



Modelización y evaluación integradas de la  
**dinámica del carbono forestal**  
en América del Norte

Herramientas para monitorear, registrar en informes  
y proyectar emisiones y remociones de gases de efecto  
invernadero en el sector forestal



Citar como:

W.A. Kurz, R.A. Birdsey, V.S. Kurz, W. A., R. A. Birdsey, V. S. Mascorro, D. Greenberg, Z. Dai, M. Olguín y R. Colditz (2016), *Modelización y evaluación integradas de la dinámica del carbono forestal en América del Norte: herramientas para monitorear, registrar en informes y proyectar emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en el sector forestal*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, 24 pp.

El presente informe fue elaborado por W. A. Kurz, R. A. Birdsey, V. S. Mascorro, D. Greenberg, Z. Dai, M. Olguín y R. Colditz para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental. La información que contiene es responsabilidad de los autores y no necesariamente refleja los puntos de vista de la CCA o de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos o México.

Se permite la reproducción de este material sin previa autorización, siempre y cuando se haga con absoluta precisión, su uso no tenga fines comerciales y se cite debidamente la fuente, con el correspondiente crédito a la Comisión para la Cooperación Ambiental. La CCA apreciará que se le envíe una copia de toda publicación o material que utilice este trabajo como fuente.

A menos que se indique lo contrario, el presente documento está protegido mediante licencia de tipo “Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada”, de Creative Commons.



#### Detalles de la publicación

*Categoría del documento:* informe de proyecto

*Fecha de publicación:* febrero de 2016

*Idioma original:* inglés

*Procedimientos de revisión y aseguramiento de la calidad:*

*Revisión final de las Partes:* enero de 2016

QA250

*Proyecto:* Plan Operativo 2013-2014: *Modelización y evaluación integradas de la dinámica del carbono forestal y las opciones de mitigación del cambio climático en América del Norte*

*Available in English – Disponible en français*

Si desea más información sobre ésta y otras publicaciones de la CCA, diríjase a



#### Comisión para la Cooperación Ambiental

393 rue St-Jacques Ouest, bureau 200

Montréal (Québec), Canada, H2Y 1N9

Tel.: 514.350.4300 - fax: 514.350.4314

info@cec.org / www.cec.org

Modelización y evaluación integradas de la  
**dinámica del carbono forestal**  
en América del Norte

Herramientas para monitorear, registrar en informes  
y proyectar emisiones y remociones de gases de efecto  
invernadero en el sector forestal

---

W.A. Kurz, R.A. Birdsey, V.S. Mascorro, D. Greenberg,  
Z. Dai, M. Olguín, y R. Colditz



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada





Modelización y evaluación integradas de la  
**dinámica del carbono forestal**  
en América del Norte

Herramientas para monitorear, registrar en informes  
y proyectar emisiones y remociones de gases de efecto  
invernadero en el sector forestal



Los bosques son los sumideros de carbono terrestres más extensos del mundo, y en las últimas dos décadas han sido responsables de remover más de una cuarta parte de las emisiones por consumo de combustibles fósiles a escala mundial (Le Quére *et al.*, 2015; Pan *et al.*, 2011a). La función que, como se proyecta, desempeñarán los bosques en un futuro en el ciclo del carbono, así como el posible impacto del sector forestal en la mitigación de los efectos del cambio climático, siguen siendo muy inciertos (Friedlingstein *et al.*, 2006; IPCC, 2014a; Wieder *et al.*, 2015). Por ello es necesario lograr un conocimiento más profundo de los principales factores que impulsan la dinámica del carbono en los bosques, y sus cambios, entre los que se incluyen perturbaciones naturales y antropogénicas, uso del suelo y modificaciones del mismo, junto con alteraciones climáticas y ambientales (Birdsey *et al.* 2013).

En la procuración del cumplimiento de sus compromisos hacia la consecución de sus objetivos en materia de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los gobiernos federales buscan entender mejor cómo los bosques y el sector forestal pueden contribuir a mitigar los efectos del cambio climático. Este conocimiento más profundo se alcanza, en primer lugar, mediante la cuantificación de los factores que impulsan actualmente la generación de emisiones y su remoción, y en segundo lugar, mediante la determinación y cuantificación de qué cambios en las actividades humanas reducen las emisiones o aumentan los sumideros forestales, en contraste con un valor o periodo de referencia (Lemprière *et al.*, 2013).

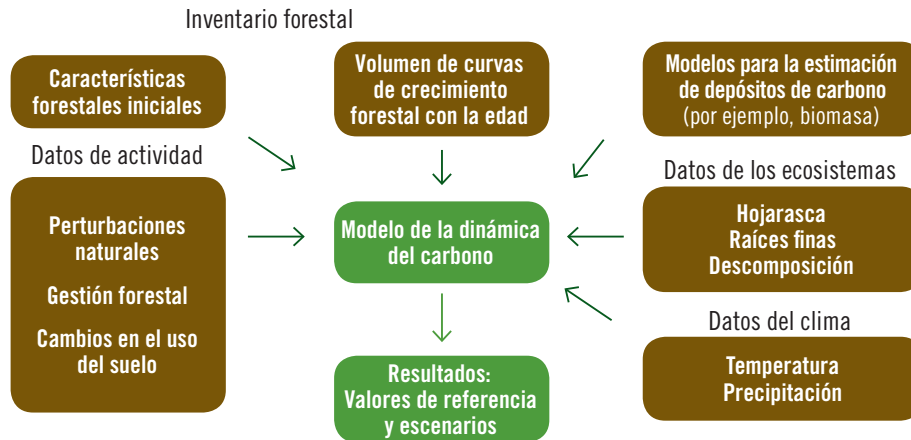
Con el respaldo de la Comisión para la Cooperación Ambiental y otros patrocinadores, los servicios forestales nacionales de Canadá, Estados Unidos y México impulsaron el presente proyecto. El trabajo de investigación trilateral conjunto congregó a expertos de distintas dependencias e instituciones de los tres países. Esta investigación contribuye a la elaboración de modelos que, basados en información científica, facilitan la toma de decisiones en lo que respecta a cuantificar los impactos de opciones alternativas de gestión forestal y de tierras en el balance de carbono en bosques de la región.

El presente resumen destaca algunos de los principales hallazgos derivados de la investigación central. La información de antecedentes, junto con los métodos, datos y herramientas empleados, se presentan en un informe exhaustivo (Kurz *et al.*, 2016; disponible en inglés únicamente en: [www.cec.org](http://www.cec.org)).

Los principios fundamentales de la dinámica del carbono forestal se aplican a todos los tipos de ecosistemas de bosques, pero los factores de impulso responsables y sus efectos en fuentes y sumideros de GEI difieren enormemente de una a otra región geográfica y a lo largo del tiempo. Los modelos científicos contribuyen a la formulación de políticas mediante la cuantificación de los impactos pasados y futuros de las actividades humanas en las emisiones y remociones de GEI, además de evaluar la eficacia de las estrategias orientadas a la mitigación de los efectos del cambio climático, elaboradas para reducir las fuentes de GEI o ampliar los sumideros de estos gases.

**Gráfica 1**

Modelo de dinámica del carbono: Integración de información de múltiples fuentes, utilizando, a manera de ejemplo, los requerimientos de entrada de datos del modelo de balance de carbono del sector forestal canadiense (Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector, CBM-CFS3)



El punto nodal de este proyecto consiste en afinar la evaluación de las emisiones de GEI en el sector forestal mediante herramientas analíticas que integran datos de inventarios forestales, mediciones de parcelas y estudios intensivos en sitios, así como de mediciones del carbono en el suelo e información obtenida por detección remota de la cubierta del suelo y sus cambios con el paso del tiempo (véase la gráfica 1). Se estudiaron modelos tanto empíricos como de procesos y se elaboraron métodos para utilizar productos nuevos generados por teledetección, tales como el análisis anual de series temporales del cambio en la cubierta superficial a una resolución de 30 metros, como datos de entrada espacialmente explícitos de modelos que permiten la estimación de emisiones y remociones anuales de GEI. Se demuestra la aplicación de tales modelos en el análisis de escenarios de emisiones de GEI registrados en el pasado y proyectados para el futuro. Por último, se plantean ejemplos de cómo estos modelos pueden respaldar el análisis de políticas de mitigación de emisiones o favorecimiento de remoción de GEI mediante la adopción de cambios en gestión forestal y reduciendo la degradación y deforestación de los bosques.

