

Potencialidad de las actividades agroforestales orientadas a la generación de activos de carbono en Colombia*

Agroforestry activities with great potential for the generation of carbon assets in Colombia

Camilo Torres Sanabria**

Recibido: 2010-08-20

Aceptado: 2010-11-01

Publicado: 2010-12-30

* Esta investigación fue realizada en la Facultad de Administración de Empresas Agropecuarias de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia.

** Agradecimientos: El reconocimiento a esta investigación se direcciona hacia los estudiantes del programa de Administración de Empresas Agropecuarias de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, por sus valiosos aportes realizados en las cátedras de Gestión Ambiental Agraria y Formulación de Proyectos Agrarios. Se reconoce el apoyo y la gestión de las directivas de la Facultad de Ciencias Económico-Administrativas en especial a Laura Esperanza Rey Ramírez. Ecólogo, Magíster en Economía Ambiental y Recursos Naturales, candidato a Doctor en Economía Ecológica. Docente asociado e investigador, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Económico-Administrativas. Laboratorio de Limnología. Correo electrónico: camilo.torres@utadeo.edu.co

Resumen

Las actividades agroforestales son desarrolladas mediante un modelo productivo conjunto, concentrando plantaciones de madera con actividades agrícolas de sombra o de pastoreo controlado. De igual forma, éste es un sistema que puede generar una amplia oferta de servicios ambientales, como es el caso de certificar la actividad dentro de un proyecto captador y regulador de carbono, mediante la incorporación de dióxido de carbono en las estructuras vegetales manejadas. Por ésta y muchas razones más, Colombia puede incursionar dentro del mercado maderero, que genere oferta de servicios ambientales como una alternativa de negocio, en búsqueda de mitigar la crisis actual del sector rural. Se puede decir que un sistema agroforestal registra beneficios económicos de manera conjunta y continua en tres grandes componentes, considerando 1) la venta permanente de Certificados de Reducción de Carbono (CER) en los mercados de valores especializados, 2) los beneficios de la actividad asociada, ya sea pecuaria o agrícola, y 3) la venta de la madera al final del ciclo productivo. Este planteamiento se desarrolló mediante la propuesta de un modelo teórico de maximización de beneficios. Se propone que el sistema agroforestal, dentro del mercado del financiamiento de carbono, garantiza un precio de los bonos de Carbono óptimo (t^*t^*), igual al beneficio marginal de producir una unidad adicional forestal, que genere reducciones validadas y certificadas de unas cantidades establecidas de Gases Efecto Invernadero (GHG). El ejemplo práctico se expresa mediante una plantación a pequeña escala de *Tectona grandis* por un periodo de 20 años, donde la actividad conjunta percibe beneficios económicos netos totales de 171,240 dólares por hectárea para la madera aserrada, y de 114,740 dólares para la madera en bloque.

Palabras clave autor: Certificados de Reducción de Emisiones, reducción de emisiones verificadas, gases efecto invernadero, *Tectona grandis*.

Palabras clave descriptores: sistemas agroforestales, mecanismo de desarrollo limpio, mercado de madera.

Abstract

Agroforestry activities are developed through a joint production model, concentrating timber plantations with agricultural shadow activities or controlled grazing. In the same way, this is a system that can be generating a wide range of environmental services, such as the project certification activity within a Carbon sequestrate. This occurs when the Carbon Dioxide gets into the plant structures managed. For this and many other reasons, Colombia can make inroads in the market supply of timber, and generate environmental services business as an alternative to mitigate the current crisis in the rural sector.

We can say that an agroforestry system recorded jointly and continuously profits of three components. (1) The permanent transaction of Carbon Reduction Certificates (CER) in the securities markets specialized. (2) The profits of the agricultural or animal activity associated. (3) The timber sale at the end of the production cycle. This approach was developed by proposing a theoretical model of profit maximization. It is proposed for the agroforestry system in the Carbon finance market, when the prices guarantees the optimum Carbon bonds (t^*t^*), is equals the marginal benefit of producing a unit that increase an additional productive forest, and this can be validated and certified reductions of amounts established Greenhouse Gases (GHG). The case study is taken to a small-scale plantation of *Tectona grandis* for 20 years, where joint activity seen total net economic benefits of \$ 171,240 per hectare for lumber or plates, and \$ 114,740 for the wood block.

Key words author: Certificates of Emissions Reduction, verified emission reduction, green house gases, *Tectona grandis*.

Key words plus: Agroforestry, clean development mechanisms, wood market. Pendiente título, resumen y palabras clave en francés. LO hace la Editorial

Introducción

La producción agroforestal se constituye en un sistema productivo donde se combinan plantaciones arbóreas, con la implementación de cultivos o el manejo integrado de animales de manera conjunta, en la misma unidad de producción, donde el objetivo principal es mantener los principios de rendimiento y sostenibilidad de los factores. Este es un modelo productivo que puede ser aplicado en los países de economías en desarrollo, donde los sistemas productivos agrícolas no son competitivos con respecto a otras regiones geográficas y los riesgos se maximizan, generando, así, problemas de seguridad alimentaria, discontinuidad en el flujo de los ingresos campesinos, entre otras situaciones adversas (Deininger, 2004).

