



**PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA
CONSERVACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

**Alternativas para la compensación de emisiones
de gases de efecto invernadero a través de plantaciones forestales**

Tesis de tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito para optar por el grado de:

Magister Scientiae en Socioeconomía Ambiental

Por

Paulo César Hernández Arango

Turrialba, Costa Rica, 2010

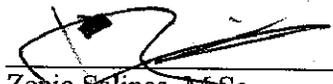
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE EN SOCIOECONOMÍA AMBIENTAL

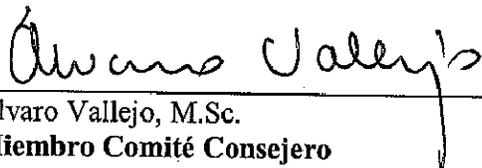
FIRMANTES:



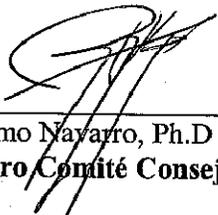
Lucio Pedroni, Ph.D.
Co-director de tesis



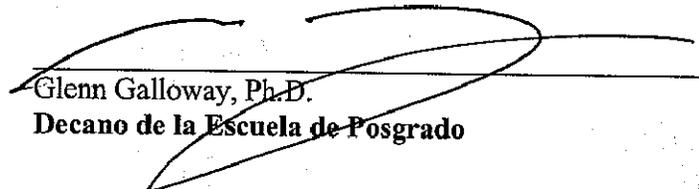
Zenia Salinas, M.Sc.
Co-directora de tesis



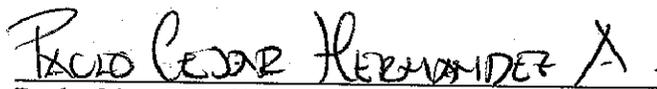
Alvaro Vallejo, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Guillermo Navarro, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Paulo César Hernández Arango
Candidato

DEDICATORIA

*A mi madre, Silvia Arango,
a quien le debo lo que soy,
y cada día me da fuerzas y valores.*

*A mi tía Ofelia Arango,
por mostrarme el amor desinteresado
y enseñarme a creer que todos
merecemos una segunda oportunidad.*

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a *Álvaro Vallejo*, quien además de ser miembro del comité, colega y maestro, es amigo, gracias Alvarín por todo el apoyo en la realización de este trabajo y por las enseñanzas profesionales y personales.

A *Guillermo Navarro*, por sus valiosos aportes académicos, con ellos he cambiado totalmente mi vida profesional.

A *Lucio Pedroni*, pionero y líder mundial en los temas de cambio climático, quien creyó en mí para llevar a cabo esta compleja idea.

A la Organización Internacional de Maderas Tropicales (OIMT), por el apoyo económico para la preparación de este trabajo.

Al Grupo Cambio Global del Catie 2005-2009, por el apoyo y por el excelente grupo humano que acompañó este trabajo.

Es difícil hacer una lista de todas las personas que jugaron un papel importante durante este tiempo de mi vida, así que en general quiero agradecer a todos mis *parceros* y *parceras* que me acompañaron en las buenas y en las malas y a todos los que nunca perdieron la fe en mí.

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| RESUMEN | vii |
| SUMMARY | viii |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivos del estudio | 3 |
| 1.1.1 <i>Objetivo General</i> | 3 |
| 1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> | 4 |
| 2. MARCO CONCEPTUAL | 5 |
| 2.1 El cambio climático | 5 |
| 2.2 El efecto invernadero | 6 |
| 2.3 Respuesta de la comunidad internacional al cambio climático | 8 |
| 2.4 La Neutralidad en Carbono..... | 10 |
| 2.5 Las emisiones del Catie | 12 |
| 2.6 Estándares, metodologías y guías para la estimación de emisiones de GEI..... | 13 |
| 2.7 Metodologías aprobadas por la junta directiva del MDL para proyectos de Forestación y Reforestación..... | 13 |
| 2.8 Guía de las buenas prácticas para uso de la suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura 2003 | 14 |
| 2.9 Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero 2006..... | 15 |
| 2.10 Guía para la cuantificación de GEI en proyectos LULUCF | 15 |
| 2.11 Protocolo para la cuantificación de GEI en proyectos (protocolo de proyecto)..... | 16 |
| 2.12 Estándar de Carbono Voluntario..... | 16 |
| 2.13 Estándar ISO 14064 | 17 |
| 3. Metodología | 19 |
| 3.1 Identificación y cuantificación de los escenarios de Línea Base..... | 19 |
| 3.1.1 <i>Estimación de las remociones por la biomasa herbácea (BH)</i> | 19 |
| 3.1.2 <i>Estimación de las remociones por la biomasa leñosa (BL)</i> | 20 |
| 3.1.3 <i>Biomasa Leñosa Arriba del Suelo (BLAS)</i> | 21 |
| 3.1.4 <i>Relación parte aérea parte Radical (RS)</i> | 22 |
| 3.2 Planificación del escenario de proyecto..... | 22 |
| 3.2.1 <i>Estimación de las remociones por la vegetación leñosa</i> | 22 |
| 3.2.2 <i>Estimación de las emisiones de GEI por implementación de actividades AR</i> | 24 |
| 3.2.3 <i>Estimación de las emisiones por quema de vegetación para la preparación del sitio</i> | 28 |
| 3.2.4 <i>Carbono en los productos forestales</i> | 30 |
| 3.2.4.1. Ciclos de los productos forestales (papel y madera)..... | 32 |
| 3.2.4.2. Dendroenergía | 35 |
| 3.3. Fugas..... | 36 |
| 3.3.1. <i>Fugas por desplazamiento de actividades</i> | 37 |
| 3.3.2. <i>Fugas por uso de combustibles fósiles</i> | 37 |
| 3.4. Balance Neto de Emisiones | 38 |

| | |
|--|----|
| 3.5. Formulación de las alternativas | 39 |
| 3.5.1. <i>Alternativa 1: Establecimiento de un proyecto forestal a perpetuidad sin aprovechamientos forestales</i> | 42 |
| 3.5.2. <i>Alternativa 2: Establecimiento de un proyecto forestal a perpetuidad con aprovechamientos forestales</i> | 45 |
| 3.5.3. <i>Alternativa 3: Establecimiento de proyecto forestal por una rotación y compra de créditos en el último año</i> | 46 |
| 3.5.4. <i>Alternativa 4: Establecimiento de proyecto forestal de una rotación con buffer para el riesgo de remisión</i> | 47 |
| 3.6. Evaluación Económica | 48 |
| 3.6.1. <i>Determinación de turnos óptimos</i> | 51 |
| 3.6.2. <i>Criterio de evaluación para las alternativas 1 y 2</i> | 51 |
| 3.6.3. <i>Criterio de evaluación para las alternativas 3 y 4</i> | 51 |
| 3.7. Análisis de sensibilidad | 52 |
| 4. Estudio de caso | 52 |
| 4.1. Escenario de Línea Base | 53 |
| 4.2. Escenario de proyecto..... | 53 |
| 4.2.1. <i>Vegetación leñosa</i> | 53 |
| 4.2.2. <i>Preparación del sito</i> | 54 |
| 4.2.3. <i>Fertilización</i> | 54 |
| 4.2.4. <i>Aplicación de Cal</i> | 54 |
| 4.2.5. <i>Raleos</i> | 54 |
| 4.2.6. <i>Productos maderables</i> | 55 |
| 4.3 Fugas..... | 55 |
| 4.4. Balance Neto..... | 56 |
| 4.5. Supuestos del Análisis Económico | 57 |
| 4.5.1 <i>Cálculo de la tasa de descuento</i> | 57 |
| 4.5.2. <i>Costos y precios</i> | 58 |
| 5. Resultados..... | 59 |
| 5.1. Alternativa 1 | 59 |
| 5.2. Alternativa 2 | 59 |
| 5.3. Alternativa 3 | 60 |
| 5.4. Alternativa 4 | 61 |
| 5.5. Disponibilidad de tierras y costo de oportunidad | 62 |
| 5.5.1. <i>Disponibilidad de tierras</i> | 62 |
| 5.5.2. <i>Costo de oportunidad de la tierra</i> | 64 |
| 5.6. Productos forestales | 68 |
| 5.7. Análisis de sensibilidad | 70 |
| 5.7.1. <i>Variaciones en las emisiones anuales</i> | 71 |
| 5.7.2. <i>Variación en el precio de venta de la madera</i> | 72 |
| 5.7.3. <i>Variación en la tasa de descuento</i> | 73 |
| 5.7.4. <i>Variación en el precio del carbono</i> | 75 |
| 6. Conclusiones..... | 77 |
| BIBLIOGRAFÍA | 80 |

RESUMEN

En la carrera por mitigar el cambio climático, algunos gobiernos, empresas y centros de investigación, entre otros, han comenzado una transformación hacia una economía de bajas emisiones de GEI. Estos cambios incluyen la “Neutralidad en Carbono”, un concepto que consiste en alcanzar un balance neto de emisiones cercano a O. A pesar de que aún no se tienen claras las reglas para alcanzar este balance, el mismo se ha intentado alcanzar a través de la compra de créditos equivalentes o bien por medio del establecimiento de áreas forestales que puedan compensar estas emisiones.

Con base en las normas y procedimientos de diferentes estándares internacionales del mercado del carbono y de organismos de investigación como el IPCC, esta investigación desarrolla cuatro alternativas para obtener un balance neutro en emisiones de gases efecto invernadero por medio de la implementación de proyectos forestales. Estas opciones fueron validadas por medio de un estudio de caso con las emisiones GEI del CATIE cuantificadas durante los años 2003 a 2006.

Las alternativas diseñadas utilizaron un escenario de línea base con un uso ganadero para carne, el cual se propone cambiar hacia usos forestales con base en los parámetros de las alternativas propuestas. Por medio del método del Valor Esperado de la Tierra se realiza la evaluación económica de estas opciones y se comparan entre sí, así como también con el valor de la compra de créditos de carbono.

La investigación concluye que a pesar de que la compensación de emisiones de GEI por medio de la implementación de proyectos forestales es una opción económica viable, e incluso mejor que la compra de créditos de carbono, esta no puede ser utilizada en el caso analizado debido a limitaciones de áreas disponibles y costos de oportunidad de la tierra. Esto sugiere que la viabilidad y sostenibilidad mecanismos de compensación analizados dependen de la escala espacial y temporal considerara así como del valor alternativo de los usos del suelo presentes.

SUMMARY

In the race to mitigate climate change, some governments, businesses and the academia, among others, have been promoting an economic transformation towards a reduction in greenhouse gas emissions (GHG). That includes "carbon neutrality", a concept that aims to achieve a net balance of emissions close to zero. Even though the rules to achieve this balance are not clear, there have been some attempts to accomplish it through the purchase of equivalent credits or by means of the establishment of forest areas that can compensate these emissions.

Based on different rules and procedures of the carbon market as well as the work done by international organizations such as the IPCC; this research analyses four alternative scenarios of carbon neutrality through the implementation of forestry projects. This proposal was validated in a case study that has quantified information about GHG from 2003 to 2006.

The designed alternatives have a baseline scenario of beef cattle grazing. The proposal promotes a change from this starting point to different forestry alternatives. Using the method of Land Expected Value, an economic assessment was performed to each alternative scenario. Then, a comparison among the four scenarios as well as a comparison with a project that included the purchase of carbon credits was done.

The research concludes that the compensation of GHG emissions through the implementation of forestry projects is a viable economic option; even better than buying carbon credits. However, it cannot be applied in the analyzed case study due to limitations in area as well as the high opportunity cost of land uses. This suggests that, in order to be sustainable, these mechanisms must carefully consider the temporal and spatial scale and the alternative economic value of land uses.

