

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE ECONOMIA

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN ECONOMÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y DE LOS
RECURSOS NATURALES

**EFFECTO DE LA CAPTURA DE CO₂ SOBRE LA DETERMINACIÓN DEL TURNO
BIO-ECONÓMICO Y LA VALORIZACIÓN DE LA TIERRA DEL SISTEMA
AGROFORESTAL NOGAL (*CORDIA ALLIODORA*) - CAFÉ (*COFFEA ARABICA*)
EN EL EJE CAFETERO COLOMBIANO**

CLAUDIA PATRICIA ESCALANTE MALDONADO

ASESOR:

JORGE HIGINIO MALDONADO

Bogotá, Mayo de 2006

**EFFECTO DE LA CAPTURA DE CO₂ SOBRE LA DETERMINACIÓN DEL TURNO
BIO-ECONÓMICO Y LA VALORIZACIÓN DE LA TIERRA DEL SISTEMA
AGROFORESTAL NOGAL (*CORDIA ALLIODORA*) - CAFÉ (*COFFEA ARABICA*)
EN EL EJE CAFETERO COLOMBIANO***

Claudia Patricia Escalante Maldonado**

Mayo de 2006

RESUMEN

A partir de la firma del Protocolo de Kyoto, el servicio ambiental de captura de carbono que prestan los bosques comenzó a tener un valor en el mercado. Bajo estas condiciones, los propietarios de plantaciones forestales podrían modificar sus decisiones con respecto al momento óptimo para talar los árboles de modo que puedan obtener los mayores beneficios posibles e incrementar el valor de su tierra.

En Colombia, como en muchos países de Latinoamérica, los sistemas agroforestales resultan ser una buena alternativa para fomentar las plantaciones forestales puesto que al diversificar la producción es posible lograr mejores ingresos y menores riesgos para los productores.

En este sentido, este trabajo examina el efecto que tendría la captura de carbono sobre los turnos de corta óptimos y el valor de la tierra bajo un sistema agroforestal conformado por el nogal (*Cordia alliodora*) y el café (*Coffea arabica*), combinación frecuentemente utilizada en las zonas cafeteras colombianas. A partir de un precio de 7 US\$/tonCO₂ capturado y una tasa de descuento de 7% se encontró que la captura de carbono atrasa el turno óptimo de una rotación de 15,11 a 17,35 años, lo cual produce un incremento en el Valor Presente Neto (VPN) de la inversión de 5.717 US\$/ha a 7.995 US\$/ha. Asimismo, la captura de carbono alarga el turno óptimo de infinitas rotaciones de 9,92 a 10,94 años, lo cual genera un aumento en el valor de la tierra agroforestal de 17.007 a 19.960 US\$/ha. Sin embargo, los resultados cambian cuando se consideran diferentes precios para el CO₂ capturado y tasas de descuento.

Clasificación JEL: Q15, Q23, Q24, Q27

Palabras Clave: captura de carbono, modelo bio-económico, plantación forestal

1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de combatir el problema del cambio climático global, la Convención sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto (PK) vinculan a la mayoría de los países

* Artículo presentado para optar al título de Magíster en Economía del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales.

** El autor agradece a Dios por la oportunidad brindada y a Jorge Higinio Maldonado (asesor del artículo) por el respaldo. También dedica con el corazón el presente trabajo a su abuelo José Antonio Maldonado Camacho.

industrializados a comprometerse en la reducción de Gases Efecto Invernadero (GEI). Dentro de los mecanismos con que cuentan estos países para cumplir con sus compromisos, existe el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) el cual les contribuye a complementar sus reducciones domésticas con otras logradas a un menor costo en naciones en desarrollo.

Debido a que los árboles durante su etapa de crecimiento, por medio del proceso de fotosíntesis, absorben o capturan CO₂ - el gas con mayor contribución al efecto invernadero - tanto la Convención como el PK promueven proyectos de captura de carbono bajo actividades de forestación y reforestación. A pesar de que persiste el debate y la incertidumbre sobre los resultados del PK, muchas medidas mitigadoras ya se encuentran en implementación.

En este sentido, Colombia posee ventajas comparativas para establecer nuevas plantaciones forestales. Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y el Observatorio Agrociencias Colombia (2005), el país tiene vastas áreas con vocación forestal distribuidas en varios pisos altitudinales con ventajas en clima, calidad de suelos y costos de mano de obra. Sin embargo, las áreas con plantaciones comerciales ocupan solo el 0.7% del potencial estimado por el Plan Nacional de Desarrollo Forestal (PNDF) para dicho fin (25 millones de hectáreas), donde la producción de madera se basa en su mayoría en la explotación de los bosques naturales dado que la actividad de plantación forestal no está consolidada en el país como práctica económica sostenible y alternativa para el uso agropecuario de la tierra.

La incorporación de sistemas agroforestales es una opción para promover la plantación de árboles en áreas agrícolas al tiempo de disminuir la presión sobre los bosques naturales. Según Salgado (2004, p. 46), “para muchos países de la región [Latinoamericana], en donde la pobreza y el minifundio están generalizados, no es posible desarrollar plantaciones forestales comerciales, sin embargo la posibilidad de diversificar la producción en sus terrenos es una alternativa muy interesante para disminuir sus riesgos y mejorar sus ingresos”.

En Colombia el sistema agroforestal de café bajo sombra es una práctica tradicional en aquellas zonas donde las condiciones de suelo y clima no favorecen el adecuado desarrollo del cultivo. Las especies más utilizadas para proporcionar sombra al cafeto son: guamo (*Inga spp.*), plátano (*Musa regia*), nogal (*Cordia alliodora*), carbonero (*Callandria sp*) y las acacias. En cuanto a la producción de café, la especie más utilizada es el *Coffea arabica*. En el país, cerca del 60% de la caficultura se encuentra bajo algún tipo de sombrío (CENICAFÉ, 2006).

En este sentido, la combinación de café con árboles de nogal (*Cordia alliodora*) tiene cierto arraigo en la cultura cafetera, debido a que el nogal es una especie forestal que crece naturalmente en este paisaje y los cafeteros reconocen sus bondades como especie maderable de alto valor; su madera se utiliza para la construcción naval, para ebanistería de lujo y en la delimitación de las fincas (Rubiano, 2000).

Según Chamorro, Gallo y López (1994) cuando el café se cultiva sólo, únicamente aprovecha los nutrientes que están en las capas superficiales del suelo; los que se encuentran en las capas profundas no son asequibles a sus raíces. Sin embargo, si el café se cultiva con plantas de raíces profundas como el nogal, esos nutrientes se convierten en hojas y luego caen produciendo una recirculación de los nutrientes y disminuyendo la necesidad de fertilización por parte del agricultor. Igualmente, bajo este sistema, se presenta una mejor calidad en el grano de café, especialmente en el aumento del peso del fruto y una mayor proporción del peso de la almendra con respecto al peso total del fruto.

Del mismo modo, bajo el cultivo de café con nogal se han logrado rentabilidades financieras atractivas. Por ejemplo, un análisis económico de éste sistema realizado en una finca localizada en Montenegro, Quindío obtuvo un Valor Actual Neto (VAN) de la inversión de 6.448 US\$/ha y una relación beneficio/costo de 1,3 considerando una edad de corta para el nogal de 13 años (Rubiano, 2000). Asimismo, otra evaluación económica realizada por CENICAFÉ para un proyecto agroforestal de 5 años en Chinchiná, Caldas encontró una utilidad neta de 3.170 US\$/ha y una relación beneficio/costo de 1,27 considerando una edad de aprovechamiento forestal de 17 años; es decir que los árboles ya tenían 12 años al inicio del proyecto (Chamorro, Gallo & López, 1994)¹. Estas evaluaciones económicas no tomaron en cuenta la venta de carbono capturado dentro de sus beneficios.

Dentro de los sistemas agroforestales y en general en todo tipo de plantaciones forestales, las decisiones económicas relacionadas a la extracción de los productos en el tiempo se basan en los mercados de la madera o pulpa, entre otros. Generalmente la captura de carbono no es una actividad tomada en cuenta como un beneficio social y ambiental, que mediante la posibilidad de participar en el MDL puede generar ingresos adicionales para los productores sin que éste tenga que alterar ninguno de sus insumos de producción.

¹ Las rentabilidades acá presentadas fueron calculadas con precios corrientes de 1994 y un tipo de cambio medio para el mismo año de 826,56 pesos colombianos por dólar, dato obtenido del Banco de la República (2006^a).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal analizar el efecto de la captura de CO₂ sobre la determinación de turnos de corta bio-económicamente óptimos y la valorización de la tierra en sistemas agroforestales conformados por el café (*Coffea arabica*) y el nogal (*Cordia alliodora*) en el eje cafetero de Colombia. Cuantificar la magnitud de este efecto es muy importante, no solo para dar recomendaciones sobre política forestal sino también para proveer de herramientas útiles para posibles negociaciones dentro del MDL.

El documento se desglosa en seis secciones. La sección 2 muestra la revisión de literatura sobre el contexto legal e institucional del MDL en el sector forestal tanto a nivel internacional como nacional; asimismo, se muestra una revisión de los trabajos previos relacionados con la captura de carbono en la estimación de turnos óptimos de corta y del valor de la tierra. La sección 3 presenta el marco teórico asociado a cuatro modelos de turnos óptimos forestales considerando la captura de CO₂: el turno técnico, el turno ambiental, el turno de una rotación y el turno de Faustmann. La sección 4 describe la metodología, la base de datos y la estimación de las funciones de producción de madera comerciable y CO₂ capturado. La sección 5 presenta los resultados bajo diferentes escenarios, un análisis de comparación entre los mismos y un análisis de elasticidades ante cambios en los precios del CO₂ y en las tasas de descuento. Finalmente, en la sección 6 se muestran las conclusiones y recomendaciones.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Acuerdos Internacionales y Sector Forestal dentro del MDL

La firma de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), durante la Cumbre para Medio Ambiente y Desarrollo realizada en Río de Janeiro, Brasil, en junio de 1992, fue el punto de partida para la generación de una serie de acuerdos destinados a reducir y estabilizar la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) causantes del calentamiento global.

Durante la CMNUCC se estableció la posibilidad de crear mecanismos flexibles de reducción de emisiones, a través de los cuales las partes puedan invertir en proyectos de mitigación de emisiones en otros países. Es así que en la primera Conferencia de las Partes² COP-1, que se

² Según el Art. 7 de la CMNUCC, se autoriza a las Conferencias de las Partes (COP) como organización para tomar las decisiones necesarias para promover la aplicación eficaz de la Convención (ONU, 1992).

llevó a cabo en Berlín en 1995, se inició una fase piloto de prueba de los mecanismos flexibles denominada Actividades de Implementación Conjunta (AIC).

Posteriormente, durante la tercera Conferencia de las Partes (COP-3) realizada en Kyoto, Japón en diciembre de 1997, se firmó el Protocolo de Kyoto (PK) que exige a los países del Anexo B³ una reducción en promedio de 5.2% de sus emisiones expresadas en CO₂ equivalente a los niveles registrados el año 1990 para el primer periodo de compromiso del 2008 al 2012.

Asimismo, dentro del PK se estableció el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) que permite a los países desarrollados reducir el costo de cumplimiento de sus compromisos mediante el comercio de “Certificados de Reducción de Emisiones” (CRE’s) con países fuera del Anexo B (países en desarrollo) y así cooperar en su desarrollo sostenible.

Los dos sectores de la economía que generan más emisiones de GEI son: el sector energético mediante actividades relacionadas a la producción y uso de combustibles fósiles; y el sector de uso de suelo, cambio de uso de suelo y forestería (LULUCF)⁴ a través de la remoción de bosques, debido a la explotación de madera y a la ampliación de la frontera agropecuaria. En este sentido, los acuerdos internacionales sobre el cambio climático incluyen una serie de disposiciones que permiten realizar acciones tendientes a reducir las emisiones generadas en ambos tipos de actividades.

Con respecto al sector forestal, el Artículo 3.3 del PK considera a las actividades de forestación⁵ y reforestación⁶ posteriores a 1990 como las únicas opciones de captura de GEI que pueden ser consideradas para el primer periodo de compromiso. Sin embargo, el Artículo 3.4 presenta la posibilidad de que otras actividades de LULUCF puedan ser incluidas en las negociaciones del segundo periodo de compromiso del 2013 al 2017 (ONU, 1997).

³ Países desarrollados junto con países que están en proceso de transición a una economía de mercado.

⁴ Sector LULUCF por sus siglas en inglés Land Use, Land Use Change and Forestry.

⁵ Definida dentro del MDL como “la conversión inducida directamente por el hombre de tierras que no han sido forestadas [pobladas con árboles] por lo menos en 50 años, a tierras forestadas a través de plantaciones, sembrados y/o promociones inducidas por el hombre de fuentes de semilla naturales.”

