futuro, se pueden aplicar tres tipos de métodos para evaluar los recursos hídricos (Xu y Singh 2004). El primero hace uso de los datos hidro-climáticos producidos por los MCG que tienen una resolución gruesa para muchas aplicaciones necesarias en una región como Mesoamérica. El segundo usa los datos de los MCG en modelos hidrológicos de macro-escala. El tercero considera modelos hidrológicos de macro-escala de tierra-superficie que se usan para mejorar modelos climáticos y meteorológicos y se usan acoplados a los MCG.

Un factor importante para la selección o construcción del modelo es la escala espacial y temporal del estudio, que depende de los objetivos del estudio. Otro factor se refiere a la disponibilidad de datos y los requerimientos de datos para identificar parámetros, calibrar y luego validar el modelo. Para los países de la región Mesoamericana esto puede ser una limitante debido a la diversidad y limitaciones en los datos disponibles.

Debido a la incertidumbre asociada a los escenarios de cambio climático (Santoso et al. 2008), es recomendable analizar varios modelos y escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero de manera que se cubra el rango de impactos posibles en el futuro. Este rango puede servir de base para una planificación robusta de la adaptación de los diferentes sectores asociados a los recursos hídricos. La mejora de la resolución espacial de los escenarios climáticos para su aplicación en modelos hidrológicos para Mesoamérica, es posible por varios métodos: la interpolación simple, métodos estadísticos de reducción de escala y modelos climáticos regionales (Santoso et al. 2008) de los cuales existen diversas experiencias en América (Marengo 2009).

Un modelo con potencial aplicación para la región mesoamericana es el Sistema de Mapeo Atmósfera-Planta Suelo (MAPSS, por sus siglas en inglés) (Neilson 1995). Este es un modelo estático atmósfera suelo-vegetación (SVAT, por sus siglas en inglés) que tiene el propósito de mapear cambios potenciales en parámetros de vegetación relevantes para el balance hídrico y los patrones de escorrentía bajo diferentes escenarios climáticos. MAPSS simula vegetación potencial bajo el principio fundamental de que los ecosistemas tienden a maximizar el área foliar que podrá ser soportada por un sitio dependiendo de la disponibilidad de humedad en el suelo y/o energía.

El modelo calcula el índice del área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) de formas de vida leñosas y herbáceas en competencia por luz y agua, mientras que mantiene un balance hídrico por sitio. Los pasos sucesivos de cualquier trabajo de modelaje (identificación de parámetros, calibración y validación) son cruciales para crear confianza en los resultados del modelo. El modelo necesita datos accesibles a nivel regional (por ejemplo, textura de suelos

y promedios mensuales de precipitación, temperatura y viento). La validación del modelo se puede hacer con valores de LAI que se obtienen a través de sensores remotos y valores de escurrimiento que se obtienen de cuencas seleccionadas en la región. La aplicación del modelo con escenarios climáticos tiene el objetivo de mostrar como el cambio climático afectará la distribución de las formas de vida y la densidad de su área foliar, al igual que los patrones de escurrimiento a través de la región mesoamericana. Este enfoque permite futuros análisis de impactos del cambio climático sobre los ecosistemas y la disponibilidad de agua a escala regional.

8. Conclusiones

Los servicios ecosistémicos contribuyen al bienestar humano y juegan un papel importante para la adaptación de la sociedad al cambio climático. En Mesoamérica como en otras partes del mundo, el agua es crucial para la sociedad y el cambio climático pone en peligro el acceso por cambios en la cantidad (escasez o exceso) y la calidad de agua. Por lo tanto, los servicios hidrológicos de los ecosistemas deberían ser considerados en las políticas de varios sectores económicos de la sociedad tales como el sector de agua potable, hidroenergía, transporte, turismo, industria y pesca. Esta es la idea que se promueve con el enfoque de adaptación basada en ecosistemas.