ÍNDICE DE CUADROS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Cuadro 1. Gases de Efecto Invernadero (GEI) | 7 |
| Cuadro 2. Valores para cada variable definidos por el IPCC | 37 |
| Cuadro 3. Emisiones anuales del CATIE para los años 2003 a 2006. (Expresadas en t-CO ₂ e) | 52 |
| Cuadro 4. Parámetros para el cálculo de los valores | 53 |
| Cuadro 5. Resumen del programa de raleos para las alternativas 2,3 y 4 | 55 |
| Cuadro 6. Valores utilizados para calcular la tasa de descuento mínima aceptable | 57 |
| Cuadro 7. Resumen de los costos del aprovechamiento forestal por m ³ | 58 |
| Cuadro 8. Resumen de los costos para las actividades de la alternativa 1 | 59 |
| Cuadro 9. Resumen de los costos para las actividades de la alternativa 2 | 60 |
| Cuadro 10. Resumen de los costos para las actividades de la alternativa 3 | 61 |
| Cuadro 11. Resumen de los costos para las actividades de la alternativa 4 | 62 |
| Cuadro 12. Número de años posibles en cada una de las alternativas para la compensación .. | 64 |
| Cuadro 13. Variaciones para las alternativas 2, 3 y 4 con la inclusión de productos forestales. | 69 |
| Cuadro 14. Comportamiento en las 4 alternativas ante variaciones en el porcentaje de emisiones | 71 |
| Cuadro 15. Comportamiento de las alternativas 2,3 y 4 ante variaciones en el precio de la madera..... | 73 |
| Cuadro 16. Comportamiento para todas las alternativas ante variaciones en la tasa de descuento en +1% | 74 |
| Cuadro 17. Comportamiento para todas las alternativas ante variaciones en la tasa de descuento en -1% | 75 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Cambios en la temperatura, en el nivel del mar y en la cobertura del casquete polar del hemisferio norte | 5 |
| Figura 2. Balance de energía generado por el efecto invernadero natural..... | 6 |
| Figura 3. Ciclo simplificado del nitrógeno (Salinas y Hernández 2008)..... | 26 |
| Figura 4. Descomposición del material forestal | 33 |
| Figura 5. Árbol de decisión para la selección de alternativas..... | 41 |
| Figura 6. Carbono almacenado en un proyecto sin aprovechamiento forestal | 44 |
| Figura 7. Carbono almacenado en plantaciones sometidas a manejo silvicultural..... | 45 |
| Figura 8. Rangos de créditos y precios promedio por proyecto | 58 |

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

| Inglés | Significado | Español | Significado |
|-------------------|--|-------------------|--|
| AFOLU | Agriculture, Forestry and Other Land Use | AFOLU | Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra: |
| CATIE | Tropical Agricultural Research and Higher Education Center | CATIE | Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza |
| CDM | Celan Development Mechanism | MDL | Mecanismo de Desarrollo Limpio |
| CERs | Certified Emission Reduction | CERs | Certificados de Reducción de Emisiones |
| CFC | Clorofluorocarbon | CFC | Clorofluorocarbono |
| CO ₂ | Carbon Dioxide | CO ₂ | Dióxido de carbono |
| CO _{2,e} | Carbon Dioxide Equivalent | CO _{2,e} | Dióxido de carbono equivalente |
| COP | Conference Of the Parties | COP | Conferencia de las Partes |
| CH ₄ | Methane | CH ₄ | Metano |
| EB | Executive Board | JD | Junta Directiva |
| FIFA | Fédération Internationale de Football Association | FIFA | Federación Internacional de Fútbol Asociado |
| GHG | Greenhouse Gases | GEI | Gases de Efecto Invernadero |
| HCFC22 | Hydroclorofluorocarbon | HCFC22 | Hidroclorofluorocarbonos |
| HFC23 | Hydrofluorocarbon | HFC23 | Hidrofluorocarbonos |
| IETA | International Emissions Trading Association | IETA | Asociación Internacional de Comercio de Emisiones |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change | IPCC | Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático |
| LULUCF | Land Use, and Use Change and Forestry | LULUCF | Uso de la Tierra, Cambio en el Uso de la Tierra y Silvicultura |
| N ₂ O | Nitrous oxide | N ₂ O | Oxido Nitroso |
| NGO | Non Gubernmental Organization | ONG | Organización No Gubernamental |
| KP | Kyoto Protocol | PK | Protocolo de Kioto |
| PP | Project Protocol | PP | Protocolo de Proyecto |
| SF ₆ | Sulphur hexafluor | SF ₆ | Hexafluoruro de azufre |
| UNEP | United Nations Environmental Programme | PNUMA | Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change | CMNUCC | Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático |
| WBCSD | World Business Council for Sustanaible Development | WBCSD | Consejo mundial de negocios para el desarrollo sostenible |
| WMO | World Meteorological Organization | OMM | Organización Meteorológica Mundial |
| WRI | World Resources Institute | WRI | Instituto Mundial de Recursos |

1. INTRODUCCIÓN

El clima es el resultado de la dinámica de un sistema en el que interactúan la atmósfera, la superficie terrestre, los glaciares, los océanos, las aguas continentales y los seres vivos. La razón por la cual la superficie de la tierra se mantiene caliente es la presencia de los gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono y el vapor de agua. Estos gases actúan como un manto que refleja la radiación de onda larga proveniente de la superficie terrestre (IPCC 2007).

El aumento en las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera, registrado en las mediciones iniciadas en 1958 por Kelling (1998), evidencia el efecto de las actividades humanas en la composición química de la atmósfera a partir de la revolución industrial. Existe un consenso en la comunidad científica de que a partir de esta fecha se presenta una correlación casi directa entre la cantidad de dióxido de carbono emitida por la actividad económica humana y el aumento de la temperatura media del planeta. Este aumento en la temperatura media conocido como calentamiento global, despertó interés por parte de la comunidad internacional y como consecuencia de este hecho comenzaron a formarse instituciones dedicadas a investigar y mitigar este fenómeno. En 1988 se crea el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, una organización internacional de científicos que estudia el cambio climático (IPCC 2007).

En 1992 se creó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático la cual es asesorada por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático. En esta convención algunos países del mundo reconocieron el problema del calentamiento global y acordaron hacer esfuerzos para reducirlo (UNFCCC 1992b). Este compromiso se materializa por primera vez a través de la firma del Protocolo de Kioto el 16 de febrero de 2005 en el que 41 países se comprometen a reducir sus emisiones antropogénicas en un 5% por debajo de sus emisiones alcanzadas en 1990 entre el período de 2008-2012 (UNFCCC 1998a).

La preocupación internacional sobre el cambio climático trasciende la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático llegando a tal punto que el 17 de abril de 2007, el Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas lo incluyó en su agenda (Armendáriz 2007). En esta ocasión el debate se enfocó en las implicaciones del impacto del cambio climático y las causas potenciales de conflicto que este puede causar, tales como el

acceso a la energía, el agua, los alimentos y otros recursos escasos, las migraciones de población y las disputas fronterizas. Posteriormente, en el debate general de la asamblea se puso claramente de manifiesto el compromiso de los estados miembros para afrontar efectivamente el cambio climático. Recientemente en la conferencia de las partes de Bali se produjo el plan de acción de Bali como mandato fundamental para entablar negociaciones encaminadas a concertar un acuerdo mundial general antes de que acabe 2009 (UN 2008).

Paralelamente a los esfuerzos del Protocolo de Kioto se ha intentado tomar medidas encaminadas a la mitigación de gases de efecto invernadero, tal es el caso del mercado voluntario de compensación de emisiones, con estándares concretos tales como el Estándar de Carbono Voluntario, lanzado por la asociación Internacional de Comercio de Emisiones, el Foro Económico Mundial y el Grupo Climático en el año 2006, con el fin de proporcionar integridad al mercado de carbono voluntario (Hamilton *et ál.* 2007). Con el gran crecimiento de estos mercados, algunos gobiernos, industrias e instituciones han comenzado a utilizar créditos provenientes de proyectos forestales para compensar sus emisiones de gases de efecto invernadero y lograr un balance neutro de estas emisiones, iniciativa que actualmente se conoce como Neutralidad en Carbono. Para alcanzarla, se debe calcular el total de emisiones de gases de efecto invernadero, reducirlas cuando sea posible y compensar sus emisiones restantes a través de compra de créditos de carbono, pagando por plantar nuevos árboles o invirtiendo en tecnologías verdes como energía solar o eólica (FAO 2007).

La Neutralidad en Carbono se ha convertido en una alternativa interesante, no sólo por parte de los países, sino por sectores más pequeños, individuos y organizaciones para que en alguna medida compensen su huella de carbono. Una de las alternativas que tienen las empresas para lograr un balance neutro en emisiones de carbono es la compra de créditos en los mercados voluntarios internacionales. Principalmente se destacan los mercados emergentes en Estados Unidos tales como la iniciativa regional de gases de efecto invernadero y el mercado australiano New South Wales (Neff *et ál.* 2007) que han logrado realizar numerosas transacciones *internacionales*. Se espera que el mercado nacional de los créditos de carbono en los Estados Unidos alcance los 100 millones de dólares, de los cuales el 80% será destinado a compañías que intentan reducir su huella de carbono. Algunas corporaciones y compradores en los Estados Unidos gastaron más de 54 millones de dólares el año pasado en certificados de compensaciones de carbono provenientes de plantaciones de árboles, granjas de viento,

plantas solares y otros proyectos para balancear sus emisiones (Baley 2008). Esto ha generado desacuerdo sobre cómo las emisiones de dióxido de carbono pueden ser neutralizadas con las remociones de carbono a través de la plantación de árboles y hacia dónde se dirige realmente el dinero pagado por los clientes (Story 2008).

En términos de balance neto, a diferencia de los proyectos de reducción de emisiones, los proyectos forestales de captura de carbono tienen la capacidad de remover el carbono emitido a la atmósfera, razón por la cual son atractivos para cumplir los objetivos de la Neutralidad en Carbono. Sin embargo, presentan el problema de la no permanencia del carbono, que consiste en el riesgo de que el carbono almacenado regrese a la atmósfera, cuando se corten o mueran los árboles plantados, de tal manera que el balance neutro obtenido se vuelva un déficit (Salinas y Hernández 2008). En el Mecanismo de Desarrollo Limpio y en el Estándar de Carbono Voluntario, se han encontrado mecanismos para resolver el problema de la no permanencia; sin embargo, en las iniciativas de Neutralidad en Carbono no se ha tratado aún este problema (Reed y Ehrhart 2007). Este trabajo desarrolla el análisis de alternativas para que organizaciones, productos y servicios puedan compensar sus emisiones de GEI por medio de la implementación de proyectos forestales de manera clara, transparente y fácilmente verificable, las cuales se analizan y se comparan financieramente. Dentro de las alternativas se evaluó la compra de créditos permanentes y el establecimiento de áreas nuevas de reforestación que compensen el equivalente a las emisiones de un período dado incluyendo mecanismos para garantizar la permanencia del carbono capturado.

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar, evaluar y comparar por medio de un estudio de caso alternativas que permitan obtener un balance neutro en emisiones de gases efecto invernadero por medio de la implementación de proyectos forestales.

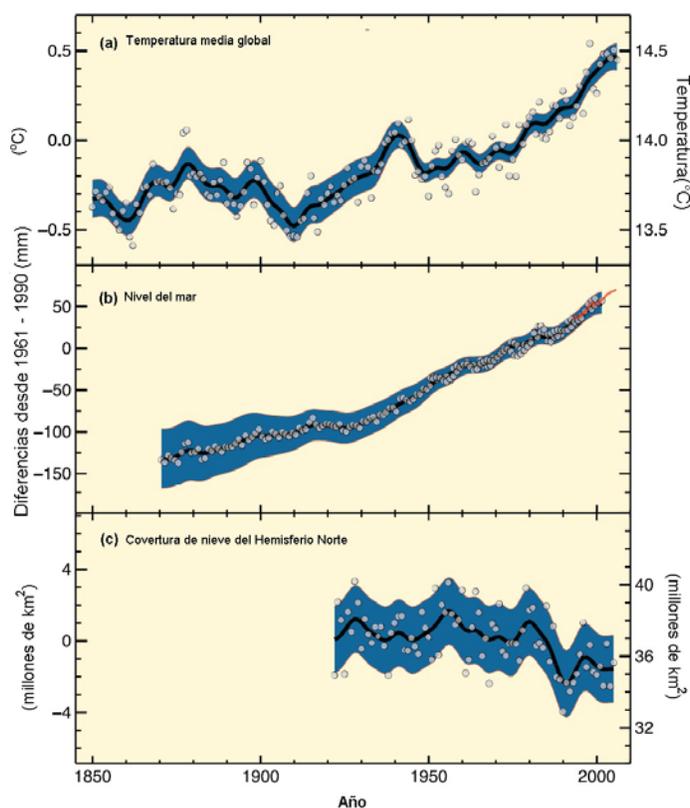
1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica detallada de estándares y metodologías para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero con base en publicaciones de reconocimiento internacional y alto rigor científico.
- Elaborar propuestas metodológicas para obtener un balance neutro en emisiones de carbono.
- Desarrollar una herramienta de análisis financiero que permita evaluar y comparar las alternativas desarrolladas.
- Evaluar y comparar las propuestas con un estudio de caso.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 El cambio climático

A escala continental y oceánica se han observado numerosos cambios en el clima a largo plazo tales como el aumento en la temperatura del océano Ártico y cambios bruscos en la precipitación, la salinidad oceánica, los patrones de viento, las sequías, las lluvias torrenciales, las olas de calor, así como en la intensidad de los ciclones tropicales. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y la comunidad científica concuerdan en la aceptación plena del calentamiento global como resultado de actividades humanas, ahora evidente con el incremento de la temperatura media de la atmósfera y los océanos, y el fuerte descongelamiento de la nieve y el hielo (Figura 1).



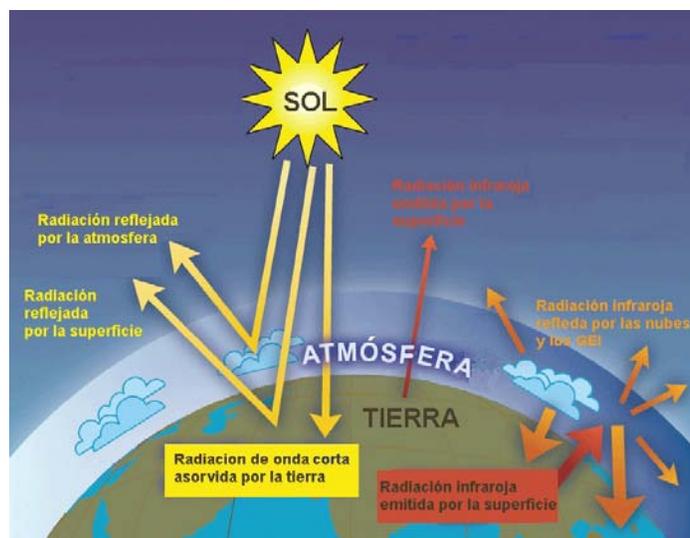
Fuente: IPCC 2007

Figura 1. Cambios en la temperatura, en el nivel del mar y en la cobertura del casquete polar del hemisferio norte

2.2 El efecto invernadero

La principal fuente de energía para el planeta tierra es el sol, el cual emite energía del espectro visible (radiación de onda corta) hacia el planeta, la atmósfera se encarga de devolver directamente al espacio una tercera parte de la cantidad que llega, los dos tercios restantes llegan a la superficie (Figura 2). La superficie de la tierra expuesta al sol se calienta debido a que la misma cantidad de energía procedente del sol es emitida como radiación de onda larga (infrarroja), una parte de esta radiación infrarroja sale hacia el espacio y otra parte es regresada a la tierra en diferentes direcciones por las moléculas de los GEI y las nubes (IPCC 2007). En otras palabras, a mayores concentraciones de GEI y vapor de agua en la atmosfera se reduce la transparencia de la misma para la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre lo cual resulta en un calentamiento.