Considerando el planteamiento de incorporar sistemas alternos a los planes de reforestación, se abre la posibilidad de generar ingresos productivos a las comunidades campesinas, prestando de manera paralela una amplia gama de servicios ambientales que van desde la regulación de los caudales hídricos, el incremento de la cobertura vegetal, el restablecimiento de los flujos genéticos en términos de biodiversidad (Torres & Buitrago, 2008), la restauración de los paisajes, la recuperación de los suelos, entre otros muchos más bienes y servicios ambientales (Ávila, 2007; Constanza, 2000). Estos servicios ecológicos son obviamente importantes para la sostenibilidad y la calidad de vida de las poblaciones humanas (Daily, 1997).

Uno de los servicios complementarios al desarrollo de un sistema agroforestal y que surge a partir de la formulación, ejecución y evaluación de un proyecto productivo de este tipo, es la captura de dióxido de carbono (CO₂) que es un gas producido por la quema de combustibles fósiles y que también es generado por la ineficiencia de algunos los modelos productivos (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2007). La emisión de este tipo de gases (conocidos como Gases Efecto Invernadero), genera problemas globales que alteran la dinámica climática, afectando de manera directa el bienestar de las poblaciones humanas de menores ingresos y más vulnerables (Macchi, 2008), deteriorando las condiciones de salud (Patz, 2004), disminuyendo los índices de la biodiversidad y generando incertidumbre alimentaria (Gilman, Randall & Schwartz, 2007).

Por lo anterior, el presente escrito propone la incorporación de los sistemas agroforestales en el país dentro del mercado de reducción de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GHG: sigla en inglés), generando ingresos adicionales a los productores campesinos, maximizando los beneficios por las actividades pecuarias, agrícolas y productivas, asociadas al sistema forestal maderero. Los

productores maximizan su función de beneficios, incorporando al modelo teórico los ingresos provenientes de la comercialización de activos de carbono o Certificados de Reducción de Emisiones (CER: siglas en inglés) de GHG. Por otro lado, el mercado del financiamiento de carbono se desarrolla por medio de instrumentos de transacción voluntario, donde el vehículo de transacción son las Emisiones Reducidas Verificables (VER: sigla en inglés), los cuales son comúnmente entendidos como bonos mercadeables de reducción de carbono generados con estándares y requisitos diferentes a los parámetros establecidos en el protocolo de Kyoto. De igual forma, las diferentes modalidades de transacción permiten transar en los mercados de valores los CER a largo plazo, los cuales consideran la fluctuación de los precios del mercado (ICER), y otros certificados que pueden ser transados en un tiempo fijo en el futuro, congelando el precio de transacción en el tiempo (tCER).

De igual forma, en el presente escrito, se realiza un ejercicio práctico mediante la generación de beneficios de una plantación de *Tectona grandis* en una sola hectárea, durante la planeación de un proyecto forestal a 20 años. Los beneficios económicos calculados incorporan la generación y transacción de los CER y la comercialización de madera al final del proyecto, en condiciones de oferta en bloque o aserrada.

Oportunidades de agro-forestación bajo el mecanismo de desarrollo limpio (MDL) en Colombia

El sector forestal proyectado hacia el ámbito ambiental, se ha convertido en una necesidad mundial, evidenciando el comportamiento del medio ambiente y sus grandes variaciones por acciones del efecto invernadero. Observamos que este incremento de gases está en aumento y agudiza la situación de degradación del medio ambiente, afectando el entorno y la calidad de vida. En efecto, la alteración en el ciclo del carbono interviene de manera decisiva para nuestro futuro climático (Costa, 2007). Es en esta etapa donde se genera la necesidad por la recuperación del medio ambiente y los servicios ambientales resultantes del desarrollo de plantaciones de bosques, los cuales actúan como sistemas captadores de CO₂.

En miras del desarrollo del sector forestal, Colombia posee grandes extensiones de tierras asignadas y con derechos claros de propiedad, lo cual facilita el manejo sostenible y el establecimiento de plantaciones forestales con amplias posibilidades económicas y ambientales (Monroy & Aguirre, 2003). El sector forestal nace con prioridades sociales y como herramienta para erradicar la pobreza de las comunidades humanas más vulnerables (FAO, 2006). Es por

eso que, en países como Colombia, se cuenta con un gran potencial para el desarrollo económico y social de esta actividad, donde las ventajas comparativas radican en las condiciones climáticas, edafológicas e hídricas, sin mencionar la diversidad genética registrada en el país (Torres & Buitrago, 2008). El área potencial estimada en la generación de proyectos forestales en Colombia, supera las 16 millones de hectáreas, donde solo se han desarrollado 235 mil hectáreas hasta finales del año 2009 (USAID, 2009). Por otro lado, se debe considerar que alrededor de 11.5 millones de hectáreas de este gran potencial presentan restricciones menores con respecto a la deficiencia de factores en los suelos, ya que éstos han sido modificados por usos ineficientes y diferentes a la vocación o potencial de uso de los suelos. Según la USAID (2008) estos suelos de alta vocación se pueden manejar con tecnologías apropiadas de bajo costo, donde actividades focalizadas en la agricultura y de mínimo impacto ambiental, pueden ser opciones o alternativas que minimicen los costos de implementar un sistema productivo forestal. Considerando lo anterior, se está aprovechando menos del tres por ciento de las áreas productivas aptas para la reforestación y desarrollo de proyectos forestales, limitando el potencial comercial del mercado de la madera y la generación de activos de carbono por la captura de CO₂ en las estructuras vegetativas de los bosques plantados.