⁶ Definida dentro del MDL como “la conversión inducida directamente por el hombre de tierras no forestadas a tierras forestadas a través de plantaciones, sembrados y/o promociones inducidas por el hombre de fuentes de semilla naturales, en tierras que fueron forestadas pero que han sido deforestadas.”

Después de Kyoto, las negociaciones continuaron y continuarán debido a la gran cantidad de temas pendientes que se generan a partir de las diferentes posiciones, estudios y experiencias relacionados a las diferentes formas de mitigar el efecto invernadero. Entre las reuniones más importantes relacionadas al tema de actividades LULUCF dentro del MDL esta la COP 7 realizada en Marrakech el año 2001, en la cual la Decisión 11/CP7 establece un tope máximo para este tipo de actividades igual al 1% de las emisiones de 1990 para el primer periodo de compromiso, considerado muy pequeño y restrictivo para la participación del sector forestal dentro del MDL (Salgado, 2004).

Otra reunión muy importante fue la COP 9 en Milán el año 2003 donde se desarrollaron modalidades para superar los problemas de no permanencia del carbono en sumideros⁷, para lo cual se crearon dos nuevos tipos de CRE's: los certificados temporales (CRET's) y los certificados de largo periodo (CREI's). Por un lado, los CRET's son aquellos provenientes de un proyecto de forestación o reforestación, expiran al final del siguiente periodo de compromiso respecto al cual fueron emitidos y son emitidos luego de cada verificación (cada 5 años) tomando en cuenta el total de carbono removido por el proyecto desde el inicio de sus actividades. Por otro lado, los CREI's son aquellos provenientes también de un proyecto de forestación o reforestación, expiran al final del periodo de acreditación del proyecto que puede ser de 20 años con dos posibilidades de renovación (60 años) o de 30 años sin posibilidades de renovación y son emitidos luego de cada verificación (cada 5 años) tomando en cuenta la variación en los stocks de carbono removido por el sumidero respecto a la verificación anterior (Gutierrez, 2004 y Salgado, 2004).

Del mismo modo, en la COP 9 se definieron cinco tipos de reservorios de carbono o "carbon pools" válidos para el cálculo de la línea base y la absorción neta efectiva en los proyectos forestales: biomasa superficial, biomasa subterránea, detritos, necromasa y carbono orgánico del suelo. Otro punto muy importante fue que se abrió la posibilidad a proyectos de pequeña escala en actividades de forestación y reforestación bajo dos condiciones: i) solo pueden absorber GEI por menos de 8 kilotoneladas de CO₂ por año y ii) los proyectos deben ser ejecutados por comunidades y/o personas de bajos ingresos (Salgado, 2004). El objeto de esta medida es minimizar los costos de transacción, facilitar la aprobación e implementación de

⁷ El problema de la no permanencia se da cuando la acción humana o la ocurrencia de perturbaciones naturales como incendios, plagas, tala ilegal, robos, entre otras pueden convertir a sumideros en fuentes de emisión.

este tipo de proyectos a grupos sociales pobres y al mismo tiempo contribuir a que estos puedan obtener beneficios del MDL.

Recientemente, en noviembre del 2005, durante la 21^a Reunión de la Junta Ejecutiva del MDL se aprobó la primera metodología para verificar la adicionalidad⁸ de los proyectos MDL forestales y planear la manera de monitorearlos (ver CDM Executive Board, 2005^b). Existen otras metodologías y procedimientos para actividades de forestación y reforestación dentro del MDL que han sido propuestas pero que todavía no están del todo aprobadas, se espera avances al respecto y se prevé la posibilidad de que se comience a retomar el tema de conservación de bosques naturales y otras actividades LULUCF no aceptadas aún dentro del PK para el siguiente periodo de compromiso.

2.2 Marco Legal e Institucional para el MDL en Colombia

Colombia firmó la CMNUCC en 1992, ratificándola en febrero de 1995 (Salgado, 2004). Del mismo modo, el país ratificó el Protocolo de Kyoto en el año 2000 mediante la Ley 629 (CAEMA y Carbono & Bosques, 2004). También el año 2000, el gobierno colombiano con el apoyo del Banco Mundial realizó el Estudio de Estrategia Nacional para la Implementación del MDL en Colombia, en el cual se evalúa el potencial y las restricciones del país, tanto en el sector forestal como el energético, para generar proyectos de reducción de emisiones. Así mismo se desarrollaron líneas estratégicas para la participación del país en este nuevo mercado.

Posteriormente, en agosto de 2002, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial llevó a cabo el lanzamiento de la Oficina Colombiana para la Mitigación del Cambio Climático (OCMCC) que es la institución encargada del registro y aprobación de los proyectos MDL en el país. Esta oficina tiene como objetivo promover el desarrollo de proyectos de alta calidad que reduzcan y/o capturen GEI y al mismo tiempo aporten beneficios sociales significativos que aporten a la lucha contra la pobreza y a la erradicación de cultivos ilícitos en Colombia (Salgado, 2004). La instauración de este cuerpo nacional ha significado un gran aporte para la formulación adecuada de proyectos forestales bajo el

⁸ Según lo acordado en la COP 9 “un proyecto MDL de forestación o reforestación es adicional si las remociones actuales netas por sumideros de GEI son incrementadas por encima de la suma de los cambios en los stocks de carbono, en los reservorios dentro de los límites del proyecto, que no hubieran ocurrido en ausencia del proyecto MDL de forestación o reforestación registrado” (CDM Executive Board, 2005^a).

esquema del MDL, actualmente el país tiene un portafolio de 6 proyectos elegibles de captura de emisiones GEI en negociación (MAVDT, 2006).

Existen otras medidas nacionales relacionadas con la implementación y manejo de plantaciones forestales. Entre ellas está la Ley 139 de 1994, que introduce el Certificado de Incentivo Forestal (CIF) que es un subsidio que da el gobierno a los productores para cubrir los costos de establecimiento y mantenimiento de nuevas plantaciones forestales en reconocimiento a los beneficios tanto sociales como ambientales de la reforestación⁹ (Aldana, 2003). En este sentido, el CIF se constituye como un promotor nacional de la actividad forestal que converge con los objetivos de la CMNUCC en cuanto a la reducción de GEI.

Del mismo modo, el 5 de diciembre de 2000, en Colombia se aprobó el Plan Nacional de Desarrollo Forestal (PNDF) que tiene como fin el “establecer un marco estratégico que incorpore activamente al sector forestal en el desarrollo nacional, optimizando las ventajas comparativas y promoviendo la competitividad de productos forestales maderables y no maderables en el mercado nacional e internacional, a partir del manejo sostenible de los bosques naturales y plantados” (MMA et al., 2000).

Finalmente, la Ley General Forestal 1021 de 2006, recientemente expedida el 20 de Abril del presente año, establece las normas legales y coordinaciones institucionales necesarias para que el Estado colombiano maneje las actividades relacionadas con los bosques naturales y las plantaciones forestales. El acta declara de prioridad nacional la conservación y el manejo sostenible de bosques naturales, asimismo como el establecimiento de plantaciones forestales en suelos con vocación forestal. En este sentido, el capítulo 3 del título 2 trata únicamente los diferentes aspectos relacionados específicamente a las plantaciones forestales y a los sistemas agroforestales (Ley 1021 de 2006).

2.3 Investigaciones sobre Captura de CO₂ y Turnos Óptimos de Corta

A partir del Protocolo de Kyoto, los estudios sobre el potencial del sector forestal en la mitigación el efecto invernadero se incrementaron en todo el mundo. A modo de obtener una

⁹ El CIF paga en dinero al reforestador el 75% de los costos de establecimiento de plantaciones forestales si se utilizan especies nativas o del 50% si son introducidas y también, el 50% del costo de mantenimiento del 2° al 5° año, sea cual sea la especie utilizada (Aldana,2003).

aproximación de la oferta de carbono capturado en este sector, la mayoría de las investigaciones se han enfocado en la estimación y monitoreo del contenido de carbono en diferentes ecosistemas forestales, mientras que otras han tratado de medir los impactos del comercio de carbono en el mercado de la madera. Para los propósitos de este estudio, la literatura presentada se enfoca específicamente en investigaciones donde se tomaron en cuenta los beneficios por captura de carbono en la estimación de turnos óptimos de corta y valor de la tierra.

Uno de los trabajos pioneros en considerar el problema analizado fue el de van Kooten, Binkley y Delcourt (1995), quienes basados en el modelo de Faustmann forestal¹⁰ calculan el efecto de los impuestos y de los subsidios al carbono sobre el turno óptimo de corta para bosques costeros en British Columbia y bosques boreales en Alberta Norte ubicados en Canadá¹¹. Según estos autores, la tasa neta de captura de carbono en bosques es proporcional al crecimiento de los mismos, por lo tanto, mientras que los beneficios maderables están en función del crecimiento de la madera, los beneficios de las externalidades de captura de carbono (que se pagan con subsidios) están en función del cambio en la biomasa. Debido a que en el momento de la corta existe emisión de carbono, una función de remoción de CO₂ se incluye en el modelo, por la cual los productores pagan impuestos. A partir de varios escenarios propuestos de subsidios (20 a 200 US\$/tonCO₂) y de tasas de interés (5%, 10% y 15%), estos autores concluyen, de manera general, que “mientras el valor para la sociedad del carbono secuestrado se incrementa, el tiempo de corta óptimo de los bosques también se incrementa, *ceteris paribus*”. Del mismo modo, si el valor de la madera declina y el valor del carbono capturado aumenta, puede ser óptimo nunca cortar los bosques; por el contrario, si los precios de la madera y las tasas de descuento se incrementan, los tiempos de rotación son menores.

Romero, Ros y Daz-Balteiro (1998) calculan el premium Pigouviano o subsidio óptimo a la captura de carbono, para lo cual primero definen tres tipos de turnos óptimos de corta: el óptimo privado que maximiza el valor presente neto (VPN) de la producción de madera, el óptimo ambiental que maximiza la captura media de CO₂ y el óptimo social que maximiza el

¹⁰ El modelo de Faustmann forestal busca el momento económicamente óptimo de talar un bosque considerando ciclos infinitos de plantación. Posteriormente se amplía esta explicación.

¹¹ Para los bosques costeros, van Kooten, Binkley y Delcourt (1995) utilizan una función general de crecimiento de la madera de varias especies forestales en British Columbia; mientras que para los bosques boreales utilizan una función de crecimiento de madera únicamente de la especie Abeto negro o Acacia australiana (*Acacia melanoxylon*) por ser la más comercial en esa zona.

bienestar social que depende tanto de VPN de la madera como de la captura de CO₂, sujeto a una frontera de posibilidades de producción de ambos bienes. Su trabajo considera que la captura de CO₂ es un bien público, lo cual genera una divergencia o ineficiencia Paretiana entre el turno óptimo privado y el social que puede removerse con un subsidio calculado a partir del turno óptimo social. Con ayuda del modelo y los datos utilizados por van Kooten et al. (1995) y con una tasa de descuento de 5%, Romero et al. encuentran un turno óptimo privado de 43 años, social de 62 años y ambiental de 122 años, y un subsidio óptimo de 132 US\$/ton CO₂.

Creedy y Wurzbacher (2001) miden el valor económico de bosques de fresno (*Fraxinus excelsior*) ubicados en Central Gippsland, Victoria, en Australia, a partir no solo de los beneficios maderables, sino también de beneficios no maderables como la regulación del ciclo hidrológico y la captura de carbono. El modelo forestal de Hartman¹² permite incluir los beneficios hídricos y combinándolo con el modelo de Faustmann también se incluye la captura de carbono. En cuanto a la remoción de carbono, los autores consideran que ésta ocurre en largos periodos de tiempo y depende del ciclo de vida de los productos de la madera¹³, por lo tanto estas condiciones se ponderan mediante el uso de un índice de la proporción de aserrío-pulpa en la función de emisión. Para valores del carbono en un rango de 25 a 500 dólares australianos por tonelada de CO₂ y una tasa de descuento de 4%, los resultados muestran que sólo los beneficios del carbono capturado pueden aumentar los turnos óptimos de 47 a 67 años y al mismo tiempo incrementar el valor de las tierras forestales de 3.058 a 44.503 dólares australianos por hectárea.

De manera similar, Sohngen (2002) repite la operación utilizando únicamente la fórmula de Faustmann con los beneficios maderables y no maderables de captura de carbono para plantaciones forestales de pino en tierras del sudeste de los Estados Unidos. A partir de un precio de 23,10 US\$ por tonelada de CO₂ y una tasa de interés de 4%, encuentra que incorporando la captura de carbono, el turno óptimo se encuentra esperando 4 años más (30 a 34 años) lo que genera un beneficio marginal al productor de \$us 134 por hectárea al año.