La superficie de la tierra expuesta al sol se calienta debido a que la misma cantidad de energía procedente del sol es emitida como radiación de onda larga (infrarroja), una parte de esta radiación infrarroja sale hacia el espacio y otra parte es regresada a la tierra en diferentes direcciones por las moléculas de los GEI y las nubes (IPCC 2007). En otras palabras, a mayores concentraciones de GEI y vapor de agua en la atmosfera se reduce la transparencia de la misma para la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre lo cual resulta en un calentamiento.



Fuente: IPCC 2007

Figura 2. Balance de energía generado por el efecto invernadero natural

La atmósfera está compuesta en un 78% de nitrógeno (N), un 21% de oxígeno (O) y un 1% de otros gases. Los cambios en su composición se deben principalmente al aumento de las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) y en menor escala otros Gases de Efecto Invernadero (GEI) (IPCC 2007). El impacto de estos gases sobre el efecto invernadero natural se debe especialmente a la concentración en la atmósfera, al tiempo de permanencia y a su potencial de calentamiento global. Por ejemplo, una tonelada de óxido nitroso (N₂O), tiene un impacto mayor en la atmósfera que una tonelada de CO₂, ya que posee un potencial de calentamiento global 310 veces superior para un horizonte de 100 años (IPCC 1996). Sin embargo, el CO₂ tiene concentraciones más altas y es el gas mayormente emitido. Los gases con mayor concentración en la atmósfera son los GEI naturales dentro de los cuales se encuentran el CO₂, el Metano (CH₄) y el N₂O (Cuadro 1). Los gases no naturales como por ejemplo el Hexafluoruro de Azufre (SF₆) que se encuentra en una concentración muy inferior con respecto al CO₂, tiene impactos más significativos ya que posee un potencial de calentamiento 23.900 veces mayor. Otros gases no naturales son el Clorofluorocarbonado (CFC₁₁) y los Hidrofluorocarbonos (HCFC₂ y HFC₂₃) (IPCC 2007).

Cuadro 1. Gases de Efecto Invernadero (GEI)

| Gas | Tiempo de residencia | Concentración 2005 (ppm*, ppt**) | Crecimiento anual (%) | Potencial de calentamiento (para un horizonte de 100 años) |
|-------------------|-----------------------------|---|------------------------------|---|
| CO ₂ | 50-200 | 379 ± 0,65* | 0,5 | 1 |
| CH ₄ | 21 | 1.774 ± 1,8* | 0,9 | 21 |
| N ₂ O | 120 | 319 ± 0,12* | 0,8 | 310 |
| CFC ₁₁ | 12,5 | 251 ± 0,36 ** | -- | 3.800 |
| HCFC ₂ | 12,1 | 169 ± 1,0 ** | -- | 1.500 |
| HFC ₂₃ | 264 | 18 ± 0,12 ** | -- | 11.700 |
| SF ₆ | 3.200 | 5,6 ± 0,038 ** | -- | 23.900 |

Fuente: IPCC 2007

Por lo tanto, el efecto invernadero natural es un fenómeno que a gran escala se compara con lo que sucede en los invernaderos que se utilizan para cultivar vegetales, donde la energía del sol queda atrapada por los gases, del mismo modo en que el calor queda atrapado detrás de los vidrios de un invernadero.

2.3 Respuesta de la comunidad internacional al cambio climático

Hace varias décadas, algunos científicos como Schneider y Londer (1984) comenzaron a llamar la atención sobre el aumento de la temperatura en el planeta, advirtieron de las consecuencias de la utilización de combustibles fósiles y abogaron por establecer un control estratégico de emisiones de GEI. En 1989 se creó el IPCC con el patrocinio de la Organización Mundial de la Meteorología (WMO, por sus siglas en inglés) y del Programa Medioambiental de Naciones Unidas (UNEP, por sus siglas en inglés), reuniendo científicos de todo el planeta con la finalidad de recoger datos y elaborar modelos para las previsiones de clima futuro (Lovelock 2006).

En 1990 se publica el primer informe de evaluación del IPCC, en el cual se enfatiza en la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ para conseguir estabilizar la concentración de GEI en la atmósfera. Las evidencias de este informe provocan en 1992 la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) (UNFCC 1992a) en la cual se reafirma que “existen amenazas de daños serios o irreversibles y la falta de certidumbre científica no debe ser razón para posponer medidas para prevenir tal degradación medioambiental” y acordaron que “el objetivo final debería ser estabilizar las concentraciones de GEI a un nivel que prevenga las interferencias antropogénicas peligrosas con el clima”. Se estableció que la meta sería lograda en un plazo que permitiera que los ecosistemas se adaptaran naturalmente al cambio climático, para asegurar que la producción de alimentos no estuviera amenazada y que existieran las condiciones para el desarrollo sostenible (UNFCCC 1992b).

Desde que la UNFCCC entró en vigor, se estableció la Conferencia de las Partes (COP, por sus siglas en inglés) cuyos miembros se han venido reuniendo anualmente para evaluar el progreso de los aspectos relacionados con el cambio climático (UNFCC 1992c) y el 11 de diciembre de 1997, durante la COP3 se elabora el Protocolo de Kioto (PK), como una adición al documento de la UNFCCC, que establece explícitamente metas de reducción de GEI para los países incluidos en el anexo B del protocolo. La meta de reducción establecida en el PK es lograr que el total de las emisiones de los países comprometidos estén en el período de compromiso (entre 2008 y 2012) al menos un 5% por debajo de las emisiones de 1990. Los

compromisos individuales de cada uno de los países se detallan en el anexo B del PK (UNFCCC 1998a).

Para cumplir de manera costo-efectiva estos compromisos, se establecieron tres mecanismos de flexibilidad dentro de los cuales se encuentra el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). El propósito de este mecanismo es ayudar a las partes no incluidas en el anexo B del protocolo a lograr un desarrollo sostenible y contribuir al objetivo último de la convención, así como ayudar a las partes incluidas en el anexo B a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos en virtud del artículo 3 del PK de manera costo-efectiva (UNFCCC 1998b).

El MDL es un mecanismo basado en proyectos y es el único que involucra a países no-anexo B, permitiendo que reducciones/remociones certificadas que ocurren en estos países puedan ser compradas por un país anexo B y usadas por éste para cumplir sus compromisos (UNFCCC 1998b). Los proyectos MDL se agrupan en 15 categorías de actividades elegibles, dentro de las cuales se encuentran los proyectos forestales, estos pueden ser de forestación y reforestación (ECOSECURITIES 2007).

A pesar de que las plantaciones forestales son los ecosistemas terrestres más importantes para remover GEI, hasta junio de 2009, sólo hay seis proyectos forestales registrados bajo el MDL (UNFCCC 2008). Algunas de las razones que explican este hecho son:

- Retraso de dos años en la definición de las modalidades y procedimientos en comparación con otras categorías de proyecto (Neff *et ál.* 2007).
- Las metodologías fueron percibidas como complejas por los desarrolladores de proyecto, por lo que fue—y es aún—necesario reforzar las capacidades humanas y desarrollar las herramientas para su implementación (Neff *et ál.* 2007).
- Altos costos de transacción (Neff *et ál.* 2007).
- Sistema Europeo de Comercio de Emisiones de la Unión Europea (EU ETS, por sus siglas en inglés) no acepta créditos del MDL forestal (Neff *et ál.* 2007).
- El límite de los proyectos de pequeña escala es demasiado reducido, por lo que la participación de los actores de bajos ingresos es limitada (Estrada 2008).

- Créditos temporales que deben ser renovados periódicamente.
- Bajos volúmenes de créditos hasta el 2021.

2.4 La Neutralidad en Carbono

En la carrera por mitigar el cambio climático, algunos gobiernos, empresas e instituciones han comenzado una transformación hacia una economía de bajas emisiones de GEI. En este proceso surgió el concepto de Neutralidad en Carbono (NC) que consiste en que el balance neto de emisiones de GEI de una organización, producto, servicio o proceso sea igual a cero, a través de una combinación de acciones directas como reducción de emisiones y/o acciones indirectas como remociones de carbono (TCNC 2006).

A pesar de que no existe un estándar reconocido internacionalmente para la NC que permita tener condiciones y reglas claras para verificar y comprobar que estas emisiones han sido correctamente estimadas y compensadas por dichas organizaciones, productos, servicios o procesos, actualmente existen varias empresas, organizaciones y eventos que se han autoproclamado como “Carbono Neutrales” y han realizado esfuerzos para compensar sus emisiones. Algunos ejemplos de esto son:

- La copa mundial de fútbol de la Federación Internacional de Fútbol Asociado (FIFA), de 2006. Los organizadores firmaron un acuerdo con UNEP y el Ministerio del Medio Ambiente de Alemania para desarrollar la iniciativa Gol Verde y remover las 100.000 toneladas métricas de GEI emitidas durante el evento a través de un proyecto en India y dos en África. El proyecto en India consiste en biodigestores instalados en aldeas rurales que generaran gas a partir del estiércol de las vacas, con el fin de reemplazar el uso de queroseno y madera como fuente de combustible. De esta manera unas 30.000 toneladas de CO₂ dejaron de ser emitidas a la atmosfera en los próximos 10 años. Para esto se requirió un total de 500.000 Euros que fueron financiados por la federación alemana de fútbol. El primer proyecto en África consiste en la instalación de un quemador en una granja de cítricos en Letaba que evitará anualmente la emisión de 19.000 toneladas de CO₂. El segundo proyecto consiste en capturar el metano proveniente de los pozos sépticos de un pueblo cerca a Johannesburgo, para convertirlo en fuente de energía, evitando que 5.800 toneladas de CO₂ salgan a la atmósfera. El financiamiento de los proyectos en África

fue dado por la FIFA (400.000 Euros), Telekom (200.000 Euros) y PlasticsEurope (100.000 Euros).

- EL gobierno de Costa Rica anuncia en 2007 a través de su presidente Óscar Arias que “el país llegará a convertirse en el 2021 en el primer país centroamericano en lograr una emisión neutra de dióxido de carbono y otros gases que están provocando el calentamiento global”.
- La universidad EARTH de Costa Rica describe en su informe anual que la universidad emite 1.154 toneladas de CO₂ anuales generadas por sus actividades y que a su vez tiene la capacidad de remover de la atmósfera 16.324 toneladas anualmente (EARTH 2007).
- EL Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) ubicado en Costa Rica encontró en un estudio para el logro de la Neutralidad en Carbono, que el balance de la institución y la modelación del capital natural realizado para las actividades que se llevan a cabo en la sede central, removió mayor cantidad de GEI de los que emite en el período comprendido entre 2003 – 2006 (Guerra 2007).

Estas son solo unas cuantas iniciativas. A esta lista podrían sumarse grandes empresas multinacionales como Dell, Continental Airlines, General Electric, Volkswagen que también han comenzado a utilizar la Neutralidad en Carbono como un elemento adicional en su portafolio de negocios y estrategia de imagen.

Es importante resaltar que estos esfuerzos no pueden ser vinculados directamente con el MDL o los mercados voluntarios; sin embargo, la implementación de proyectos forestales con elementos técnicos confiables y verificables puede convertirse en un esfuerzo real para la compensación de la huella de carbono, ya que estos tienen la capacidad de remover CO₂ de la atmósfera, convirtiendo estos proyectos en un mecanismo adecuado para el cumplimiento del objetivo de la Neutralidad en Carbono, siempre y cuando se dé al riesgo de la re-emisión del CO₂ a la atmósfera un tratamiento adecuado (técnicamente correcto, transparente, conservador y verificable).

A pesar de que, como se dijo, no existe un estándar reconocido internacionalmente para la NC, existen actualmente estándares, metodologías y guías para la estimación de GEI y para la emisión de créditos de compensación en proyectos forestales que podrían servir como punto de partida para la elaboración de una propuesta metodológica de alternativas para

alcanzar un balance neutro en emisiones de carbono que incluya el tratamiento de la no permanencia.

2.5 Las emisiones del Catie

Guerra (2007) plantea que debido a las características cambiantes que tiene cualquier organización y tomando en cuenta el hecho fundamental de que el CATIE es propietario de un capital natural, llamado finca, la vía hacia la neutralidad en carbono institucional va a estar inherentemente relacionada con el manejo que se haga de este capital, desde la perspectiva de una fuente importante de emisión como también de la capacidad de remoción y almacenamiento de carbono asociado a los bosques del CATIE. En la investigación de Guerra (2007) se identificaron las emisiones del CATIE por concepto de:

- a. Fermentación entérica producto de los procesos de digestibilidad del ganado.
- b. Manejo de residuos agrícolas sólidos y líquidos dentro de la finca.
- c. Aplicación de fertilizantes sintéticos a los cultivos de la finca.
- d. Viajes aéreos institucionales de docentes y personal institucional.
- e. Combustibles utilizados en transporte y en actividades productivas.
- f. Energía eléctrica empleada en la infraestructura de la sede central.
- g. Consumo de papel realizado por la institución.