Las actividades del sector primario en Colombia se han focalizado hacia el desarrollo de sistemas productivos agrícolas y ganaderos los cuales superan las 41.7 millones de hectáreas, de las cuales nueve millones de hectáreas son destinadas a la ganadería extensiva (Departamento de Planeación Nacional [DNP], 2008). Esta cantidad de tierra subutilizada, puede ser un foco de generación de proyectos agroforestales sostenibles en el tiempo, generadores de empleo, maximizadores de beneficios económicos, de relevancia ambiental global, incluyentes socialmente y competitivos en los mercados internacionales. Existen diversos proyectos que se podrían desarrollar bajo los estándares, lineamientos y metodologías de la Comisión Internacional del Cambio Climático para Naciones Unidas (UNFCCC por sus siglas en inglés), el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) y los Mercados Voluntarios de financiamiento de carbono.

Los proyectos potenciales pueden ser de diferentes tipos:

- Reforestación de áreas degradadas.

- Restauración de tierras degradadas a partir de la forestación¹ y reforestación².
- Forestación y reforestación de tierras degradadas a través de la siembra de árboles, regeneración natural asistida y control de pastoreo de ganado.
- Reforestación o forestación de tierra actualmente en uso agrícola.
- Implementación de actividades de forestación y reforestación para uso comercial e industrial.
- Forestación y reforestación con arbustos en tierras degradadas.

Agroforestación en Colombia y financiamiento de carbono

Los propósitos, acuerdos y misiones de la UNFCCC, fueron incorporados dentro de los principios gubernamentales de los países participantes en la convención de Río de Janeiro en el año 1992. Esta iniciativa entró en acción a principios del año de 1994 para los países participantes, donde el propósito primal fue la mitigación en las emisiones y minimización de las concentraciones de GHG en la atmosfera, las cuales son generadas por las actividades humanas. El logro de este propósito se proyectó en un plazo suficiente para que los ecosistemas incorporen dentro de sus fases del ciclo de carbono, las moléculas de CO₂ resultantes de las emisiones antropogénicas. De esta iniciativa mundial surgió el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) dentro del marco del Protocolo de Kioto en el año de 1997; donde, los países en desarrollo se comprometieron a colaborar con los países desarrollados (mayores generadores de GHG) a cumplir con las metas de reducción de emisiones de GHG, mediante la implementación de proyectos que mitigaran el efecto de estos gases, reflejando un desarrollo sostenible y garantizando la adicionalidad³ de la ejecución (Monroy & Aguirre, 2003).

Colombia avaló y ratificó su participación dentro de esta iniciativa mundial, mediante la Ley 629 del 2000 por la cual se adopta el Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático;

-
- 1 Forestación: se define como el establecimiento de bosques en tierras que carecieron de bosques en un período mínimo de 50 años.
 - 2 Reforestación: se refiere a la conversión de áreas deforestadas, que anteriormente tenían bosques, en tierras forestales.
 - 3 La adicionalidad se refiere al proyecto que representa capturas o reducciones de Carbono mayores a las que ocurrirían si no se ejecutara el proyecto. De igual forma se debe considerar que el proyecto no se ejecutaría si no fuese por los incentivos económicos, sociales y ambientales generados bajo el marco del MDL.

pero solo hasta el año 2004, el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial mediante la resolución 453 adopta los principios y el marco técnico de los procedimientos para la adopción de proyectos MDL, años después de ser implementados y ejecutados por países como Brasil, Chile, India, entre muchos otros, los cuales le llevan ventaja competitiva y experiencia en el desarrollo de este tipo de proyectos a Colombia.

Por otro lado, en Colombia se desarrollan estrategias para la implementación de este tipo de actividades mediante el Certificado de Incentivo Forestal (CIF), creado por medio de la Ley 139 de 1994 en donde el Gobierno, por medio del Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario (FINAGRO), reconoce directamente en dinero los gastos del establecimiento y mantenimiento de las plantaciones forestales establecidas en un terreno de vocación forestal para fines comerciales o de protección. Estos beneficios del CIF están orientados tanto para personas naturales como jurídicas, contemplando de forma paralela algunas exoneraciones tributarias al productor, además estos beneficios consideran los riesgos imputables al sistema productivo.

A pesar que el país cuenta con una gran biodiversidad de especies forestales con un alto valor económico y forestal, el desarrollo de este tipo de proyectos es mínimo, no obstante, siempre se han considerado las altas cotizaciones en los precios de venta por unidad volumétrica de madera. Los precios del mercado de la madera varían de acuerdo a las ciudades y disponibilidad de manejo de las cantidades volumétricas de la madera. Lo anterior es un argumento de fondo para demostrar la adicionalidad de proyectos agroforestales en Colombia, solventando las barreras tecnológicas o culturales que abaten este tipo de proyectos.

En tres ciudades de Colombia el metro cúbico de madera registra los siguientes precios de venta promedio:

Tabla 1
Precios (Pesos colombianos, año base 2005) de algunas maderas nativas
de alta categoría comercial para múltiples propósitos.

Nombre Común	Nombre Científico	Medellín			Barranquilla			Bogotá		
		COL\$/m3 Bloque	COL\$/m3 Aserrada							
Abarco	<i>Cariniana pyriformis</i>	564,000	951,000	537,000	883,200	733,260	1,497,850			
Cedro	<i>Guarea trichiloides</i>	577,200	974,820	446,000	682,640	574,390	1,031,000			
Roble	<i>Quercus sp.</i>	517,750	871,200	366,800	625,000	395,500	756,600			
Teca	<i>Tectona grandis</i>	1,098,000	1,618,000	773,800	975,200	658,300	1,041,600			
Nogal	<i>Cordia alliodora</i>	328,300	636,500			417,804	681,021			
Algarrobo	<i>Hymenaea courbaril</i>	636,000	984,720			704,400	1,265,150			
Bálsamo	<i>Myroxylon balsamun</i>	631,720	924,000	593,600	1,800,000	696,970	1,237,730			
Pino nativo	<i>Pinus radiata</i>					241,643	499,950			

Fuente: Modificado de USAID (2008). Complementado de FEDEMADERAS a precios base de 2005.

