

LAS MASAS FORESTALES COMO SUMIDEROS DE CO₂ ANTE UN CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

G. E. Rojo-Martínez¹; J. Jasso-Mata²; A. Velásquez-Martínez³

¹Universidad Autónoma Indígena de México. (UAIM). Facilitadores Educativos. Los Mochis, Sinaloa. México. Correo- e: grojo@colpos.mx,

²Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales: Programa Forestal. Montecillo, Estado de México. C. P. 56230. Correo-e: jejama@colpos.mx.

³Director del IRENAT del Colegio de Postgraduados.

RESUMEN

Se realizó un acopio de datos bibliográficos sobre la importancia de la absorción, retención y medición de carbono en las masas forestales, con especial referencia a los bosques y plantaciones forestales, incluyendo información de la fijación de carbono de masas arbóreas de México. Se enfatiza finalmente, la importancia de las masas forestales como sumideros de carbono (incluyendo los desconocidos) y la optimización de este recurso. Se concluye que las masas forestales, juegan un papel importante en la fijación y retención del carbono emitido antrópicamente a la atmósfera, por lo que la reducción de las emisiones es el factor principal a donde debe ir encaminado el esfuerzo de los gobiernos, aunado a una mayor sensibilidad de la población en la reducción de estas emisiones y la práctica de métodos sostenibles de manejo forestal.

PALABRAS CLAVE: gases efecto invernadero, fijación de carbono, Protocolo de Kyoto, plantaciones forestales, regeneración natural.

FOREST MASSES IN CO₂ SEQUESTER IN THE FACE OF GLOBAL CLIMATIC CHANGE

SUMMARY

A review of the importance of carbon absorption, fixation and measurement on natural forest populations (boreal, temperate and tropical forest) as well as forestry plantations was done. Finally, the importance of forest masses in the sequester of carbon and optimization of the use of this resource are emphasized. It is concluded that forest masses play an important role in the fixation and retention of carbon emitted by man into the atmosphere. Thus, reduction of emissions is a major factor toward which government efforts can be directed, together with a greater sensitivity of the population in the reduction of these emissions and the use of sustainable methods of forest management.

KEY WORDS: greenhouse effect, carbon fixation, Protocol of Kyoto, forestry plantations, natural regeneration.

INTRODUCCIÓN

Existe gran preocupación a escala mundial por el aumento acelerado de la concentración de gases efecto invernadero (GEI), considerados como causantes del cambio climático global, principalmente el dióxido de carbono (CO₂), del cual está demostrada su relación con la vegetación, especialmente por la capacidad de ésta de fijar carbono (C) atmosférico, y el papel que juega al ser la segunda fuente emisora de CO₂ (después de la quema de combustibles fósiles: petróleo, carbón mineral y gas natural) debido a los incendios naturales o antropogénicos, así como los procesos de industrialización y la destrucción de bosques para el aprovechamiento para combustible o simplemente, cambios en el uso de la tierra (Bolin, 1970;

Stuiver, 1978; Woodwell *et al.*, 1978; Delcourt y Harris, 1980; Sedjo, 1990; Brown *et al.*, 1994; Dale *et al.*, 1994; Houghton y Hackler, 1994; Ludevid, 1998, entre otros). En torno a esta problemática se han hecho una serie de esfuerzos para lograr la coordinación de acciones internacionales para su control.

Una de estas primeras iniciativas fue el Protocolo de Montreal de 1987, el cual se orientó al control de sustancias como los clorofluorocarbonos (CFC) y haloclorofluorocarbonos (HCFC). Posteriormente, en 1988 se estableció el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (PICC) como una iniciativa de las Naciones Unidas y la Organización Mundial de Meteorología, que conllevó a la creación del Comité Internacional de Negociación de las

Naciones Unidas en Cambio Climático (CINNUCC). Después de un año, 155 países firmaron voluntariamente la Convención Marco de Cambio Climático (CMCC) en la Cumbre de Río de 1992, que contempló el compromiso de los países desarrollados de estabilizar las emisiones de los GEI, y de aquellos en desarrollo para facilitar la reducción de emisiones de los no desarrollados (Orrego *et al.*, 1998).

En 1995 y 1996 se estableció la 1ª. y 2ª. Conferencias de las Partes (COP1 y COP2), respectivamente, tal como lo sugirió la CMCC en 1989; en las que se reafirmó el propósito de las Naciones Unidas de concretar medidas de protección y formulación legal contra el Cambio Climático. Posteriormente, en la Tercera Conferencia de las Partes-COP3 (1987), se elaboró el Protocolo de Kyoto (PK), estableciéndose el compromiso de reducir las emisiones de tres de los principales GEI (CO_2 , CH_4 y N_2O) hasta en un 5 % para el lapso 2008 - 2012 con respecto a los niveles de 1,990. Asimismo, se ratificó la posibilidad de usar mecanismos de flexibilidad como la implementación conjunta (IC), los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) y el comercio de derechos de emisión (CDE), para el cumplimiento de las metas de reducción de los GEI (Lewis *et al.*, 1996; Morrissey y Justus, 1998; Orrego *et al.*, 1998). En la Cuarta Conferencia de las Partes-COP4 (1998) catalogada como un epílogo de Kyoto, se gestó el *Plan de Acción Buenos Aires*, que incluye mecanismos financieros, desarrollo y transferencia de tecnologías, actividades de implementación conjunta en la fase piloto y, mecanismos del Protocolo de Kyoto (Grubb *et al.*, 1999). Finalmente, en la Quinta Conferencia de las Partes-COP5 (1999), también conocida como la Cumbre de Bonn, se apremió a los países a ratificar el PK, sin fijar fecha límite; sin embargo, se generaron dos documentos formales de negociación, uno sobre mecanismos de funcionamiento del PK y otro sobre las medidas en caso de incumplimiento del mismo (Rivera, 1999).

Simultáneamente, numerosos autores tales como Delcourt y Harris (1980), Brown *et al.* (1986), Sedjo (1990), Tans *et al.* (1990), Goudriaan (1992), Schroeder *et al.* (1993), Hoen y Solberg (1994), Ortiz (1997), Ramírez *et al.* (1997), Bashkin y Binkley (1998), Prebble (1998), señalan la importancia de las masas forestales como sumideros de CO_2 y plantearon como estrategia para reducir la concentración de GEI, incrementar la biomasa forestal, lo cual permite almacenar el carbono (C) en los tejidos de las plantas y en otros componentes del bosque como los suelos, la hojarasca y la necromasa.

Las actividades de forestación y deforestación, a través de plantaciones o regeneración natural, contempladas en el Protocolo de Kyoto, son objeto de discusión y clarificación. No obstante, existe un potencial en este tipo de proyectos, especialmente cuando uno o ambos tipos se establecen en condiciones de suelos degradados. Se debe tener en cuenta que los terrenos con

aptitud forestal, no sólo en México sino en el mundo, están amplia y severamente degradados por lo que se cuenta con superficie para reforestar (Osorno, 1999), máxime que existe información sobre especies tolerantes a la sequía (López *et al.*, 1990), sugerencias para la conservación y restauración de zonas degradadas aplicando el mejoramiento genético (Jasso y López, 1991), e incluso el establecimiento de plantaciones forestales con base en el mejoramiento genético (Vargas *et al.*, 1994).