Los resultados de la estimación de las emisiones del CATIE obtenidos por Guerra (2007) para 4 años (2003 a 2006) indican que para el caso de la fermentación entérica, el promedio fue de 877,4525 t-CO₂e. En relación con el manejo de residuos agrícolas sólidos y líquidos, el promedio para el mismo período fue de 8,0525 t-CO₂e. Para las emisiones directas de óxido nitroso por manejo de fertilizantes sintéticos, el balance de GEI varía de 72,38 t-CO₂e para el 2003 a 87,62 t-CO₂e en el 2006. Las emisiones por viajes aéreos fueron de 539 t-CO₂e en el 2003 y 661 t-CO₂e en el 2006. El promedio de las emisiones por consumo eléctrico fue de 251,5 t-CO₂e. Por consumo de combustible fósil el promedio fue de 449,9 t-CO₂e. Por último, las emisiones por consumo de papel fueron en promedio de 4,26 t-CO₂e.

2.6 Estándares, metodologías y guías para la estimación de emisiones de GEI

Los proyectos MDL forestales de mitigación del cambio climático tienen modalidades y procedimientos que reglamentan tópicos específicos tales como la elegibilidad de las tierras y la no-permanencia de las remociones logradas. También se incluyen reglas sobre temas comunes a otros proyectos MDL tales como: adicionalidad, línea base, monitoreo, emisiones ocasionadas por el proyecto dentro y fuera de su límite y los impactos socio-económicos y ambientales del proyecto (Salinas y Hernández 2008). Para esto existen protocolos que permiten estimar el carbono y otros gases de efecto invernadero utilizando métodos y ecuaciones que se apoyan en el conocimiento científico existente y que son los más adecuados y precisos para las circunstancias de un proyecto específico (Salinas y Hernández 2008).

2.7 Metodologías aprobadas por la junta directiva del MDL para proyectos de Forestación y Reforestación

Una metodología es, en el contexto del MDL, un conjunto de métodos y reglas específicos para la ejecución de proyectos MDL que permiten evaluar y demostrar la adicionalidad de las remociones de carbono que resultará de la implementación de una actividad de proyecto de remoción de GEI, determinar la línea base, definir las actividades del proyecto, evaluar las fugas, estimar el carbono y otros GEI (Salinas y Hernández 2008).

Actualmente existen 11 metodologías aprobadas para proyectos forestales de escala normal y 3 para proyectos forestales de pequeña escala. Un proyecto de pequeña escala se define como un proyecto cuya proyección de las remociones antropogénicas netas de GEI por los sumideros no debe exceder las 16.000 t-CO₂e por año en un período de verificación y que es desarrollado o implementado por comunidades o individuos de bajos ingresos (UNFCCC 1992).

Muchas de estas metodologías toman como referencia para la realización de sus cálculos ecuaciones y parámetros por defecto de las guías y directrices del IPCC (2003).

2.8 Guía de las buenas prácticas para uso de la suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura 2003

Esta publicación es la respuesta a la invitación de la UNFCCC al IPCC para que elaborara una orientación sobre las buenas prácticas para la estimación de GEI en proyectos que involucren el uso de la tierra. Abarca un conjunto de procedimientos que garantizan que los inventarios de GEI sean consistentes entre países y proyectos, acordes con el avance de la ciencia en el tema y que no presenten sistemáticamente una estimación por exceso o por defecto, reduciendo las incertidumbres. Provee a su vez las bases para la representación consistente de áreas terrestres, las prácticas adecuadas para el sector del cambio de uso de la tierra y métodos suplementarios para la estimación, medición, monitoreo y reporte de cambios en el almacenamiento de carbono y emisiones de GEI en actividades relacionadas con el uso y cambio de uso del suelo y la silvicultura (Vallejo 2005).

También comprende la elección de métodos de estimación apropiados a las circunstancias nacionales, la garantía de calidad y el control de calidad en el plano nacional, la cuantificación de las incertidumbres y la notificación y puesta en archivo de los datos a fin de promover la transparencia (UNFCCC 2001) y aborda los siguientes aspectos (IPCC 2003):

- La elección del método de estimación en el contexto de las directrices del IPCC.
- Los procedimientos de garantía de la calidad y control de calidad que permitan verificaciones cruzadas durante la compilación del inventario.
- Los datos y la información que deberán documentarse, archivarse y notificarse para facilitar el análisis y la evaluación de las estimaciones de los inventarios.
- La cuantificación de incertidumbres a nivel de la categoría de fuente o sumidero y del inventario en su conjunto, de manera que los recursos disponibles puedan dedicarse a reducir las incertidumbres en el transcurso del tiempo y poder seguir las mejoras.

2.9 Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero 2006

Es una publicación compuesta por cinco volúmenes que proveen metodologías para realizar los inventarios nacionales de emisiones antropogénicas por las fuentes y remociones por los sumideros de GEI. El volumen 4 proporciona una guía para la preparación de inventarios anuales de GEI en los sectores Agrícola, Forestal y de Otros Usos de la Tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés). En la versión anterior de esta publicación se tenían dos capítulos para este tipo de proyectos, el capítulo 4 aborda el área de la agricultura y el capítulo 5 que aborda el Uso del suelo, Cambio de Uso del Suelo y Silvicultura (LULUCF, por sus siglas en inglés) IPCC (1996). Esta nueva integración considera que las emisiones y remociones de GEI, así como los diversos reservorios de carbono, pueden encontrarse en todos los usos de la tierra; los cambios de uso del suelo pueden involucrar cualquier tipo de tierra. Con esta unión se intenta mejorar la consistencia en la estimación y reporte de las emisiones y remociones de GEI (IPCC 2006). Sin embargo, es común que todavía se utilice la versión de 1996 ya que es una versión revisada.

2.10 Guía para la cuantificación de GEI en proyectos LULUCF

Paralelamente a las metodologías para proyectos forestales de la UNFCCC y a las guías del IPCC, algunas entidades con el Consejo Mundial de Recursos (WRI, por sus siglas en inglés) y el Consejo Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) han desarrollado guías para complementar y facilitar la cuantificación de GEI en el caso de actividades de proyectos forestales como la guía para la cuantificación de GEI en proyectos LULUCF que provee principios específicos, conceptos y métodos para cuantificar y reportar las reducciones de GEI (WRI 2005).

Este documento provee guías y conceptos específicos más apropiados para cuantificar y reportar reducciones de GEI provenientes de actividades LULUCF. Esta guía puede ser usada para todas las actividades de proyectos LULUCF y se enfoca en dos tipos de proyectos: reforestación y manejo forestal, también puede usarse para actividades de deforestación evitada; sin embargo, éstas no son específicamente tratadas (WRI 2006).

La guía LULUCF no tiene requerimientos, simplemente describe e ilustra, usando ejemplos, como deben ser alcanzados los requerimientos de los proyectos de reforestación y manejo forestal y destaca los elementos que requieren una aproximación diferente a como se describen en el protocolo de proyecto. Adicionalmente, este documento apunta a reducir la incertidumbre y los costos de transacción de los proyectos de LULUCF y al mismo tiempo mejorar su integridad ambiental. Debe ser usada en conjunto con el Protocolo para la estimación de GEI.

2.11 Protocolo para la cuantificación de GEI en proyectos (protocolo de proyecto)

El protocolo de proyecto para GEI, es una iniciativa compartida de empresas, Organizaciones No Gubernamentales (ONG), gobiernos e instituciones académicas agrupadas por el WBCSD y el WRI. Fue creado en 1998, con el objetivo de elaborar un estándar y/o protocolo para la cuantificación y reporte de GEI internacionalmente aceptado. El protocolo de proyecto provee principios específicos, conceptos y métodos para cuantificar y reportar las reducciones y sus objetivos son (WRI 2005):

- Proveer una aproximación transparente y confiable para la cuantificación y el reporte de las reducciones de GEI.
- Aumentar la credibilidad de la estimación de GEI a través de la aplicación de conceptos de cuantificación, procedimientos y principios.
- Proveer una plataforma para la armonización a través de iniciativas y programas de proyectos de GEI.

2.12 Estándar de Carbono Voluntario

El aumento considerable en los mercados de carbono voluntario, ha generado la creación de estándares para garantizar la calidad y transparencia de estos proyectos. Uno de los más importantes actualmente es el Estándar de Carbono Voluntario (VCS, por sus siglas en inglés), el cual presenta un marco y una estructura para la validación y verificación de reducción o remoción de emisiones voluntarias, creado en 2006 por la Asociación Internacional de Comercio de Emisiones (IETA, por sus siglas en inglés), el Foro Económico Mundial y el

Grupo Climático con el fin de incluir criterios e integridad al mercado del carbono voluntario (Hamilton *et ál.* 2007).

Las siguientes actividades son abordados por este estándar (VCS 2007):

- Forestación, reforestación y revegetación.
- Manejo de tierras agrícolas.
- Manejo mejorado de bosques.
- Reducción de emisiones por deforestación.

2.13 Estándar ISO 14064

Es la última adición de la familia de estándares internacionales para el manejo ambiental. El estándar ISO 14064 provee herramientas a los gobiernos e industrias para programas dirigidos a la reducción de GEI (ISO 2008a). La implementación de ISO 14064 intenta alcanzar los siguientes beneficios (SGS 2008a):

- Promover consistencia, transparencia y credibilidad en la cuantificación, monitoreo, reporte y verificación de GEI.
- Permitir a las organizaciones identificar y manejar las responsabilidades, ventajas y riesgos relacionados con los GEI.
- Facilitar el comercio de créditos de GEI.

ISO 14064 se compone de tres estándares que detallan especificaciones y guías para el nivel organizacional de proyectos, validación y verificación, que pueden ser usados independientemente o como un juego integrado de herramientas para agrupar las diferentes necesidades de la cuantificación y verificación de GEI.

- a. ISO 14064-1: principios específicos y requerimientos a nivel de organización para la cuantificación y el reporte de las emisiones y remociones de GEI incluyendo los requerimientos para el diseño, desarrollo, manejo, reporte y verificación de los inventarios de GEI de las organizaciones (ISO 2008a).

- b. ISO 14064-2: principios específicos y requerimientos a nivel de proyecto para la cuantificación, monitoreo y reporte de actividades previstas a generar reducción de emisiones o mejoras en las remociones. Incluye requerimientos para la planificación de proyectos de GEI, identificación y selección de las fuentes, sumideros y reservorios relevantes del proyecto y de la línea base. Así como instrucciones para el monitoreo, la cuantificación y el reporte del proyecto de GEI (ISO 2008a).
- c. ISO 14064-3: principios específicos y requerimientos para quienes conducen la validación y/o verificación de las estimaciones de GEI. Pueden ser aplicadas para la cuantificación, monitoreo y reporte de GEI llevados a cabo con base en las normas ISO 14064-1 o 14064-2 (ISO 2008a).

3. METODOLOGÍA

3.1 Identificación y cuantificación de los escenarios de Línea Base

La proyección de los usos de la tierra que existían al comienzo del proyecto se conoce como la Línea Base (LB) y es en términos simples, el escenario que representa de manera razonable la suma de los cambios en las existencias de carbono en los reservorios dentro de las fronteras del proyecto, que se producirían en caso de no realizarse la actividad de proyecto propuesta (Salinas y Hernández 2008). Los cambios en las existencias de carbono en la LB se deben de manera transparente y conservadora, de forma tal que representen las emisiones de GEI que ocurrirían en ausencia del proyecto (UNFCCC 2005h). La cuantificación de los cambios de existencias de carbono debe realizarse con base en metodologías y procedimientos que permitan acercar las estimaciones a la realidad. Se propone construir un escenario de LB teniendo en cuenta las metodologías aprobadas por la JD del MDL. Por principio de conservadurismo en el escenario de Línea base no se estiman las emisiones, ya que al considerarlas, el escenario de proyecto removería mayor cantidad de GEI.

Se deben definir los componentes del ecosistema que sirven como almacenamiento de carbono. Según las metodologías del MDL existen 5 reservorios de Carbono (biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, hojarasca y carbono orgánico en el suelo) que son susceptibles de aumentar o disminuir por acciones humanas (UNFCCC 1998b). Sin embargo, algunos de ellos requieren de complicados procesos para su cuantificación y tienen poco efecto sobre el balance total, por lo que se debe hacer un análisis costo beneficio para su inclusión. En este estudio solo se consideró la biomasa aérea y la biomasa subterránea.

3.1.1 Estimación de las remociones por la biomasa herbácea (BH)

Por lo general, en los proyectos MDL forestales la biomasa herbácea sólo se calcula en la línea base con el objetivo de estimar las emisiones debidas a la eliminación de la vegetación preexistente en el escenario de proyecto. En la línea base, los cambios en las existencias de biomasa y el contenido de carbono de la vegetación herbácea se suelen considerar nulos, pues se entiende que los pastos se degradan o se conservan sin variaciones (Salinas y Hernández

2008). EL Carbono expresado en T CO₂e en la BH para todos los años será estimado con la ecuación 1.

$$BH = ((BHAS) + (BHAS * RS)) * (Fc) * \frac{44}{12} \quad (1)$$

donde:

BH= biomasa herbácea

BHAS= biomasa herbácea arriba del suelo

RS= relación parte aérea, parte radical

FC = fracción de carbono

44/12 = factor de conversión de C a CO₂

Biomasa herbácea arriba del suelo (BHAS): el cálculo de la biomasa herbácea arriba del suelo puede ser un proceso complejo que requiere métodos destructivos con mediciones directas en campo, establecimiento de parcelas y análisis de laboratorio. Sin embargo, este valor puede ser tomado de la tabla 6.4 del IPCC (2006). Las unidades de esta variable son toneladas de materia orgánica (tdm, por sus siglas en ingles).