Los métodos empleados para realizar estimaciones de emisiones y remociones de GEI a escala nacional varían de un país a otro en América del Norte debido a las diferencias entre los datos disponibles, las herramientas que se utilizan y otras circunstancias de carácter interno. Aunque los tres países siguen métodos definidos por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el presente proyecto se propone armonizar las diferentes metodologías científicas. Se demuestra el uso de métodos de nivel 3 del IPCC que recurren a modelos empíricos o modelos basados en procesos para integrar datos a partir de una diversidad de fuentes, y se aplican estos modelos a tres regiones: la península de Yucatán (PY), en México; el Bosque Nacional Nez Perce-Clearwater (NP), en Idaho, Estados Unidos, y la región de Prince George (PG), en Columbia Británica, Canadá (véase la gráfica 2). Para calcular las emisiones y remociones de GEI, ambos

métodos de modelización demuestran claramente la importancia de los “datos de actividad”, es decir, la información sobre el área afectada, en términos anuales, por perturbaciones naturales y antropogénicas, incluidos los cambios en el uso del suelo y su explotación y, sobre todo, la deforestación, que se define como la conversión de bosque en usos de tierra no forestales.

Con el propósito de estimar los balances de gases de efecto invernadero, el presente estudio se centró en dos modelos de dinámica del carbono forestal que sirvieron para integrar datos provenientes de numerosas fuentes. Estos modelos fueron el de balance de carbono del sector forestal canadiense CBM-CFS3 (*Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector*) y el de desnitrificación y descomposición forestal DNDC (*Forest DeNitrification-DeComposition*). El primero se basa en gran medida en mediciones empíricas provenientes de inventarios forestales (para describir la distribución inicial de tipos de bosque y su edad), al igual que en el crecimiento y producción de los

## Gráfica 2

Regiones seleccionadas para este estudio: península de Yucatán, México; Bosque Nacional Nez Perce-Clearwater, Idaho, Estados Unidos, y región de Prince George, Columbia Británica, Canadá

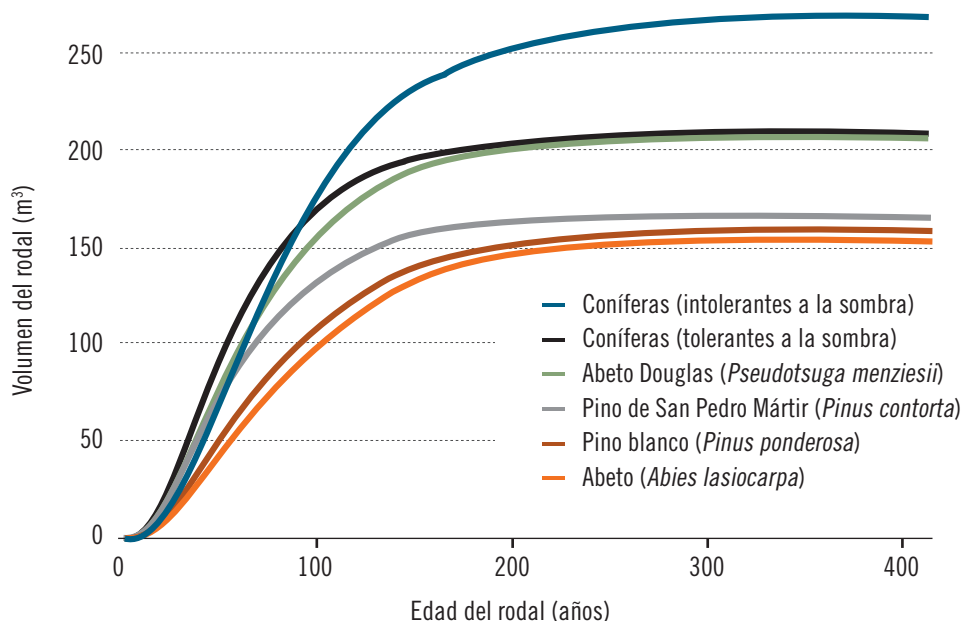


*Nota:* El área amarilla corresponde a la península de Yucatán en su totalidad; el recuadro azul representa la zona de estudio correspondiente a la escena Landsat identificada con trayectoria/hilera 20/46.

bosques (con el objetivo de cuantificar las tasas de crecimiento de los diferentes tipos de bosque) (véase la gráfica 3). Asimismo, el modelo CBM-CFS3 se vale de la modelización basada en procesos para cuantificar la dinámica del carbono en materia orgánica inerte (basura y desechos de árboles muertos) y las reservas de carbono en el suelo (Kurz *et al.*, 2009). Además de poder funcionar con datos de actividad espacialmente explícitos (basados en mapas) y espacialmente referenciados (basados en cuadros), el modelo CBM-CFS3 se adhiere a las directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), genera informes sobre las cinco reservas de carbono requeridas y presenta resultados que incluyen la transición entre las distintas categorías de uso de suelo, definidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Con un funcionamiento en fases que abarcan periodos de un año, el modelo opera a un ritmo relativamente rápido, lo cual permite realizar un análisis eficaz de múltiples escenarios proyectados para el futuro y explorar opciones de mitigación. Estos escenarios facilitan la evaluación de los impactos que los cambios sufridos ejercen en las tasas de crecimiento y descomposición, índices de perturbación, gestión forestal y alteraciones en el uso de suelo.

Modelos basados en procesos, como el DNDC, en cambio, simulan el crecimiento forestal, así como la dinámica de carbono lo mismo en materia orgánica inerte que en el suelo, mediante el empleo de información relativa al suelo, la vegetación y las condiciones climáticas y ambientales (Li *et al.*, 2000; Stange *et al.*, 2000). Para trabajar con el modelo DNDC se requiere una cantidad considerablemente nutrida de datos de entrada sobre el ecosistema y las especies arbóreas, e información del suelo que abarque cinco capas verticales, así como información diaria sobre el estado del tiempo. Este modelo opera en fases temporales de periodos de un día, y por ello las corridas individuales a veces duran desde varios días a semanas enteras, dependiendo de la extensión del terreno y la duración del periodo de análisis. Aunque resulta impráctico utilizar este tipo de modelo en resoluciones

**Gráfica 3** Curvas de crecimiento empleadas en la simulación del Bosque Nacional Nez Perce-Clearwater con el modelo CBM-CFS3

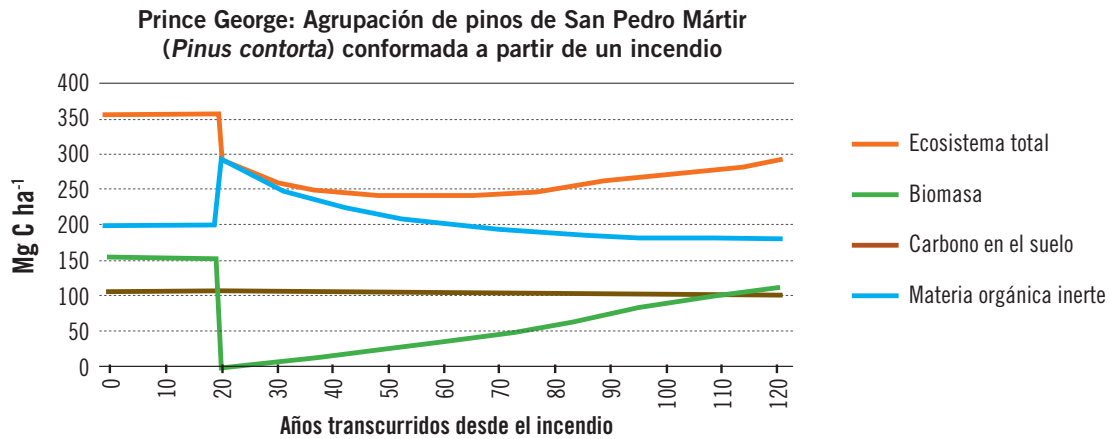


Nota: CBM-CFS3 = Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector [modelo de balance de carbono del sector forestal canadiense, versión 3]



Gráfica 4

Ejemplo de dinámica del carbono para diferentes depósitos de carbono después de un incendio forestal