La anterior información está calculada a partir del promedio de precios de ventas, pero existen precios mayores para maderas de primera calidad, donde el metro cúbico puede alcanzar precios de transacción doméstica hasta de cuatro millones de pesos⁴ para especies de Abarco, Teca y Bálsamo.

Un proyecto agroforestal está encaminado a planificar actividades que fortalezcan los procesos empresariales de los productos agropecuarios, con un objetivo económico forestal definido, bajo un conjunto de actividades enmarcadas en unos límites temporales y presupuestales. Este tipo de proyectos productivos debe incorporar especies nativas que no interfieran ecológicamente con el entorno ambiental, generando barreras de protección, procesos de sombrío, fauna asociada que ejerza control biológico, fertilización y estabilidad del suelo, entre otras muchas más funciones asociadas.

La participación del sector forestal en la economía colombiana se refleja en dos sectores, el silvícola y el manufacturero. El sector silvícola incluye la producción derivada del aprovechamiento de los bosques, la reforestación y los productos como látex, goma, resina corteza, madera en bruto y leña. El sector manufacturero abarca la transformación de la madera, los procesos productivos, la generación de bienes comerciables como muebles y el conjunto industrial conformado por la producción de pulpa, papeles y cartones (Orozco, Castaño & Sánchez, 1994).

Por otro lado, el mercado de los bonos de carbono resultantes por la formulación, ejecución, validación y certificación de un proyecto forestal de este tipo, genera unos ingresos económicos significativos por la transacción de estos certificados en las bolsas de valores especializadas del mundo. Se debe considerar que el proceso de certificación y generación de estos activos de carbono es metódico y estricto, donde se debe asumir una serie de costos asociados al proceso. Para que un proyecto agroforestal en Colombia sea generador de CER transables en las bolsas de valores de los mercados internacionales, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Idea del proyecto: Se debe generar un documento con unos estándares específicos los cuales se expresan en un documento llamado el PIN (Notas de las ideas del proyecto, en sus siglas en inglés), el cual es radicado y avalado en la oficina de cambio climático para Colombia, jurisdicción del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Este ente se conoce como la Autoridad Nacional Designada (DNA por sus siglas en inglés).

4 La conversión aproximada para inicio del año 2010 es de 1 USD por 2.000 pesos colombianos.

2. **Formulación:** El proyecto debe presentarse en un documento de diseño de proyecto (PDD por sus siglas en inglés), bajo un modelo de estándar internacional⁵. Este documento debe incluir detalles del proyecto con respecto a la pertinencia, aplicación, adicionalidad, metodología implementada, cálculo inicial de línea base (escenario donde el proyecto no se implemente), impactos socioeconómicos, partes interesadas, fugas de emisiones, justificación de la plantación, periodo de acreditación, estrategia de monitoreo y complementos de archivos sustentables.
3. **Validación:** El PDD es remitido a una entidad internacional que revise la formulación del proyecto, la cual es conocida como el DOE (Entidad Operacional Designada, por sus siglas en inglés) considerada como el ente internacional más idónea y competente en el tema de validación de proyectos agroforestales del mundo, la cual es acompañada por un seguimiento estricto de los organismos de control de Naciones Unidas.
4. **Registro:** La junta internacional de Naciones Unidas registra el proyecto en la base de datos internacionales por la petición y aval del DOE encargado del proyecto. Este es un requisito fundamental para que los futuros compradores de estos bonos o CER identifiquen internacionalmente el proyecto.
5. **Verificación:** La entidad internacional encargada del proyecto o DOE, verifica las capturas de CO₂ generadas en el proyecto agroforestal verificando lo planteado en el PDD.
6. **Certificación:** A partir de la petición de ente internacional DOE, se certifica que la captura de carbono es real y que puede expedir los CER correspondientes.
7. **Comercialización:** Es el proceso de transacción de bonos de carbono expresados en los CER emitidos por la entidad DOE de acuerdo a las cantidades de toneladas de CO₂ capturadas o reducidas por el sistema agroforestal en el ciclo del proyecto acordado en el PDD. Los CER se venden en las bolsas de valores del mundo, los cuales son comprados por los sectores empresariales de los países industrializados que se comprometieron a generar e incentivar reducciones de GHG en los acuerdos internacionales bajo el marco del MDL. Si estos sectores empresariales de los países contratantes no cumplen con las metas acordadas, se enfrentarían en sanciones, multas o cierres de los sistemas productivos.

5 Se recomienda revisar los respectivos formatos metodológicos en la página web: <http://cdm.unfccc.int/index.html>

Los precios de transacción en el mercado de los CER establecen los beneficios generados por el sistema productivo agroforestal por el concepto de captura de carbono durante el ciclo del proyecto. Estos beneficios son expresados como el producto resultante de las correspondientes cantidades de CO₂ capturado en el tiempo y el precio de los CER que sean transados en el mercado del financiamiento de carbono. La tendencia de estos precios muestra una disminución progresiva los últimos dos años, pero algunas proyecciones realizadas hacia el año 2012 pronostican un aumento significativo del precio de transacción de las cantidades de CO₂ capturadas o reducidas por medio de proyectos MDL. La siguiente información grafica (Figura 1) muestra la tendencia del precio transado en los años de 2008 y 2009 por una tonelada de CO₂ reducida o capturada por un proyecto MDL certificado, de igual forma se muestran las cantidades transadas en ese periodo.