Sin embargo, para definir e implementar la adaptación basada en ecosistemas, se requiere estudiar más el rol de los servicios hidrológicos en la reducción de la vulnerabilidad de la sociedad a problemas de agua. Este primer paso es necesario para demostrar la importancia de los servicios hidrológicos a tomadores de decisión y empezar a planificar medidas de adaptación basadas en ecosistemas. Un segundo paso consistiría en el involucramiento de diferentes sectores en el diseño e implementación de políticas, medidas y arreglos financieros para lograr la sostenibilidad de los servicios. En lugares donde los cambios en los ecosistemas se explican principalmente por presiones humanas como el cambio de uso del suelo, se debe abordar primero estos problemas. La urgencia de la adaptación de la sociedad al cambio climático puede permitir reexaminar problemas de conversión y degradación de ecosistemas con una nueva visión, nuevas motivaciones e implicación de sectores normalmente lejanos al tema de los ecosistemas.

Además de las presiones humanas, los servicios ecosistémicos (SE) van a ser afectados por el cambio climático. En una perspectiva de adaptación basada en ecosistemas, se debe tomar en cuenta estos impactos y tratar de reducirlos. Todavía no están claras las medidas de adaptación de los ecosistemas, sin embargo, ya se han propuesto medidas para facilitar la adaptación de los mismos, amortiguando las perturbaciones (por ejemplo, previniendo incendios o manejando especies invasivas y plagas) o facilitando la evolución o la transición del ecosistema hacia un nuevo estado adaptado a las nuevas condiciones (por ejemplo, aumentando la conectividad del paisaje o conservando ecosistemas en un gradiente de condiciones ambientales).

Evaluar dónde los servicios ecosistémicos son más vulnerables y dónde contribuyen más a la adaptación de la sociedad es crucial para lograr una adaptación sostenible de la sociedad mesoamericana al cambio climático. Los temas y enfoques de investigación presentados en este capítulo siguen ese objetivo y se deben complementar con estudios socioeconómicos sobre la vulnerabilidad de la sociedad, con una perspectiva multidisciplinaria.

Bibliografía

Aguilar, E., Peterson, T.C., Ramírez Obando, P., Frutos, R., Retana, J.A., Solera, M., Soley, J., González García, I., Araujo, R. M., Rosa Santos, A., Valle, V.E., Brunet, M., Aguilar, L., Álvarez, L., Bautista, M., Castañon, C., Herrera, L., Ruano, E., Sinay, J.J., Sánchez, E., Hernández Oviedo, G.I., Obed, F., Salgado, J.E., Vázquez, J.L., Baca, M., Gutiérrez, M., Centella, C., Espinosa, J., Martínez, D., Olmedo, B., Ojeda Espinoza, C.E., Núñez, R., Haylock, M., Benavides, H., Mayorga, R., 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research*, 110, D23107.