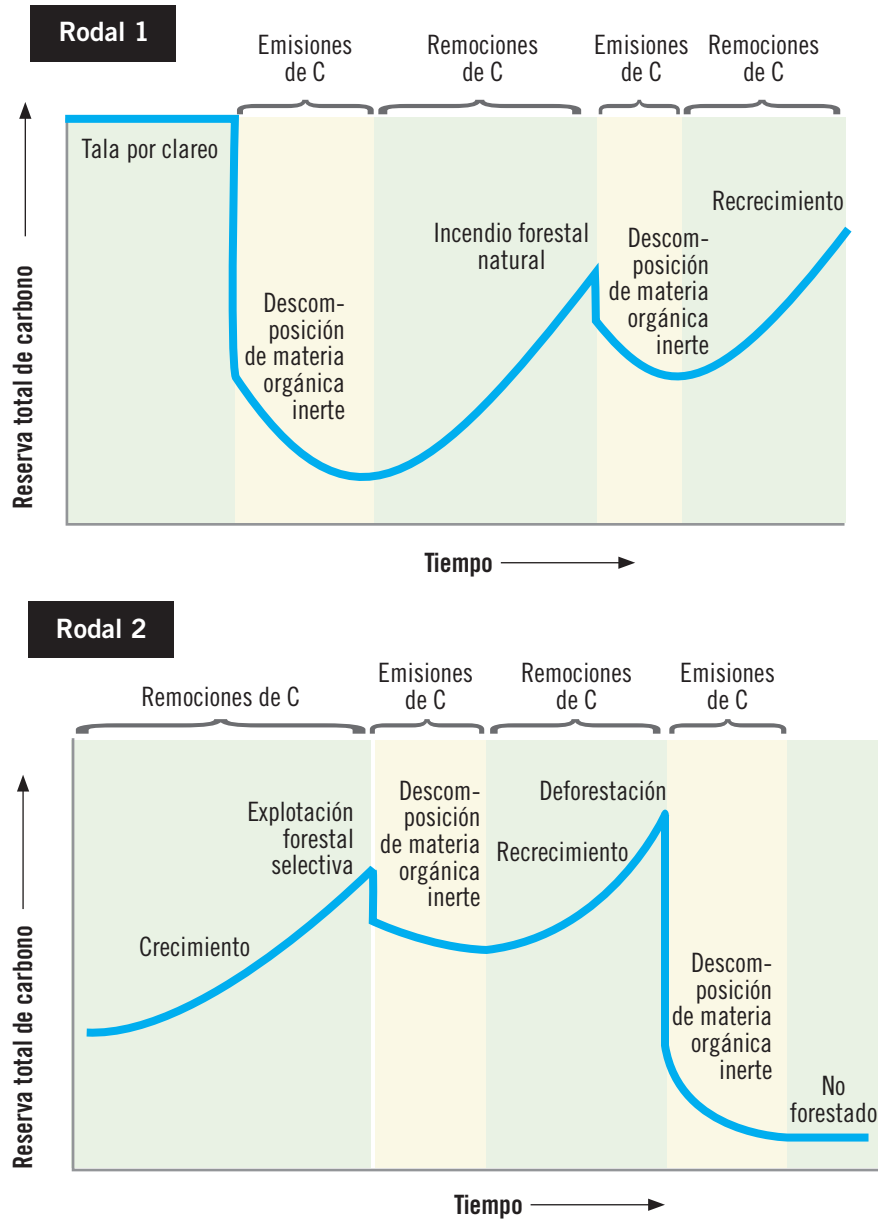
Nota: MgC ha<sup>-1</sup> = megagramos de carbono por hectárea

espaciales altas para regiones geográficas extensas, en este estudio se demuestra que el mayor mérito de los modelos basados en procesos, una vez que éstos se han calibrado y validado, estriba en su capacidad para generar estimaciones de las reservas de carbono en la biomasa, las cuales guardan estrecha concordancia con valores observados y luego pueden utilizarse para simular en qué forma los diferentes tipos de perturbación han afectado o pueden afectar las reservas de carbono en ecosistemas forestales. Otra característica de los modelos basados en procesos que funcionan con variables climatológicas y ambientales (como la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera) es su capacidad para simular respuestas ambientales a futuros cambios en el clima, como se ilustra más detalladamente en el informe técnico de este proyecto (Kurz *et al.*, 2016).

Con el objeto de efectuar análisis de las emisiones de GEI en ecosistemas forestales, es preciso contar con información detallada sobre las condiciones iniciales del terreno, lo que comprende la extensión, el tipo y la edad (o tiempo transcurrido desde la última perturbación que condujo al reemplazo de la agrupación arbórea) de estos ecosistemas. La misma importancia revisten las estimaciones empíricas de cómo crecen los bosques después de verse sometidos a perturbaciones, lo que comprende una contabilidad detallada de cambios en los distintos depósitos de carbono (véase la gráfica 4). El rastreo o seguimiento de los diferentes depósitos de carbono y de las transferencias entre sí constituye un elemento esencial para estimar con toda precisión el balance de carbono forestal registrado en el pasado y aquel proyectado para el futuro. Estos valores presentan una enorme variabilidad entre las diferentes regiones geográficas, tipos de bosque y tipo e intensidad de las distintas perturbaciones (véase la gráfica 5). Un desafío particular de los bosques tropicales de la península de Yucatán es la desigualdad en su edad y que, a menudo, se encuentran degradados como resultado de perturbaciones recientes que no ocasionaron el reemplazo de la agrupación arbórea, las cuales son más difíciles de detectar y cuantificar que aquellas que generaron el reemplazo de rodales. La generación de mapas de la distribución inicial de los ecosistemas por edad supuso un enorme desafío para la realización de este estudio dado lo difícil que resultaba distinguir, entre la información obtenida a partir de inventarios forestales, si una parcela con poca biomasa era un bosque joven o un rodal viejo degradado. Será preciso llevar a cabo trabajos ulteriores a fin de afinar la información sobre las condiciones iniciales de estos complejos tipos de bosque, incluida la distribución inicial de la biomasa y las tasas de crecimiento asociadas.

**Gráfica 5**

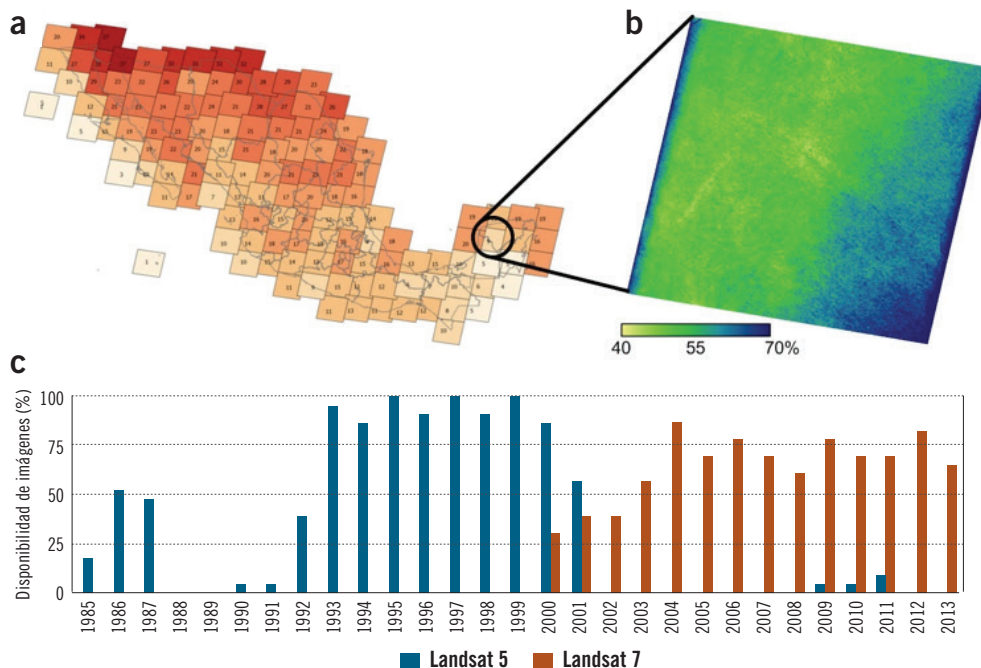
Ejemplos simplificados de dos rodales forestales que experimentan diferentes dinámicas de carbono debido a patrones variables en cuanto a perturbación, crecimiento y descomposición de materia orgánica inerte



Nota: Las diferencias resultantes en términos de emisiones y remociones de GEI con el paso del tiempo, debido a los distintos patrones en cuanto a perturbaciones, crecimiento y descomposición de materia orgánica inerte, pueden ser considerables. C = carbono.

En la mayoría de los ecosistemas forestales, las perturbaciones naturales y antropogénicas son factores clave para las emisiones y remociones anuales de gases de efecto invernadero. Por consiguiente, los datos de actividad que permiten cuantificar los índices de ambos tipos de alteración del entorno constituyen información importante para la estimación de balances forestales de GEI. Cada vez se dispone de mayor cantidad de productos generados por detección remota que hacen posible una descripción de la cubierta superficial a resoluciones de 250 y 30 metros, o más altas, en fases de periodos anuales (véase la gráfica 6). Asimismo, se están creando métodos que, gracias a estos productos —a partir de los cuales se derivan datos de actividad—, permiten calcular los cambios anuales en la cubierta del suelo (por ejemplo, para Saskatchewan, Canadá, véase Hermsilla *et al.*, 2015). Como parte de este estudio se elaboraron métodos y se creó una herramienta, denominada Recliner, para utilizar esos productos de teledetección de cambios anuales en la cubierta superficial como datos de entrada para modelos de balances de carbono, y se pusieron a prueba en tres terrenos seleccionados de Canadá, Estados Unidos y México.