¹² El turno forestal de Hartman toma en cuenta el valor no maderable de un bosque en un contexto de uso múltiple a través de una función de servicios ambientales y recreativos (Romero, 1997). Generalmente, la dificultad de evaluar estos servicios no maderables es la inexistencia de un mercado bien definido para valorarlos.

¹³ La corta de bosques resulta en una liberación de carbono a la atmósfera dependiendo del uso final que se da a la madera. Se considera que la quema o el uso de la pulpa para papel generan emisiones instantáneas o a corto plazo, mientras que si la madera es usada para la industria de la construcción o mueblería las emisiones son a largo plazo (Creedy & Wurzbacher, 2001)

Por otro lado, Cacho, Hean y Wise (2002) evalúan las implicaciones económicas de la adopción de cuatro métodos para contabilizar carbono: el sistema de contabilidad ideal, la contabilidad por tonelada al año, la contabilidad ex ante y la contabilidad ex post. El primer método es muy similar al utilizado por van Kooten et al. (1995), Romero et al. (1998) y por Creedy y Wurzbacher (2001) y consiste en pagar la captura de carbono a medida que éste servicio es provisto y cobrar cuando el carbono es liberado. Según Cacho et al., el sistema de contabilidad ideal es difícil de aplicar en la práctica; sin embargo representa el esquema de una situación ideal contra el cual políticas alternativas de conteo deben ser comparadas. Los otros tres métodos se basan en un factor de equivalencia (E_f) calculado a partir de los años requeridos para que la captura de carbono sea equivalente a la emisión evitada del mismo (T_e). De esta forma, el segundo método consiste en pagar anualmente sólo por la cantidad equivalente de emisiones evitadas, en el tercer método se paga por todo el carbono capturado en T_e años al principio del proyecto y en el último método se paga por todo el carbono capturado al final del proyecto en T_e años.

Para explorar el rol potencial de los bosques en la mitigación del cambio climático, Sohngen y Mendelsohn (2003) desarrollan un modelo de control óptimo de secuestro de carbono acumulado en bosques a nivel mundial. Estos autores encuentran que el incremento en las emisiones de GEI conllevarán en el tiempo a un aumento en los precios de carbono capturado en un rango de 61 a 187 US\$ por tonelada para el año 2100 lo cual generaría incentivos para que los dueños de tierras incrementen el área en plantaciones forestales, prolonguen los turnos de rotación e intensifiquen las prácticas de manejo. La captura de carbono acumulada estimada en bosques es de 39 a 102 miles de millones de toneladas para el 2100, mientras que en el mercado de madera la oferta estimada refleja un incremento en un rango de 333 a 785 millones de m^3 por año para el mismo periodo, donde el 80% de estos resultados se deberían a actividades de cambio en el uso del suelo como la reforestación, 16 % debido incrementos en los turnos de rotación y una mínima parte por prácticas de manejo intensivas.

En resumen, la mayoría de los artículos revisados muestran que la manera más correcta para medir y valorar la captura de carbono es mediante el uso de una función de cambio en la biomasa o su equivalente cambio en el carbono almacenado. Asimismo, la utilización de una función de emisión para el cobro por la liberación de carbono desde el momento de la corta. Existen otras metodologías propuestas para contabilizar la captura de carbono pero todas están expuestas a discusión. Generalmente, el modelo de Faustmann ha sido el más utilizado

para incorporar los beneficios de la captura de carbono (medidos por pagos al productor forestal) en los análisis de turnos óptimos y valorización de los bosques.

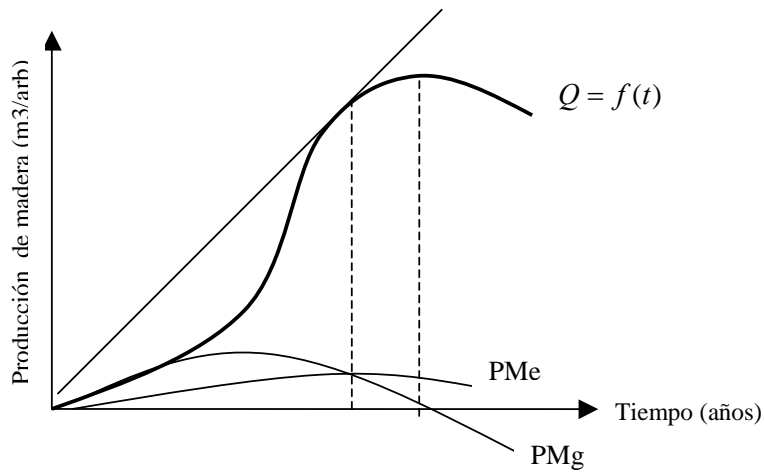
3. MARCO TEÓRICO

Para este estudio se han utilizado las herramientas teóricas de la economía de los recursos naturales aplicadas a bosques plantados¹⁴ que en este caso forman parte de un sistema agroforestal (SAF). Se trata de un análisis desde el punto de vista de productores privados debido a que se asume que los derechos de propiedad sobre determinadas cantidades de tierra están bien definidos. Puesto que los árboles se caracterizan por tener periodos de crecimiento largos, según Conrad (1999) el problema económico relacionado a este tipo de bosques es determinar el turno óptimo de corta que maximice los beneficios de los productores; en otras palabras, se trata de resolver un problema de extracción maderera eficiente en el tiempo.

Para comenzar el análisis es importante conocer la dinámica biológica de los recursos forestales. Como se muestra en la Figura 1, la función de crecimiento de un bosque se asemeja a una función de producción donde se relaciona la producción de la madera Q (por ejemplo $m^3/\text{árbol}$ o $m^3/\text{ha.}$) con el tiempo de vida de la plantación t (años), es decir $Q = f(t)$. En este sentido, para la función de crecimiento forestal se suponen las propiedades usuales de la teoría de la producción, es decir, productividades marginales positivas ($Q'(t) \geq 0$), una primera etapa de crecimiento rápido asociada a rendimientos marginales crecientes ($Q''(t) \geq 0$) hasta un punto de inflexión, a partir del cual comienza la etapa de crecimiento lento asociada a rendimientos marginales decrecientes ($Q''(t) \leq 0$) e integrabilidad (Romero, 1997).

¹⁴ Los bosques plantados conocidos como “even-aged forest” son aquellos que contienen árboles de la misma edad y comúnmente de la misma especie.

Figura 1. Curva de crecimiento o función de producción temporal de madera



Fuente: Adaptado de Romero (1997)

Tanto la producción de madera como la captura de CO₂ se dan a medida que el árbol crece mediante la formación de biomasa vegetal, por lo tanto se espera que la función de captura de CO₂ forestal tenga una forma funcional muy parecida a la mostrada en la Figura 1.

En cuanto a la producción del café dentro de un SAF, en condiciones normales ésta tiene rendimientos anuales relativamente constantes una vez la plantación madura, por lo cual no depende del tiempo y no afecta los turnos óptimos de corta del nogal cafetero aunque si el valor económico de la tierra agroforestal. Existen estimaciones sobre la capacidad fotosintética para el cafeto, sin embargo debido a que aún no se permite el comercio de carbono derivado de este tipo de plantaciones no se incluye la captura de CO₂ derivada de la producción de café en el análisis¹⁵. Del mismo modo, el carbono en el suelo no es considerado puesto que aunque este compartimiento puede almacenar grandes cantidades de carbono, sus tasas de fijación neta son muy bajas y difíciles de predecir (CAEMA y Carbono & Bosques, 2004).

Existen diferentes tipos de turnos óptimos de corta para los bosques, determinar cuál es el ideal para ser utilizado depende de la función objetivo que se quiera adoptar. Para el presente estudio se analizan cuatro tipos de turnos óptimos: el turno técnico, el turno ambiental, el turno de una rotación y el turno de infinitas rotaciones o de Faustmann. Modelar los cuatro

¹⁵ Una revisión sobre los avances en la medición de captura de carbono en cafetos *Coffea arabica* en Colombia puede encontrarse en Gómez, Montoya, López y Riaño (2001).

turnos nos permite comparar el efecto de las decisiones de los productores cuando se basan en uno u otro concepto.

3.1 Turno Óptimo Técnico y Ambiental

El turno técnicamente óptimo es aquel que maximiza el volumen medio de madera comercial producida (Conrad, 1999). A pesar de que la producción de la madera y CO₂ capturado ocurren simultáneamente, las unidades de rendimiento físico son diferentes y no se pueden sumar, por lo tanto no es posible aún incluir ambos tipos de producción en éste modelo, pero si es posible utilizar el mismo modelo para analizar ambas producciones por separado. En este sentido, el cálculo del turno óptimo ambiental es muy similar al necesario para obtener el turno óptimo técnico; según Romero, Ros y Daz-Balteiro (1998), para encontrarlo el productor forestal debe maximizar la captura media de CO₂ como vemos a continuación:

$$\text{Max}_T \frac{Q(T)}{(T)} \quad (1)$$

Donde $Q(T)$ puede ser la función de producción de madera comerciable por árbol en m³ o la función de captura de CO₂ por árbol en toneladas, según corresponda. Entonces, la condición de primer orden es:

$$\frac{\partial Q(T)/T}{\partial T} = \frac{Q'(T)T - Q(T)}{T^2} = 0$$

$$Q'(T) = \frac{Q(T)}{T} \quad (2)$$

La ecuación (2) indica que el turno de corta óptimo técnico o ambiental (T) se da cuando la producción marginal de madera o de captura de carbono se iguala a su producto medio. Geométricamente esto ocurre cuando una recta que pasa por el origen es tangente con la curva de producción de manera similar a lo observado en la Figura 1. Este punto también se caracteriza porque la elasticidad producción tiempo es igual a 1.

$$\varepsilon_Q^T = Q'(T)/[Q(T)/T] = 1 \quad (3)$$

Debido a que para obtener el turno técnico y ambiental no se toman en cuenta parámetros económicos tales como precios de la madera, del carbono capturado, costos, tasa de descuento entre otros, su análisis es muy limitado y sólo incluye consideraciones teóricas.

3.2 Turno Óptimo de Una Rotación o Turno Económico considerando la captura de CO₂

Según Fisher (1930) y Hottelling (1925) en Romero (1997), este turno se define como aquel que maximiza el valor presente neto (VPN) de la inversión de un solo ciclo de corta; es decir, que ahora se añaden las variables económicas omitidas en el análisis anterior por lo cual podemos denominarlo “turno bio-económico”.

Debido a que ahora se maximizan unidades monetarias y no físicas, es posible incluir la producción de carbono capturado en el modelo. Se tienen tres supuestos importantes: los precios de madera y del carbono son conocidos y se mantienen constantes; el uso final de toda la madera producida es para aserrío; y se considera un solo costo que se da al inicio del ciclo, es decir, en el momento de la plantación (Conrad, 1999). Si la madera es valorada el año en que el árbol es cortado, mientras que - según lo mostrado en van Kooten, Binkley y Delcourt (1995), Romero, Ros y Daz-Balteiro (1998) y Creedy y Wurzbacher (2001) - el carbono es valorado por los incrementos en la cantidad de CO₂ capturado, entonces el problema del productor se plantea de la siguiente forma:

$$\text{Max}_T \pi = P_1 n Q_1(T) e^{-\delta T} + P_2 n \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt - c \quad (4)$$

Donde, P_1 es el precio por m³ de la madera, P_2 el precio por tonelada de CO₂ capturada, n la densidad de árboles por hectárea, $Q_1(T)$ la función de producción de madera comerciable por árbol en m³, $Q_2(t)$ la función de producción de captura de CO₂ por árbol en toneladas, δ la tasa de descuento y c el costo inicial de plantación por hectárea. La línea base para encontrar el efecto de la captura de carbono sobre las decisiones relacionadas a los turnos de corta se da cuando la producción de CO₂ capturado no se toma en cuenta en el análisis o cuando el precio de este servicio ambiental es igual a cero.