Además, mediante la captación de recursos internacionales a través de instrumentos económicos como los MDL y conservación ambiental, se abre la posibilidad de establecer plantaciones forestales comerciales con fines de captura de C y consecuente aprovechamiento (excepto para leña, carbón vegetal, tal vez celulosa para papel o cualquier otro producto elaborado que pudiera servir como combustible, o quizá un subproducto con la misma utilidad "aserrín"), lo que traería beneficios ambientales (disminución de la presión sobre los bosques naturales, protección de fuentes de agua, infiltración de ésta para el enriquecimiento de mantos acuíferos, mejoramiento de la calidad paisajística, mitigación del cambio climático global, entre otros), de conservación (recursos genéticos forestales y biodiversidad en general) y sociales (generación de empleo, reactivación económica del campo, etc.), para muchas zonas forestales del país rezagadas por múltiples factores.

EL CARBONO EN EL MUNDO

Las cantidades de carbono, se expresan en t C/año y cuando se calcula como una sumatoria en un período de tiempo específico, las unidades son t C. Aunque actualmente hay discusión acerca de las reglas usadas para medir el C capturado y almacenado en el marco del PK, el flujo anual está siendo usado para contabilizar el C capturado y emitido a nivel nacional por medio de las actividades de forestación, reforestación y deforestación (FRD) (numeral 1.3.4, Artículo 3.3 del PK). Por lo anterior es importante distinguir entre los inventarios de C nacionales, regionales o de un ecosistema en particular de aquellos proyectos cuyo propósito es compensar las emisiones de una cierta cantidad de GEI en un momento dado en el tiempo, ya que el uso de este método en la evaluación del impacto de proyectos de compensación de C puede tener varias desventajas:

- Los flujos anuales varían de un año a otro, haciendo difícil ajustar la captura de C por un proyecto forestal particular a una fuente industrial de emisiones.
- Las empresas dependerían completamente de las compensaciones forestales de C, cuando no fuera posible adquirir una unidad de compensación para mitigar una emisión en particular (por ej., para una cantidad ya adquirida); por lo que sería necesario invertir en un proyecto de fijación de C por periodos de 30 a 50 años.

- Las plantaciones de rápido crecimiento tienen más posibilidades de ser escogidas que las actividades de restauración de ecosistemas boscosos naturales; sin embargo, aunque éstas pueden tener una rápida fijación durante 20 a 40 años, el C almacenado a largo plazo puede ser menor, además de que las áreas restauradas cercanas a la vegetación natural pueden ser reforzadas con la regeneración natural.

Cambio en las existencias de C en el largo plazo

Este método, expresado en t C, se define como el nivel de *equilibrio* del C almacenado en un nuevo sistema forestal, con respecto a una línea base y se utiliza como la principal medida del impacto en la mayoría de proyectos desarrollados bajo el Programa de Actividades Implementadas Conjuntamente (AIC) del Convenio Marco en Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMCCNU) (numeral 1.6.4.1 del PK); sin embargo, hay diversas dificultades en su aplicación práctica:

- Para muchos sistemas boscosos es difícil predecir cuál será el almacenamiento promedio de C, ya que alcanzar un *equilibrio* puede tomar mucho tiempo.
- La definición de un valor de *equilibrio* implica que el nuevo sistema forestal tendrá que permanecer perpetuamente; en la práctica, este supuesto es difícil de asegurar (numeral 1.3.6. del PK). No hay un horizonte de tiempo definido para propósitos contractuales o legales.
- Existen problemas para comparar proyectos con diferentes promedios, tanto de almacenamiento de C como de tiempos de duración.
- Una emisión de C a la atmósfera al comienzo del proyecto, tendrá un efecto de calentamiento por varios años antes de que sea recapturada por un sistema forestal.

Almacenamiento acumulativo de C

También es conocido como el área bajo la curva de almacenamiento de C y se expresa en t C años. Este método fue propuesto por Tipper y de Jong (1998), siendo utilizado posteriormente por Chomitz (1998) y Moura-Costa y Wilson (1999), y se basa en la fuerza radiativa de los GEI en la atmósfera. Utilizando este procedimiento, se ha calculado que el tiempo requerido para compensar la emisión de 1 t C, en el presente, es de 50-60 años; este método presenta ventajas sobre los anteriores en cuanto a que:

- Se resuelven los problemas de cuantificación que se tienen por las diferencias entre el tiempo de emisión y la fijación.
- Se evita el problema de la definición del estatus de largo plazo del uso de la tierra, pues una vez que la fuerza

radiativa de la emisión ha sido compensada, no hay obligaciones en las partes y por lo tanto, se puede iniciar, si se desea, un nuevo contrato de compensación en la misma tierra.

- No se requiere definir condiciones de sostenibilidad indefinida de un estado de equilibrio para el manejo del bosque.
- Hay un vínculo explícito entre el manejo de la compensación de C y el conocimiento del ciclo global del mismo.
- Los métodos de inventarios empleados para monitorear t C años, son consistentes con los métodos usados para evaluar los flujos anuales de C.
- Aunque es deseable un sistema bancario de emisiones, éste no será esencial; ya que el C almacenado en t C años podrá ser pagado retrospectivamente para evitar el riesgo asociado con un fracaso del proyecto, o pagado por adelantado, con un adecuado interés, para facilitar el desarrollo del proyecto.

Sin embargo, Enting (2000), muestra que la propuesta de Tipper y de Jong (1998) en cuanto a la afirmación que plantea que la fijación temporal puede tener un efecto en la reducción de las emisiones o equivalentemente puede proveer una compensación que cancela las emisiones, es incorrecta, por lo que cualquier medida que acredite temporalmente la fijación como una compensación de las emisiones tendrá que usar otro criterio al empleado por los autores mencionados.

Lo visto en este capítulo, abre paso a otra polémica que existe en cuanto a la manera correcta de medir el impacto de la fijación de C en proyectos forestales, es decir, el papel que juegan en la compensación de emisiones de CO₂ y por lo tanto, en la *permanencia* de este tipo de proyectos.

CAMBIO CLIMÁTICO

Efecto invernadero

Los GEI presentes en la atmósfera desempeñan un papel clave en el sistema climático, ya que aunque sólo dejan pasar las radiaciones de onda corta hacia la Tierra, absorben las de onda larga y las vuelven a irradiar indiscriminadamente (Ramanathan, 1985; Bolin, 1989), manteniendo caliente la baja atmósfera y la superficie terrestre. Aunque el efecto de invernadero es indispensable para la vida en la tierra, pues si no existiera, la temperatura promedio del planeta sería de -23 °C (Pabón y Chaparro, 1998) y, a pesar de que el vapor de agua es responsable en un 80 % de dicho efecto, existen también los gases denominados *traza* (dióxido de C, metano, óxido

de nitrógeno y los haloclorofluorocarbonos –HCFC–) que aunque están presentes en pequeñas concentraciones, son importantes en el fenómeno. El aumento excesivo en la concentración de estos gases *traza* causados por el ser humano, repercuten en el cambio climático.