**Gráfica 6** Disponibilidad de imágenes de México correspondientes al año 2000, distribución de datos no válidos y disponibilidad de imágenes correspondientes al periodo 1985-2013



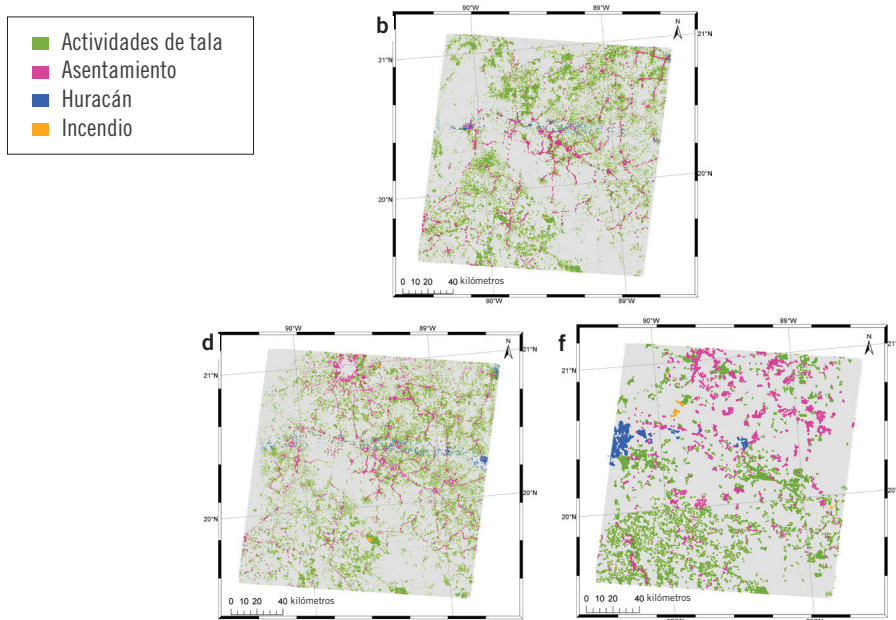
Nota: a) Disponibilidad de imágenes de México, obtenidas por el instrumento temático cartográfico (TM) y su versión mejorada (ETM+) de Landsat, con una nubosidad de menos de 10 por ciento, para el año 2000.  
 b) Distribución espacial de datos no válidos, conforme a FMASK, derivada de imágenes disponibles en la trayectoria-hilera 020-046 (círculo negro), en términos porcentuales.  
 c) Disponibilidad de imágenes obtenidas mediante los instrumentos 5 TM y ETM+ de Landsat para la trayectoria/hilera 020-046, de 1985 a 2013.

Asimismo, se utilizó el modelo CBM-CFS3 con datos de entrada para un solo paisaje de la península de Yucatán obtenido con imágenes satelitales Landsat, a fin de evaluar los impactos en las estimaciones de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero de cuatro productos diferentes obtenidos mediante detección remota y derivados de mapas de cambios anuales en la cubierta del suelo, cada uno con y sin atribución de los cambios a tipos de perturbación específicos (véase la gráfica 7). De las ocho corridas de simulación espacialmente explícitas que se llevaron a cabo con el modelo CBM-CFS3, puede concluirse que las incertidumbres en las estimaciones de GEI se atenuarían de la siguiente manera:

- (1) aumentando la resolución espacial de los productos obtenidos mediante detección remota de 250 a 30 metros, porque al aumentar la resolución se pueden detectar más perturbaciones comunes en la península de Yucatán en parcelas pequeñas;
- (2) incrementando la resolución temporal de los productos de la cubierta del suelo a un año, porque es posible detectar más perturbaciones seguidas de una rápida regeneración en los bosques, y
- (3) atribuyendo los cambios en la cubierta superficial al tipo de perturbación que ha tenido lugar, pues esto permite afinar la estimación del impacto de la perturbación en las emisiones de GEI, incluidas, en caso de incendios, aquellas distintas del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) —a saber: metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ )—, y cuyo potencial para contribuir al cambio climático es considerablemente mayor que el del  $\text{CO}_2$ .

## Gráfica 7

### Mapas de cambios en la cobertura del suelo derivados de distintos productos obtenidos mediante teledección



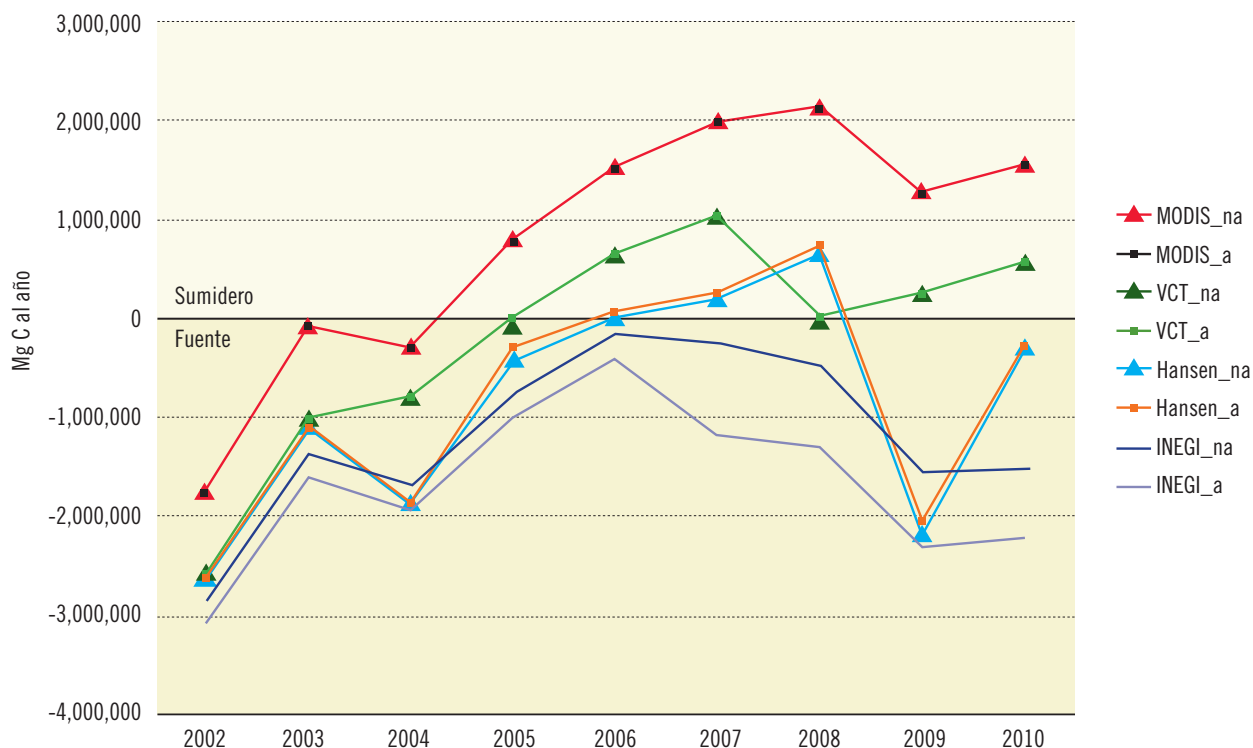
Nota: Mapa creado mediante el algoritmo para la detección de cambios (el seguidor de cambios en la vegetación (b) *Vegetation Change Tracker*, (VCT); (d) mapa de Hansen; y (f) mapa del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi).

Fuente: Mascorro et al. 2016.

El amplio rango de las estimaciones de emisiones de GEI derivadas de los ocho productos sobre cambios en la cubierta superficial pone de relieve que las acciones encaminadas a aumentar la precisión de esos productos, entre las que se incluye la determinación de los tipos de perturbación, pueden traducirse en reducciones importantes en la incertidumbre de las estimaciones de GEI lo mismo en la escala regional que en la nacional (véase la gráfica 8).

**Gráfica 8**

Flujos anuales de carbono en la península de Yucatán, 2002-2010, estimados a partir de distintas fuentes de datos de actividad



Note: MgC = megagramos de carbono; a = con atribución; na = sin atribución; MODIS = *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* [espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada] (NASA [Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio], Estados Unidos); VCT = algoritmo para la detección de cambios (el seguidor de cambios en la vegetación [*Vegetation Change Tracker*, VCT]), e Inegi = Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Fuente: Mascorro, 2014.

Como parte de este estudio se exploró también la posible aplicación del factor de temporalidad a las imágenes obtenidas mediante detección remota (temporada de sequía en contraste con la temporada pico de crecimiento), así como de algoritmos para la detección de cambios, respecto de la precisión de los productos sobre alteraciones en la cubierta superficial. Se probó un algoritmo para la detección de cambios (el seguidor de cambios en la vegetación [*Vegetation Change Tracker, VCT*]) (Huang *et al.*, 2010), que está bien establecido y se utiliza con buenos resultados en ecosistemas de bosques templados. Lamentablemente, debido a problemas de nubosidad y la falta de imágenes adecuadas correspondientes a algunos años, no fue posible detectar perturbaciones significativas principalmente a lo largo del año 2009 del periodo de simulación, mientras que con el algoritmo de Hansen *et al.*, (Hansen *et al.*, 2013), que se vale de todos los píxeles disponibles sin nubes, se lograron detectar estas perturbaciones. Los resultados mostraron, además, que las series temporales de cambios en la cobertura superficial generadas por medio del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS*) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (*National Aeronautics and Space Administration, NASA*) de Estados Unidos permitieron detectar bastante menos perturbaciones que los otros tres métodos probados, los cuales se valieron de imágenes Landsat de mayor resolución. En el caso de México, un tema de investigación de alta prioridad es el de optimizar los métodos para detectar a distancia perturbaciones en regiones persistentemente nubladas.