Integrando la ecuación (5) por partes tenemos:

$$Max_T \pi = P_1 n Q_1(T) e^{-\delta T} + P_2 n \left[Q_2(T) e^{-\delta T} + \delta \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt \right] - c \quad (5)$$

Cabe notar que dentro del modelo no se considera una función de remoción de carbono como algunos autores (van Kooten et al., 1995, Romero et al., 1998 y Creedy & Wurzbacher, 2001) lo hacen, por tres motivos. En primer lugar, los modelos que consideran la función de remoción de carbono fueron hechos para países desarrollados donde es factible el cobro a los productores por las externalidades negativas causadas por la tala de bosques, mientras que en países en vías de desarrollo como Colombia, donde gran parte de la deforestación se da en regiones pobres, este tipo de cobros no son viables. Por otro lado, a partir de la fecha de vencimiento de los CRE's, los productores tienen la libertad de manejar las plantaciones forestales libremente, no existen obligaciones o pagos desde ese momento. Finalmente, según Creedy y Wurzbacher (2001) la madera para aserrío genera emisiones a largo plazo, por lo tanto la ponderación de emisión de carbono en estos casos es muy baja o nula. Dadas estas condiciones, para maximizar la expresión (5) la condición de primer orden ahora es:

$$\frac{\partial \pi}{\partial T} = P_1 n Q_1'(T) e^{-\delta T} - \delta P_1 n Q_1(T) e^{-\delta T} + P_2 n \left[Q_2'(T) e^{-\delta T} - \delta Q_2(T) e^{-\delta T} + \delta Q_2(T) e^{-\delta T} \right] = 0$$

$$P_1 Q_1'(T) + P_2 Q_2'(T) = \delta P_1 Q_1(T) \quad (6)$$

La ecuación (6) nos indica que el turno óptimo de una rotación se obtiene cuando el ingreso marginal de esperar un año adicional por concepto de la venta de la madera y de CO₂ capturado es igual al costo marginal de esperar ese mismo año pero solo por concepto de la venta de madera, este resultado se debe a que una vez el árbol es cortado los beneficios de la captura de CO₂ dejan de existir. El costo marginal mencionado equivale a los intereses que el productor deja de ganar por la venta de la madera en el momento T ; es decir, $\delta [P_1 Q_1(T)]$, capital que invierte, por ejemplo, en el banco. Si el ingreso marginal de esperar un periodo es mayor al costo marginal de esperar, conviene esperar ese periodo y no cortar; de manera similar, si el costo marginal de esperar es mayor al ingreso marginal de esperar, conviene cortar y vender la madera inmediatamente.

3.3 Turno Óptimo de Faustmann y Valor de la Tierra Agroforestal considerando la captura de CO₂

Según el planteamiento sugerido por Faustmann en 1849, si el mejor uso para una determinada tierra es la producción forestal, entonces esta actividad debería continuar indefinidamente en el tiempo. En este sentido, el modelo para encontrar el turno óptimo de corta consiste en maximizar el valor presente neto (VPN) de los beneficios de una cadena infinita de rotaciones de la misma longitud (Conrad, 1999).

Para incorporar la captura de carbono en el análisis económico de todas las futuras rotaciones es necesario replantear el modelo de Faustmann, en este sentido el carbono nuevamente es valorado sólo por los incrementos en la cantidad de CO₂ capturado como lo hacen van Kooten, Binkley y Delcourt (1995), Romero, Ros y Daz-Balteiro (1998) y Creedy y Wurzbacher (2001). En este contexto, para incorporar la producción de café también es necesario valorar sus rendimientos bajo un horizonte de tiempo infinito. De este modo, ahora el problema resultante para el productor consiste en encontrar el turno óptimo de corta que maximice el VPN de los beneficios infinitos de la producción no solo de madera sino también de CO₂ capturado y de café dentro de un SAF como se muestra a continuación.

$$Max_T \pi = \left[(P_1 n Q_1(T) - c_1) e^{-\delta T} + P_2 n \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt \right] (1 + e^{-\delta T} + e^{-2\delta T} + \dots) - c_1 + (P_3 Q_3 - c_2) \left(\frac{e^\delta}{\delta} \right) \quad (7)$$

La primera parte de la ecuación (7) se refiere los beneficios derivados de la producción de madera y carbono capturado, mientras que la segunda parte se refiere a los beneficios derivados de la producción del café. Donde, P_1 es el precio por m³ de la madera, P_2 el precio por tonelada de CO₂ capturada, P_3 el precio por carga de café, n la densidad de árboles por hectárea dentro del sistema agroforestal, $Q_1(T)$ la función de producción de madera comerciable por árbol en m³, $Q_2(t)$ la función de producción de captura de CO₂ por árbol en toneladas, Q_3 la producción anual de cargas de café, δ la tasa de descuento, c_1 el costo inicial de plantación del nogal cafetero por hectárea y c_2 el costo anual de la producción de café por hectárea. Nótese que la producción de café no depende del tiempo, por lo tanto no afecta el turno óptimo de corta del nogal cafetero, pero sí el valor de los beneficios netos.

El modelo de Faustmann asume que los precios, los costos, la tasa de descuento, las funciones de producción tanto de madera como de carbono capturado y la producción anual de café no cambian en todas las futuras rotaciones. Como $\sum_{i=0}^{\infty} e^{-i\delta T} = \frac{1}{1 - e^{-\delta T}}$ cuando $0 < e^{-\delta T} < 1$ y el costo de plantación del periodo inicial es considerado como un costo hundido (Conrad, 1999), entonces el problema se transforma en el siguiente:

$$\text{Max}_T \pi = \frac{[P_1 n Q_1(T) - c_1] e^{-\delta T} + P_2 n \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt}{1 - e^{-\delta T}} + (P_3 Q_3 - c_2) \left(\frac{e^{\delta}}{\delta} \right) \quad (8)$$

Maximizando la ecuación (8) se obtiene la siguiente condición de primer orden (ver Anexo 1 para el detalle de como se deduce esta expresión).

$$P_1 Q_1'(T) + P_2 Q_2'(T) + \delta P_2 Q_2(T) = \frac{\delta}{(1 - e^{-\delta T})} \left[P_1 Q_1(T) + P_2 Q_2(T) - \frac{c}{n} + \delta P_2 \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt \right] \quad (9)$$

Según Hartwick y Olewiler (1998), el valor de la tierra forestal se obtiene a partir de los beneficios netos de la producción forestal con un turno bioeconómicamente óptimo bajo una planificación sostenida con un horizonte de planeación infinito. En este sentido, el valor presente neto (VPN) de las ganancias basadas en el turno obtenido mediante la condición (9) representa el valor de la tierra agroforestal.

4. METODOLOGÍA

En primer lugar se realiza la estimación de las funciones de producción de madera comerciable y de CO₂ capturado a través del tiempo para la especie forestal nogal cafetero (*Cordia alliodora*). A partir de éstas funciones y de la información económica relevante se calculan y comparan los turnos óptimos de corta y valor de la tierra agroforestal con diferentes escenarios. Finalmente, se plantea un análisis de elasticidades con el objeto de evaluar los efectos porcentuales de posibles cambios en los precios de CO₂ y en las tasas de descuento sobre los resultados.

4.1 Base de datos y fuentes de información

Para estimar las funciones de producción tanto de madera como de CO₂ capturado se utilizaron los datos obtenidos por los ingenieros forestales Aristizabal y Guerra (2002) que con el apoyo de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) estimaron la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal con nogal (*Cordia alliodora*), cacao (*Theobroma cacao L*) y plátano (*Musa paradisiaca*) dentro de la GRANJA LUKER, en Palestina, Caldas¹⁶. De éste estudio sólo se consideraron los datos relacionados al nogal cafetero como ser la edad, el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la biomasa.

Los datos económicos fueron obtenidos del estudio de prefactibilidad para implementar el MDL en el Proyecto Forestal para la cuenca del río Chinchiná - Caldas (PROCUENCA), estudio realizado por el Centro Andino para Economía en el Medio Ambiente (CAEMA) y Carbono & Bosques (2004). En este sentido, el análisis se hace para un sistema agroforestal tipo propuesto por PROCUENCA con una densidad de siembra de nogal de 600 árboles/ha¹⁷. Aunque los datos utilizados sobre producción forestal y rendimiento económico tienen diferentes fuentes primarias, ambas están asociadas a una misma zona cafetera lo que hace posible la aproximación. Del mismo modo, se utilizaron datos del Banco de la República y estadísticas económicas relacionadas al comercio del café de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FEDECAFÉ).

4.1.1 Ingresos

Para calcular los ingresos potenciales del sistema agroforestal estudiado se utilizó un valor en pie de la madera para aserrío de 17,3 US\$/m³, precio considerado por el proyecto PROCUENCA para la especie forestal *Cordia alliodora* (CAEMA y Carbono & Bosques, 2004). No se tomó en cuenta la posibilidad de venta de madera para pulpa.

Por otro lado, a nivel global los precios de los CRE's oscilaron entre 3 y 7,15 US\$/ton CO₂ equivalente el año 2004, con un precio promedio de 5,15 US\$ /ton CO₂. Sin embargo, el

¹⁶ La GRANJA LUKER se encuentra a 5° 4' 13.2'' latitud norte, 75° 41' 7.7'' latitud oeste, a 1.058 m.s.n.m., tiene una precipitación promedio anual de 2.250 mm. y una temperatura promedio anual de 23°C (Aristizabal & Guerra, 2002).

¹⁷ La densidad de siembra bajo monocultivo del nogal cafetero es de 1.111 árboles por hectárea (CAEMA y Carbono & Bosques, 2004).

precio promedio se incrementó a 7,04 US\$/ton CO₂ el 2005 y a 11,56 US\$/ton CO₂ los tres primeros meses del 2006 (Carbon Finance at the World Bank, 2006). Debido a esta volatilidad en los precios de los certificados de reducción de emisiones o CRE's, para el cálculo de los ingresos potenciales por la venta de carbono capturado se utilizan valores para los CRE's de 3, 7, 10 y 13 US\$/tonCO₂. También se utiliza un precio igual a cero para los CRE's que representa el estado donde no se considera la captura de carbono en el análisis o línea base a partir de la cual se puede comparar el efecto de la inclusión de éste servicio ambiental sobre los turnos de corta óptimos.

En cuanto a los ingresos provenientes del comercio de café (*Coffea arabica*), según CAEMA y Carbono & Bosques (2004), bajo una densidad de sombra de 600 árboles de nogal se pueden producir anualmente un promedio de 1.088 kilogramos de café seco por hectárea¹⁸. Del mismo modo, se utiliza un precio del café seco igual a 133,82 US\$/carga de 125 Kg¹⁹.

4.1.2 Costos

El análisis contempla dos tipos de costos: por un lado, los costos asociados a establecimiento y manejo forestal del nogal; y por otro lado, los costos correspondientes a la producción del café (ver Anexo 5 y 6). La captura de CO₂ no altera los insumos de producción del sistema agroforestal por lo cual no se consideran costos adicionales provenientes de ésta producción²⁰.

4.1.3 Tasas de Descuento

En Colombia las tasas de interés de los Certificados de Depósitos a Término (CDT) han oscilado el 7% los últimos dos años (Banco de la República, 2006^b). En este sentido, el presente trabajo utiliza una tasa descuento de 7% por ser una buena referencia del costo de oportunidad del capital en el tiempo. Asimismo, debido al gran efecto que tiene la tasa de descuento en los análisis dinámicos o intertemporales se adicionan dos escenarios más, el primero con una tasa de interés baja de 4% y el segundo con una tasa alta de 10%.

¹⁸ Normalmente a plena exposición solar el rendimiento de café seco es de 1.500 Kg./ha/año, lo que significa que bajo el sistema agroforestal, la producción de café disminuye aproximadamente en 27,5% (Comité Municipal de Cafeteros de Caldas, 2003 en CAEMA y Carbono & Bosques, 2004).

¹⁹ Éste dato fue calculado a partir del promedio de los precios por carga de café seco del año 2004 que según FEDECAFÉ (2006) fue de 351.448,17 pesos colombianos y el tipo de cambio promedio para el mismo año que fue de 2.626,22 pesos colombianos por dólar, dato obtenido del Banco de la República (2006^a).

²⁰ No se consideran los posibles costos de transacción del MDL porque no existen criterios estandarizados para definirlos debido a la escasa experiencia en este tipo de actividades. Actualmente éste tema esta en discusión.

variable que representa la madera en pie comerciable para esta especie forestal. Asimismo, debido a que la biomasa se mide en unidades de peso (kilogramos) mientras que la madera se comercia en unidades de volumen (m³), se calculó la equivalencia con una densidad de 0.42 (ton/m³) para la madera del *Cordia alliodora* encontrada por Aristizabal y Guerra (2002) y respaldada por Brown (1997) en CAEMA y Carbono & Bosques (2004) (ver Anexo 3).

Según Aristizabal y Guerra (2002), la relación de la biomasa con el DAP es de la forma $Biomasa\ fuste = \gamma_0 DAP^2$. Al reemplazar el DAP por la estimación inicial de ésta variable en función del tiempo (ecuación 10), se está realizando una transformación monótonica que da como resultado la función de producción de la biomasa del fuste o su equivalencia en madera comerciable con respecto al tiempo por árbol para el *Cordia alliodora*. La ecuación 12 y la Figura 2 muestran los resultados de ésta estimación (ver Anexo 3).

$$MADERA(t) = \gamma_0 (\beta_0 * (1 - e^{(\beta_1 * t)}))^2$$

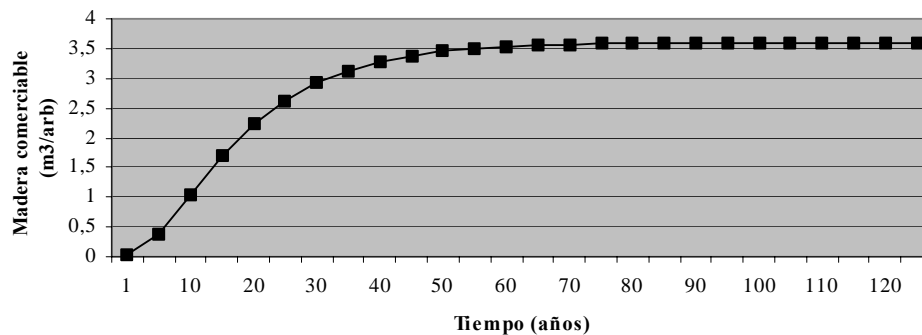
$$MADERA(t) = 3,602 * (1 - EXP(-0,077 * t))^2 \quad (12)$$

(***) (***) R² = 0,75

Donde: *MADERA* = Volumen de producción en el tiempo de madera comerciable del nogal en m³/árbol.

t = Tiempo en años.