De estos gases *traza* el CO₂ tiene un efecto proporcional de 49 - 67 % en el calentamiento global con respecto a los otros gases (Field, 1995; Brown, 1997), mientras que el impacto de los otros equivale a la mitad del causado por éste (Ludevid, 1998); por lo que es de suma importancia conocer el incremento de C en la atmósfera.

El C en la atmósfera está actualmente incrementándose en cerca de 3.0 Gt/año (Sedjo, 1990) (1 Gt = mil millones de toneladas o 10⁹), aunque Berner y Berner (1996) reportaron de 6.0 ± 0.5 Gt/año, lo que equivale a un aumento de 0.4 - 0.5 % anual. La mayor fuente es la quema de combustibles fósiles, los cuales en la década de los 80 liberaron 5.3 Gt/año (Berner y Berner, 1996). La segunda fuente de C atmosférico son los ecosistemas terrestres asociados con los cambios en el uso de la tierra, de los cuales el C neto liberado ha sido estimado entre 0.4 - 4.7 Gt/año (Sedjo, 1990).

Aumento del CO₂ a través del tiempo

Según análisis de muestras de aire atrapado en el hielo de los glaciares, se estima que las concentraciones de CO₂ durante períodos glaciares oscilaron entre 190 - 200 ppmv (partes por millón de volumen), mientras que en los interglaciares fueron de 260 - 280 ppmv (Bolin, 1989; Huggert, 1991). A finales de la última glaciación la concentración de CO₂ pasó de 200 a 280 ppmv en un período de 7,000 años, con cantidades acumuladas que llegaron a 170 Gt de C en la atmósfera, a una tasa promedio de 0.03 Gt/año; de manera alarmante, los niveles de este gas se han incrementado desde el siglo XVIII hasta el presente en igual cantidad, a una tasa de 3.0 Gt/año (Coviella, 1998).

Antes del siglo XX, las emisiones de CO₂ debidas a cambios en el uso de la tierra (expansión agrícola en latitudes medias y altas) eran superiores a las emisiones procedentes de la quema de combustibles fósiles. A principios del siglo XX y alrededor de 1930, las emisiones eran de igual magnitud para ambas fuentes, pero a partir de la década de los años cuarenta la utilización mundial de combustibles fósiles ha aumentado enormemente, así como la deforestación en zonas tropicales, mientras las emisiones debidas a cambios en el uso de la tierra en latitudes medias y altas ha disminuido (Brown, 1997). De esta forma, los niveles de CO₂ atmosférico se han incrementado desde la revolución industrial, al pasar de 270 - 280 ppmv hasta niveles actuales de 355 - 364 ppmv, lo que equivale a un incremento de aproximadamente un 27 - 30 % (Mabey *et al.*, 1997; Coviella, 1998) y con la expansión de la economía mundial esta tasa seguramente seguirá en

continuo aumento.

En los últimos años se han registrado niveles de emisión nunca antes alcanzados; así, en 1997 se emitieron a la atmósfera, por causa de la quema de combustibles fósiles, 6.3 Gt de C, es decir 0.1 Gt más que las emitidas en 1996 (6.2 Gt de C), lo que equivale a un aumento del 1.6 %, alcanzando una concentración de CO₂ de 364 ppmv, la más alta en los últimos 160,000 años (Brown *et al.*, 1997). En algunos estudios se afirma, que si el nivel de aumento del CO₂ en la atmósfera fuera constante o muy pequeño (del orden del 0.5 % anual), en el año 2100 la concentración alcanzaría 440 ppmv, es decir, un 60 % por encima del nivel preindustrial; si por el contrario continuara el nivel actual de aumento, 1 - 2 % anual desde 1973, en el 2100 la concentración de CO₂ en la atmósfera sería un 100 % más elevada que en la época preindustrial (Bolin, 1989), lo que implica un aumento en la temperatura media entre 1 - 3.5 °C.

Otras investigaciones sugieren que para el 2030, las concentraciones de los otros gases *traza* (excluyendo el CO₂) serán el equivalente a 560 ppmv de CO₂, lo que supone el doble del nivel natural (Ludevid, 1998).

Efectos potenciales del cambio climático y de la intensificación del efecto invernadero

El principal efecto del cambio climático es el calentamiento global del planeta. En los últimos 100 años la temperatura media ha aumentado entre 0.3 y 0.7 °C, atribuido al aumento de las emisiones de los GEI. En numerosos estudios se ha tratado de simular el efecto de diversos escenarios para los próximos 100 años en relación con el calentamiento de la tierra, a continuación se reseñan algunos de ellos. Si se duplica la concentración de CO₂ (escenario posible para mediados del siglo XXI) la temperatura en la superficie de la tierra podría incrementarse entre 1.5 y 5.5 °C (Bolin, 1989; USGCRP, 1998a, 1998b), por lo que se prevé un aumento en altura del espacio del agua a nivel del mar entre 20 - 165 cm. Cabe mencionar que durante el siglo XX se incrementó el nivel global de los océanos un promedio de 12 ± 5 cm (Bolin, 1989), principalmente por la expansión termal del agua oceánica. Otras estimaciones hablan de un aumento entre 3.5 y 4.2 °C para el año 2100 (Domenech, 1991).

Algunos modelos matemáticos (Domenech, 1991) han predicho que el aumento en la temperatura para el año 2100 sería de unos 6 °C en las zonas polares mientras que en la zona ecuatorial tan sólo de 1 °C; este contraste repercutiría en una menor conversión de energía potencial y generaría una variación del sistema global de las masas de aire, provocando probablemente, transformaciones en los climas regionales y locales, por ejemplo, las zonas medias y bajas tendrían climas más húmedos que los actuales, mientras que el norte de Europa y las zonas

centrales de Norteamérica y Asia tendrían climas más secos y cálidos.

Por otro lado, a pesar de los efectos negativos del aumento del CO₂ hay uno que puede considerarse positivo, ya que un aumento de la precipitación y de la temperatura aumentaría la productividad primaria neta de ecosistemas y cosechas en zonas en las que el crecimiento de la vegetación está limitado por uno o ambos factores. Además, se ha demostrado que un aumento en la concentración del CO₂ en la atmósfera produce un efecto fertilizante sobre los árboles y la vegetación en general, ya que la concentración actual está lejos del óptimo para las plantas (Reams y Noejd, 1996). Por ejemplo, Bolin (1989) estima que si no se diera un cambio climático y la concentración de CO₂ se duplicara, se presentaría un aumento entre 0-15 % en el crecimiento y rendimiento de las cosechas de varios cultivos (caña de azúcar, maíz, sorgo, trigo, soya y arroz); sin embargo, el mismo autor señala, luego de varios análisis de impacto, que con un aumento de 2 °C en la temperatura, sin cambios en la precipitación, la tecnología y la variedad de cultivos, las cosechas de Norteamérica y Europa disminuirían un 10 ± 7 %.