Se estudiaron los impactos en las estimaciones y compensaciones de emisiones de gases de efecto invernadero elegidos entre la opción de utilizar datos de actividad espacialmente explícitos y la de aplicar los espacialmente referenciados. Los métodos que emplean datos espacialmente explícitos (*IPCC Reporting Method 2, IPCC 2003, 2006*) determinan la ubicación de cada polígono (o píxel) en un paisaje. Los métodos basados en datos espacialmente referenciados (*IPPC Reporting Method 1, ibid.*), en cambio, permiten identificar los límites geográficos de áreas terrestres, como las unidades de manejo, a las que todos los datos están referenciados. De ahí se puede saber que una unidad espacial comprende una cantidad indeterminada de hectáreas (ha) de un tipo de bosque en particular, aunque se desconozca la ubicación exacta del tipo de bosque dentro de la unidad espacial. Los datos de entrada espacialmente referenciados —por ejemplo, las tasas de recolección de madera para leña u otras actividades que no fácilmente se encuentran cartografiadas— requieren información basada en reglas a fin de asignar estas actividades al polígono o píxel correspondiente.

Los modelos basados en procesos, como el DNDC, no pueden en la actualidad usar datos referenciados espacialmente, y con el CBM-CFS3 existe la limitante de tener que recurrir a fuentes de datos espacialmente referenciados o espacialmente explícitos, pero no admite la combinación de los dos tipos de datos de entrada en una



Natural Resources Canada, Canadian Forest Service

misma simulación. Los métodos espacialmente referenciados reducen significativamente el volumen de datos de entrada y, al no requerir proyecciones espacialmente explícitas de la ubicación de futuras perturbaciones o actividades humanas, como la deforestación, resultan más propicios para efectuar análisis de escenarios futuros.

Se evaluaron, además, las diferencias en las estimaciones de gases de efecto invernadero derivadas de simulaciones espacialmente referenciadas y espacialmente explícitas. Se compararon estimaciones de emisiones de GEI acumuladas, obtenidas a partir de una sola simulación espacialmente explícita, con distintos conjuntos de 400 simulaciones espacialmente referenciadas, para el bosque NP en Idaho, Estados Unidos. Las incertidumbres en las estimaciones de GEI obtenidas a partir de simulaciones espacialmente referenciadas disminuyeron al incrementarse las limitaciones de los criterios de elegibilidad de los rodales forestales para su selección, por cada tipo de perturbación. No obstante, conforme se aplicaban reglas más estrictas, aumentaba el número de rodales que sufrieron perturbaciones en forma repetida. En comparación con las simulaciones espacialmente explícitas, estas perturbaciones frecuentes en las simulaciones espacialmente referenciadas significaron un sesgo en las estimaciones, porque se registraron menos emisiones generadas a partir del segundo evento de perturbación en los mismos rodales. Agregar una regla para evitar la repetición de perturbaciones en las simulaciones espacialmente referenciadas disminuyó el sesgo, pero cambió su signo porque, en realidad, se observaron pocas perturbaciones repetidas en las simulaciones espacialmente explícitas. Así, los conjuntos de reglas que se aplican para introducir datos espacialmente referenciados en simulaciones de estimaciones de GEI deben considerar tanto la elegibilidad de los rodales como la cantidad de perturbaciones repetidas en las mismas agrupaciones arbóreas. El estudio permitió demostrar que, al aplicar los conjuntos de reglas pertinentes, pueden emplearse datos de actividad espacialmente referenciados en el modelo CBM-CFS para cuantificar estimaciones de emisiones y remociones de GEI en el pasado y simular escenarios futuros de gestión forestal y cambios en el uso del suelo.

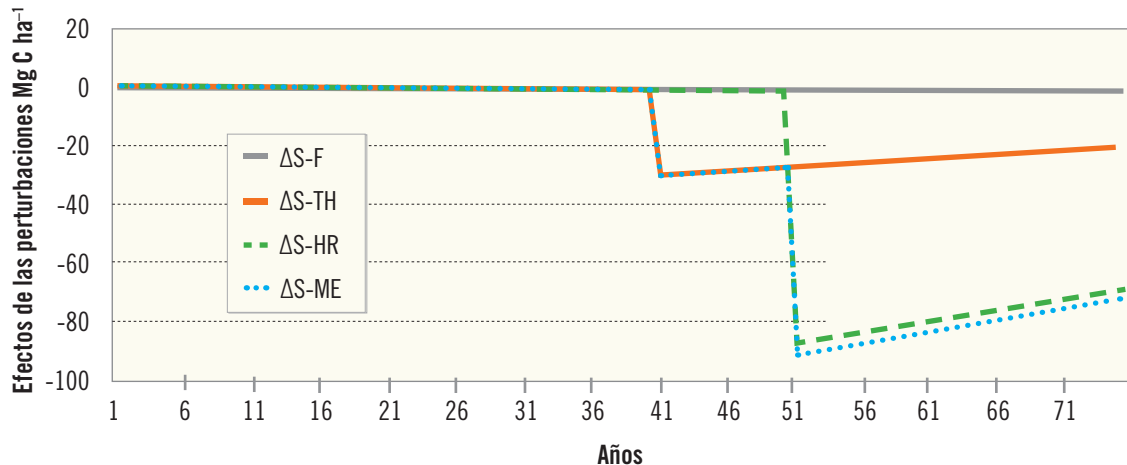
Con el objetivo de calcular el impacto de diferentes tipos de perturbaciones en el carbono almacenado en distintos reservorios, se utilizó el modelo DNDC de procesos. Después de calibrarlo y validarlo mediante datos independientes provenientes de observaciones de campo, se simularon los efectos de alteraciones del entorno, como incendios, huracanes y actividades de tala, por separado o combinadas (véase la gráfica 9). Se mostró que, en los diferentes sitios, estas perturbaciones generaron pérdidas cuantiosas del carbono almacenado inmediatamente después de sucedido el evento, tras lo cual las reservas comenzaron a recuperarse con rapidez. En la península de Yucatán se simuló un huracán de categoría 4 (daños extremos) que ocasionó una pérdida considerable de aproximadamente 86 por ciento de la biomasa viva, de la cual se presupuso que 70 por ciento se rescataría, mientras que el resto pasaría a formar parte de desechos leñosos y reservas de carbono en el suelo. Gracias al clima tropical de la península de Yucatán, la biomasa que se sumó a reservorios de materia orgánica inerte se descompuso rápidamente.

Cabe señalar que las perturbaciones a las que se someten bosques templados y boreales también tienen profundas repercusiones que perduran décadas enteras. En el caso del Bosque Nacional Nez Perce-Clearwater, en Estados Unidos, la explotación ocurrida entre 1991 y 2011 significó la remoción de aproximadamente 763.5 Gg C de la biomasa superficial; otros tipos de perturbación, sin embargo, ocasionaron una pérdida mayor de árboles vivos que la tala efectuada en el mismo periodo: cerca de 4,131 Gg C de biomasa viva superficial a causa de incendios y plagas de insectos, y la mayor parte de ésta hubo de ser transferida a reservorios de árboles muertos. Estas perturbaciones también significaron una cantidad considerable de raíces muertas en los suelos forestales, lo que produjo un aumento en el flujo edáfico de CO<sub>2</sub> debido a su descomposición (respiración heterotrófica). Los incendios, por su parte, ocasionaron importantes pérdidas de carbono en la basura —de más de 10 Mg C ha<sup>-1</sup>— en los lugares donde se registraron incendios del dosel forestal.



**Gráfica 9**

Efectos de un incendio de baja intensidad a nivel de suelo, adelgazamiento, huracanes y múltiples perturbaciones, además del impacto del cambio climático, en las reservas de carbono en la biomasa en el bosque semiárido de la península de Yucatán, en comparación con el escenario base



Nota: Mg C ha<sup>-1</sup> = megagramos de carbono por hectárea al año; Δ = diferencia en las reservas de carbono entre el escenario base y los distintos escenarios: S-F = escenario de incendio; S-TH = escenario de adelgazamiento; S-HR = escenario de huracán; S-ME = escenario de múltiples perturbaciones (efectos), además del impacto del cambio climático. Obsérvese que el incendio a nivel del suelo en el año 30 del escenario S-F sólo presentó un efecto insignificante en las reservas de carbono del ecosistema.

Asimismo, se recurrió al modelo DNDC para simular las repercusiones previstas de determinados eventos causados por el cambio climático, y de mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, lo que afectaría la productividad forestal en un futuro y repercutiría considerablemente en los cambios proyectados en las reservas de carbono. En la península de Yucatán se descubrió una importante relación entre las reservas de biomasa y temperatura y precipitación. Con base en la variabilidad climática de los últimos 33 años (1981-2013), el modelo DNDC pronosticó que el carbono almacenado en los bosques húmedos podría incrementarse conforme aumentara la temperatura en esta región. Sin embargo, las reservas de carbono en la biomasa de bosques secos podrían disminuir con un aumento en la temperatura. El carbono en la biomasa de bosques húmedos, en cambio, podría incrementarse en forma considerable si se registra un aumento en las precipitaciones, mientras que en bosques secos se incrementaría en cantidades mucho menores. En el bosque NP, el modelo DNDC sugirió que la biomasa se incrementa conforme aumenta la temperatura, pero disminuye al aumentar la precipitación, aunque no se observó que se guardaran sistemáticamente estas relaciones en los diferentes tipos de bosque.