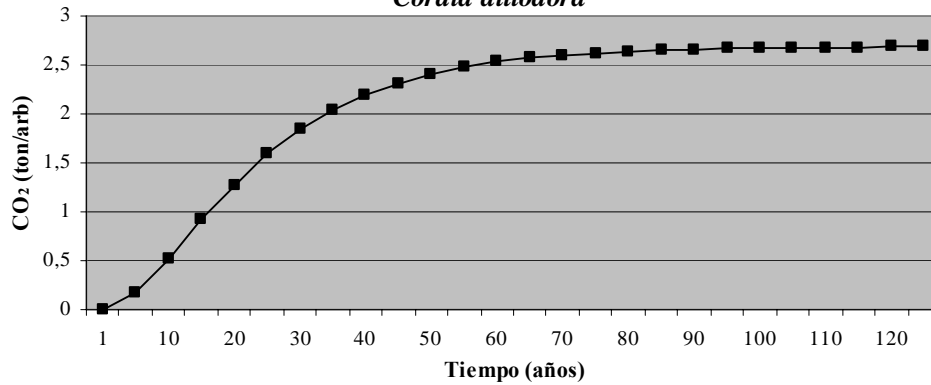
Figura 2. Función de producción de madera de *Cordia alliodora*



Fuente: Cálculos del autor.

Se observa que el gráfico de rendimiento de *Cordia alliodora* responde a una función logística la cual es de mucha utilidad para la planificación del manejo y explotación de recursos naturales renovables.

Figura 3. Función de producción de CO₂ capturado para el *Cordia alliodora*



Fuente: Cálculos del autor.

Nuevamente la función de producción de CO₂ capturado estimada permitió hallar las funciones de producción media y marginal respectivas, las cuales se muestran a continuación.

Función de producción media de CO₂ capturado

$$CO_2(t)/t = (\lambda_0 (\beta_0 * (1 - e^{(\beta_1 * t)}))^2)/t$$

$$CO_2(t)/t = (2,688 * (1 - EXP(-0,059 * t))^2)/t \quad (16)$$

Función de producción marginal de CO₂ capturado

$$CO_2'(t) = - 2 \lambda_0 \beta_0^2 \beta_1 * e^{(\beta_1 * t)} * (1 - e^{(\beta_1 * t)})$$

$$CO_2'(t) = 0,315 * EXP(-0,059 * t) * (1 - EXP(-0,059 * t)) \quad (17)$$

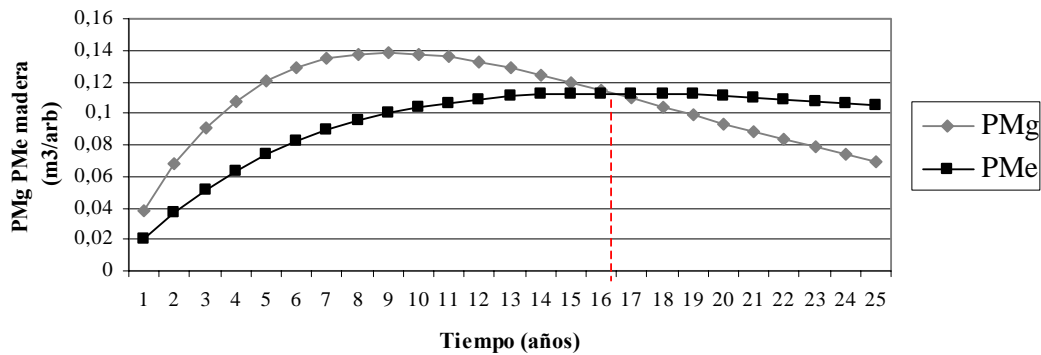
Los datos obtenidos de la estimación de las funciones de producción de madera comerciable y de CO₂ capturado para el nogal cafetero y la información económica relevante son incorporados a los modelos examinados en el marco teórico para el cálculo y comparación de los turnos óptimos de corta y valor de la tierra para el caso particular del sistema agroforestal de nogal y café en la regiones cafeteras de Colombia.

5. RESULTADOS

5.1 Determinación del Turno Óptimo Técnico y Ambiental

A partir de la maximización de la función de producto medio de madera comerciable para el *Cordia alliodora* (ecuación 13) se encontró que el turno técnico óptimo es de 16,33 años que corresponde al momento cuando el producto medio y marginal de madera son iguales (condición necesaria de ecuación 2) con un volumen de 0,11 m³/árbol. Es decir que si el productor forestal quiere obtener la máxima producción media de madera por nogal plantado en una tierra determinada debe esperar este periodo de tiempo para cortar el árbol. La Figura 4 nos muestra este resultado gráficamente.

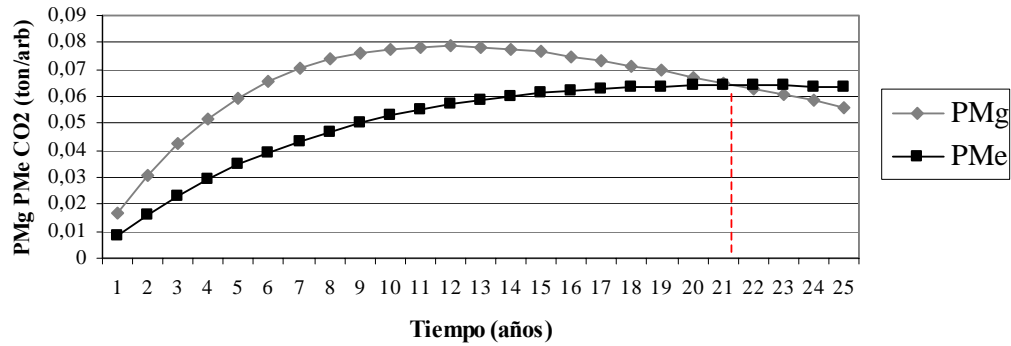
Figura 4. Funciones de Producto Marginal y Producto Medio de madera para el *Cordia alliodora*



Fuente: Cálculos del autor.

Del mismo modo, al maximizar la función de producción media de CO₂ capturado (ecuación 16) se obtuvo un turno ambiental óptimo de 21,47 años, a ésta edad el producto medio y el producto marginal de CO₂ capturado del nogal son iguales con un valor de 0,06 ton/árbol. Es decir que el productor forestal debería esperar aproximadamente 5 años más en comparación al caso anterior si lo que desea ahora es obtener el mejor rendimiento en captura promedio de carbono sin dejar de tomar en cuenta el comercio de la madera. El resultado indica anticipadamente el efecto de retraso de la captura de carbono sobre los turnos de corta. Nuevamente, la Figura 5 nos muestra este resultado gráficamente.

Figura 5. Funciones de Producto Marginal y Producto Medio de CO₂ capturado para el *Cordia alliodora*



Fuente: Cálculos del autor.

5.2 Efecto de la captura de CO₂ sobre la determinación del Turno Óptimo de Una Rotación o Turno Económico

Una primera vista del efecto de la captura de CO₂ sobre la determinación del turno óptimo de una rotación puede ser obtenida a partir de la ecuación (4) considerando precios de 0 y 7 US\$/tonCO₂ capturado y una tasa de descuento de 7%. Como puede verse en el Cuadro 2, si el productor forestal desea maximizar los ingresos provenientes solo de la venta de madera, éste decide cortar los árboles de nogal a los 15 años obteniendo por su inversión un Valor Presente Neto (VPN) de 5.717 US\$/ha. Sin embargo, si además se vende el carbono almacenado en la biomasa de los árboles a 7 US\$/tonCO₂, el productor decide esperar aproximadamente 2 años más para cortar su bosque obteniendo ahora por su inversión un VPN de 7.995 US\$/ha (2.278 US\$/ha adicionales).

Cuadro 2. Turnos óptimos económicos y máximos rendimientos de la inversión (7%)

Precio de CO ₂ (US\$/ton)	Turno Óptimo Económico (años)	Máximo VPN producción de madera de <i>Cordia alliodora</i> (US\$/ha)
0	15,11	5.716,86
7	17,35	7.995,26

Fuente: Cálculos del autor.

Con el objeto de analizar los resultados en base a otros posibles precios de CO₂ capturado y tasas de descuento, se calcula los turnos óptimos de una rotación y los valores máximos de rendimientos de la inversión para los diferentes escenarios propuestos. El Cuadro 3 muestra el resumen de los resultados.

Cuadro 3. Turnos óptimos de una rotación y máximos rendimientos de la inversión

Turno Óptimo Económico (años)					
Precio de CO₂ capturado (US\$/ton)					
Tasa de Descuento	0	3	7	10	13
4%	20,52	21,80	23,42	24,59	25,70
7%	15,11	16,09	17,35	18,27	19,15
10%	12,11	12,91	13,96	14,72	15,46

Máximo Valor Presente Neto de la producción de madera de <i>Cordia alliodora</i> (US\$/ha)					
Precio de CO₂ capturado (US\$/ton)					
Tasa de Descuento	0	3	7	10	13
4%	9.927,43	11.484,14	13.651,55	15.336,37	17.064,95
7%	5.716,86	6.665,55	7.995,26	9.035,19	10.107,17
10%	3.697,23	4.341,35	5.247,56	5.958,72	6.693,78

Fuente: Cálculos del autor.

Como puede observarse, a medida el precio del carbono capturado sube, los turnos óptimos de corta de una sola rotación se alargan y los rendimientos económicos de los inversores en producción forestal aumentan en relación a la situación que no considera la captura de carbono, es decir cuando el precio del carbono es cero. En base a los escenarios propuestos, la captura de CO₂ puede atrasar el turno óptimo económico entre 9,6 meses y 5,2 años, lo cual produce incrementos en los retornos a la inversión entre 644 y 7.138 US\$/ha respectivamente.

Por otro lado, a medida que la tasa de descuento se incrementa, los turnos óptimos de corta y los beneficios netos se reducen significativamente. Las tasas de descuento presionan a que los turnos óptimos de corta sean más cortos porque mayores tasas generan que valores futuros sean menores en el presente (Sohnngen, 2002). Por ejemplo, al tomar una tasa de descuento de 4%, los turnos óptimos bajo los diferentes escenarios se dan aproximadamente entre los 20,5 y 25,7 años con rendimientos netos de la inversión en un rango de 9.927 a 17.065 US\$/ha dependiendo del precio del carbono capturado; mientras que si se considera una tasa de descuento de 10%, los turnos óptimos se dan entre los 12,1 y 15,4 años del árbol, generando rendimientos económicos entre 3.697 y 6.694 US\$/ha. Es decir, que si el costo de oportunidad del capital se valora en el tiempo a una tasa de 10% en vez de 4%, los rendimientos netos de la inversión forestal disminuyen en un rango de 6.230 a 10.371 US\$/ha, pérdidas que significan un desincentivo muy fuerte para que los productores elijan dedicarse a la actividad forestal.

5.3 Efecto de la captura de CO₂ sobre la determinación del Turno Óptimo de Faustmann y Valor de la Tierra Agroforestal

Cuando el productor agroforestal tiene como objetivo maximizar los beneficios netos generados por su tierra en un horizonte infinito de tiempo (ecuación 8), con una tasa de descuento de 7% y sin tomar en cuenta la captura de carbono como un ingreso potencial adicional, el turno óptimo de Faustmann se da aproximadamente a los 10 años de vida del nogal y el valor de la tierra agroforestal es de 17.007 US\$/ha. Pero si se añade el pago por este servicio ambiental con un valor de 7 US\$/tonCO₂ capturado en las ganancias del sistema, el productor encuentra que debe esperar aproximadamente un año adicional (11 años) para cortar su bosque lo cual incrementaría el valor de su tierra a 19.960 US\$/ha (ver Cuadro 4).

Cuadro 4. Turnos óptimos de Faustmann y valores de la tierra agroforestal (7%)

Precio de CO ₂ (US\$/ton)	Turno Óptimo Infinitas Rotaciones (años)	Valor de la Tierra Agroforestal (US\$/ha)*
0	9,92	17.006,55
7	10,94	19.959,62

Fuente: Cálculos del autor.