LOS BOSQUES Y SELVAS COMO SUMIDEROS Y FUENTES DE CARBONO

Proceso bioquímico de la fijación y emisión de C en las plantas

El gas carbónico del aire, presente en una concentración de 0.03 % (300 mmol por mol de aire), es la única fuente de C para las plantas, las cuales lo capturan y secuestran (incorporándolo a sus tejidos). El paso de este gas a las plantas tiene lugar por difusión desde el medio en el que está más concentrado (el aire), hacia el menos concentrado (el líquido intracelular) donde se disuelve y se pone a disposición de la materia celular. La materia seca vegetal tiene un contenido bastante estable de cadenas de C, que constituye el esqueleto de todas las sustancias orgánicas de las células (prótidos, glúcidos, lípidos) (Goudriaan, 1992). Según Hoen y Solberg (1994), la producción forestal influencia el flujo del C, en forma de CO₂, desde y hacia la atmósfera por dos procesos, la fijación (asimilación) y la emisión, respectivamente. El primero representa el incremento en biomasa en árboles vivos mediante la fotosíntesis, mientras que el segundo representa la descomposición de la biomasa como una consecuencia de la mortalidad natural o la explotación relacionada con el hombre y los usos finales de los bosque, la selva y la vegetación xerófila y riparia.

A través de la fotosíntesis, las plantas capturan CO₂ de la atmósfera, fijando C en la biomasa (biomasa) y liberando oxígeno (O₂) de nuevo a ésta (Ortiz, 1997). La síntesis de la materia orgánica (MO) a través de la

fotosíntesis por las plantas verdes en un ecosistema es llamada producción primaria del ecosistema. La suma total de MO producida por el mismo proceso es llamada producción bruta (*Pb*). Las plantas consumen una parte de lo fotosintetizado en la respiración (*r*), el resto es incorporado a la planta y llamado producción neta (*Pn*), así (Sattoo y Madgwick, 1982) indican que:

$$Pn = Pb - r \quad (1)$$

Contenido de CO₂ en la biomasa

Existen varios métodos para estimar la cantidad de CO₂ fijado por la vegetación; sin embargo, en numerosos estudios (Brown *et al.*, 1986; Schroeder *et al.*, 1993; Hoen y Solberg, 1994; Ortiz, 1997; Ramírez *et al.*, 1997) se ha empleado uno simple para evaluar este proceso, en el cual los datos existentes de biomasa por hectárea (*B*) son multiplicados por un factor (*F*), que involucra el contenido de C (CC, en proporción) en la biomasa seca y la relación entre el peso de la molécula de CO₂ (44) y el peso del átomo de C (12).

$$CO_2 = B * F \quad (2)$$

Donde:

$$F = CC * 44/12 \quad (3)$$

El CC de la madera de las coníferas arbóreas está entre un 50 y 53 %, mientras que en las especies de hoja ancha varía entre 47 y 50 % (Ramírez *et al.*, 1997). En su estudio sobre valoración de la contribución de las plantaciones forestales a cuentas nacionales de Costa Rica, Ramírez *et al.* (1997), asumieron un CC promedio del 50 % para las principales cinco especies plantadas en ese país, entre las que se encuentran *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Eucalyptus deglupta*. Ortiz (1997), utilizó un CC del 45 % para su trabajo en bosques secundarios de Costa Rica. En su estudio sobre las implicaciones de las plantaciones tropicales como sumideros de C, Brown *et al.* (1986) asumieron que 1 g de biomasa = 0.5 g de C, es decir, un CC de 50 %. Goudriaan (1992), sostiene que el CC en la materia vegetal seca varía entre un 45-50 % dependiendo de la especie, y afirma que esta variación es de hecho mucho menor que la de otros elementos minerales como N, P y K, cuyos niveles pueden variar en un factor de cinco según la especie y la fertilidad del suelo.

Algunos factores de conversión de biomasa de tronco a biomasa total de árboles (incluyendo hojas, ramas y raíces) varían entre 1.3 - 3.6 (con un promedio de 2.5) para bosques y selvas naturales y entre 1.3 - 2.7 (promedio 1.9) para plantaciones forestales (Ramírez *et al.*, 1997; Brown y Lugo, 1984; Thoranisorn *et al.*, 1991), esto debido a que tanto los bosques como las selvas naturales cuentan con

la regeneración natural y el sotobosque, característico de esos ecosistemas, no así las plantaciones que además, en la mayoría de los casos son perentorias, como las comerciales.

El papel de las masas forestales

Las masas forestales desempeñan un papel primordial en el ciclo del C porque almacenan grandes cantidades de éste en la vegetación y el suelo, lo intercambian con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, son fuentes de C atmosférico cuando son perturbados por causas humanas o naturales (incendios, deforestación, etc.) y se convierten en sumideros durante el abandono de las tierras y su regeneración natural tras la perturbación, además pueden ser ordenados para alterar su papel en el ciclo global del C (Brown, 1997).

Las perturbaciones (naturales o antrópicas) motivan con frecuencia que los bosques se conviertan en fuentes de CO₂ debido a que la tasa de productividad primaria neta (P_n) es sobrepasada por la respiración total u oxidación de las plantas, el suelo y la materia orgánica muerta (producción neta del ecosistema $P_n < 0$); sin embargo, al mismo tiempo, algunas áreas de bosques aprovechados y degradados, o terrenos agrícolas y pastizales, son abandonados y vuelven de forma natural al bosque o se convierten en plantaciones, transformándose de esta forma en sumideros de CO₂, es decir, la tasa de respiración de las plantas, el suelo y la materia orgánica muerta es sobrepasada por la productividad primaria neta ($P_n > 0$) (Kyrklund, 1990; Brown, 1997). Hoy en día entre el 40 - 60 % del CO₂ emitido por el hombre permanece en la atmósfera y no se sabe con certeza si el resto se está almacenando en los océanos, los suelos o la biomasa de las plantas. Resultados preliminares obtenidos por Phillips *et al.* (1998), muestran que la biomasa de los bosques neotropicales podrían dar cuenta del 40 % del C faltante. Al parecer los océanos son los mayores sumideros de C, aunque varios estudios estiman que éstos sólo absorben entre un 26 - 44 % del CO₂ fósil (Sedjo, 1990). Al respecto, Tans *et al.* (1990), concluyen a partir de un modelo de circulación general que el total de CO₂ fijado por los océanos es considerablemente menor al tomado por los sistemas terrestres; sin embargo, estas afirmaciones se basan en pocos datos, en su mayoría imprecisos y no dejan de ser hipótesis.

a) Las plantaciones forestales tropicales

El área de éstas (31 Mha, 1 Mha = 10⁶ ha) es tan solo el 1 % del área total mundial de bosques naturales (3.4 Gha, 1 Gha = 10⁹ ha o mil millones de ha), pero su impacto en el ciclo global del C puede ser significativo (Brown *et al.*, 1986; Lugo y Brown, 1992; Brown, 1997). Las plantaciones forestales tropicales pueden fijar suficiente C en la biomasa aérea como para compensar el C emitido a la atmósfera

como resultado de los cambios en el uso de la tierra en la zona templada (0,03 - 0,11 * 10⁹t C/año, Brown *et al.*, 1986). Además, las plantaciones pueden secuestrar C en el suelo, especialmente en aquellos casos en que éste ha sido agotado por usos anteriores de la tierra.

b) Los bosques y selvas naturales mundiales

Los bosques de latitudes elevadas o **zona boreal** (entre 50 - 75° N-S) que representan el 30 % del área de bosques naturales mundiales, poseen reservas totales de C de 278 Gt (aunque esto no incluye a los países nórdicos que forman parte de Europa y que podrían añadir alrededor de otros 10 Pg C, 1 Pg = 10 a 15 g), con un 71 % del C total en los suelos; estos bosques representan un sumidero de C de 0,48 ± 0,2 Gt/año, que corresponde prácticamente a la antigua Unión Soviética, la cual contiene aproximadamente el 63 % del C de esta zona (Brown, 1997).