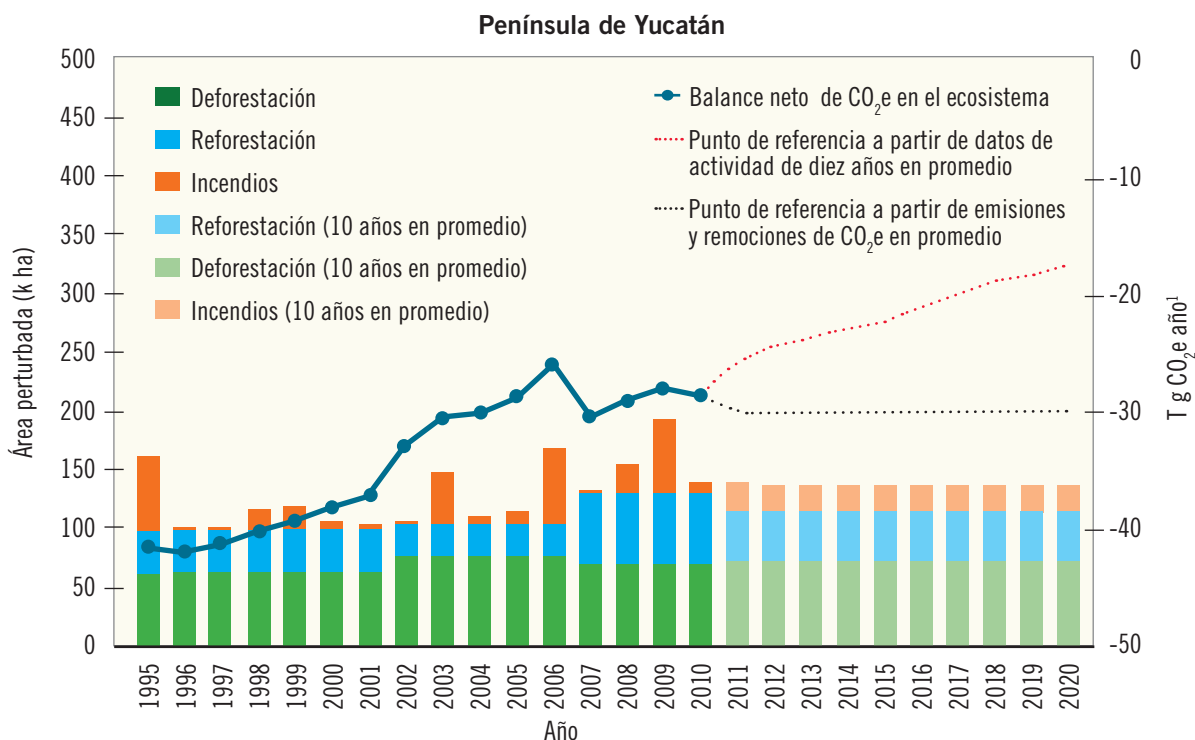
Con el uso del modelo CBM-CFS3 en un método espacialmente referenciado, se llevaron a cabo análisis históricos del balance de carbono, así como proyecciones para toda la península de Yucatán, estratificados en seis unidades espaciales. Para ello se recurrió a un marco espacial creado para realizar análisis a escala nacional en México (94 unidades espaciales) y se simularon seis unidades espaciales en la PY, obtenidas a partir de la intersección de los límites de tres entidades federativas y dos ecorregiones (método de nivel 1, CCA, 1997). Además se generaron estimaciones de datos de actividad anuales a partir de matrices sobre cambios en el uso del suelo



que se derivaron al comparar mapas de la cubierta superficial correspondientes a los periodos 1993-2002, 2002-2007 y 2007-2011. Se calculó también la contribución de las perturbaciones (incendios) y el cambio en el uso del suelo al balance de gases de efecto invernadero para toda la península de Yucatán, y los resultados mostraron un reducido sumidero de carbono que, en términos anuales, disminuyó con el paso del tiempo, a medida que la superficie forestal total decreció debido a la deforestación neta, y a que la tasa de crecimiento de los bosques restantes se redujo con la edad y las emisiones por hectárea deforestada se incrementaron al aumentar la edad de los árboles (véase la gráfica 10). Asimismo, se documentó la forma en que las tres principales categorías de uso del suelo contribuyen al balance global de GEI en la península. Se obtuvieron los siguientes cálculos para los flujos promedio de GEI de 2001 a 2010: tierras forestales que siguen siendo tierras forestales (importante sumidero;  $-52 \text{ Tg CO}_2\text{e año}^{-1}$ ), tierras forestales convertidas en otros usos (fuente mediana;  $27 \text{ Tg CO}_2\text{e año}^{-1}$ ) y otras tierras convertidas en tierras forestales (sumidero pequeño;  $-8 \text{ Tg CO}_2\text{e año}^{-1}$ ). Es probable, no obstante, que el balance global de GEI en la península se aproxime a cero a medida que se incluyan en el análisis otras perturbaciones más complejas y a escalas más reducidas (es decir, la degradación) (Olguín *et al.*, 2015).

**Gráfica 10**

Área afectada en la península de Yucatán, sobre una base anualizada, por cambio en el uso del suelo forestal y por eventos de incendios anuales, periodo 1995-2010, y emisiones netas estimadas de  $\text{CO}_2\text{e}$



Nota:  $\text{CO}_2\text{e}$  = dióxido de carbono-equivalente; K ha = miles de hectáreas; Tg = teragramos. El flujo negativo indica remoción de la atmósfera; es decir, se trata de un sumidero. Información histórica: datos de actividad correspondientes a 10 años en promedio (línea punteada roja), y emisiones de gases de efecto invernadero correspondientes a 10 años en promedio (línea punteada negra).

Fuente: Adaptado de Olguín *et al.*, 2015.



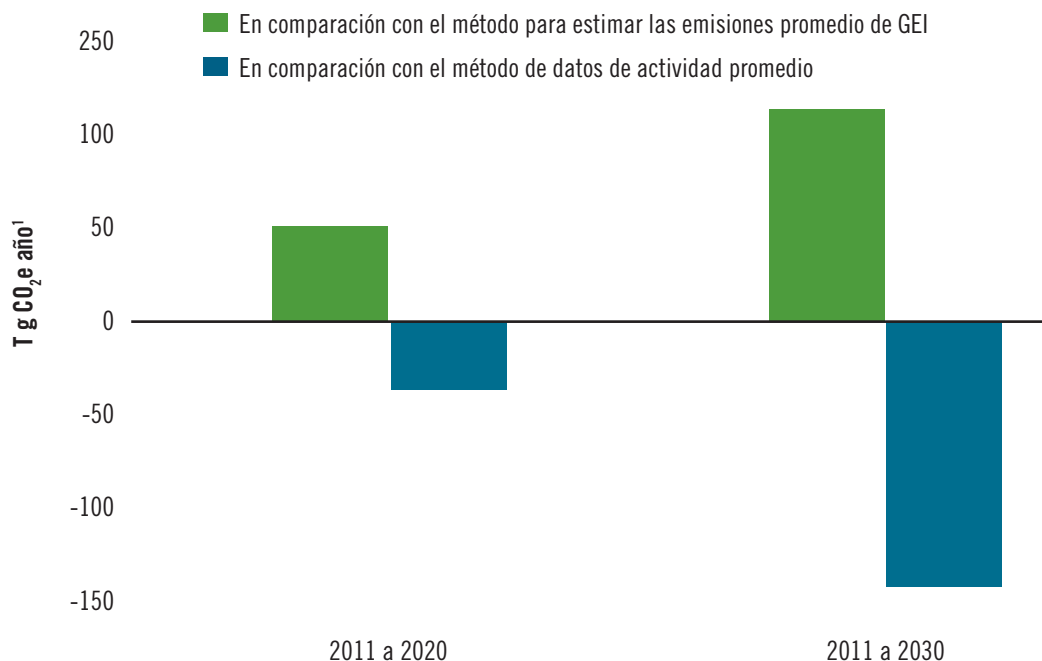
US Forest Service

Por otro lado, se evalúan futuras iniciativas de mitigación y se las contrasta con niveles de referencia o valores iniciales. Estas iniciativas incluyen actividades encaminadas a reducir las emisiones debidas a la deforestación y la degradación forestal, junto con una gestión sustentable de los bosques (REDD+, por sus siglas en inglés). Se evaluaron dos posibles métodos para definir dichos valores de referencia: las emisiones promedio registradas a lo largo de la década pasada, o las emisiones generadas por actividades promedio registradas en el mismo periodo. Se demostró que los resultados difieren enormemente. Con el primer método, se asume que el sumidero anual se mantiene sin cambios, cuando en realidad (según la representación del segundo método) el sumidero disminuye en la medida en que los impactos acumulados de la deforestación reducen el área de bosque y, por consiguiente, la capacidad del área en su conjunto para absorber  $\text{CO}_2$  de la atmósfera.