Figura 1. Comportamiento de los precios de transacción de los CER y las cantidades transadas en los años 2008 y 2009.

Fuente: Modificado de Point Carbon (2009)⁶; UNFCCC (2008).

Considerando lo anterior, se puede decir que un sistema agroforestal registra beneficios económicos de manera conjunta y continua de tres grandes componentes, considerando (1) la venta permanente de CER por la captura de

6 La base de datos de la entidad internacional Point Carbon se actualiza diariamente en el seguimiento de los precios del mercado de CER: <http://www.pointcarbon.com/productsandservices/carbon/> Revisar la base de datos de Point Carbon (2010) del Banco Mundial.

carbono, (2) los beneficios de la actividad asociada de la madera ya sea pecuaria o agrícola, y (3) la venta de la madera al final del ciclo productivo del proyecto.

Modelo económico del beneficio en la actividad agroforestal

El beneficio es una medida económica en la cual se genera una diferencia entre los ingresos provenientes de las actividades productivas en función de las cantidades y de los precios del mercado, sustrayendo los costos generados en los procesos de producción que dependen de las cantidades producidas y de los precios de los factores de producción (Mankiw, 2002). El siguiente modelo muestra la estructura teórica que enmarca al productor que incursiona en el mercado de los CER. Generando, validando y comercializando los bonos de carbono, donde las variables del modelo propuesto son:

$y_k = y_k$ = Productos agrícolas, pecuarios o forestales madereros de la empresa k .

$w_k = w_k$ = Precio del producto en un mercado competitivo.

$r_k = r_k$ = Vector de insumos o factores de producción.

$p_k = p_k$ = Vector de precios de los insumos o factores de producción.

$s_k = s_k$ = Cantidad de bonos de carbono o CER generados en el sistema de producción agroforestal.

$t = t$ = Precio internacional o de transacción de cada CER o paquete de CER.

La función de producción de la empresa agroforestal k (f^k) está en función del precio de los insumos o factores de producción (r_k) y de la cantidad de bonos de carbono o CER que pueda validar y transar en un mercado de valores internacionales (s_k). Se representa de la siguiente forma:

$$f^k = (r_k, s_k) \leq y_k$$

Donde la función de producción debe ser menor o igual a la cantidad de productos agrícolas generados en el sistema, como son bienes agrícolas, productos pecuarios o bienes forestales madereros que pueden ser comercializados bajo un ciclo de rotación sostenible.

Cuando la empresa forestal k se enfrenta al mercado de intercambio de bonos de carbono o CER, por unidades reducidas de GHG, la maximización de la función de beneficios está dada por la siguiente estructura teórica:

$$\pi_k^t = \underset{y_k, r_k, s_k}{MAX} w_k y_k - p_k s_k + t s_k$$

La maximización está sujeta a la función de producción:

$$f^k = (r_k, s_k) \leq y_k$$

El proceso de maximización plantea la siguiente función de optimización bajo el modelo de los multiplicadores de Lagrange o Lagrangiano:

$$L = w_k y_k - p_k s_k + t s_k - \lambda_k [f^k = (r_k, s_k) - y_k]$$

Al resolver el Lagrangiano y optimizando bajo la cantidad de CER obtenidos en el proyecto, conseguimos las condiciones de primer orden con respecto a la cantidad de bonos de Carbono (CER generados) en el sistema de producción agroforestal:

$$\frac{\delta L}{\delta s_k} = t - \lambda_k \frac{\delta f^k}{\delta s_k}$$

Si igualamos a cero tenemos:

$$t - \lambda_k \frac{\delta f^k}{\delta s_k} = 0$$

Donde:

$$t^* = \lambda_k \frac{\delta f^k}{\delta s_k}$$

Para maximizar los beneficios empresariales del sistema agroforestal k , dentro del mercado del financiamiento de carbono en la transacción de los CER, el precio de los bonos de carbono o CER óptimo (t^*) debe ser igual al beneficio marginal de producir una unidad productiva adicional forestal que genere reducciones validadas y certificadas de unas cantidades establecidas de GHG.

Aplicación práctica a un sistema agroforestal

A continuación se realiza un recuento económico de costos de producción de un sistema agroforestal de la especie nativa *Tectona grandis*, en las diferentes etapas de desarrollo del proyecto bajo el marco del MDL. Esta es una especie que puede crecer desde los cero hasta los 1,100 metros sobre el nivel del mar en un clima cálido a húmedo, donde los mejores rendimiento se obtienen a una temperatura media de 22 a 27 grados centígrados en suelos profundos, francos y bien desarrollados (Reforestadora de la Costa S.A. [Refocosta], 2008). Así mismo, se plantea un potencial flujo de ingresos provenientes de los procesos de transacción de bonos de Carbono o CER con una proyección de 20 años en el ciclo del proyecto. El ejercicio plantea la incorporación del sistema productivo de una hectárea.