Los bosques de latitudes medias o **zona templada** (25 - 50° N-S) con un 18% del área total de los bosques mundiales, contienen (sin incluir por falta de información, algunos países de las zonas no tropicales de Sudamérica, Africa y Asia/Oceanía) aproximadamente 120 Gt de C en la vegetación y el suelo, este último representando el 58 % del total. De igual forma que los bosques de latitudes elevadas, éstos son considerados sumideros de C del orden de 0.26 ± 0.1 Gt/año; aunque en muchos países se presentan emisiones de C debido a la deforestación, se considera que éstas son suficientemente compensadas (Brown, 1997).

Los bosques y selvas de baja latitud o **zonas tropicales** (0 - 25° N-S) que representan el 52 % (con un 53 % en las masas forestales de América y un 27 % en las de África) del total de bosques y selvas, y reservas de C (Phillips *et al.*, 1998, afirman que puede sólo llegar al 40 % de las existencias mundiales de C) contienen aproximadamente 428 Gt, con una distribución del C entre el suelo y la vegetación de igual magnitud. A diferencia de los dos casos anteriores, se estima que estos bosques son una fuente neta de C relativamente grande de 1.6 ± 0.4 Gt/año en 1990; sin embargo, la media puede ser inferior 1 Gt/año (Lugo y Brown, 1992), por causa de la deforestación, los aprovechamientos y la degradación gradual de las existencias en pie (algunos estimados, como el de FAO, 1993, hablan de 15.4 Mha deforestadas por año entre 1980 y 1990). De esta forma, la fuente tropical total es equivalente a casi el 28 % de las emisiones de combustibles fósiles en 1990 (Brown, 1997).

El papel de los bosques tropicales en el ciclo global del C está sujeto a intensos debates y estudios, particularmente enfocados a la determinación de la magnitud y dirección del flujo neto de C (Delaney *et al.*, 1997).

Algunos autores argumentan que los trópicos son una fuente neta de C debido a las altas tasas de deforestación y a las grandes cantidades de C almacenadas en los bosques objeto de cambios en el uso de la tierra (Houghton, 1995). Otros afirman que los bosques y selvas tropicales mundiales que actualmente están siendo deforestados tienen bajas cantidades de C y otras áreas forestales están aún recuperándose de disturbios pasados, reduciendo así la magnitud de las emisiones de C y compensando la fuente proveniente de la deforestación (Lugo y Brown, 1980; Brown y Lugo, 1984).

En el caso particular de México, se cuenta con una tasa de deforestación entre 0.37 y 1.5 millones de ha anual, resultado de múltiples factores donde los incendios naturales y antropogénicos, y el cambio de uso del suelo son los más lesivos, esto obviamente provee una fuente constante de CO₂ a la atmósfera. Sin embargo, la contribución de oxígeno, y captura y secuestro de carbono solamente están dados en casi toda su magnitud por la vegetación forestal natural (55 205 000 ha) con un equivalente de 54 t·ha⁻¹ de biomasa y 27 t/C/ha aproximadamente y los cultivos anuales (esto perentoriamente), ya que no es significativo el número de hectáreas de plantaciones forestales (65 mil hectáreas) (FAO, 2001). Esto indica que si México desea contribuir a los Programas de Conservación y Mejoramiento Ambiental deberá de hacer mayores inversiones en plantaciones a largo plazo combinado con el aprovechamiento sustentable de los bosques y de selvas naturales.

OPTIMIZACIÓN DEL RECURSO FORESTAL

Kyrklund (1990) sostiene, que debido a que la velocidad de absorción del CO₂ es directamente proporcional al crecimiento de las masas forestales, por lo tanto, preservar los bosques naturales es una manera poco eficaz de fijar CO₂. En cambio, una ordenación forestal basada en cosechar en el mejor momento, convertir la madera con un mínimo de desperdicios en productos duraderos y regenerar debidamente el bosque, permite fijar el máximo posible de C; evidentemente, esta medida de aprovechamiento tiene límites, pues la utilización industrial de los bosques naturales no es factible desde el punto de vista de la conservación del ecosistema.

De esta forma, las áreas forestales (especialmente las plantaciones) pueden manejarse con diferentes enfoques y producir varios servicios, por ejemplo, paisaje, control de clima y agua, variabilidad genética, biomasa, etc. La producción forestal es así un proceso de producción de múltiples entradas/múltiples salidas. Desde el punto de vista de la fijación de C, la producción forestal puede ser un proceso de producción multientrada/doblesalida, donde se analiza el manejo del bosque con respecto a la producción de dos servicios principales: madera y C orgánico. Este proceso de producción es acoplado, es decir, una de las

salidas no puede producirse sin simultáneamente producir la otra hasta cierto nivel (Hoen y Solberg, 1994).

Si se demuestra que los cambios climáticos inducidos por el hombre son reales, entonces al incrementar las existencias de C (como madera o productos forestales duraderos) se tendrán valores marginales positivos, disminuyendo las cantidades de CO₂ atmosférico. Si por el contrario el calentamiento global no es severo, un incremento de las existencias de madera tendrá un valor marginal positivo probablemente utilizándolas como tal.

Esto agrega flexibilidad a los resultados futuros de las actuales acciones de manejo forestal (Hoen y Solberg, 1994). Si una reducción marginal del CO₂ atmosférico aumenta la utilidad, entonces una contribución positiva a la utilidad se obtiene cuando la biomasa está creciendo, mientras que cuando la biomasa está decayendo (por acción natural o antrópica) el efecto es una contribución negativa a la utilidad. Esto es un panorama diferente comparado con el análisis económico de producción forestal, donde la utilidad se tiene cuando la madera es cosechada, suponiendo que un bosque en pie no provee una utilidad marginal en sí mismo (por ejemplo, por recreación o protección) (Hoen y Solberg, 1994).

Si el objetivo de manejo es encontrar una política para reducir la cantidad de CO₂ atmosférico en un período, por ejemplo un año, comparado con un *negocio tradicional* de madera desarrollado sin cualquier consideración de CO₂, se plantearían dos opciones relacionadas con la silvicultura (Hoen y Solberg, 1994):

- Incrementar la cantidad de CO fijado de la atmósfera por medio de la fotosíntesis (incrementando el crecimiento de la biomasa).
- Reducir la cantidad de CO emitida a la atmósfera como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica, es decir, incrementando el tiempo de vida del C orgánico (C en la madera de la biomasa, fibra de madera, árboles vivos, entre otros).