Se demostró también la aplicabilidad del modelo CBM-CFS3 para efectuar estimaciones de cambios en emisiones generadas a raíz de modificaciones en futuras tasas de deforestación en la península de Yucatán. Se estima que la tasa bruta anual de deforestación para el periodo comprendido entre 2001 y 2010 es de 0.6 por ciento al año<sup>-1</sup>, y se simuló un segundo escenario en el que esta tasa se redujo 2.5 por ciento al año<sup>-1</sup>. En contraste con el valor de referencia para REDD+ —definido por los datos de actividad promedio—, se estimó que las emisiones netas de GEI generadas por deforestación pueden reducirse 16 por ciento para 2020 si la tasa bruta de deforestación disminuye en 25 por ciento en 2020, o bien 41 por ciento en 2030 si la deforestación se reduce a la mitad en 2030 (véase la gráfica 11). Cabe destacar que la selección del valor de referencia para REDD+ —definido a partir de emisiones promedio registradas en el pasado— daría como resultado un incremento contabilizado en emisiones (respecto del valor de referencia) aun cuando disminuyan las tasas de deforestación.

**Gráfica 11**

Ejemplo de reducción acumulativa de emisiones de gases de efecto invernadero al disminuir las tasas anuales de deforestación en 2.5 por ciento (de la tasa original) al año, en comparación con los dos escenarios de referencia: de 2011 a 2020 y de 2011 a 2030



*Nota:* GEI = gases de efecto invernadero; Tg CO<sub>2</sub>e año<sup>-1</sup> = teragramos de dióxido de carbono equivalente al año. En comparación con un valor de referencia obtenido mediante el método para estimar las emisiones promedio de GEI, las emisiones contabilizadas se incrementarían aun cuando disminuyeran las tasas de deforestación.

Se compararon determinados resultados, obtenidos con distintos métodos de modelización, entre sí y con los conjuntos de datos disponibles, a fin de ampliar nuestros conocimientos sobre las respuestas del ecosistema ante perturbaciones, y destacar algunas incertidumbres acerca de cómo los bosques responderán en el futuro frente a factores antropogénicos o naturales. En la práctica, los modelos empíricos resultan idóneos para representar cambios en el carbono almacenado en distintos reservorios, producto de impactos de actividades de gestión, incendios, plagas de insectos y cambios en el uso del suelo, así como para cuantificar la incertidumbre de reservas de carbono medidas directamente, y validar las estimaciones independientes obtenidas con modelos de procesos. De mayor utilidad para simular respuestas del ecosistema forestal a cambios en el clima o la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, los modelos basados en procesos pueden utilizarse para realizar estimaciones o proyecciones fuera de los límites espaciales y temporales de los datos empleados para la parametrización. Es importante validar los modelos con conjuntos de datos independientes antes de intentar usarlos fuera del rango de datos de parametrización.

La comparación de los resultados obtenidos con ambos modelos reveló que es posible que se requiera de un nivel elevado de habilidades analíticas para utilizar modelos empíricos y de procesos, ya que ambas clases de modelo por lo general exigen esfuerzos considerables en el momento de adquirir y gestionar los datos de entrada, los cuales podrían no tenerse a la mano, no ser representativos de la región o tipo de bosque de interés, o no estar

adecuadamente preparados para integrarse en el modelo. Como regla general, los modelos empíricos son más fáciles de entender, mientras que los de procesos implican normalmente una representación detallada de los mecanismos y sus respuestas a factores ambientales, que el modelador deberá comprender a la perfección. Efectuar comparaciones de modelos es una tarea difícil en extremo: los requisitos en cuanto a datos difieren entre un modelo y otro; éstos pueden ser o no espacialmente explícitos; pueden incluir la representación de distintos factores de cambio en el medio ambiente, y pueden utilizar distintas definiciones para las variables. Las estimaciones de las principales variables —como la producción primaria neta (PPN), la producción neta del ecosistema y la producción neta del bioma (PNB)— difieren enormemente de un método de modelización a otro, y las causas que explican estas diferencias son difíciles de interpretar. Salvar estas diferencias supone una labor ardua fuera del ámbito de este proyecto.

Se concluyó que los modelos de nivel 3 constituyen herramientas poderosas y flexibles muy útiles para la integración de datos provenientes de fuentes diversas. Estos modelos generan los datos que se requieren para llevar a cabo estimaciones de alcances regional y nacional en torno a la emisión y remoción de gases de efecto invernadero en el sector forestal: el modelo CBM-CFS3 se ha utilizado desde 2006 para generar datos de entrada que nutren el informe del inventario nacional de Canadá en materia de GEI (Stinson *et al.*, 2011; Environment Canada, 2015), además de que ha servido para calcular niveles de emisiones de referencia que permiten integrar el informe que México presenta para las Notas de Ideas para el Programa de Reducción de Emisiones (ER-PIN, por sus siglas en inglés) del Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF, por sus siglas en inglés) (FCPF, 2013). Se demostraron también algunas de las capacidades de los modelos basados en procesos para mejorar los análisis, validar los resultados y estimar las respuestas de los ecosistemas frente al cambio climático.

Los resultados emanados de este estudio contribuyen a lograr el efecto esperado de un diseño y evaluación mejorados de las actividades de mitigación de los efectos del cambio climático, actividades que también se orientan hacia tareas de reducción de las emisiones de la deforestación y la degradación de los bosques y una gestión forestal sustentable (REDD+) en el sector forestal y de cambios en la cubierta del suelo en América del Norte. Asimismo, el presente estudio desvela algunos temas y oportunidades en cuanto a disponibilidad de datos y aplicaciones de modelización que podrían mejorar resultados, y el aprendizaje adquirido ayudará a orientar trabajos ulteriores en aras de optimizar las evaluaciones de gases de efecto invernadero en distintas escalas. Futuras tareas financiadas por la CCA se centrarán en el uso de estas herramientas para el análisis de opciones de mitigación de los efectos del cambio climático en el sector forestal en paisajes representativos de América del Norte. Estos análisis de opciones de mitigación requerirán el desarrollo de mayores capacidades analíticas y, para ello, la generación de los datos en que habrán de apoyarse. Asimismo, para efectuar estos análisis se requerirá hacer una evaluación de los cambios en las reservas de carbono en los bosques, así como de los cambios en las reservas de carbono de productos de madera y los observados en las emisiones en otros sectores, resultado de la sustitución de productos intensivos en emisiones —concreto, acero y plásticos, por ejemplo— por productos madereros (Lemprière *et al.*, 2013), como se demostró para realizar análisis a escala nacional en Canadá (Smyth *et al.*, 2014). Los trabajos también continuarán en la formulación y puesta a prueba de métodos que busquen optimizar los productos de cambios en la cubierta superficial obtenidos por detección remota y la integración de esos productos con modelos de emisiones y remociones de gases de efecto invernadero.



## Agradecimientos

El éxito de este proyecto es resultado de la colaboración de numerosos expertos de instituciones destacadas en Canadá, Estados Unidos y México. Los autores desean agradecer a la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) por los recursos con que se financió el proyecto, además del enorme apoyo prestado —en particular por Karen Richardson, Itzia Sandoval y Sarah Heiberg— en la administración, coordinación y organización del trabajo.

Vaya nuestro agradecimiento a los servicios forestales de los tres países de América del Norte: el Servicio Forestal Canadiense (*Canadian Forest Service*), el Servicio Forestal de Estados Unidos (*US Forest Service*, USFS) y la Comisión Nacional Forestal (Conafor) de México, por el apoyo en especie brindado para la ejecución de este proyecto. Asimismo, deseamos reconocer a las dependencias responsables de labores de detección remota y otros órganos gubernamentales, entre los que se incluyen el Centro Canadiense de Cartografía y Observación Terrestre (*Canada Centre for Mapping and Earth Observation*, CCMEO), el Servicio Geológico de Estados Unidos (*US Geological Survey*, USGS) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA) de Estados Unidos, y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), de México. Muchos otros programas e instituciones contribuyeron a la realización de este trabajo: de México, agradecemos la colaboración y el apoyo del proyecto “Fortalecimiento REDD+ y Cooperación Sur-Sur” de la Conafor, así como del Colegio de Postgraduados. De Estados Unidos, nuestro reconocimiento a la considerable aportación de fondos de la Agencia para el Desarrollo Internacional (*Agency for International Development*, US AID), la Oficina de Programas Internacionales (*International Program Office*) del Servicio Forestal de Estados Unidos (*US Forest Service*) y el programa SilvaCarbon, entidades todas que respaldaron la participación de científicos y técnicos de dependencias e instituciones de Estados Unidos y México.