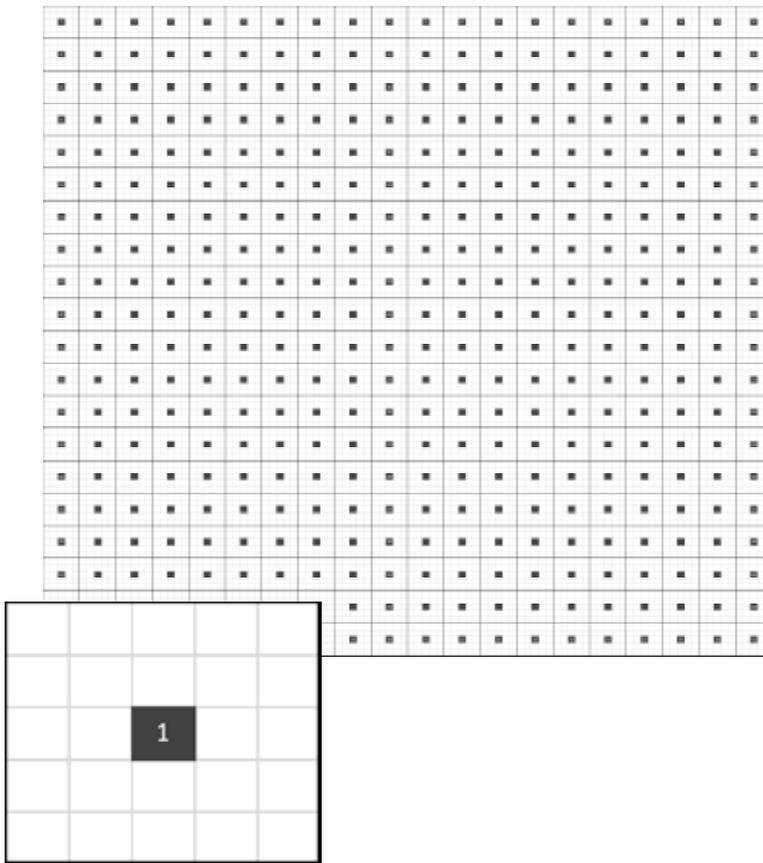


Figura 2. Establecimiento del cultivo de *Tectona grandis* en una hectárea.
 Nota: Cada árbol es plantado en un área de 25 metros cuadrados.
 Fuente: Autor.

El cultivo se desarrolla en una hectárea donde se disponen 400 plántulas de *T. grandis* certificadas en el origen productivo (en Colombia los distribuidores certificados y autorizados venden cada plántula a dos dólares), donde la ubicación deseada es de una plántula en 25 metros cuadrados, con una separación de cinco metros de cada individuo. Lo que garantiza el óptimo desarrollo de cada árbol y permite incorporar actividades agrícolas de sombrero o actividades de pastoreo transitorio y controlado (Figura 2).

La plantación de los 400 individuos en una hectárea generaría unos costos de 800 dólares en la compra de las plántulas certificadas, donde la plantación, el manejo y la manutención de la plantación en una hectárea tienen un promedio de 1.200 dólares por año. Durante los 20 años se generarían gastos de 24.000 dólares de manejo. El propósito de uso de la madera de la especie *T. grandis* es destinado a la venta en bloques o láminas aserradas dependiendo del propósito manufacturero. El corte de los 400 árboles de una hectárea es de 2.000 dólares y si ésta es aserrada, se tendría que adicionar 6.000 dólares en los costos (Tabla 2).

Tabla 2
Costos de implementación, siembra, certificación y corte de una hectárea de plantación de *T. grandis* de 20 años para la venta de madera aserrada o en bloque de pie.

	Costos USD / Hectárea	
	Aserrado	Bloque
400 plántulas certificadas	\$ 800	\$ 800
Manejo de 20 años por hectárea	\$ 24,000	\$ 24,000
Corte de los 400 árboles	\$ 2,000	\$ 2,000
Aserrado	\$ 6,000	\$ -
Certificación forestal dentro del MDL	\$ 10,000	\$ 10,000
Total	\$ 42,800	\$ 36,800

Fuente: Modificado y calculado a partir de Refocosta (2008) y USAID (2009).

Los ingresos generados por la venta de la madera están determinados por el precio de comercialización y el formato de venta en el manejo de la madera. La plantación de 400 árboles después de su maduración y finalización del ciclo del proyecto (20 años) genera 250 metros cúbicos de madera, considerando un crecimiento promedio anual de 12.5 metros cúbicos de madera por hectárea. De acuerdo a la Tabla 1, se establecieron los precios estimados en el mercado de la comercialización de madera, obtenida al final de los 20 años que es formulado el proyecto. La estimación económica muestra que la venta de madera aserrada

genera 200.000 dólares de ingreso bruto y la comercializada en bloque registra de ingresos brutos de 137.500 dólares, para este caso práctico planteado.

Por otro lado, al certificar el bosque plantado dentro de un proyecto del MDL, se consideran los CER generados desde el primer año de la plantación. Actualmente, se consideran precios conservadores de seis dólares por tonelada de CO₂ capturado en un sistema forestal certificado. Según el Banco Mundial y algunas transacciones registradas en su base de datos, se transa una tonelada de CO₂

Tabla 3
Cálculos de las cantidades de fijación de CO₂ en una plantación de *T. grandis* de una hectárea y los ingresos generados por la comercialización de los CER.

Descripción	Unidades	Cantidad
Densidad de la plantación	Arboles/Hectárea	400
Fijación de CO ₂	ton CO ₂ /Año/Árbol	0.3
Fijación de CO ₂	ton CO ₂ /Año/Hectárea	120
Fijación de CO ₂	ton CO ₂ /20Años/Árbol	6
Fijación de CO ₂	ton CO ₂ /20Años/Hectárea	2,400 ⁺
Precio actual* de 1 CER (1ton** CO ₂)	USD/1CER	6
Ingresos por el comercio de CER	USD/Año/Hectárea	720
Ingresos por el comercio de CER	USD/Año/Árbol	1.8
Ingresos por el comercio de CER	USD/20Años/Hectárea	14,400
Ingresos por el comercio de CER	USD/20Años/Árbol	36

* Calculado a partir de la metodología: *Approved consolidated afforestation and reforestation baseline and monitoring methodology*. AR-ACM0001. UNFCCC, 2010.