En relación con la silvicultura, la utilidad de las reducciones del CO₂ atmosférico puede ser medida en términos de la cantidad de C orgánico, por ejemplo, como un precio por tonelada de CO₂ fijada. Un análisis económico de la fijación de CO₂ es un problema intertemporal, que plantea algunas preguntas clave (Hoen y Solberg, 1994):

- ¿Qué tan grande será en el futuro la utilidad (precio - nivel relativo), relacionada con una reducción marginal del CO₂ atmosférico?
- ¿Qué nivel de mejora tecnológica (incremento en la productividad) puede esperarse en actividades que influyen la cantidad de CO en la atmósfera?

- ¿Cómo una reducción marginal de CO₂ de hoy, será evaluada, comparada con una reducción² marginal de CO₂ en el futuro?

Los precios relativos proveen la base para la evaluación de una reducción marginal de CO₂ entre otros productos en un punto dado en el tiempo. Las dos primeras influirán en la demanda, el suministro y por tanto, en el precio sombra o costo de oportunidad de la reducción marginal del CO₂. El desarrollo del precio relativo relacionado con la reducción marginal (interrogante 3) del CO₂ podrá ser parcialmente determinado por las expectativas acerca del futuro. Si el clima *empeora* es más probable que esto lleve a un incremento de la demanda para las reducciones del CO₂ y que aumente así su precio marginal (Hoen y Solberg, 1994).

DISCUSIÓN

Un aspecto que afecta a las actividades en la categoría de Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS), es el problema de la *permanencia*, el cual surge del Artículo 12.5 del PK: “las reducciones de emisiones deben ser certificadas sobre la base de beneficios reales, mensurables y a largo plazo en relación con la mitigación del cambio climático”; aunque estos problemas pueden surgir también en proyectos de energía que involucran captura y fijación física de las emisiones de CO₂ por combustión, donde hay un riesgo de liberación accidental (Chomitz, 1998). Los bosques, plantaciones y otras formas de fijación de C son vulnerables a los desastres naturales, como inundaciones, sequías y huracanes, así como a incendios, plagas e intervenciones humanas imprevistas, que pueden afectar la cobertura vegetal y no verse reflejado en la contabilidad del PK (Costa Rica, 2000). De esta forma, una peculiaridad de las actividades UTCUTS es la posible reversibilidad del C secuestrado, es decir, el C incorporado en una plantación o proyecto forestal tiene siempre un riesgo de volver a ser liberado, pudiendo no ser permanente, lo que no ocurre con otro tipo de proyectos, como por ejemplo aquellos de reducción de consumo de combustibles fósiles, en los que una reducción actual, contabilizada apropiadamente, puede significar una reducción a largo plazo en los niveles del CO₂ atmosférico (Chomitz, 1998).

A nivel de determinado proyecto, las actividades que resulten en un secuestro adicional de los GEI de la atmósfera y su almacenamiento en sumideros, pueden generar compensación de C; sin embargo, para que esta compensación ocurra, el efecto neto del secuestro deberá ser idéntico al de haber evitado las emisiones (Moura y Wilson, 1999). Esto da lugar a una pregunta importante: ¿cuánto tiempo debe ser almacenado el C por la vegetación, dado que ésta tiene un tiempo de vida finito de acuerdo a la longevidad de las especies y su tipo de

multiplicación (sexual, asexual o sexual/asexual). El PK simplemente requiere beneficios a largo plazo, pero no define por cuanto tiempo, es decir, la permanencia de estos proyectos con especies vegetales que están sujetas a una declinación biológica. En este caso habría que plantear proyectos infinitos que incluyan plantaciones anuales, propiciando los bosques y selvas irregulares, que en el último de los casos asegurarían un aprovechamiento y restitución constante de las masas forestales para un beneficio generacional.

El PICC (2000) considera que la reversibilidad potencial y por lo tanto, la no permanencia del C almacenado podría requerir una especial atención a la hora de hacer la contabilidad del C, por ejemplo, haciendo que los créditos obtenidos por el aumento del C almacenado se equilibren, contabilizando toda reducción posterior de dicho C, sea cual fuere su causa.

En Costa Rica proponen que el problema de la permanencia para las actividades de las partes que constituyen el Anexo B (protocolo de Kyoto), debe resolverse a través de períodos continuos de cumplimiento. Sin embargo, para garantizar la permanencia de los beneficios netos a largo plazo de actividades de proyectos MDL y poder, en los casos que corresponda, reflejar su reversibilidad en el marco contable del PK, se requiere aplicar un enfoque de portafolio y contabilizar en forma conexa, los beneficios netos en C de las actividades de proyectos domésticos en esta modalidad. Será responsabilidad de la autoridad oficialmente designada ante la Secretaría de la CMCC, reconciliar anualmente la cuenta nacional de los proyectos MDL en las categorías de UTCUTS, de forma que se refleje la reversibilidad (Costa Rica, 2000), sobre todo cuando los UTCUTS incluyeran los métodos de regeneración natural en forma adecuada ecológicamente.

Para un máximo beneficio climático, los proyectos UTCUTS deberían tener una duración perpetua; a pesar de esto, en la práctica es difícil diseñar proyectos de captura con esta concepción, fundamentalmente por las siguientes razones (Ludevid, 1998):

- Falta de mecanismos de garantía, ya que es muy difícil diseñar mecanismos confiables que aseguren la protección del bosque para períodos de siglos.
- Desastres naturales, ya que la captura y fijación de C puede ser interrumpida por una variedad de desastres naturales.
- Afectación de la soberanía, ya que los países hospederos pueden no querer garantizar proyectos perpetuos, pues podrían verlos como una inaceptable violación a la soberanía; estas naciones pueden también ser renuentes a perder la opción de precios asociados con el posible surgimiento de altos valores en los usos de la tierra.

- El desarrollo generacional humano tiene una tendencia cultural hacia la destrucción, en vez de la conservación ambiental y de la paz.

Estas cuatro consideraciones sugieren que los proyectos de captura podrán involucrar compromisos a término fijo para bosques y selvas o conservación del uso de la tierra. Dicho autor plantea la siguiente pregunta ¿suponiendo que un proyecto solamente pospone las emisiones por tres, cuatro o diez décadas, tendrá algún valor o importancia en la mitigación del cambio climático? La respuesta sería, sí, debido a lo siguiente:

- Al posponer las emisiones se retrasa la fuerza radiactiva de los GEI, la cual tiene un efecto acumulativo sobre el clima. Como resultado, los proyectos de captura temporales disminuyen la pendiente de la curva de incremento futuro en la temperatura u otros efectos climáticos, y por lo tanto, los niveles de daño en cada punto en el tiempo serán un poco más bajos; a su vez, si la sociedad tiene una tasa de descuento positiva, posponer los daños representa un beneficio económico.
- Existe una ventaja física de posponer las emisiones de CO₂, ya que el impacto marginal del CO₂ sobre la fuerza radiactiva declina cuando la concentración de CO₂ en la atmósfera aumenta, así al posponer la emisión de CO₂ durante un cierto tiempo en el que las concentraciones hayan incrementado, se habrá suavizado su impacto.