- Arnell, N. 2003. Effects of IPCC SRES emission scenarios on river runoff: a global perspective. *Hydrology and Earth System Sciences* 7, 619-641.
- Arnell, N. 2004. Climate change and global water resources: SRES emission and socioeconomic scenarios. *Global Environmental Change* 14, 31-52.
- Bergkamp, G., Orlando, B., Burton, I. 2003. *Change. Adaptation of Water Management to Climate Change*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 53 pp.
- Bonell, M. 1998. Possible impacts of climate variability and change of tropical forest hydrology. *Climatic Change* 39, 215-272.
- Brauman, K., Daily, G., Duarte, T., Mooney, H. 2007. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environmental Resources* 32, 67-98.
- Calderon Palma, H., Bentley, L. 2007. A regional-scale groundwater flow model for the Leon-Chinandega aquifer, Nicaragua. *Hydrogeology Journal* 15, 1457-1472.
- CEPAL. 2002. El impacto socioeconómico y ambiental de la sequía de 2001 en Centroamérica. Comisión Económica para América Latina, Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo. 53 p.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P. 2007. Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor M., Miller, H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Condit, R. 1998. Ecological implications of changes in drought patterns: shifts in forest composition in Panama. *Climatic Change* 39, 413-427.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., van den Belt, M. 1997. The value of world's ecosystem services and natural capital, *Nature* 387, 253-260.
- Daily, G., Alexander, S., Ehrlich, P., Goulder, L., Lubchenco, J., Matson, P., Mooney, H., Postel, S., Schneider, S., Tilman, D., Woodwell, G. 1997. Ecosystem Services: Benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Issues in Ecology* 2, 1-16.
- Dudley, N. 1998. Forests and climate change. A report for WWF Internacional, Forest Innovations, IUCN, GTZ, WWF.
- Fearnside, P. 2004. Are climate change impacts already affecting tropical forest biomass?. *Global Environmental Change* 14, 299-302.
- Fisher, J., Tu, K., Baldocchi, D. 2008. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment* 112, 901-919.
- Foley, J., Levis, S., Costa, M., Cramer, W., Pollard, D. 2000. Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models. *Ecological Applications* 10, 1620-1632.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33, 1-4.
- Goldammer, J., Price, C. 1998. Potential impacts of climate change on fire regimes in the tropics based on MAGICC and GISS GCM-derived lightning model. *Climatic Change* 39, 273-296.
- González, C., Locatelli, B., Imbach, P., Vignola, R., Pérez, C., Vaast, P. 2008. Identificación de bosques y sistemas agroforestales proveedores de servicios ecosistémicos para el sector agua potable en Nicaragua. *Recursos Naturales y Ambiente* 51, 35-41.
- de Groot, R., Wilson, M., Boumans, R. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41, 393-408.
- Guo, Z., Xiao, X., Li, D. 2000. An assessment of ecosystem services: water flow regulation and hydroelectric power production. *Ecological Applications* 10, 925-936.
- Guswa, A., Rhodes, A., Newell, S. 2007. Importance of orographic precipitation to the water resources of Monteverde, Costa Rica. *Advances in Water Resources* 30, 2098-2112.
- Halpin, P.N., Kelly, P.M., Secrett, C.M., Schmidt, T.M. 1995. *Climate Change and Central America Forest System*. Background paper on the Nicaragua Pilot Project.
- Heyman, W.D., Kjerfve, B. 1999. Hydrological and Oceanographic Considerations for Integrated Coastal Zone Management in Southern Belize. *Environmental Management* 24, 229-245.
- Huntingford, C., Gash, J., Giacomello, A. 2006. Climate change and hydrology: next steps for climate models. *Hydrological Processes* 20, 2085-2087.
- Kaimowitz, D. 2005. Useful myths and intractable truths: the politics of the link between forests and water in Central America. In: Bonell, M., Bruijnzeel, L.A. (eds). *Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management*. International Hydrology Series, Cambridge University Press, United Kingdom. 944 p.
- Kim, J., Saunders, P., Finn, J. 2005. Rapid Assessment of Soil Erosion in the Rio Lempa Basin, Central America, Using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information Systems. *Environmental Management* 36, 872-885.
- Krauze, K., Wagner, I. 2007. An ecohydrological approach for the protection and enhancement of ecosystem services. In: Petrosillo et al. (eds.). *Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer Netherlands. 107-277 p.

- Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K.A., Oki, T., Sen, Z., Shiklomanov, I.A. 2007. Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.
- Limburg, K., O'Neill, R., Costanza, R., Farber, S. 2002. Complex systems and valuation. *Ecological Economics* 41, 409-420.
- Leguía, E., Locatelli, B., Imbach, P., Pérez, C., Vignola, R. 2008a. Servicios ecosistémicos e hidroenergía en Costa Rica. *Ecosistemas* 17, 16-23.
- Leguía, E., Locatelli, B., Imbach, P., Alpizar, F., C., Vignola, R., P., Pérez. 2008b. Servicios ecosistémicos e hidroelectricidad en Nicaragua. *Recursos Naturales y Ambiente* 51, 41-51.
- Locatelli B., Kanninen, M. 2009. Servicios ecosistémicos y adaptación al cambio climático. *En este volumen*.
- Locatelli B., Vignola R., 2009. Managing watershed services of tropical forests and plantations: Can meta-analyses help? *Forest Ecology and Management* 258 (9), 1864-1870. doi:10.1016/j.foreco.2009.01.015
- Luijten J., Miles, L., Cherrington, E. 2006. Land use change modelling for three scenarios for MAR region. Technical report. Watershed Analysis for the Mesoamerican Reef Data CD. World Resources Institute. Washington, DC.
- Magrin, G., Gay García, C., Cruz Choque, D., Giménez, J.C., Moreno, A.R., Nagy, G.J., Nobre, C., Villamizar, A. 2007. Latin America. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.
- Malhi, Y., Wright, J. 2004. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. Biological Sciences* 359, 311-329.
- Marengo, J. 2009. Regional changes in climate and extremes scenarios in Brazil and applications for Impacts, Vulnerability, Adaptation Studies and Consequences for Ecosystem Services. *En este volumen*.
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E. 2007. The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88, 1383-1394.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2003. *Ecosystems and Human Well-Being: a Framework for Assessment*. Island Press. 212 p.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Neelin, J., Münnich, M., Su, H., Meyerson, J., Holloway, C. 2006. Tropical drying trends in global warming models and observations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, 6110-6115.
- Neilson, R. 1995. A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications* 5, 362-385.
- OMM. 1996. San José Declaration: Latin American Action Plan on Assessment and Management of Water Resources. Adoptada a la Conferencia sobre Evaluación y Manejo de los Recursos Hídricos en América Latina y El Caribe. San José, Costa Rica, Organización Mundial de la Meteorología/Banco Interamericano de Desarrollo.
- Pattanayak, S. 2004. Valuing watershed services: concepts and empirics from southeast Asia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 171-184.
- Pearson R.G. 2006. Climate change and the migration capacity of species. *Trends in Ecology and Evolution* 21 (3), 111-113.
- Pérez, C., Locatelli, B., Vignola, R., Imbach, P. 2008. Importancia de los bosques tropicales en las políticas de adaptación al cambio climático. *Recursos Naturales y Ambiente* 51-52, 4-11.
- Piao, S., Friedlingstein, P., Ciais, P., Noblet-Ducoudré, N., Labat, D., Zaehle, S. 2007. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO₂ on global river runoff trends. *PNAS* 104: 15242-15247.
- Pounds J.A., Fogden M.P.L., Campbell J.H. 1999. Biological response to climate change on a tropical mountain. *Nature*, 398, 611-615.
- Rauscher, S., Giorgi, F., Diffenbaugh, N., Seth, A. 2008. Extension and intensification of the Meso-American mid-summer drought in the twenty-first century. *Climate Dynamics* 31, 551-571.
- Sala, O.E., Chapin III, F.S., Gardner, R.H., Lauenroth, W.K., Mooney, H.A., Ramakrishnan, P.S. 1999. Global change, biodiversity and ecological complexity. In: Walker, B.H., Steffen, W.L., Canadell, J., Ingram, J.S.I. (eds). *The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Poff, N.L., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M., Wall, D.H. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287, 1770-1774.
- Santoso, H., Idinoba, M.M., Imbach, P. 2008. Climate Scenarios: What we need to know and how to generate them. Working Paper No.45, CIFOR, 32 p.
- SICA. 2002. Marco Regional de Adaptación al Cambio Climático para los Recursos Hídricos en Centroamérica. SICA/CRRH/UICN/GWP. Diálogo Centroamericano Sobre el Agua y el Clima, Noviembre 26-28, San José, Costa Rica. 61 p.
- Townsend S.A., Douglas M.M. 2004. The effect of a wildfire on stream water quality and catchment water yield in a tropical savanna excluded from fire for 10 years (Kakadu National Park, North Australia). *Water Research* 38, 3051-3058.
- United Nations. 2000. Millennium Development Goals. The Millennium Development Goals Report. United Nations, New York.

- Weng, E., Zhou, G. 2006. Modeling distribution changes of vegetation in China under future climate change. *Environmental Modeling and Assessment* 11, 45-58.
- Wolf, A., Yoffe, S., Giordano, M. 2003. International waters: identifying basins at risk. *Water Policy* 5, 29-60.
- Woodward, R., Wui, Y. 2001. The economic value of wetland services: a meta analysis. *Ecological Economics* 37, 257-270.
- Xu, C., Singh, V. 2004. Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. *Water Resources Management* 18, 591-612.
- Zadroga, F. 1981. The hydrological importance of a montane cloud forest area of Costa Rica. In: Lal, R., Russell, E. W. (eds.). *Tropical Agricultural Hydrology. Watershed Management and Land Use*. New York, Willey.