* Precio de comercialización actual, Marzo de 2010: Revisar Point Carbon, 2010.

** ton.: se refiere a toneladas de Dióxido de Carbono capturado.

La Tabla 3 muestra el ingreso generado por la comercialización de los CER proveniente del sistema productivo de *T. grandis* en el ciclo del proyecto productivo planeado a 20 años. Estos ingresos por la generación de Activos o Bonos de Carbono superan los 14.400 dólares por hectárea durante los 20 años, bajo un escenario conservador. Si las proyecciones a futuro realizadas por la agencia del Banco Mundial (Point Carbon, 2010), superan los 45 dólares por tonelada capturada y certificada mediante un CER, los ingresos de este sistema productivo sería de 108.000 dólares en 20 años de certificación, solo por la comercialización de Activos o Bonos de Carbono. Por otro lado, la recomendación al realizar este tipo de proyectos es generar cultivos de gran escala, por ejemplo si

el cultivo se realiza en 500 hectáreas, el ingreso total bruto por la comercialización de los CER en 20 años bajo un escenario conservador, superaría los siete millones de dólares.

Tabla 4
Cálculos de la actividad forestal en una plantación de *T. grandis* de una hectárea considerando los ingresos generados por la comercialización de los CER y la comercialización de la madera.

Periodo	Costos	Ingresos	Beneficios Madera Aserrada	Beneficios Madera en Bloque
1	12,000		-12,000	-12,000
2	1,200		-1,200	-1,200
3	1,200	1,800	600	600
4	1,200	720	-480	-480
5	1,200	720	-480	-480
/	/	/	/	/
19	1,200	720	-480	-480
20	3,200	200,720	191,520	135,020
		Total	171,240	114,740

Fuente: Cálculos del Autor.

La Tabla 4 muestra el flujo de beneficios netos generados por las actividades de captura de carbono y comercialización de la madera en una hectárea de plantación, ya sea en madera aserrada o madera en bloque. Los costos relacionados en el periodo inicial corresponden a 12.000 dólares, considerando la plantación de los árboles, la certificación del bosque reforestado dentro del marco del MDL y el manejo del primer periodo. En este primer periodo no se registran ingresos, ya que solo hasta el tercer periodo se pueden comercializar los CER generados dentro de un marco conservador en la comercialización. Cada periodo generaría 720 dólares por concepto de la comercialización de 120 toneladas capturadas de CO₂ certificadas. Cada tonelada de CO₂ certificada (CER) se comercializaría a seis dólares, dentro de un marco conservador. Los costos del periodo final consideran el manejo del periodo, el corte de los 400 árboles plantados por hectárea y el manejo pos-cosecha para el caso de la madera aserrada⁷. Los beneficios netos de comercializar los CER generados durante los

7 Es necesario ratificar que los ingresos por la madera aserrada son mucho mayores que los ingresos de la madera en bloque. Solo por la venta y comercialización de la madera aserrada se recibirían por ingresos brutos 200.000 dólares, y por la madera en bloque el ingreso bruto sería de 137.500 dólares. Estos ingresos están dentro del supuesto de que la madera no es de primera calidad, dentro de un marco

20 años y la venta de la madera aserrada serían de 171.240 dólares por hectárea; si la madera es comercializada en bloque los beneficios netos serían de 114.740 dólares, considerando la comercialización de los CER generados.

Tabla 5
Cálculos del Valor Presente Neto (VPN) de la actividad forestal por concepto de la comercialización de CER y madera. Tasa Interna de Retorno (TIR) de la inversión propuesta.

Madera Comercializada	VPN (5%)	VPN (10%)	VPN (12%)	TIR
Aserrada	\$ 55,689	\$ 14,197	\$ 6,228	14.4%
Bloque	\$ 34,395	\$ 5,798	\$ 371	12.2%

Fuente: Cálculos del Autor.

Al generar esta proyección de los beneficios totales, tanto por la generación de CER como por la venta de la madera, se puede inferir una rentabilidad positiva en el sistema productivo forestal, considerando los 20 años del ciclo productivo y una sola hectárea plantada. La comercialización de madera aserrada presenta un mayor flujo de beneficios netos, pero requiere una tasa de rendimiento mínimo mayor que la comercialización de madera en bloque (Tabla 5).

Discusión

Los sistemas forestales asociados a actividades agrícolas o pecuarias son considerados como procesos productivos sostenibles e integrales, ya que incorporan actividades sostenibles ambientalmente y económicamente viables. De forma paralela, Colombia tiene un gran potencial en el desarrollo de estas actividades que aseguran la oferta alimentaria (Costa, 2007), y que suministran una amplia variedad de servicios ambientales como es la captura o secuestro de carbono (Torres & Buitrago, 2008). De igual forma, el país presenta un área potencial estimada en la generación de proyectos forestales que supera las 16 millones de hectáreas, donde solo se han desarrollado 235 mil hectáreas hasta finales del año 2009 (USAID, 2009).