Posponiendo las emisiones se puede ganar tiempo para avanzar en progresos tecnológicos de mitigación. Si la captura es barata y el costo marginal de mitigar las emisiones industriales está creciendo más suavemente que la tasa de descuento, la fijación temporal puede ser un buen negocio.

Desde el ámbito científico, han surgido varias alternativas para tratar de determinar la permanencia del C almacenado por proyectos forestales. Una de ellas es el sistema de contabilización t C años o almacenamiento acumulativo de C, el cual estima, mediante el cálculo del área de la curva de agotamiento del C en la atmósfera, el almacenamiento acumulativo del C requerido para compensar la emisión de 1 t C en el presente (Tipper y de Jong, 1998). Por ejemplo, si se estima que el tiempo de residencia del C en la atmósfera es 200 años, una tonelada emitida será igual a 200 t·año⁻¹.

Teóricamente, esta cantidad es compensada por un proyecto que captura una cantidad de toneladas/años, que equivale a no haberse emitido por 200 años (IISD, 1999). Usando este método, Tipper y de Jong (1998), y Moura y Wilson (1999) estiman que la permanencia de los proyectos forestales debería ser de por lo menos 50 - 60 años. Sin embargo, los autores de este escrito, consideran que este

lapso es demasiado corto, ya que simplemente los proyectos de Mejoramiento Genético Forestal se planean hasta de 100 años o más, debido a la amplia longevidad de la mayoría de las especies forestales.

Asimismo pueden verse, otras posturas, aunque más políticas que técnicas, aceptadas por el PICC y por el PK, plantean un horizonte de tiempo de 100 años para evaluar los beneficios de la captura sobre la prevención de los efectos de la fuerza radiativa del CO₂.

Al igual que en el tema de las actividades UTCUTS y los mecanismos de flexibilidad, no hay un consenso general internacional sobre la permanencia de los proyectos forestales, por lo que existe gran incertidumbre en cuanto a la implementación de este tipo de estrategias para capturar C; sin embargo, se espera que en las próximas reuniones a realizarse, especialmente la COP6, se definan todos estos asuntos metodológicos, económicos, políticos y sociales.

CONCLUSIONES

Las masas forestales, sean bosques, selvas, o vegetación xerófila y ribereña; juegan un papel importante en la fijación y retención del carbono emitido antrópicamente a la atmósfera. La reducción de las emisiones es en todo caso el factor principal, a donde debe ir encaminado el esfuerzo de los gobiernos, unido a una mayor sensibilidad de la población en el consumo de combustibles fósiles.

La conservación de las masas forestales existentes, favoreciendo su regeneración e incrementando su biomasa leñosa, se considera una vía efectiva para la retención de una parte del carbono atmosférico. A ella se une la derivada de la creación de nuevas áreas forestales mediante plantaciones forestales comerciales y de otro tipo, en las que la especie y usos de los productos obtenidos determinarán en buena medida el tiempo de retención de carbono.

Por lo anterior, es de vital importancia la conservación de los bosques naturales como sumideros de CO₂ incentivando la creación de nuevas masas forestales a través de forestaciones (plantaciones comerciales, urbanas y recreativas) y reforestaciones (plantaciones protectoras, faunísticas y escénicas) en complemento con la regeneración natural; como estrategia para reducir la concentración de los GEI al incrementar la biomasa forestal, lo cual permite almacenar el C en los tejidos de las plantas y otros componentes de la vegetación, tales como los suelos, la hojarasca y la necromasa.

LITERATURA CITADA

BASHKIN, M. A.; BINKLEY, D. 1998. Changes in soil carbon following afforestation in Hawaii. *Ecology* 79 (3): 828-833.