*VPN de los beneficios de la producción de café y de la producción forestal con turno óptimo de Faustmann.

Nuevamente, es posible calcular los turnos óptimos y los valores de la tierra agroforestal para los diferentes escenarios propuestos. El Cuadro 5 muestra el resumen de los resultados.

Cuadro 5. Turnos óptimos de Faustmann y valores de la tierra agroforestal

Tasa de Descuento	Turno Óptimo Infinitas Rotaciones (años)				
	Precio de CO ₂ capturado (US\$/ton)				
	0	3	7	10	13
4%	11,98	12,45	13,03	13,43	13,80
7%	9,92	10,37	10,94	11,35	11,73
10%	8,50	8,92	9,45	9,84	10,21

Tasa de Descuento	Valor de la Tierra Agroforestal (US\$/ha)*				
	Precio de CO ₂ capturado (US\$/ton)				
	0	3	7	10	13
4%	33.140,68	35.588,45	38.898,34	41.410,14	43.943,41
7%	17.006,55	18.257,97	19.959,62	21.257,56	22.571,78
10%	10.942,09	11.731,57	12.809,14	13.633,98	14.471,55

Fuente: Cálculos del autor.

*Datos no oficiales de fincas raíz en Colombia muestran que el valor de las fincas en el eje cafetero actualmente esta entre los 7.000 y 40.000 US\$/ha según la ubicación y el uso de la tierra.

De manera similar a lo encontrado anteriormente, a medida que el precio del carbono capturado sube, los turnos óptimos de Faustmann se alargan y los valores de la tierra agroforestal aumentan en relación a la situación que no considera la captura de carbono como fuente adicional de ingresos. Bajo los escenarios propuestos, la captura de CO₂ puede alargar el turno de Faustmann entre 5 meses y 1,8 años generando incrementos en el valor de la tierra agroforestal entre 790 y 10.802 US\$/ha respectivamente.

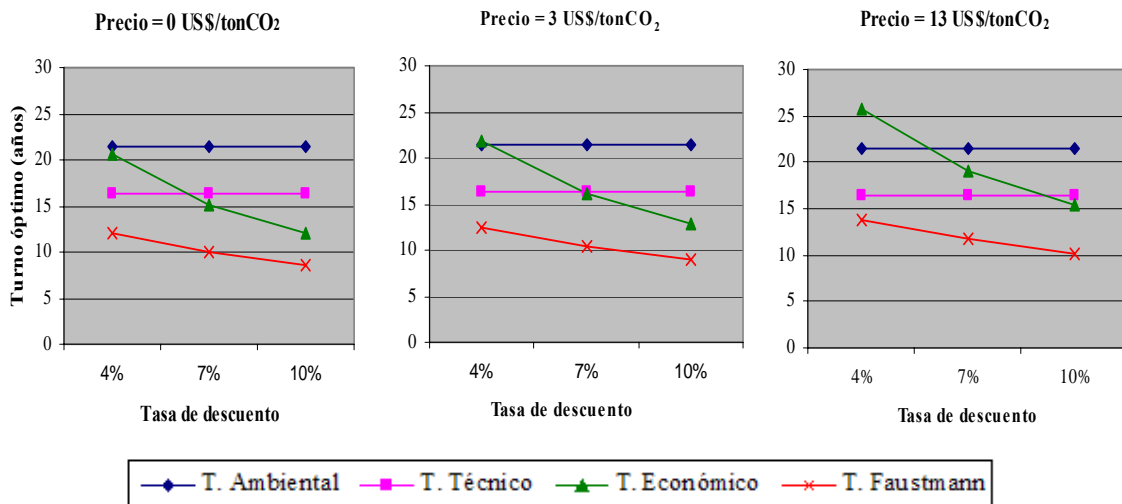
Como se puede notar, comparando los Cuadros 3 y 5, los turnos óptimos de Faustmann calculados son mucho menores a los turnos óptimos de una sola rotación (en muchos escenarios se dan en casi la mitad de tiempo), resultados que están relacionados con la tasa de crecimiento de los árboles de nogal. Debido a que los árboles más jóvenes crecen más rápido que los árboles viejos, talando y reforestando, los productores pueden obtener ese crecimiento veloz repetidas veces. En otras palabras, el turno óptimo de Faustmann muestra que la mejor opción para maximizar el valor de la tierra es cortar los árboles cuando éstos son jóvenes y están creciendo rápidamente (Sohngen, 2002). Por este motivo, si el objetivo es maximizar los beneficios para los productores forestales, se podría recomendar que los CREI's (de largo periodo) sean negociados bajo turnos óptimos económicos, mientras que los CRET's (temporales) bajo turnos de Faustmann.

Por otro lado, a medida que la tasa de descuento se incrementa, tanto el turno bio-económico de infinitas rotaciones como el valor de la tierra agroforestal se reducen significativamente. Por ejemplo, al tomar una tasa de descuento de 4%, el turno óptimo se da aproximadamente entre los 12 y 13,8 años generando un valor de la tierra agroforestal en un rango de 33.141 a 43.943 US\$/ha dependiendo del precio del carbono capturado; mientras que si se considera una tasa de descuento de 10%, los turnos óptimos se dan entre los 8,5 y 10,2 años del árbol asociados a valores de la tierra entre 10.942 y 14.472 US\$/ha. En este sentido, el valor de la tierra agroforestal puede disminuir en un rango de 22.199 a 29.471 US\$/ha si el costo de oportunidad del capital se incrementa de 4% a 10%, bajo estas condiciones al productor puede resultarle más atractivo vender su tierra e invertir su capital en otro negocio más lucrativo.

5.4 Comparación de los diferentes turnos óptimos

Como se mencionó anteriormente, a partir de los diferentes tipos de turnos óptimos de corta obtenidos se puede hacer una comparación del efecto de las decisiones de los productores bajo diferentes escenarios cuando se basan en uno u otro concepto.

La Figura 6 nos muestra los cuatro tipos de turnos óptimos de corta estudiados (el turno técnico, el turno ambiental, el turno de una rotación y el turno de infinitas rotaciones o de Faustmann) calculados en base a precios de 0, 3 y 13 US\$/ton de CO₂ capturado. Es interesante notar que bajo todos los escenarios, incluso cuando el precio del carbono es cero, es decir cuando no se considera la captura de carbono, es posible que el turno económico alcance a ser igual o mayor al turno ambiental si se utilizan bajas tasas de descuento como es 4%. Sin embargo, si se utilizan altas tasas de descuento, el turno económico se aleja del turno ambiental pero se acerca al turno de Faustmann. En otras palabras, con tasas de descuento bajas se incentiva a los productores a alargar los turnos de corta, de modo que bajo una sola rotación se pueda alcanzar la máxima captura media de carbono sin necesidad de que se realice el pago efectivo por este servicio ambiental.

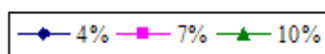


Fuente: Cálculos del autor.

De manera similar, en la Figura 6 se ve que cuando comparamos los escenarios con diferentes

Sin embargo, como se muestra en la Figura 7, a mayores precios de carbono el turno económico sigue creciendo indefinidamente y siempre es diferente al utilizar diferentes tasas de descuento; mientras que en las mismas condiciones, el turno de Faustmann converge y se alarga sólo hasta 21 años aproximadamente independientemente de la tasa de descuento utilizada, acercándose de este modo también al turno ambiental (21,47 años)²⁴.

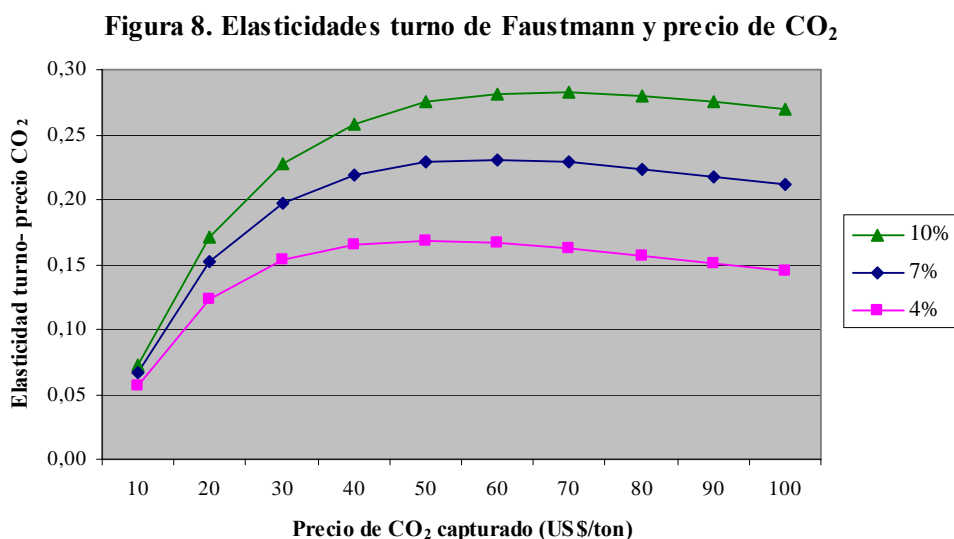
Figura 7. Turnos Óptimos Económicos y de Faustmann según Precio de CO₂ capturado



Fuente: Cálculos del autor.

En resumen, a medida que la tasa de descuento es menor y el precio del carbono capturado es

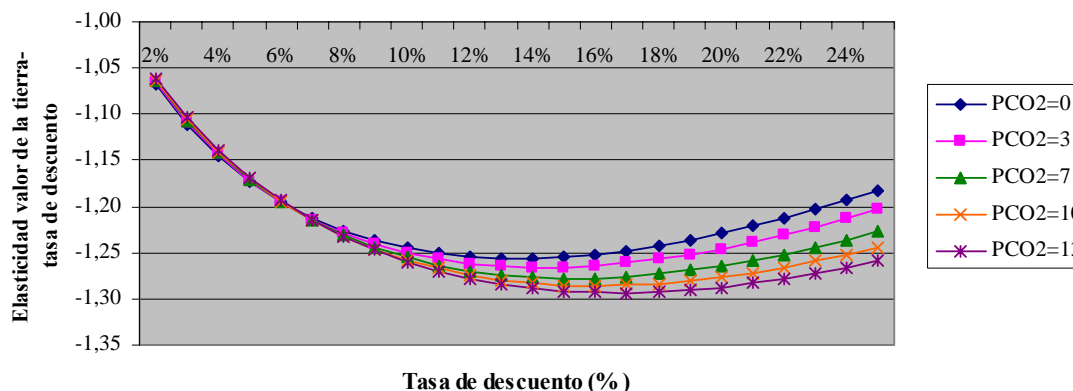
Como se muestra en la Figura 8, primero se calcularon las elasticidades del turno bioeconómico de Faustmann ante cambios en precios del carbono capturado para escenarios de precio entre 0 a 100 US\$/tonCO₂. Según lo encontrado, bajo todas las situaciones propuestas el turno de infinitas rotaciones es inelástico ante cambios en los precios del carbono, además los mayores efectos porcentuales se dan cuando los precios son aproximadamente de 50, 60 y 70 US\$/tonCO₂ capturado con tasas de descuentos de 4, 7 y 10% respectivamente (Ver Anexo 7). En otras palabras, si el comprador de CRE's desea obtener el mayor rendimiento de captura de carbono por dólar invertido en este tipo de proyectos, el comprador debe pagar alrededor de 50, 60 o 70 US\$/tonCO₂ (según la tasa de descuento utilizada) porque de esta manera afecta en mayor proporción el retraso en los turnos de corta óptimos. Ante otros precios del carbono, el efecto en los turnos de corta siempre es menor.



Fuente: Cálculos del autor.

Del mismo modo, se calcularon las variaciones porcentuales de valor de la tierra agroforestal ante cambios en las tasas de descuento. La Figura 9 muestra que el efecto de las tasas de descuento sobre el valor de la tierra es inverso y significativo puesto que en todas las situaciones las elasticidades son mayores en valor absoluto a 1 (entre -1,06 y -1,29) (ver Anexo 7). Así mismo, se encontró que al utilizar tasas de descuento de 13 a 17 %, la reducción porcentual del valor de la tierra es mucho mayor en comparación con los resultados basados en otras tasas de descuento. Generalizando, tasas de descuento mayores a 13% producen mayores desincentivos a los productores forestales puesto que disminuyen en mayor proporción sus beneficios.

Figura 9. Elasticidad valor de la tierra agroforestal y tasa de descuento



Fuente: Cálculos del autor.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema agroforestal conformado por el nogal (*Cordia alliodora*) y el café (*Coffea arabica*) es una buena alternativa para fomentar las plantaciones forestales en Colombia, sin embargo existen otras combinaciones agroforestales que pueden generar beneficios similares o mayores que deben ser estudiadas.