Relación parte aérea parte Radical (RS): esta relación permite obtener la proporción de la biomasa abajo del suelo. Sin embargo, para su estimación se requiere un proceso complicado, que incluye la extracción de las raíces para obtener su peso verde y posteriormente estimar el peso seco en el laboratorio. En caso de no poseer datos específicos puede ser estimada a partir de los valores por defecto de la tabla 6.1 del IPCC (2006).

Fracción de Carbono (FC): la fracción de carbono permite convertir las toneladas de materia seca en toneladas de carbono, posteriormente se debe multiplicar por el factor de conversión de C a CO₂.

3.1.2 Estimación de las remociones por la biomasa leñosa (BL)

Las existencias de carbono de la biomasa leñosa presentan diferencias a lo largo del tiempo. Por tal razón, se debe estimar una biomasa inicial, un crecimiento y una biomasa final. Generalmente la BL en la LB no es un componente muy importante, ya que solo está presente en pequeña proporción, como p.e. árboles aislados en potreros, de tal manera que para la estimación de esta se puede seguir un proceso simplificado, que consiste en determinar la biomasa inicial y la biomasa final en el último año del proyecto. Con estos dos datos se estima

el crecimiento de la biomasa durante el período establecido y se calculan los cambios de existencias para cada año como la diferencia entre la biomasa final y la biomasa inicial, dividida por el número de años. El carbono de la BL expresado en T CO₂ e para cada uno de los años del período de estudio será calculado con la ecuación 2.

$$BL = ((BLAS) + (BLAS * RS)) * (Fc) * \frac{44}{12} \quad (2)$$

donde:

BL= biomasa leñosa

BLAS= biomasa leñosa arriba del suelo

RS= relación parte aérea, parte radical

FC = fracción de carbono

44/12 = factor de conversión de C a CO₂

3.1.3 Biomasa Leñosa Arriba del Suelo (*BLAS*)

Para la estimación *ex-ante* de la biomasa leñosa arriba del suelo se pueden seguir dos procedimientos que dependerán de los tipos de datos encontrados o reportados. De igual manera que la biomasa herbácea, el cálculo de la biomasa no leñosa arriba del suelo puede ser un proceso complejo que requiere métodos destructivos y análisis de laboratorio. Sin embargo, este valor puede ser tomado de la tabla 6.4. del IPCC (2006). Los valores en este caso son tomados directamente en tdm y no requieren otros factores para su conversión, pero también es común encontrar como medida m³ para la comercialización de la madera. En caso de no conocer el volumen se deben utilizar los valores por defecto de la tabla 4.7 del IPCC (2006). Para convertir la unidad de volumen en unidades de biomasa (tdm) se aplica la ecuación 3.

$$BLAS = Vol * Dm * FEB \quad (3)$$

donde:

BLAS= biomasa leñosa arriba del suelo

Vol = volumen

Dm = densidad de la madera

FEB = factor de expansión de biomasa

La densidad de la madera (*Dm*) es utilizada para convertir el volumen del fuste de un árbol expresado en m³ a toneladas de materia seca. Existen diferentes procedimientos para

determinar la densidad de la madera, algunos requieren destrucción y proceso de laboratorio. Otra manera de determinarla es con base en la relación del volumen de una muestra con su masa en estado Anhidro (Davel *et ál.* 2005). En caso de no poseer datos específicos se puede recurrir a la tabla 4.13 del IPCC (2006). Luego de conocer la biomasa del fuste se multiplica por el Factor de Expansión de Biomasa (FEB) para obtener la biomasa total del árbol (Salinas y Hernández 2008). Es un factor variable que depende de la especie, las condiciones ambientales, la densidad y la edad. En caso de no poseer datos específicos se deben utilizar los valores por defecto de la tabla 3A.1.10 del IPCC (2003).

3.1.4 Relación parte aérea parte Radical (RS)

Esta relación permite obtener la proporción de la biomasa abajo del suelo. Sin embargo, para su cálculo se requiere un proceso complicado ya que las raíces deben ser extraídas con maquinaria que aumenta los costos de los proyectos. Al igual que los numerales anteriores, el IPCC (2006) suministra valores por defecto para esta variable.

3.2 Planificación del escenario de proyecto

Uno de los objetivos de la implementación de proyectos forestales sobre otros usos del suelo, es aumentar las existencias de carbono en los sumideros. Sin embargo, la implementación de estos proyectos genera un impacto en términos de emisiones por uso de fertilizantes y uso de combustibles fósiles entre otros. Es por esto que se deben estimar las “remociones de GEI netas por los sumideros”, que resultan de sumar los cambios verificables en las existencias de carbono en los reservorios dentro de los límites del proyecto, menos las emisiones de GEI por las fuentes (UNFCCC 2005). De igual manera, en la LB de este estudio se consideran dos de los reservorios propuestos por el MDL: la biomasa aérea y la biomasa subterránea. Además se consideran algunas fuentes de emisión y se incluye una propuesta para la estimación del carbono almacenado por los productos forestales (papel y madera).

3.2.1 Estimación de las remociones por la vegetación leñosa

Biomasa de los árboles: a diferencia del procedimiento utilizado en la LB, en el escenario de proyecto se presentan anualmente cambios considerables en las existencias de

carbono en la biomasa leñosa, que dependerán principalmente de la o las especies utilizadas y del tipo de manejo dado. Por lo general las estimaciones *ex-ante* de los escenarios de proyectos AR se realizan a partir de tablas de crecimiento de volumen. Estas tablas pueden ser construidas a partir de modelos de crecimiento. En este estudio se utilizará la herramienta “MINGA”, una herramienta diseñada en Excel que permite consultar datos de crecimiento de numerosas especies obtenidos en sitios concretos de muchos países. Con estos datos se pueden generar modelos para variables específicas a partir de un conjunto de características seleccionadas por el usuario; así por ejemplo, se puede representar el crecimiento de una especie en un sitio específico o escoger modelos genéricos adecuados para la simulación del crecimiento de una especie en un lugar dado. La herramienta permite parametrizar modelos para calcular la altura de los árboles, el diámetro y el volumen en función del tiempo.

Los modelos genéricos utilizados por MINGA son:

Altura:
$$Hd = a * (1 - EXP(-b * T))^c \quad (4)$$

Diámetro
$$D = a * Hd^b * N^c \quad (5)$$

Volumen:
$$V = f(\text{forma del fuste}, Hd, N) \quad (6)$$

donde:

Hd = altura

T = tiempo en años

D = diámetro

N = número de árboles por hectárea

V = volumen

a, b y c = Parámetros variables según las especies a modelar.

Con el modelo para la estimación del volumen se puede construir entonces una tabla de volumen en función del tiempo, lo que permite luego determinar los cambios de existencias de carbono en la BLAS en cada uno de los años de duración del proyecto.

Densidad de la madera: es la relación entre el peso de una cantidad dada de madera y su correspondiente volumen. Para cálculos de relación de carbono, se acostumbra a utilizar la **densidad básica**, la cual se calcula utilizando el peso de una muestra seca al horno y el

volumen de dicha muestra a un contenido de humedad saturado. Se acostumbra a presentar los valores de densidad de madera en g cm^{-3} o en kg m^{-3} .

Con la tabla de volumen construida con la herramienta Minga, se estima el volumen de madera en pie año a año, y se convierte a toneladas de materia seca (tdm) –también llamadas biomasa- utilizando la densidad de la madera. Las densidades de la madera pueden ser calculadas mediante muestreo y métodos de laboratorio, o pueden ser tomados de la tabla 4.13 del IPCC (2006) en la cual hay un listado de valores de densidad de madera para 822 especies con su respectiva densidad.

Factor de expansión de biomasa: El factor de expansión permite obtener la biomasa total del árbol cuando se cuenta con biomasa del fuste (Salinas y Hernández 2008). Se trata de un factor variable que depende de la especie, las condiciones ambientales y la densidad y edad de la plantación (Avendaño 2008). En caso de no poseer datos específicos se pueden utilizar los valores por defecto de la tabla 3A.1.10 del IPCC 2003.

3.2.2 Estimación de las emisiones de GEI por implementación de actividades AR

EL MDL tiene en la actualidad 12 metodologías aprobadas para la implementación de proyectos AR, las cuales consideran diferentes reservorios de carbono, y diferentes tipos de fuentes de emisión de GEI. Para este trabajo se consideraron las emisiones de CO_2 por uso de combustibles fósiles, emisiones de CO_2 , CH_4 , N_2O por quema de biomasa y las emisiones de N_2O por uso de fertilizantes nitrogenados. Todas estas fuentes de emisión son comunes en todas las metodologías MDL. A pesar de que en ninguna metodología del MDL se aborda el tema de las emisiones de CO_2 generadas por la aplicación de Cal, el IPCC (2006) presenta algunas fórmulas para el cálculo de esta fuente de emisión.

Uso de combustible fósil:

A pesar de ser claro que la implementación de un proyecto forestal tiene beneficios por el aumento de carbono debido al cambio positivo en las existencias, es importante medir las emisiones por consumo de combustible fósil, para determinar el balance positivo en términos de emisiones de carbono como resultado de las actividades forestales desde la plantación hasta la cosecha. Son pocos los estudios que describen el efecto de los combustibles fósiles en los proyectos forestales. Sin embargo, con los factores de emisión del IPCC (2003) se puede calcular las toneladas de CO₂ emitidas por uso de cada litro de Diesel o de gasolina.

Para determinar la cantidad de litros utilizados se requiere conocer algunas variables como la eficiencia de la máquina y las horas utilizadas, o bien hacer un seguimiento detallado de los consumos de combustible. La información de consumos puede hallarse en los registros contables de las empresas, tales como facturas de compra o reportes contables, o bien en los manuales y catálogos de los equipos utilizados. De esta manera, conociendo la cantidad de litros utilizados se aplica la ecuación 7 para determinar las toneladas de CO₂ emitidas.

$$CO_2e = \frac{C * EF_{combustible}}{1000} \quad (7)$$

donde:

CO_2e = Toneladas de CO₂e

C = combustible utilizado en litros

$EF_{combustible}$ = factor de emisiones (valor por defecto para diesel = 2,83 Kg CO₂e l⁻¹)

factor de emisiones (valor por defecto para gasolina = 2,33 Kg CO₂e l⁻¹)

Aplicación de fertilizantes nitrogenados: es una práctica bastante común en los proyectos forestales. El nitrógeno será absorbido por las raíces generalmente bajo las formas de NO₃⁻ y NH₄⁺. Su asimilación se diferencia en el hecho de que el ión nitrato se encuentra disuelto en la solución del suelo, mientras que gran parte del ión amonio está adsorbido sobre las superficies de las arcillas (

Figura 3.).

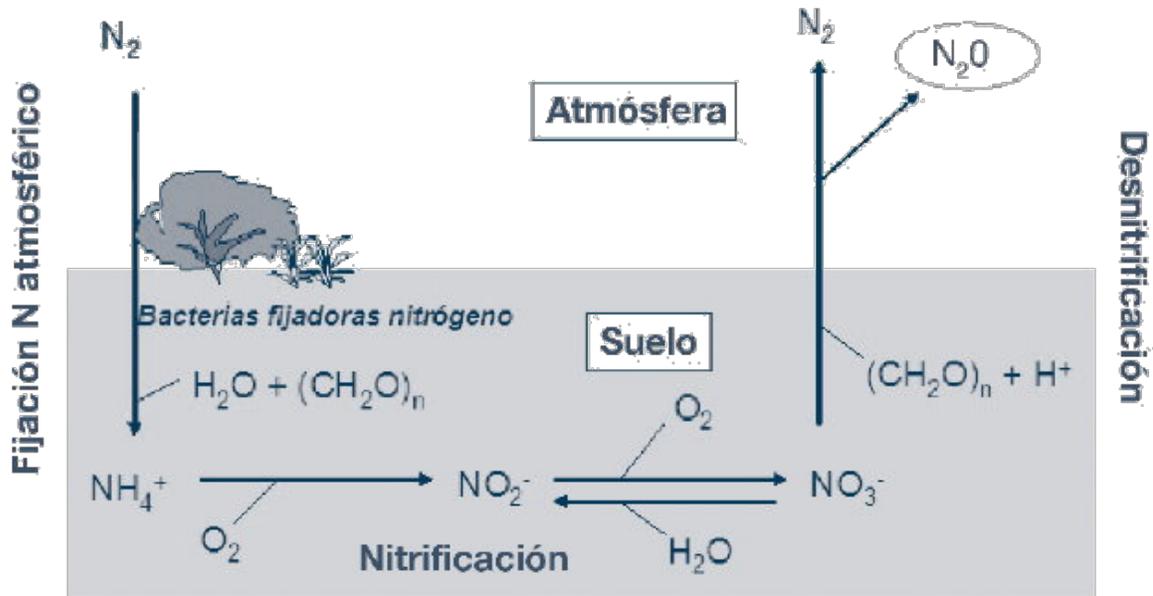


Figura 3. Ciclo simplificado del nitrógeno (Salinas y Hernández, 2008)

Por lo general, los compuestos utilizados en los proyectos forestales pueden ser de origen orgánico o químico; en ambos casos, son mezclas con otros componentes. En este caso se debe conocer la fórmula del compuesto para determinar la cantidad de N orgánico o químico presente en el producto. El nitrógeno añadido como abono, puede estar como urea, NH_4^+ y NO_3^- . Este nitrógeno sigue los mismos modelos de reacción que el nitrógeno liberado por los procesos bioquímicos a partir de residuos de plantas. Así, la urea es sometida a la amonificación (formación de NH_4^+) y nitrificación previas para su utilización por los microorganismos y plantas. El amonio puede ser oxidado a NO_3^- y ser fijado por las partículas sólidas del suelo o utilizado sin cambio por los microorganismos y las plantas. Los nitratos pueden ser absorbidos directamente por microorganismos y plantas o pueden perderse por volatilización y lavado.

Hasta el año 2007 las emisiones de N_2O por la aplicación de fertilizantes nitrogenados era una fuente de emisión de todas las metodologías AR, pero a partir de las decisiones de la reunión 42 de la JD del MDL, se decidió suprimirla ya que no se considera significativa su incidencia en los proyectos. Sin embargo, para efectos de NC, se debe calcular, ya que se está tratando de determinar el balance neto del efecto de los proyectos forestales. De esta manera se procede entonces con la ecuación 8.

$$CO_2e = N_{Tn} * (1 - FracGASF) * GWP(N_2O) * EF_N * \frac{44}{28} \quad (8)$$

donde:

CO_2e = Toneladas de CO_2e

N_{Tn} = Toneladas de Nitrógeno utilizadas en la fertilización

$FracGASF$ = Fracción que se volatiliza como NH_3 y NO_x

fertilizantes sintéticos (valor por defecto del IPCC = 0,1)

fertilizantes orgánicos (valor por defecto del IPCC = 0,2)

$GWP N_2O$ = Potencial de calentamiento global del N_2O (296 para el segundo período de compromiso)

EF_N = Factor de emisiones por Nitrógeno (valor por defecto del IPCC 2006 = 0,0125)

Aplicación de carbonatos de Calcio y cal dolomita: la aplicación de cal es usada para reducir la acidez del suelo y mejorar el crecimiento de bosques manejados y tierras agrícolas. Agregar carbonatos a los suelos en forma de cal ($CaCO_3$), o dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) genera emisiones de CO_2 cuando los carbonatos se disuelven y liberan bicarbonato ($2HCO_3$) que se convierte en CO_2 y en Agua, por lo que se considera una buena práctica estimar la emisiones por la aplicación de cal (IPCC 2006). Para el cálculo de las emisiones de CO_2 por la aplicación de cal se utiliza la ecuación 9.

$$CO_2e = ((M_{Cal} * EF_{Cal}) + (M_{Dolomita} * EF_{Dolomita})) * \frac{44}{12} \quad (9)$$

donde:

CO_2e = Toneladas de CO_2e

M_{Cal} = Toneladas de Cal ($CaCO_3$)

$M_{Dolomita}$ = Toneladas de Dolomita ($CaMg(CO_3)_2$)

EF_{Cal} = Factor de emisiones de cal ($CaCO_3$), Toneladas C (Toneladas de cal)⁻¹

$EF_{Dolomita}$ = Factor de emisiones de dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), Toneladas C (Toneladas de dolomita)⁻¹

3.2.3 Estimación de las emisiones por quema de vegetación para la preparación del sitio

La quema de biomasa es una fuente de emisión, tanto de CO₂ como de gases No-CO₂ (CH₄ y N₂O). Esta práctica tiene dos orígenes: las quemas voluntarias y las involuntarias (incendios). La quema voluntaria de biomasa para la eliminación de vegetación preexistente también motiva el doble conteo (Salinas y Hernández 2008). El doble conteo se produce cuando por error se calculan las variaciones del gas CO₂, tanto en la quema de biomasa como en la pérdida de biomasa. Para evitar esto, no se calcularon las emisiones de CO₂ por quema ya que estas son equivalentes a la reducción en las existencias que se determinan al eliminar la vegetación. Solo se cuantificaron las emisiones de los gases No-CO₂ (CH₄ y N₂O).

La estimación de los gases No-CO₂ producido, es un proceso complejo debido a la diversidad de los componentes de los árboles. La celulosa es el mayor constituyente, significa el 50% por peso de la madera. Esta es una gran cadena de polímeros compuesta de unidades de glucosa. La Lignina, en un 23 a 33% en maderas blandas; 16 al 25% en maderas duras y sobre el 65% en maderas muertas, tiene una estructura molecular mucho más compleja que la celulosa. La hemicelulosa, pertenece a la familia de los polisacáridos constituyendo dentro del 15 al 30% de la madera, dependiendo de la especie y los extractos, los cuales no forman parte de la estructura de la madera, pero contribuyen a la inflamabilidad y a la complejidad de los productos de la combustión. Estos incluyen los taninos, aceites, grasas, ceras y almidones (Manson 2000).

La estequiometría de la combustión de una tonelada de madera nos da que contienen 50% de carbono, 6% de hidrógeno y 43% de oxígeno (Manso 2000). Es importante enfatizar que la combustión en los incendios forestales y las quemas de vegetación no son procesos químicamente eficientes. Una de las razones es el contenido de humedad de los combustibles, los cuales tienden a absorber diferentes cantidades de energía desde el fuego. La razón más importante es el movimiento del aire alrededor del fuego, el cual no aporta oxígeno en forma pareja para que se mezcle con los gases inflamables. Bajo estas condiciones, muchos de los elementos no son consumidos completamente (Haltenhoff 1998). Entre los contaminantes emitidos durante la combustión de biomasa está:

Metano (CH₄): el metano atmosférico absorbe la radiación infrarroja y contribuye directamente al efecto invernadero (Dikerson y Cicerone 1986). En la oxidación del CH₄ atmosférico se libera CO el cual tiene una influencia indirecta sobre el equilibrio radioactivo de la tierra. El monóxido de carbono es el más abundante de los gases contaminantes del aire generado por los incendios forestales. Para estimar la cantidad de CH₄ emitido, se utilizará la ecuación 10.

Oxido nitroso (N₂O): la quema de combustibles fósiles y de biomasa son así mismo fuentes de emisiones del N₂O. El oxido nitroso tiene tres bandas de absorción, aproximadamente entre 7,7um, 9um y 17um. Las dos primeras caen dentro la ventana atmosférica. La formación de óxidos de nitrato ocurre durante la fijación del nitrógeno atmosférico en la zona de combustión a temperaturas sobre los 1540°C (Sandberg *et ál.* 1978), esto es sobre las temperaturas que ocurren normalmente en las quemas. Los óxidos de nitrógeno son producidos solamente a altas temperaturas, que sólo se alcanzan cuando el combustible forestal es totalmente consumido (Haltenhoff 1998). Para estimar las emisiones de N₂O producida durante la quema de vegetación se aplicó la ecuación 11.

$$CO_2e = (B_{seca} * CF_{pre} * CE) * \frac{16}{12} * (ERCH_4 * GWPCH_4) \quad (10)$$

$$CO_2e = (B_{seca} * CF_{pre} * CE) * \frac{44}{28} * (GWPN_2O * \frac{N}{C} * ERN_2O) \quad (11)$$

donde:

CO_2e = Toneladas de CO₂e

B_{seca} = Toneladas de materia seca

CF_{pre} = t C (t d.m.)⁻¹ Fracción de biomasa seca promedio.

$ER CH_4$ = Relación de emisiones por CH₄ (Valor por defecto del IPCC = 0,012)

$GWP CH_4$ = Potencial de calentamiento global para el CH₄ (21 para el primer período de compromiso)

$GWP N_2O$ = Potencial de calentamiento global del N₂O (296 para el segundo período de compromiso)

N/C = Relación Nitrógeno – Carbono (Valor 0,01)

$ER N_2O$ = Relación de emisiones por N₂O (Valor por defecto del IPCC = 0,007)

CE = Eficiencia promedio de combustión de biomasa (Valor por defecto IPCC= 0,01)

3.2.4 Carbono en los productos forestales

Los productos forestales (papel y madera) son almacenes de carbono durante todo el tiempo de vida del producto y cuando este tiempo termina, el carbono pasa a otra parte del ciclo dependiendo del proceso de degradación del producto. Mientras mayor sea la vida media de un producto forestal, el carbono estará almacenado por más tiempo (Benjamín y Masera 2001). Buena parte de la madera extraída del bosque básicamente se convierte en productos maderables (muebles, puertas, herramientas, infraestructura, entre otros) y papel. Sin embargo, el porcentaje de los productos que no se utilice en estos usos podría ser destinado a dendroenergía, entendiendo ésta como la quema de la madera proveniente directamente de los productos cosechados del bosque para la generación de energía.

El comercio de productos forestales tiene como resultado un desplazamiento espacial del componente fuente (en el sitio de descomposición del producto) relativo a un componente comparable del sumidero (en el ecosistema forestal). El carbono contenido en los productos forestales hace un pequeño y manejable aporte al balance mundial del carbono. A nivel mundial, el efecto neto sobre la concentración atmosférica es insignificante, a no ser que el índice de descomposición en las reservas de productos geográficamente desplazados sea diferente del que se da en el ecosistema forestal del que se había eliminado. No obstante, un control de esas tasas mediante una ordenación adecuada puede dar lugar a cierto grado de mitigación de los aumentos del CO₂ atmosférico.

Los datos de los productos forestales tradicionalmente recopilados por la FAO también tienen importancia conexas con el clima. La labor sobre el cambio climático se superpone con la labor sobre el comercio y, también, con la comercialización de los productos forestales. Por ejemplo, la certificación de las compensaciones del carbono proveniente de la reforestación en el marco del Mecanismo para un desarrollo limpio (MDL) y la certificación forestal tienen algunos objetivos superpuestos; los créditos compensatorios de carbono y quizás, el carbono en los productos forestales con el tiempo se transformará en productos básicos originales en el comercio de los productos forestales (FAO 2009).

Gran parte de la madera que es cosechada de los bosques, cultivos y otros tipos de usos del suelo permanece en productos durante mucho tiempo (IPCC 2006). Sin embargo, en muchos casos, tal como en las metodologías forestales MDL es común considerar los

aprovechamientos forestales como una pérdida de carbono. Actualmente en varios estándares de mercados de carbono se exige incluir el reservorio de los productos forestales (VSC 2007), y existen diferentes aproximaciones para determinar el carbono en los productos forestales p.e. Brown *et ál.* (1997) y Ford (2003), incluso el IPCC (2006) en sus *guidelines*, tiene un capítulo completo referente a los productos forestales.

El carbono almacenado en la madera que es transformada en productos como muebles, puertas e infraestructura, permanece en la biosfera un período antes de ser liberado a la atmósfera. Por su parte, se puede afirmar que es extremadamente alto el volumen de C en que permanece fijado en productos de vida larga. Se ha estimado que el carbono fijado en los productos forestales (muebles, estructuras, marcos, molduras, etc.) en Alemania es de 335 millones de toneladas, cantidad que equivale aproximadamente a un tercio de la biomasa aérea actual de los bosques alemanes (Fruehwald *et ál.*, citado por Gutiérrez 2004). Sin embargo, no el 100% de la madera llega a su destino final debido a los procesos de transformación; esto es considerado madera residual de la transformación, la cual podrá ser estimada mediante una relación porcentual con base al volumen de pérdida. En este estudio se asumirá que esa madera es tratada como madera que queda al aire libre.

Por otra parte, el papel es considerado un producto forestal maderable, pues está entre el grupo de aquellos materiales obtenidos de los árboles, donde su componente principal es la madera o el xilema. La mayoría son productos intermedios, es decir, sirven como materia prima para elaborar otros productos (Rivas 2007).

El procesamiento de la madera a papel conlleva una serie de procesos químicos y mecánicos que generan desperdicios. El papel es el producto forestal de más alto grado de industrialización. En este trabajo se define una cantidad porcentual, que permite determinar los desperdicios o pérdidas con la finalidad de calcular el carbono emitido. Las pérdidas de madera en el proceso de elaboración de papel serán tratadas como madera dejada al aire libre y se manejarán de manera similar a los otros productos maderables. Se tomó como base la cantidad de madera extraída en los raleos y en los aprovechamientos finales y se calculó la cantidad de CO₂ que habrá en estos volúmenes de madera extraídos. Posteriormente por medio de relaciones porcentuales, se descontaron los productos forestales y el material destinado a quema.