- BERNER, E.; BERNER, R. 1996. Global environment. New Jersey: Prentice-Hall. 376 p.
- BOLIN, B. 1970. The carbon cycle. *Scientific American* 223: 125-132.
- BOLIN, B. 1989. The greenhouse effect: climatic change and ecosystems. Chichester: John Wiley & Sons. Scope No 29.
- BROWN, S. 1997. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. Ankara, Turquía: Congreso Forestal Mundial. 107-121 pp.
- BROWN, S.; LUGO, A. 1984. Biomass of tropical forest: a new estimate based on forest volumes. *Science* 223: 1290-1293.
- BROWN, S.; LUGO, A.; CHAPMAN, J. 1986. Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forestry Research* 16: 390-394.
- BROWN, S.; IVERSON, L.; LUGO, A. 1994. Land-use and biomass changes of forest in Peninsular Malaysia from 1972 to 1982: a GIS approach. Cap. 4. 117-144 pp. En: DALE, V.H. (Ed.). Effects of land-use changes on atmospheric concentrations. South and Southeast Asia as a case study. New York: Springer-Verlag.
- CHOMITZ, K. M. 1998. The permanence and duration issue in carbon offsets based on sequestration. World Bank. Paper for comment and discussion subject to revision. 20 p.
- COSTA RICA. 2000. Propuesta parcial: uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura. www.unfccc.org.
- COVIELLA, C. 1998. Tritrophic interactions in elevated atmospheric CO₂. Dissertation proposal. www.insects.ucr.edu/grad/proposal.html.
- DALE, V. H. 1994. Effects of land-use changes on atmospheric concentrations. South and Southeast Asia as a case study. New York: Springer-Verlag. 102 p.
- DELANEY, M.; BROWN, S.; LUGO, E.; TORRES-LEZAMA, A.; BELLO, N. 1997. The distribution of organic carbon in major components of forest located in five life zones of Venezuela. *Journal of Tropical Ecology* 13: 697-708.
- DELCOURT, H.; HARRIS, W. 1980. Carbon budget of the southeastern U.S. biota: analysis of historical change in trend from source to sink. *Science* 210 (4467): 321-323.
- DOMENECH, X. 1991. La contaminación atmosférica. Barcelona: Biblioteca Cultural Barcanova. 58 p.
- ENTING, I. 2000. Comment: On Tipper and de Jong on 'Quantification and regulation of carbon offsets from forestry: comparison of alternative methodologies, with special reference to Chiapas, Mexico'. *International Forestry Review* 2(1): 54-56.
- FIELD, B. C. 1995. Economía ambiental: una introducción. Massachusetts: McGraw Hill. Department of Resources Economics. University of Massachusetts at Amherst. 587 p.
- FAO, 2001. Situación de los bosques en el mundo. FAO. Roma Italia. 175 p.
- GOUDRIAAN, J. 1992. ¿A dónde va el gas carbónico?: el papel de la vegetación. *Mundo Científico* 126(12): 687-692.
- GRUBB, M.; VROLIJK, C.; BRACK, D. 1999. The Kyoto Protocol: a guide and assessment. London: The Royal Institute of International Affairs. 342 p.
- HOEN, H.; SOLBERG, B. 1994. Potencial and economic efficiency of carbon sequestration in forest biomass through silvicultural management. *Forest Science* (3): 429-451.
- HOUGHTON, R. 1995. Land-use change and the carbon cycle. *Global Change Biology* 1: 275-287.
- HOUGHTON, R.; HACKLER, J. 1994. The net flux of carbon from deforestation and degradation in South and Southeast Asia. Cap 7: 301-328 pp. En: DALE, V.H. (Ed.). Effects of land-use changes on atmospheric concentrations. South and Southeast Asia as a case study. New York: Springer-Verlag.
- HUGGETT, R. 1991. Climate earth processes and earth history. Berlin: Springer-Verlag. 281 p.
- IISD. 1999. Flexibility mechanisms. 7 p. www.iisd.ca/linkages/climate/ba/mechanisms.html.
- JASSO, M. J.; LÓPEZ, J. 1991. El mejoramiento genético forestal en la conservación y restauración de áreas forestales. In: I Simposio Nacional, Agricultura Sostenible: Una opción para el desarrollo sin deterioro ambiental. Colegio de Postgraduados-MOA. Montecillo, Méx. pp. 203-230.
- KYRKLUND, B. 1990. Cómo pueden contribuir los bosques y las industrias forestales a reducir el exceso de anhídrido carbónico en la atmósfera. *Unasyuva* 43(163): 12-14.
- LEWIS D.; TURNER, D.; WINJUM, J. 1996. An inventory-based procedure to estimate economic costs of forest management on a regional scale to conserve and sequester atmospheric carbon. *Ecological Economics* 16: 35-49.
- LOPEZ, U. J.; VARGAS, H. J. J.; JASSO, M. J. 1990. Variación genética de la tolerancia a la sequía en una plantación de *Pinus greggii* Engelm. In: I Simposio Nacional de Agua en el Manejo Forestal. Noviembre, 28-30. Chapingo, Méx. México. pp. 204-212.
- LUDEVID, A. M. 1998. El cambio global en el medio ambiente: introducción a sus causas. Madrid: Boixareu. 99 p.
- LUGO, A.; BROWN, S. 1980. Los bosques tropicales: ¿fuentes o sumideros de carbono atmosférico?. *Unasyuva* 32(129): 9-13.
- LUGO, A.; BROWN, S. 1992. Tropical forest as sinks of atmospheric carbon. *Forest Ecology and Management* 54: 239-255.
- MABEY, N. 1997. Argument in the greenhouse: the international economics of controlling global warming. Routledge. 442 p.
- MORRISSEY, W.; JUSTUS, J. 1998. Global climate change. Washington: Committee for the National Institute for the Environment. 18 p. www.enie.org.
- MOURA-COSTA, P.; WILSON, C. 1999. An equivalence factor between CO₂ avoided emissions and sequestration - description and implications in forestry. Submitted for publication. *Ecosecurities*. 8 p. www.ecosecurities.com.
- ORREGO, S. A.; JARAMILLO, L. F.; LOAIZA, L. M. 1998. Venta de servicios ambientales: posibilidades y limitaciones para el departamento del Chocó. Medellín: Alto vuelo comunicaciones. 26 p.
- ORTIZ, R. 1997. Costa Rican secondary forest: an economic option for joint implementation initiatives to reduce atmospheric CO₂. Draft paper presented for inclusion in the Beijer Seminar in Punta Leona. Costa Rica. 19 p.
- OSORNO, A. 1999. Bosques, CO₂ y paz. Medellín: diario El Colombiano.
- PABON, J.; CHAPARRO, R. 1998. Colombia en el ambiente global. En: LEYVA P.; PHILLIPS O.; MALHI Y.; HIGUCHI N.; LAURENCE W.; NÚÑEZ P.; VÁSQUEZ R.; LAURENCE S.; FERREIRA L.; STERN M.; BROWN S.; GRACE J. 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science* 82: 439-442.
- Phillips, A. 1998. Mesuring trees and forests. Cab. International Wallingford Oxon. U. K. 254 p.
- PICC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2000. Informe especial del IPCC: uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y silvicultura. Resumen para responsables de políticas. 22 p. www.ipcc.org.

- PREBBLE, C. 1998. Cambios climáticos: el factor bosque. *Actualidad Forestal Tropical* (Boletín de la OIMT) 6(1): 2-5.
- RAMANATHAN, V. 1985. Trace gas trends and their potential role in climate change. *Journal of Geophysical Research* 81.
- RAMÍREZ O.; GÓMEZ, M.; SHULTZ, S. 1997. Valuing the contribution of plantation forestry to the national accounts of Costa Rica from the ecological economics perspective. Beijer Research Seminar. Costa Rica. 28 p.
- REAMS, G.; NOEJD, P. 1996. Increasing CO₂ and tree growth: drawing conclusions from observational data. XX World Congress of the International Union Forestry Research Organizations (IUFRO). Tampere (Finland): 6-16 agosto/95. pp. 89-97.
- RIVERA, A. 1999. La cumbre de Bonn apremia a ratificar el Protocolo de Kyoto: la conferencia prepara acuerdos definitivos para el año 2000. EL PAIS, viernes 5 de noviembre de 1999.
- SATOO, T.; MADGWICK, H. 1982. Forest biomass. La Haya: Martinus Nijhoff/ Dr. W. Junk Publishers. 152 p.
- SCHROEDER, P. E.; DIXON, R. K.; WINJUM, J. K. 1993. Ordenación forestal y agrosilvicultura para reducir el dióxido de carbono atmosférico. *Unasylva* 173 (44): 52-60.
- SEDJO, R. 1990. ¿The global carbon cycle: are the forest the missing sink?. *Journal of Forestry* 88(10): 33-34.
- STUIVER, M. 1978. Atmospheric carbon dioxide and carbon reservoir changes. *Science* 199(4236): 253-258.
- TANS, P.; FUNG, Y.; TAKAHASHI, T. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science* 247: 1431-1447.
- THORANISORN, S.; SAHUNALU, P.; YODA, K. 1991. Litterfall and productivity of *Eucalyptus camaldulensis* in Thailand. *Journal of Tropical Ecology* 7(2): 275-279.
- TIPPER, R.; JONG, B. de. 1998. Quantification and regulation of carbon offsets from forestry: comparison of alternative methodologies, with special reference to Chiapas, Mexico. *Commonwealth Forestry Review* 77(3): 219-228.
- USGCRP (United States Global Change Research Program). 1998a. Anticipated climate changes in a high-CO₂ world: implications for long-term planning. 3 p. www.usgcrp.gov.
- USGCRP (United States Global Change Research Program). 1998b. Greenhouse gas emissions scenarios: their content, assumptions, and implications. www.usgcrp.gov.
- VARGAS, H. J. J.; JASSO, M. J.; BERMEJO, V. B. 1994. El Mejoramiento Genético Forestal como Base para el Establecimiento de Plantaciones Forestales. In: IV Reunión Nacional de Plantaciones Forestales. Julio, 19-21. SFF-INIFAP. México, D. F. pp. 49-80.
- WOODWELL, G.; WHITTAKER, R.; REINERS, W.; LIKENS, G.; DELWICHE, C.; BOTKIN D. 1978. The biota and the world carbon budget. *Science* 119: 141-146.