Asimismo, deseamos agradecer a las siguientes personas por su contribución:

Graham Stinson, Sally Tinis, Dennis Paradine y Don Leckie (Servicio Forestal Canadiense [*Canadian Forest Service*]) integraron conjuntos de datos sobre cambios en la cobertura superficial que respaldaron la modelización de la región Prince George en Canadá. Alexa Dugan (Servicio Forestal de Estados Unidos [*US Forest Service*]) compartió conjuntos de datos e información sobre bosques estadounidenses, al igual que resultados de modelos de procesos para el bosque estadounidense utilizado en el estudio de caso. Craig Wayson (Servicio Forestal de Estados Unidos [*US Forest Service*]) apoyó la integración de datos de actividad y la estimación de los impactos de actividades en el carbono forestal. Shannon Franks y Jeff Masek (NASA) aportaron la información sobre perturbaciones en los bosques de México. Gregorio Ángeles-Pérez (Colegio de Postgraduados) ayudó a estimar los impactos de diferentes actividades en el carbono forestal.



Natural Resources  
Canada

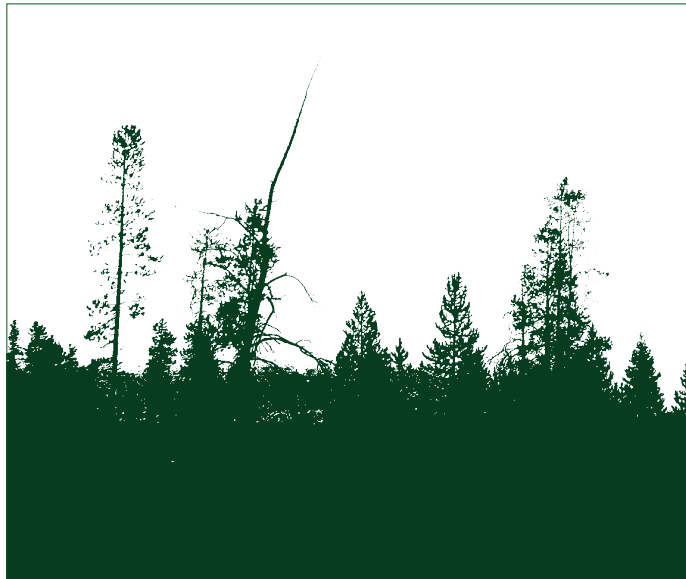
Ressources naturelles  
Canada



## Referencias

- Birdsey, R., G. Ángeles-Pérez, W.A. Kurz, A. Lister, M. Olguín, Y. Pan, C. Wayson, B. Wilson, y K. Johnson (2013), “Approaches to monitoring changes in carbon stocks for REDD+”, *Carbon Management*, núm. 4(5): 519–537. doi: 10.4155/cmt.13.49
- Environment Canada (2015), “National Inventory Report 1990-2013. Greenhouse gas sources and sinks in Canada”, *The Canadian Government’s Submission to the UN Framework Convention on Climate Change*, 199.
- FCPF (2013), “Emission Reductions Program Idea Note (ER-PIN)”, Fondo de Carbono del Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF, por sus siglas en inglés).
- Friedlingstein, P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule, *et al.* (2006), “Climate–carbon cycle feedback analysis: Results from the C 4 MIP model intercomparison”, *Journal of Climate*, núm. 19(14): 3337–53. doi:10.1175/JCLI3800.1.
- Hansen, M.C., P.V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S.A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, *et al.* (2013), “High-resolution global maps of 21st-century forest cover change”, *Science*, núm. 342(6160): 850–53. Nueva York, N.Y.) doi:10.1126/science.1244693.
- Hermosilla T., M.A. Wulder, J.C. White, N.C. Coops, y G.W. Hobart (2015), “An integrated Landsat time series protocol for change detection and generation of annual gap-free surface reflectance composites”, *Remote Sensing of Environment*, núm. 158: 220–234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.005>.
- Huang, C., S.N. Goward, J.G. Masek, N. Thomas, Z. Zhu, y J.E. Vogelmann (2010), “An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks”, *Remote Sensing of Environment*, núm. 114(1): 183–98. Elsevier Inc.. doi:10.1016/j.rse.2009.08.017.
- IPCC (2014a), “2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol”, Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, editado por T. G. Hiraishi, T. Krug, T. Tanabe, K. Srivastava, N. Baasansuren, J. Fukuda y M. Troxler, Suiza.
- Kurz, W.A., C.C. Dymond, T.M. White, G. Stinson, C.H. Shaw, G.J. Rampley, C. Smyth, *et al.* (2009), “CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards”, *Ecological Modelling*, núm. 220(4): 480–504. doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018.
- Kurz, W.A., R.A. Birdsey, V.S. Mascorro, D. Greenberg, Z. Dai, M. Olguín, y R. Colditz (2016), “Integrated modeling and assessment of North American forest carbon dynamics: Tools for monitoring, reporting and projecting forest greenhouse gas emissions and removals”, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal.
- Le Quéré, C., R. Moriarty, R.M. Andrew, G.P. Peters, P. Ciais, P. Friedlingstein, S.D. Jones, *et al.* (2015), “Global Carbon Budget 2014”, *Earth System Science Data*, núm. 7(1): 47–85. Copernicus GmbH. doi:10.5194/essd-7-47-2015.
- Lemprière, T.C., W.A. Kurz, E.H. Hogg, C. Schmoll, G.J. Rampley, D. Yemshanov, D.W. Mckenney, *et al.* (2013), “Canadian boreal forests and climate change mitigation 1”, *Environmental Reviews*, núm. 21(4): 293–321. doi:10.1139/er-2013-0039.

- Li, C., J. Aber, F. Stange, K. Butterbach-Bahl, y H. Papen (2000), "A process-oriented model of N<sub>2</sub>O and NO emissions from forest soils: 1. Model development", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, núm. 105(D4): 4369–84. doi:10.1029/1999JD900949.
- Mascorro, V.S. (2014), *Assessing Forest Disturbances for Carbon Modelling: Building the Bridge between Activity Data and Carbon Budget Modelling*, M.Sc. Thesis, Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, Canada. 106 pp. doi: 10.14288/1.0165575.
- Mascorro, V.S., N.C. Coops, W.A. Kurz, y M. Olguin (2015), "Choice of satellite imagery and attribution of changes to disturbance type strongly affects forest carbon balance estimates", *Carbon Balance and Management*, núm. 10:30 doi:10.1186/s13021-015-0041-6.
- Mascorro, V.S., N.C. Coops, W.A. Kurz, y M. Olguin (2014), "Attributing changes in land cover using independent disturbance datasets: A case study of the Yucatan Peninsula, Mexico", *Regional Environmental Change*. Publicado por Canadian Forest Service. 16(1): 213-221. doi:10.1007/s10113-014-0739-0.
- Olguín, M., C. Wayson, W. Kurz., M. Fellows, V. Maldonado, D. López, G. Ángeles, O. Carrillo, y V.S. Mascorro (2015), "Adaptation of the CBM-CFS3 modeling framework to Mexico: Towards a Tier 3 reporting in strategic landscapes for REDD+", iniciativa México-Noruega de la Comisión Nacional Forestal, Ciudad de México, México.
- Pan, Y, R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, *et al.* (2011), "A large and persistent carbon sink in the world's forests", *Science*, núm. 333(6045): 988–93. New York, N.Y. doi:10.1126/science.1201609.
- Smyth, C.E., G. Stinson, E. Neilson, T.C. Lemprière, M. Hafer, G.J. Rampley, y W.A. Kurz (2014). "Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector", *Biogeosciences*, núm. 11(13): 3515–29. Copernicus GmbH. doi:10.5194/bg-11-3515-2014.
- Stange, F., K. Butterbach-Bahl, H. Papen, S. Zechmeister-Boltenstern, C.S. Li, y J. Aber (2000), "A process-oriented model of N<sub>2</sub>O and NO emissions from forest soils: 2. Sensitivity analysis and validation", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, núm. 105(D4): 4385–98. doi:10.1029/1999JD900948.
- Stinson, G., W. A. Kurz, C. E. Smyth, E. T. Neilson, C. C. Dymond, J. M. Metsaranta, C. Boisvenue, *et al.* (2011), "An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008", *Global Change Biology*, núm. 17(6): 2227–44. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x.
- Wieder, W.R., C.C. Cleveland, W.K. Smith, y K. Todd-Brown (2015), "Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability", *Nature Geoscience*, número de abril: 1–5. doi:10.1038/ngeo2413. doi:10.1029/2011JG001930.
- Zhu, Z., y C.E. Woodcock (2012), "Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery", *Remote Sensing of Environment*, núm. 118: 83–94. doi:10.1016/j.rse.2011.10.028.



**Comisión para la Cooperación Ambiental**

393, rue St-Jacques Ouest, bureau 200

Montreal (Quebec)

H2Y 1N9 Canada

t 514.350.4300 f 514.350.4314

info@cec.org / www.cec.org



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada