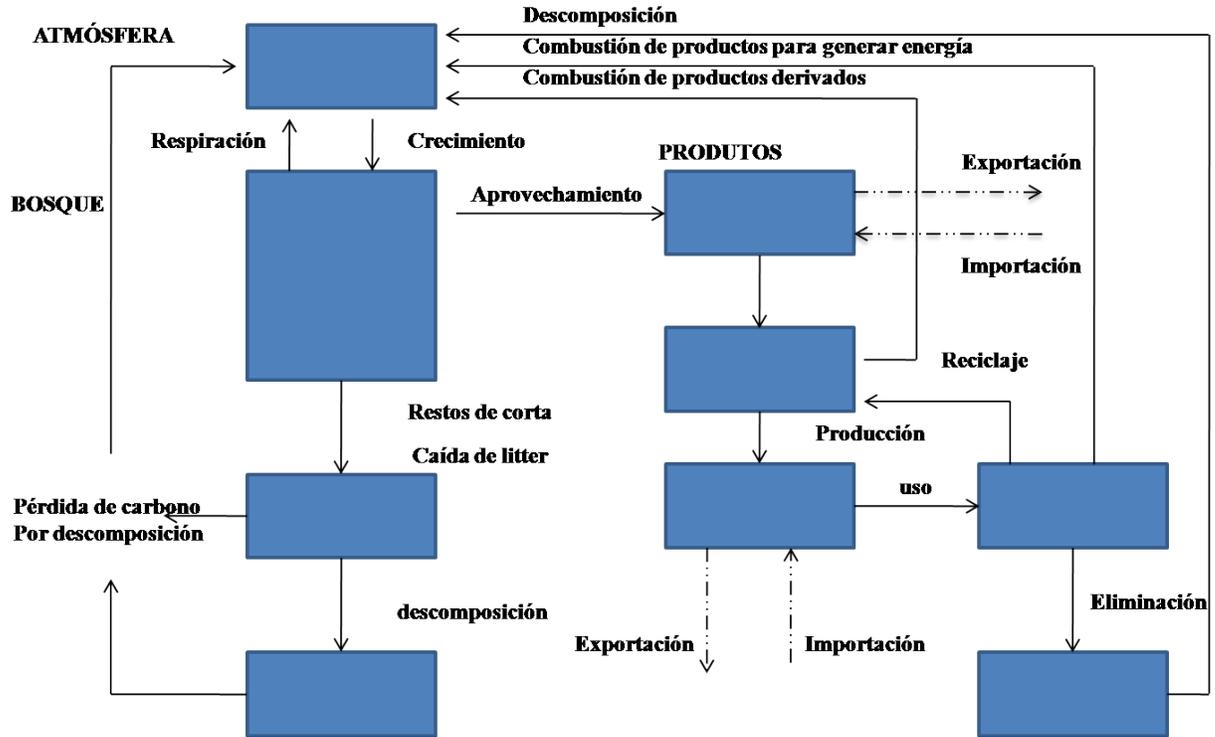
En esta sección se propuso una metodología para el seguimiento del carbono de los productos forestales, tomando como base conceptos del IPCC y de metodologías para proyectos de bioenergía del MDL. En este estudio se permitió variar la cantidad de productos maderables y papel por medio de un cambio en la relación porcentual del volumen extraído del bosque al volumen final de los productos. Posteriormente a cada una de estas categorías se les aplicó una curva de decaimiento de primer orden y el carbono liberado de los productos forestales se trató de acuerdo a su destino final, ya que puede ser reciclado, quemado, dejado al aire libre, etc.

3.2.4.1. Ciclos de los productos forestales (papel y madera)

Durante la descomposición de la madera, los hongos y bacterias digieren el carbono y absorben el nitrógeno. De esta manera, los animales que se alimentan de tejido en descomposición se nutren del nitrógeno contenido en la madera; otras bacterias fijadoras de nitrógeno pueden adicionar este elemento. Los suelos localizados bajo la madera en descomposición también se enriquecen y los niveles de calcio se pueden quintuplicar debido a la descomposición (Dajoz 2000). La madera residual que se descompone, es considerada una reserva de carbono y un sitio para la fijación de nitrógeno y acumulación de materia orgánica, de este modo actúa como un liberador de fertilizante (Delgado y Pedraza 2002).

Con base en la cantidad de madera extraída en los raleos y en los aprovechamientos finales, se calcula la cantidad de CO₂ que habría en estos volúmenes de madera extraídos. Este cálculo se realiza con base en los parámetros establecidos para la plantación como densidad de la madera y fracción de carbono.

Vida Media de los productos Maderables: la vida útil de los productos forestales es muy variable y obedece a factores como el tipo de madera, tipo de producto y variables ambientales entre otros. De esta manera, el carbono almacenado por ellos permanecerá un tiempo definido en la biosfera. A medida que el tiempo avanza, este carbono se irá liberando gradualmente a la atmósfera (Figura 4).



Fuente: Karjalainen y Kellomäki (1996)

Figura 4. Descomposición del material forestal

Existen varias aproximaciones para la cuantificación del aporte de los productos forestales; sin embargo, en este estudio se utilizó la curva de decaimiento de primer orden con base en la vida media de los productos de IPCC (2006) que se muestra en la ecuación 12.

$$K = \frac{\ln 2}{\text{Vida media}} \quad (12)$$

donde:

K = constante de desintegración

$\ln 2$ = logaritmo neperiano de 2 (0,693)

Con esta ecuación y el valor de la vida media para los productos forestales de 30 años para la madera y de 2 años para el papel (IPCC 2006), se pueden calcular anualmente los cambios en las existencias de carbono almacenado en los productos forestales. Luego por diferencia se calcula el carbono emitido a la atmósfera. A pesar de que la curva asume que se libera el carbono, ya que esta parte de un supuesto que la vida útil del producto forestal es destruido, esto no es cierto, porque el producto puede ser reciclado y el carbono seguirá siendo

almacenado por otro período. Otro destino puede ser que se queme o sea depositado en un relleno sanitario. En este estudio se proponen cuatro destinos de los productos maderables: reciclaje, relleno sanitario, quema y descomposición al aire libre y será definido como una relación porcentual con base en el carbono liberado de los productos forestales.

1. Destino de los productos a reciclaje: a lo largo del tiempo los productos maderables van siendo reemplazados por otros, así los productos viejos pasan a ser reciclados, bien en parte o bien en su totalidad, por lo que el carbono almacenado será liberado gradualmente por otro período. Este ciclo puede repetirse indefinidamente. Sin embargo, para este estudio se consideró un solo ciclo de reciclaje y el carbono liberado en este ciclo posteriormente se asumió como si se fuera a un relleno sanitario.

2. Disposición de los productos a rellenos sanitarios: la cantidad de productos maderables que llegan a un relleno sanitario se calcula con una fracción de los productos en uso y la cantidad de productos que provienen de cumplir un único ciclo de reciclaje. La descomposición de estos productos en rellenos sanitarios genera CH₄. Para el cálculo de estas emisiones se utilizó la herramienta metodológica de UNFCC para el tratamiento de residuos sólidos en proyectos de bioenergía. La ecuación (13) calcula las emisiones de CH₄ expresadas en t de CO₂ equivalentes.

$$BECH_4, SWDS, y = \varphi * (1 - f) * GWP(CH_4) * (1 - OX) * \frac{16}{12} * F * DOCF * MCF * \sum w_{j,x} * DOCJ * E - K(y - x) * (1 - ek) \quad (13)$$

donde:

$BECH_4, SWDS, y$ = emisiones de metano expresadas en CO₂e

φ = factor de corrección del modelo para incertidumbres (Valor defecto UNFCC 0,9).

f = fracción del CH₄ capturado en el relleno y quemado o usado en otra manera. (Valor defecto UNFCC 0).

$GWP CH_4$ = potencial de calentamiento global del CH₄.

OX = factor de oxidación. (Valor defecto UNFCC = 0).

F = fracción de gas CH₄ en el relleno (fracción de volumen) (Valor defecto UNFCC = 0,5).

$DOCF$ = fracción del carbono orgánico degradable que se puede descomponer.

(Valor defecto UNFCC = 0;5)

MCF = factor de corrección de Metano. (Valor defecto UNFCC = 0,5)

W = cantidad de carbono t-CO₂e

DOC_j = fracción del carbono orgánico degradable (Valor defecto UNFCC para papel 0,44)
(Valor defecto UNFCC para madera = 0,5)

k_j = tasa de decaimiento de la perdida. (Valor por defecto para papel UNFCCC = 0,043)
(Valor por defecto para madera UNFCCC = 0,023)

En este cálculo se incluirán las toneladas de CO₂ emitidas de los productos forestales reciclados provenientes del primer ciclo de uso con base en la curva de decaimiento de primer orden de IPCC.

3. **Disposición de los productos en quemas de los productos forestales:** como ya se mencionó, la quema de biomasa es una fuente de emisión, tanto de CO₂ como de gases No-CO₂ (CH₄ y N₂O). Se estimaron los gases no CO₂, pero el CO₂ no se contabilizó, ya que éste es descontado como cambio de existencia cuando se calculan los raleos o las cosechas. Para estimar las emisiones de CH₄ y de N₂O se utilizaron las ecuaciones 10 y 11 respectivamente y que ya fueron descritas en el numeral 3.2.3.
4. **Disposición de los productos descompuestos al aire libre:** un producto forestal al aire libre también genera emisiones de CH₄ por su descomposición (FAO 2009). Sin embargo, no existe una fórmula o procedimiento único que permita establecer estas emisiones, y tampoco existen procedimientos definidos o exclusivos para este cálculo. Es por esta razón que en este estudio se toma como base la herramienta metodológica de la UNFCCC para el cálculo de las emisiones de metano. Las emisiones serán calculadas con la ecuación 10, utilizada en el relleno, cambiando los parámetros de la ecuación por los valores de productos descompuestos al aire libre.

3.2.4.2. Dendroenergía

Una forma de bioenergía es la dendroenergía, la cual es obtenida a partir de los dendrocombustibles, que son a su vez originados de forma directa o indirecta a partir de la biomasa leñosa (FAO 2001). Un sistema dendroenergético es entendido según la FAO (2004) como el sistema en que todas las unidades y operaciones involucradas en el proceso de producción, preparación, transporte, comercio y conversión de dendrocombustibles a energía

útil están integradas. Los sistemas energéticos basados en biomasa leñosa y sus derivados, se diferencian de otros sistemas debido al recurso primario adoptado. Es, decir la capacidad natural que posee la fitomasa de almacenar energía solar lo que lo diferencia de la bioenergía y, así mismo, la dendroenergía, de otras formas de energía renovables considerada esta última como la más compleja (FAO 2004). Koh y Hoy (2003) agruparon las estrategias forestales para producción de energía en tres: plantaciones forestales de larga rotación, plantaciones forestales de corta rotación y sistemas agroforestales. Las plantaciones forestales de larga rotación tienen el potencial de producir energía a partir de la biomasa, especialmente con los subproductos de la producción de madera, residuos obtenidos en el procesamiento de la madera y también de otras actividades de manejo y mantenimiento de la plantación como biomasa de copas, ramas y trozas de diámetro menor. En este estudio se consideran dos tipos de energía: la primera será la proporción de la madera que se dedique a este uso, proveniente directamente del bosque, es decir de la madera que no se destina a papel y a productos maderables. Por otro lado estará la dendroenergía proveniente de los productos forestales (papel y madera) que terminan el ciclo de decaimiento y puede terminar como materia prima para quema.

3.3. Fugas

Las fugas son el incremento en emisiones de GEI por las fuentes que ocurre fuera del límite del proyecto y que es medible y atribuible al proyecto” (UNFCCC 2005). Es el aumento de las emisiones de GEI por las fuentes que se produce fuera del ámbito del proyecto de forestación o reforestación del MDL y que puede medirse y atribuirse a la actividad del proyecto de forestación o reforestación (Salinas y Hernández 2008). Loguercio (2002) define las fugas como los efectos sobre las emisiones de GEI que el proyecto podría tener a lo largo de su desarrollo fuera de los límites del proyecto. La baja competencia por usos alternativos del suelo y el bajo nivel de carbono de la línea base, implican un menor riesgo de ocurrencia de fugas considerables.

3.3.1. Fugas por desplazamiento de actividades

Las fugas por desplazamiento de actividades se presentan con respecto a las actividades en la LB p.e., la ganadería es desplazada por la implementación del proyecto forestal, de manera que la actividad se desplazará hacia otra zona, incluso con características muy diferentes, como por ejemplo un bosque. Así, para la implementación de la actividad ganadera, podría ocurrir un cambio de uso de suelo, generando pérdidas en las existencias de carbono en el ecosistema de destino.

El cálculo de las fugas se definirá con base en relaciones porcentuales hacia otros usos de la tierra, en cada uno de ellos se calculará la biomasa existente. La fuga será calculada como la diferencia de la biomasa total (arriba del suelo y debajo del suelo) de la nueva área y la biomasa total de donde fue desplazada la actividad. En caso de que las fugas se presenten, se deberá definir qué porcentaje de ellas se desplaza a otros diferentes usos de la tierra y caracterizarlos de manera similar a como se caracterizaron en la LB. En el caso en que no se conozcan los valores, se puede recurrir a los valores por defecto del IPCC (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores para cada variable definidos por el IPCC

| Tipo de desplazamiento | Valores por variable | | |
|--|--|--|----------------------------------|
| | BAS | Relación parte aérea – parte radical | Fracción de carbono |
| A áreas desconocidas (por principio precautorio, se asume que se desplaza a un bosque) | 50% del valor promedio de la Tabla 4.7 del IPCC 2006 | Promedio de la Tabla 3A 1.8. del IPCC 2004 | Definido por IPCC 2003 |
| A áreas forestales | Tabla 4.7 del IPCC 2006 | Tabla 3A 1.8 del IPCC 2004 | Tabla 4.3 del IPCC 2006 |
| A pastizales | Tabla 6.4 del IPCC 2006 | Tabla 6.1 del IPCC 2004 | 0,5 (valor por defecto del IPCC) |
| A áreas agrícolas | Tabla 4.7 del IPCC 2006 | Tabla 6.a del IPCC 2006 | |

3.3.2. Fugas por uso de combustibles fósiles

El consumo de combustibles fuera del escenario de proyecto como consecuencia del mismo es, hasta la fecha, la única fuga considerada en todas las metodologías aprobadas. Por lo general, se considera el consumo de combustible debido a los desplazamientos desde y

hacia el proyecto. Por ejemplo, desde los lugares de acopio de materiales (abonos, planta, etc.) hacia los puntos de venta de productos (madera, leña, etc.) o hacia las poblaciones donde habita el personal. Es importante recordar que siempre se deben considerar desplazamientos de ida y vuelta. Esta fuga supone la emisión directa de CO₂ (Salinas y Hernández 2008) y se calcula directamente a través de los combustibles utilizados con base en los factores de emisión de IPCC 2006. Para el presente estudio se definieron 4 subcategorías de actividades que demandan combustible fósil por fuera de los límites del proyecto.