El presente trabajo comprueba que el pago por el servicio ambiental de captura de carbono que prestan los bosques modifica las decisiones óptimas de los productores forestales, de manera que éstos, para generar los máximos beneficios posibles e incrementar el valor de su tierra, optan por esperar periodos más largos de tiempo antes de extraer madera de sus árboles. A partir de un precio de 7 US\$/tonCO₂ capturado y una tasa de descuento de 7% se tiene que:

- J La captura de CO₂ atrasa el turno óptimo de una rotación de 15,11 a 17,35 años (aproximadamente 2 años), lo cual produce un incremento en el Valor Presente Neto (VPN) de la inversión de 5.717 US\$/ha a 7.995 US\$/ha (2.278 US\$/ha adicionales).
- J Asimismo, la captura de CO₂ alarga el turno de Faustmann de 9,92 a 10,94 años, lo cual genera un aumento en el valor de la tierra agroforestal de 17.007 a 19.960 US\$/ha.

Debido a que generalmente el turno económico es mayor al turno de Faustmann, si el objetivo es maximizar los beneficios para los productores forestales, se podría recomendar que los CREI's (de largo periodo) sean negociados bajo turnos óptimos económicos, mientras que los

CREt's (temporales) bajo turnos de Faustmann. Sin embargo, es importante hacer un análisis más profundo al respecto de acuerdo al contexto dado.

Los precios con los que se negocie el CO₂ capturado y las tasas de descuento son muy importantes en los resultados, a mayores precios y menores tasas, los turnos óptimos se alargan y el valor de la tierra agroforestal incrementa. Sin embargo, para obtener el mayor rendimiento de captura de carbono por dólar invertido, el precio del carbono debe estar alrededor de 50, 60 y 70 US\$/tonCO₂ para tasas de descuento de 4, 7 y 10%, respectivamente. Del mismo modo, es posible que a bajas tasas de descuento se capture eficientemente carbono sin tener que invertir recursos adicionales en pagar por el servicio ambiental, mientras que con tasas de descuento mayores a 13% se genera un mayor desincentivo para los productores forestales puesto que a partir de este nivel, aumentos en la tasa de descuento generan una mayor disminución porcentual en sus beneficios y por ende, una mayor disminución en el valor de su tierra.

En este sentido, políticas internacionales de precios del carbono y de reducción de tasas de descuento con que se enfrentan los productores forestales o una combinación de ambas son muy importantes para incentivar la forestación o reforestación con el objetivo de mitigar el cambio climático. La colocación de un precio mínimo para los CRE's y la implementación de sistemas de ayuda financiera internacional o nacional mediante la dotación de créditos blandos (con bajas tasas de interés) o subsidiados para programas de reforestación son ejemplos de medidas que se pueden tomar al respecto. En este sentido, la Ley Forestal 1021 de 2006 y el certificado de incentivo forestal (CIF) aplicados en Colombia son claras señales del interés de gobierno central por apoyar este tipo de actividad productiva que converge con los objetivos del Protocolo de Kyoto.

La herramienta clave para realizar estudios similares al presentado en este documento es contar con datos confiables acerca de la captura dinámica de carbono en diferentes especies forestales, sin embargo la información al respecto es muy limitada.

Finalmente, este estudio nos lleva reconocer que el enfoque convencional de la economía agrícola y forestal está cambiando y que una nueva visión de producción está surgiendo; una visión que además de valorar el producto tradicional comienza a valorar otros productos o servicios ambientales como la captura de carbono.

7. BIBLIOGRAFÍA

- ALDANA, V.C. (2003). *Las externalidades forestales*. Recuperado el 2 de Abril de 2005, de <http://www.conif.org.co/images/Las%20Externalidades%20Forestales.doc>
- ARISTIZABAL, H.J. y GUERRA, M.A. (2002). *Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero (Cordia alliodora) – cacao (Theobroma cacao L) – platano (Musa paradisiaca)*. Tesis de ingeniería forestal publicada. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) y Universidad Distrital. Bogotá D.C., Colombia.
- BANCO DE LA REPÚBLICA (2006^a). *Tasa de cambio representativa de mercado – TCRM – Promedio mensual desde 1950*. Recuperado el 3 de Febrero de 2006, de http://www.banrep.gov.co/estad/dsbb/sec_ext_011.xls
____ (2006^b). *Tasas de Interés de los Certificados de Depósitos a Término Promedio 180 y 360 días*. Recuperado el 15 de Mayo de 2006, de http://www.banrep.gov.co/estad/dsbb/sfin_003.xls
- CACHO, O., HEAN, R. y WISE, R. (2002). *Carbon-accounting methods and reforestation incentives*. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR) under project ASEM 1999/093, Australia. Recuperado el 23 de Febrero del 2006, de <http://www.une.edu.au/carbon/CC04.PDF>
- CARBON FINANCE AT THE WORLD BANK, (2006) *State and Trends of the Carbon Market*. Documento recuperado el 15 de Mayo de 2006, del Sitio Web: <http://carbonfinance.org/docs/StateoftheCarbonMarket2006.pdf>
- CENTRO ANDINO PARA ECONOMÍA EN EL MEDIO AMBIENTE (CAEMA) y CARBONO & BOSQUES (2004). *Estudio de Prefactibilidad para Implementar el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) en el Proyecto PROCUENCA. Informe Final*. Caldas, Colombia: Manuscrito no publicado
- CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ (CENICAFE) (2006). *Información sobre sistemas de producción de café*. Recuperado el 9 de septiembre de CENTRCE. Recupe

project activities. Recuperado el 28 de Febrero de 2006, de http://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/AdditionalityTools/Additionality_tool.pdf

___ (2005^b). *Approved afforestation and reforestation baseline methodology AR-AM001*. Recuperado el 28 de Febrero de 2006, de http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/CDMWF_AM_XDGPPW00IY89H1O2TTXPL6LXKTH7UM

- CONRAD, J.M. (1999). *Resource Economics*. Cambridge, UK.: Cambridge University Press.
- CREEDY, J. y WURZBACHER, A. D. (2001). The economic value of a forested catchment with timber, water and carbon sequestration benefits. *Ecological Economics*, 38, 71-83.
- FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA (FEDECAFÉ) (2006). *Información estadística cafetera. Precio de compra base – promedio mensual (\$/carga de 125 kilos)*. Recuperado el 3 de Febrero de 2006, de <http://mailin.cafedecolombia.com/productivo/Infocafe.nsf/3058C8D2752AA84105256E98007F52F5>
- GÓMEZ, L. F., MONTOYA, E., LÓPEZ, Y. y RIAÑO, N. (2001). *Estimación de la fotosíntesis en plantas completas y validación de un modelo matemático para el café Coffea Arábica L.* Recuperado el 9 de Septiembre de 2005, de <http://www.uach.cl/procarbono/simposio/trabajos/33%20-%20Gomez.PDF>
- GUTIERREZ, V. H. (2004). Implicaciones de las Decisiones adoptadas en la COP9 en el Diseño y Manejo de Proyectos MDL Forestales. *Boletín del Centro Andino para la Economía en Medio Ambiente (CAEMA)*, 4 (1), 7-9.
- HARTWICK, J. y OLEWILER, N. D. (1998). *The economics of natural resource use (Second Edition)*. United States of America: Addison-Wesley Educational Publishers.
- LEY 1021 DE 2006.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL y OBSERVATORIO AGROCADENAS COLOMBIA (2005). *La cadena forestal y madera en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005*. Documento de trabajo No. 64. Recuperado el 21 de Noviembre de 2005, de http://www.agrocadenas.gov.co/forestal/Documentos/caracterizacion_forestal.pdf

- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT) (2006). *Portafolio colombiano de proyectos elegibles al MDL*. Recuperado el 26 de Abril de 2006, de <http://www.latincarbon.com/docs/presentations/dia3/sideevents/sala1/Colombia.pdf>
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE (MMA), MINISTERIO DE COMERCIO EXTERIOR (MCE), MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO (MDE), DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN (DNP) y MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (MADR) (2000). *Plan Nacional de Desarrollo Forestal*. Recuperado el 2 de Abril de 2005, de <http://www.minambiente.gov.co/admin/contenido/documentos/PNDFORESTAL.pdf>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (ONU) (1997). *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* Documento recuperado el 10 de Septiembre de 2005, del Sitio Web de la United Nations Framework Convention on Climate Change: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- ____ (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)* Documento recuperado el 10 de Septiembre de 2005, del Sitio Web de la United Nations Framework Convention on Climate Change: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- ROMERO, C. (1997). *Economía de los recursos ambientales y naturales (2da. Edición Ampliada)*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- ROMERO, C., ROS, V. y DAZ-BALTEIRO L. (1998). Optimal forest rotation age when carbon captured is considered: theory and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 49, 121-131.
- RUBIANO, J. (2000). Asociación agroforestal de café con nogal en la zona cafetera quindiana. *Sistemas agroforestales II* (pp. 203-220). Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).
- SALGADO, L. (2004). *El Mecanismo de Desarrollo Limpio en actividades de uso de suelo de la tierra, cambio de uso y forestería (LULUCF) y su potencial en la región latinoamericana*. Santiago de Chile: Naciones Unidas, CEPAL.
- SOHNGEN B. y MENDELSON, R. (2003). An Optimal Control Model of Forest Carbon Sequestration. *American Journal of Agricultural Economics*, 85 (2), 448-457.

- SOHNGEN, B. (2002). *The economics of forest management*. Ohio State University, Ohio, United States. Recuperado el 25 de Agosto de 2005, de <http://aede.osu.edu>
- VAN KOOTEN, G.C., BINKLEY C.S. y DELCOURT G. (1995). Effect of Carbon Taxes and Subsidies on Optimal Forest Rotation Age and Supply of Carbon Services. *American Journal of Agricultural Economics*, 77, 365-374.

ANEXO 1

Desarrollo del modelo de Faustmann considerando la captura de carbono

$$Max_T \pi = \frac{[P_1 n Q_1(T) - c_1] e^{-\delta T} + P_2 n \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt}{1 - e^{-\delta T}} + (P_3 Q_3 - c_2) \left(\frac{e^\delta}{\delta} \right)$$

Integrando por partes tenemos:

$$Max_T \pi = \frac{[P_1 n Q_1(T) - c_1] e^{-\delta T} + P_2 n \left[Q_2(T) e^{-\delta T} + \delta \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt \right]}{1 - e^{-\delta T}} + (P_3 Q_3 - c_2) \left(\frac{e^\delta}{\delta} \right)$$

$$Max_T \pi = \frac{P_1 n Q_1(T) + P_2 n Q_2(T) - c_1}{(1 - e^{-\delta T}) e^{\delta T}} + \frac{\delta P_2 n \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt}{(1 - e^{-\delta T})} + (P_3 Q_3 - c_2) \left(\frac{e^\delta}{\delta} \right)$$

La condición de primer orden es:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi}{\partial T} &= \frac{[P_1 n Q_1'(T) + P_2 n Q_2'(T)](1 - e^{-\delta T}) e^{\delta T} - [P_1 n Q_1(T) + P_2 n Q_2(T) - c_1] \delta e^{\delta T}}{(e^{\delta T} - 1)^2 (e^{\delta T})^2} \\ &+ \frac{\delta P_2 n Q_2(T) e^{-\delta T} (1 - e^{-\delta T}) - \delta P_2 n \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt (\delta e^{-\delta T})}{(1 - e^{-\delta T})^2} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi}{\partial T} &= [P_1 Q_1'(T) + P_2 Q_2'(T)](1 - e^{-\delta T}) - \delta \left[P_1 Q_1(T) + P_2 Q_2(T) - \frac{c_1}{n} \right] + \delta P_2 Q_2(T) (1 - e^{-\delta T}) \\ &- \delta^2 P_2 \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt = 0 \end{aligned}$$

Finalmente se tiene:

$$P_1 Q_1'(T) + P_2 Q_2'(T) + \delta P_2 Q_2(T) = \frac{\delta}{(1 - e^{-\delta T})} \left[P_1 Q_1(T) + P_2 Q_2(T) - \frac{c_1}{n} + \delta P_2 \int_0^T Q_2(t) e^{-\delta t} dt \right]$$

ANEXO 2

Resultados de la estimación de la función de crecimiento del *Cordia alliodora*

Dependent Variable: DAP
 Method: Least Squares
 Date: 09/10/05 Time: 22:32
 Sample: 1 8
 Included observations: 8
 Convergence achieved after 18 iterations
 DAP=C(1)*(1-EXP(C(2)*T))

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	57.44687	14.50393	3.960778	0.0074
C(2)	-0.068004	0.026182	-2.597362	0.0408
R-squared	0.960257	Mean dependent var	24.97250	
Adjusted R-squared	0.953634	S.D. dependent var	10.73606	
S.E. of regression	2.311783	Akaike info criterion	4.726233	
Sum squared resid	32.06605	Schwarz criterion	4.746094	
Log likelihood	-16.90493	F-statistic	144.9712	
Durbin-Watson stat	1.967536	Prob(F-statistic)	0.000020	