En Colombia, se pueden desarrollar diversas modalidades dentro de la conformación de proyectos agroforestales, considerando la generación de beneficios económicos conjuntos por la comercialización de madera, la certificación del bosque dentro del marco del MDL incursionando al mercado de los Activos

conservador, a pesar de adquirir plántulas certificadas, lo que es muy poco probable. Lo esperado es comercializar madera de primera calidad cuadruplicando los ingresos, en un escenario optimista.

de Carbono o CER con el propósito de mitigar los efectos del cambio climático (Patz, 2004; UNFCCC, 2007), por los incentivos fiscales o subvenciones bajo la política pública de Colombia como es el caso del CIF (DNP, 2008; FINAGRO, 2009), y por el constante flujo de caja de las actividades agrícolas o pecuarias transitorias y controladas.

El precio de comercialización de la madera de especies nativas, permite generar ingresos considerables al largo plazo, donde los precios de las maderas de primera calidad hace atractivo el mercado (Fedemaderas, 2005; USAID, 2008, 2009). Este tipo de maderas se garantiza por medio de incorporar plántulas certificadas mediante avances tecnológicos (Torres & Buitrago 2008), y considerar un manejo cultural eficiente (Refocosta, 2008).

El modelo de maximización de beneficios económicos propuesto, incorpora las actividades forestales desarrolladas, los ingresos generados por la comercialización de los CER, el cual es un beneficio que cada vez será mayor a medida que incrementa el precio de transacción de los mismos. Para maximizar estos beneficios empresariales del sistema agroforestal, dentro del mercado del financiamiento de Activos de Carbono, el precio de los bonos de carbono o CER óptimo debe ser igual al beneficio marginal de producir una unidad productiva adicional forestal que genere reducciones certificadas.

La aplicación del modelo teórico es válido a un caso práctico, mediante la generación de un proyecto agroforestal de pequeña escala de la especie nativa *Tectona grandis*. La plantación se realiza en una sola hectárea, con una proyección forestal de 20 años. Por esta actividad conjunta se pueden percibir beneficios económicos netos totales de 171.240 dólares por hectárea para la madera aserrada, y de 114.740 dólares para la madera en bloque, con una rentabilidad positiva a diferentes tasas de descuento en el cálculo del Valor Presente Neto y con una Tasa Interna de Retorno baja, lo que hace de la iniciativa a pequeña escala productiva muy rentable.

Referencias

- Agencia para el Desarrollo Internacional. (2008). *Una perspectiva de la competitividad forestal de Colombia*. Programa MIDAS de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Washington: Autor.
- Agencia para el Desarrollo Internacional. (2009). *Programa Colombia foresta: plan de monitoreo y evaluación*. Programa MIDAS de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. Washington: Autor.
- Ávila, V. S. (2007). Los modelos de la economía ecológica: una herramienta metodológica para el estudio de los servicios ambientales. *Gaceta ecológica*, 84, 85-91.
- Costa, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia. Universidad de Los Andes. *Revista de Ingeniería*, 26, 74-80.
- Costanza, R. (2000). Social goals and the valuation of ecosystem services. *Ecosystems*, 3, 4-10.
- Daily, G. (1997). *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. Washington, DC: Island Press.
- Deininger, K. (2004, october). *Land policies for growth and poverty reduction: Key issues and challenges ahead*. Paper presented at UN, FIG, PC IDEA Inter-regional Special Forum on The Building of Land Information Policies in The Americas, Aguascalientes, México.
- Departamento de Planeación Nacional. (2008). *Distribución de recursos para el certificado de incentivo forestal con fines comerciales*. Bogotá: Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES 3509.
- Food and Agriculture Organization of The United Nations. (2006). *Better forestry, less poverty*. Rome: Autor.
- Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario. (2009). *Manual de servicios de Finagro*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá: Autor.
- Gilman, N., Randall, D. & Schwartz, P. (2007). *A system vulnerability approach to consider the potential impacts to 2050 of a mid-upper greenhouse gas emissions scenario*. San Francisco, Ca: Global Business Network.
- Macchi, M. (2008). *Indigenous and Traditional Peoples and Climate Change*. Geneva, Sw: International Union for Conservation of Nature.
- Mankiw, G. (2002). *Principles of Economics*. New York: Harcourt Brace and Company Publishers.
- Monroy, N. & Aguirre, A. (2003). *El protocolo de Kyoto: Una oportunidad para la industria colombiana*. Bogotá: Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.
- Orozco, J. M., Castaño, C. & Sánchez, H. (1994). *Lineamientos estratégicos de política para el desarrollo forestal sustentable*. Bogotá: Ministerio de Medio Ambiente.
- Patz, J. A. (2004). Global warming. Health impacts may be abrupt as well as long term. *BMJ*, 328, 1269-1270.
- Point Carbon. (2010). *The data, information, news, analysis, calculations, models, forecasts and systems*. Point Carbon, World Bank, Oslo (Head Office), Washington D.C. Extraído el 2 de agosto, 2010, de: www.pointcarbon.com

- Reforestadora de la Costa S.A. (2008). *Desarrollo tecnológico para la producción y certificación de materia forestal reproductivo de Teca (Tectona grandis) para la costa atlántica colombiana* [Cartilla de propagación por semilla]. Bogotá: Autor.
- Torres, F. & Buitrago, G. A. (2008). Prospectiva de la biotecnología aplicada en el sector forestal en Colombia. *Gestión y Sociedad*, 1 (1), 89-107.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2007). *Climate change: Impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries*. Bonn: Autor.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2008). *Potential of carbon markets*. Bonn: Autor.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2010). *Methodologies for small scale CDM project activities*. Extraído el 15 de agosto, 2010, de <http://cdm.unfccc.int/methodologies/SSCmethodologies/index.html>