Estimación obtenida por Aristizabal & Guerra (2002):

$$DAP(T) = \beta_0 * (1 - e^{(\beta_1 * T)})$$

$$DAP(T) = 54.1641 (1 - e^{-0.0749 * T})$$

Wald Test:

Equation: EXPON2

Null Hypothesis:		C(1)=54.1641 C(2)=-0.0749	
F-statistic	0.077146	Probability	0.926658
Chi-square	0.154293	Probability	0.925754

ANEXO 3

Valores de DAP, altura, biomasa y tiempo estimado para el *Cordia alliodora*

DAP (cms)	Altura (mts)	Biomasa Fuste (Kg)	Biomasa ramas mayores (Kg)	Biomasa hojas y ramas menores (Kg)	Biomasa radicular (Kg)	Biomasa total (Kg)	Biomasa fuste / madera comerciable (m3)	Tiempo estimado (años)
21.32	17.50	474.50	53.50	72.50	71.17	671.67	1.13	6.82
31.20	16.50	478.00	133.50	195.00	71.70	878.20	1.14	11.52
25.78	16.00	318.50	44.00	79.00	47.77	489.27	0.76	8.76
29.92	15.50	446.50	75.00	81.50	66.97	669.97	1.06	10.82
26.10	16.00	379.50	168.50	165.00	56.92	769.92	0.90	8.91
27.05	18.90	341.00	81.00	61.00	51.15	534.15	0.81	9.36
35.01	19.40	814.00	88.00	99.00	122.10	1123.10	1.94	13.83
34.69	20.50	534.00	135.00	68.00	80.10	817.10	1.27	13.62
28.64	20.00	409.00	67.00	85.00	61.35	622.35	0.97	10.15
28.64	19.50	329.00	85.00	33.00	49.35	496.35	0.78	10.15
43.30	22.00	893.00	216.00	448.00	133.95	1690.95	2.13	20.61
36.65	22.10	842.50	72.50	13.50	126.37	1054.87	2.01	14.94
34.06	22.20	619.00	453.00	106.00	92.85	1270.85	1.47	13.22
29.92	17.20	428.50	128.50	95.00	64.27	716.27	1.02	10.82
36.92	19.20	765.50	51.00	107.00	114.82	1038.32	1.82	15.13

Fuente: Adaptado de Aristizabal y Guerra (2002)

Resultados de la estimación de la función producción de madera comerciable para el *Cordia alliodora*

Dependent Variable: MADERA
 Method: Least Squares
 Date: 09/22/05 Time: 20:09
 Sample: 1 15
 Included observations: 15
 Convergence achieved after 5 iterations
 $MADERA=C(1)*(1-EXP(C(2)*TIEMPO))^2$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	3.601920	1.056303	3.409932	0.0047
C(2)	-0.076925	0.019843	-3.876681	0.0019
R-squared	0.749204	Mean dependent var		1.281349
Adjusted R-squared	0.729912	S.D. dependent var		0.473497
S.E. of regression	0.246076	Akaike info criterion		0.157215
Sum squared resid	0.787196	Schwarz criterion		0.251622
Log likelihood	0.820887	F-statistic		38.83495
Durbin-Watson stat	2.053448	Prob(F-statistic)		0.000031

ANEXO 4

Valores de DAP, biomasa seca total, carbono capturado, CO₂ capturado y tiempo estimado para el *Cordia alliodora*

DAP (cms)	Biomasa seca total (Kg)	Carbono capturado (Kg)	CO ₂ capturado (ton)	Tiempo estimado (años)
21.32	290.08	145.04	0.53	6.82
31.20	390.29	195.14	0.72	11.52
25.78	214.19	107.09	0.39	8.76
29.92	290.35	145.17	0.53	10.82
26.10	341.52	170.76	0.63	8.91
27.05	231.05	115.52	0.42	9.36
35.01	482.59	241.29	0.89	13.83
34.69	350.66	175.33	0.64	13.62
28.64	270.74	135.37	0.50	10.15
28.64	212.1	106.05	0.39	10.15
43.30	759.48	379.74	1.39	20.61
36.65	444.53	222.26	0.82	14.94
34.06	545.42	272.71	1.00	13.22
29.92	311.29	155.64	0.57	10.82
36.92	447.87	223.93	0.82	15.13

Fuente: Adaptado de Aristizabal y Guerra (2002)

Resultados de la estimación de la función producción de CO₂ capturado para el *Cordia alliodora*

Dependent Variable: CO2
 Method: Least Squares
 Date: 09/22/05 Time: 20:05
 Sample: 1 15
 Included observations: 15
 Convergence achieved after 1 iterations
 $CO_2 = C(1) * (1 - EXP(C(2) * TIEMPO)) ^ 2$

	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	2.687627	1.049515	2.560829	0.0237
C(2)	-0.058520	0.017679	-3.310131	0.0056
R-squared	0.768696	Mean dependent var		0.682874
Adjusted R-squared	0.750904	S.D. dependent var		0.269885
S.E. of regression	0.134698	Akaike info criterion		-1.047992
Sum squared resid	0.235867	Schwarz criterion		-0.953585
Log likelihood	9.859940	F-statistic		43.20317
Durbin-Watson stat	2.096333	Prob(F-statistic)		0.000018

ANEXO 5

Costos en correspondientes a la plantación y manejo forestal del *Cordia alliodora* en (US\$/ha.)

Para 600 árb/ha.	Años*				
ACTIVIDAD	1	2	3	4	5
1. Costos Directos					
Preparación del Terreno	45,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Trazado	7,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Plateo y Hoyado	30,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Transporte árboles (interno)	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Plantación (siembra)	15,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Control fitosanitario	7,6	3,8	3,8	3,8	0,0
Aplicación fertilizante	7,6	7,6	0,0	0,0	0,0
Replante	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Limpias	60,6	45,5	30,3	26,5	0,0
Mantenimiento caminos	3,8	1,9	1,9	1,9	0,0
Protección incendios-calles	3,8	1,9	1,9	1,9	0,0
Podas	0,0	0,0	18,9	0,0	18,9
Raleo	0,0	7,6	0,0	0,0	0,0
	189,6	68,3	56,8	34,1	18,9
2. Materiales e Insumos					
Plántulas	42,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Fertilizante Calfos	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Fertilizante NPK	12,1	6,1	0,0	0,0	0,0
Bórax	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Insecticidas	3,8	3,8	0,0	0,0	0,0
Herramientas	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Alambre - grapas (para cercos)	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	77,3	14,1	4,2	4,2	4,2
TOTAL	266,9	82,4	61,0	38,3	23,1

Actividades correspondientes a la plantación de *Cordia alliodora*

* Los primeros 5 años se realizan podas y limpiezas para lograr un adecuado desarrollo de la plantación.

Fuente: CAEMA y Carbono & Bosques, 2004

ANEXO 6

Costos anuales correspondientes a la producción del *Coffea arabica* dentro del sistema agroforestal con el *Cordia alliodora* en (US\$/ha.)

ACTIVIDAD	
1. Costos Directos	
Control Manual de Malezas (incluye plateo)	69,1
Control de Enfermedades	33,7
Resiembra	13,5
Fertilización	18,3
Recolección	311,0
Zoqueo	95,9
	541,5
2. Materiales e Insumos	
Insecticida Hongo Bd	4,0
Insecticida Lorsban 4E	2,7
Fungicida: Benlate	1,2
Fertilizante Simple Bulto (Urea 46%)	14,4
Fertilizante Simple Bulto (Fosfato Diamónico)	6,9
Fertilizante Simple Bulto (KCl)	16,6
Coadyuvante (Carrier Portador)	1,8
Costales	4,9
Asistencia Técnica	17,5
Beneficio y Fletes	68,2
Gastos Financieros	14,5
	152,7
TOTAL	694,2

Actividades correspondientes al cultivo de café

Fuente: CAEMA y Carbono & Bosques, 2004

ANEXO 7

Elasticidades turno de Faustmann y precio de CO₂

Precio CO ₂ (\$us/ton)	4%		7%		10%	
	Turno (años)	Elasticidad T, PCO ₂	Turno (años)	Elasticidad T, PCO ₂	Turno (años)	Elasticidad T, PCO ₂
0	11,981		9,922		8,506	
10	13,427	0,057	11,348	0,067	9,843	0,073
20	14,576	0,123	12,561	0,152	11,032	0,171
30	15,498	0,153	13,592	0,197	12,083	0,227
40	16,248	0,165	14,470	0,219	13,010	0,259
50	16,868	0,168	15,224	0,229	13,829	0,275
60	17,386	0,167	15,876	0,231	14,556	0,282
70	17,826	0,162	16,444	0,228	15,203	0,283
80	18,203	0,157	16,942	0,224	15,782	0,280
90	18,529	0,151	17,381	0,218	16,302	0,276
100	18,814	0,145	17,772	0,211	16,771	0,270

Fuente: Cálculos del autor.

Elasticidad valor de la tierra agroforestal y tasa de descuento

Tasa de descuento	PCO ₂ = 0		PCO ₂ = 3		PCO ₂ = 7		PCO ₂ = 10		PCO ₂ = 13	
	π	Elasticidad π , %	π	Elasticidad π , %	π	Elasticidad π , %	π	Elasticidad π , %	π	Elasticidad π , %
1%	152.493,41		163.434,27		178.112,69		189.176,25		200.278,00	
2%	72.447,77	-1,068	77.725,41	-1,066	84.826,15	-1,064	90.191,13	-1,063	95.584,12	-1,062
3%	46.104,26	-1,111	49.493,72	-1,110	54.066,08	-1,107	57.528,67	-1,106	61.015,28	-1,104
4%	33.140,68	-1,145	35.588,45	-1,144	38.898,34	-1,142	41.410,14	-1,140	43.943,41	-1,139
5%	25.500,92	-1,173	27.386,75	-1,172	29.942,13	-1,171	31.885,04	-1,170	33.847,41	-1,168
6%	20.504,70	-1,195	22.018,88	-1,195	24.074,48	-1,195	25.640,04	-1,194	27.223,36	-1,193
7%	17.006,55	-1,212	18.257,97	-1,214	19.959,62	-1,215	21.257,56	-1,215	22.571,78	-1,214
8%	14.435,88	-1,226	15.492,58	-1,229	16.931,52	-1,231	18.030,53	-1,232	19.144,50	-1,232
9%	12.477,16	-1,237	13.384,44	-1,241	14.621,45	-1,245	15.567,35	-1,246	16.527,04	-1,247
10%	10.942,09	-1,245	11.731,57	-1,250	12.809,14	-1,255	13.633,98	-1,258	14.471,55	-1,260
11%	9.711,58	-1,251	10.406,16	-1,257	11.355,09	-1,264	12.082,13	-1,267	12.820,95	-1,270
12%	8.706,77	-1,255	9.323,51	-1,262	10.166,83	-1,270	10.813,48	-1,274	11.471,04	-1,278
13%	7.873,43	-1,257	8.425,41	-1,265	9.180,72	-1,274	9.760,31	-1,280	10.350,03	-1,284
14%	7.173,16	-1,257	7.670,56	-1,266	8.351,62	-1,277	8.874,57	-1,283	9.406,94	-1,289
15%	6.578,01	-1,255	7.028,91	-1,266	7.646,65	-1,278	8.121,25	-1,285	8.604,63	-1,292
16%	6.067,18	-1,252	6.478,09	-1,264	7.041,33	-1,278	7.474,27	-1,286	7.915,42	-1,293
17%	5.624,93	-1,248	6.001,16	-1,261	6.517,10	-1,276	6.913,85	-1,285	7.318,29	-1,294
18%	5.239,09	-1,243	5.585,04	-1,257	6.059,61	-1,273	6.424,71	-1,283	6.797,00	-1,293
19%	4.900,16	-1,237	5.219,48	-1,252	5.657,66	-1,269	5.994,88	-1,281	6.338,84	-1,290
20%	4.600,62	-1,230	4.896,37	-1,246	5.302,34	-1,264	5.614,87	-1,277	5.933,73	-1,287
21%	4.334,41	-1,222	4.609,21	-1,239	4.986,51	-1,259	5.277,04	-1,272	5.573,54	-1,283
22%	4.096,63	-1,213	4.352,70	-1,231	4.704,37	-1,252	4.975,23	-1,266	5.251,71	-1,278
23%	3.883,28	-1,203	4.122,54	-1,222	4.451,18	-1,244	4.704,36	-1,259	4.962,83	-1,273
24%	3.691,04	-1,193	3.915,15	-1,213	4.223,02	-1,236	4.460,24	-1,252	4.702,47	-1,266
25%	3.517,17	-1,182	3.727,56	-1,203	4.016,63	-1,227	4.239,40	-1,244	4.466,90	-1,259

Fuente: Cálculos del autor.