Plantación: el uso de combustibles fósiles en la plantación sería estimado directamente a partir del consumo total de combustible (diesel y/o gasolina) durante el año de plantación (primer año).

Actividades de cosecha: son una fuga que solamente se presentará cuando se tengan programados los raleos o las cosechas finales en el escenario de proyecto. Será calculada con base en los litros de combustible utilizados por cada m³ cosechado.

Transporte de personal: a pesar de que es un valor que varía de acuerdo a la edad del proyecto, será calculado a partir del valor total de los combustibles utilizados para este fin. Sin embargo, para efecto de los cálculos será constante cada año y se estimará como el valor resultante del valor total dividido por la duración del proyecto.

Otros: cualquier otra actividad que no se encuentre dentro de las anteriores y será calculada igualmente como en el transporte de personal.

3.4. Balance Neto de Emisiones

El balance neto de remociones reales se realizará calculando las remociones ocurridas en los reservorios de carbono y restando las emisiones por parte de las fuentes emisoras, las fugas y las capturas que se hubieran generado en la línea base (Salinas y Hernández 2008). El balance neto será obtenido así:

Balance neto =remociones NETAS del proyecto- remociones NETAS de la LB – Fugas (14)

donde:

Remociones Netas del proyecto (numeral 3.1)

Remociones Netas de la LB (numeral 3.2)

Fugas (numeral 3.3)

3.5. Formulación de las alternativas

Considerando que las alternativas de inversión en proyectos forestales de largo plazo presentan rentabilidades cada vez más moderadas y que las oportunidades para los propietarios de tierras marginales son escasas, los proyectos combinados de madera y carbono pueden llegar a constituir una opción, si se implementan adecuados mecanismos de financiamiento (Bastienne 2001).

Los ecosistemas forestales son responsables de alrededor del 20% de las emisiones de CO₂ producidas por el hombre, principalmente debido a procesos de deforestación y degradación. Las consecuencias de esta deforestación y degradación del bosque son, entre otras: empobrecimiento de la población rural, pérdida de biodiversidad, desertificación y afectación de la calidad del agua. Es por esto, que cualquier acción para detenerla tendrá un efecto positivo en las consecuencias (Bastienne 2001). Por esto, es importante tener en cuenta que los proyectos forestales contribuyen a disminuir las tasas de afectación causadas por la degradación de los bosques. Algunas de las repercusiones positivas de los proyectos forestales, las menciona un estudio hecho por Laarman y Contreras (2000) indicando que algunos proyectos forestales tienen efectos positivos porque, con ocasión de ellos, se formularon pautas para el mejor uso de la tierra, o normas para la protección de bosques y pastizales, y en algunos casos se demostraron nuevas técnicas, como la reforestación de laderas erosionadas, para limitar las pérdidas debidas a incendios, para mejorar normas en el pastoreo, así como para construir obras de fábrica en la corrección de torrentes. Fearnside (1989), afirma que los proyectos forestales representan beneficios sociales, no solo por el mejoramiento del ambiente, sino por concepto de entradas a razón de pago de jornales y mejoramiento de infraestructura que se desarrolla en el proyecto como arreglo y adecuación de vías y caminos forestales, más aún este autor afirma que este es uno de los incentivos para que se quiera invertir en proyectos forestales, especialmente cuando los recursos provienen de donaciones internacionales.

A pesar de todos estos beneficios, los proyectos forestales para la compensación de GEI, presentan grandes limitaciones, debidas principalmente a dos factores: el primero de ellos es la no permanencia del carbono, que consiste en el riesgo de re-emisión del carbono

removido ya sea por incidencias naturales (plagas, incendios, enfermedades) o incidencias antrópicas (cosechas, cambio de uso de la tierra).

La implementación de un proyecto forestal con fines de compensación de emisiones de GEI deberá asegurar la permanencia de las remociones, ya que al finalizar el ciclo de proyecto (turno forestal) el carbono almacenado en los árboles que en algún momento fue incluido en un balance para la compensación saldrá nuevamente a la atmósfera; actualmente existen diferentes enfoques para asegurar la permanencia o compensar la no permanencia como el MDL, el VCS, Servidumbres ecológicas, entre otras.

Se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica para integrar los conceptos de todos estos enfoques, y las alternativas que permiten compensar las emisiones de GEI en un período previamente establecido han sido diseñadas con base en estos enfoques. Cada una de estas alternativas presentará ventajas y desventajas respecto a las demás (entre ellas) y su comportamiento económico será diferente. De esta manera, la determinación de la alternativa más adecuada para compensar las emisiones de GEI en un período establecido será muy diferente para cada uno de los casos en que se desee implementar los proyectos forestales, y obedecerá a criterios económicos, a la disponibilidad de capital y de infraestructura, principalmente. El diseño de un proyecto forestal para compensar emisiones de GEI con proyectos deberá ser realizado acorde a las características de la zona donde será implementado y enfocado en reducir los costos, maximizar beneficios y remover la mayor cantidad de CO₂ de la atmósfera.

Todas las alternativas requieren uso del recurso tierra, algunas en mayor escala que otras dependiendo de las características del proyecto y de la cantidad de toneladas a compensar. Cuando se decide utilizar un área en uso forestal para compensación de las emisiones en un período, esta área se verá inhabilitada para otro uso diferente, ya sea a perpetuidad en algunos casos o durante el tiempo del turno forestal. De esta manera, cada período que se quiera compensar por medio de proyectos forestales requerirá de nuevas aéreas. Cuando se piense en compensar las emisiones con este tipo de proyectos, es erróneo suponer que se puede hacer por siempre, ya que la tierra tiene un límite y no todo el mundo puede destinar el uso de la tierra a proyectos de compensación de emisiones, así que, a pesar de que las alternativas pueden ser adecuadas, se convierten en una herramienta temporal para

compensar emisiones, mientras se generan cambios culturales y tecnológicos que permitan reducir las emisiones de GEI de forma permanente. La implementación y selección de la alternativa más adecuada, dependerá en gran medida de las condiciones intrínsecas de cada proyecto de compensación de emisiones y estará sujeta a restricciones de capital económico (liquidez, flujo de caja, capacidad de inversión), aspectos que se pueden resolver de alguna manera. Sin embargo, existe una restricción mucho más importante sobre el capital natural que consiste en la disponibilidad de áreas (Figura 5).

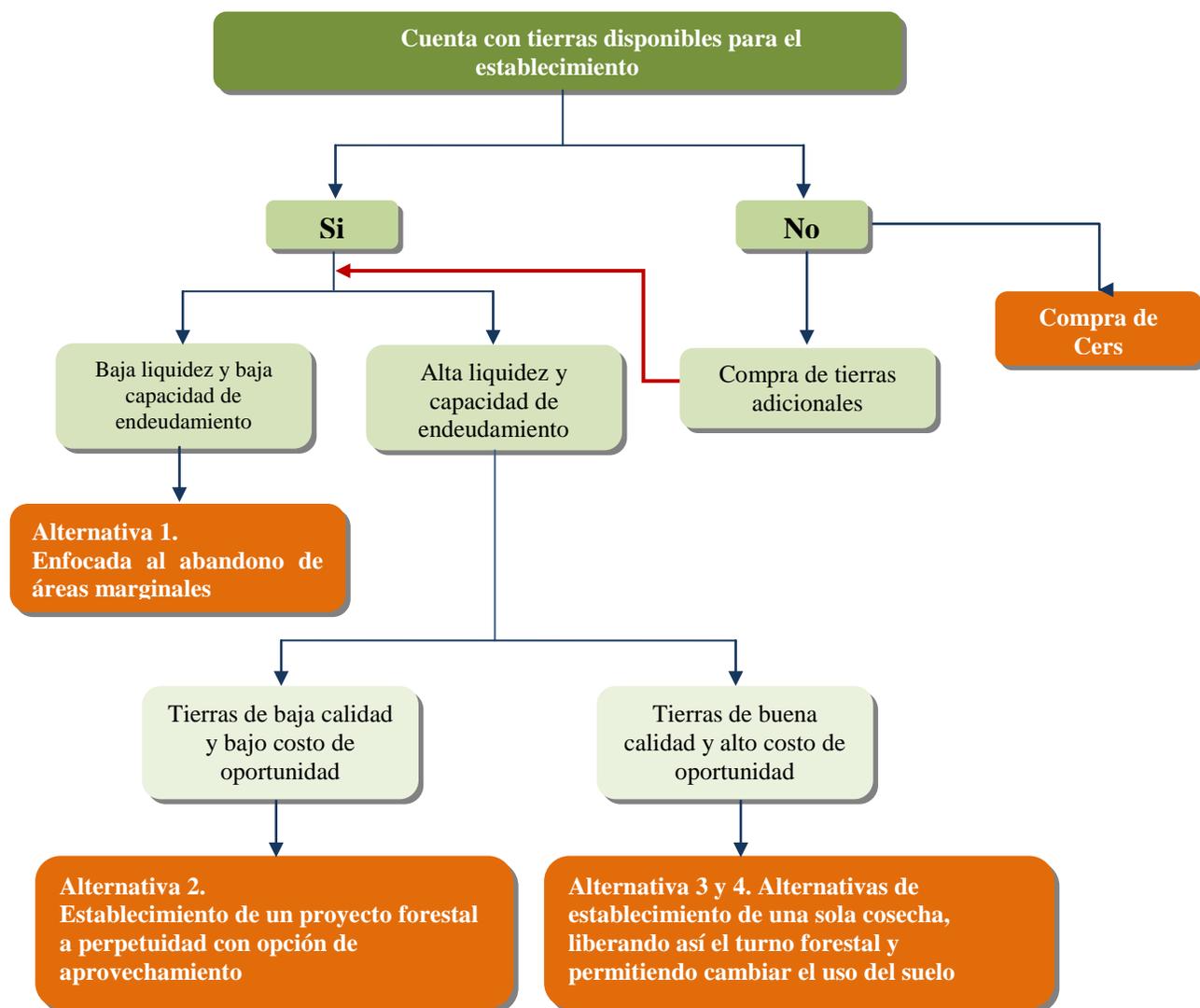


Figura 5. Árbol de decisión para la selección de alternativas

El área necesaria del proyecto será calculada como la relación entre las emisiones en el período a compensar y el balance neto de las estimaciones *ex-ante* determinado con base en el numeral 3.4.

$$\text{área necesaria} = \frac{\text{Emisiones en el periodo dado}}{\text{Balance neto de emisiones}} * \text{factor de riesgo} \quad (15)$$

A pesar de que los proyectos forestales son una alternativa temporal, su implementación genera innumerables beneficios ambientales y sociales y, como ya se mencionó anteriormente, al observar su implementación para efectos de compensación es la única opción que realmente representa un esfuerzo por “limpiar” los GEI, ya que estos remueven el carbono emitido a la atmósfera, y lo almacenan en la biósfera por un determinado período a diferencia de la opción de compra de créditos de carbono. La compra de créditos es una opción atractiva para la compensación de GEI, ya que inmediatamente puede ser certificada por un agente externo. Sin embargo, es una opción que a largo plazo se convierte en un gasto poco sostenible, ya que año tras año se deberá comprar la cantidad de créditos necesarios para compensar las emisiones de cada año. Mientras que la implementación de estas alternativas traerá consigo el mismo beneficio de compensación, además de generar recursos económicos y los beneficios ya mencionados.

3.5.1. Alternativa 1: Establecimiento de un proyecto forestal a perpetuidad sin aprovechamientos forestales

Esta opción consiste en establecer áreas nuevas con proyectos de reforestación sin aprovechamientos forestales que capturen el equivalente a las emisiones del período a compensar. Este tipo de proyectos podrían ser enfocados en fortalecer y mejorar la productividad de algunos bosques secundarios, o incluso charrales abandonados, provenientes de cultivos agrícolas o pastizales, esto se puede lograr mediante prácticas de manejo silvicultural, que además de favorecer la producción de madera y de otros productos forestales, asegura la protección de fuentes de agua y la conservación de la biodiversidad. Entre las actividades silviculturales de manejo se podría considerar el manejo de la regeneración natural, ya que además de ahorrar gastos por concepto de instalación y mantenimiento de viveros, garantiza una composición florística del bosque más acorde a las condiciones del sitio y a los objetivos del manejo (Beek y Sáenz 1992). Entre las prácticas está:

1. Manejo de rebrotes
2. Raleo selectivo

3. Enriquecimiento con especies de interés

4. Mejoramiento de suelos

La alternativa 1, al no permitir aprovechamientos forestales, en todos los casos representará un costo y sus beneficios económicos serán casi nulos. Podrían existir algunos beneficios ambientales que pudieran ser contemplados, como por ejemplo, paisajismo, regulaciones hídricas, pero para efectos de este estudio no serán considerados. Sin embargo, esta alternativa podría ser una opción de uso para aquellas áreas que se encuentran abandonadas y teniendo en cuenta que la Ley Forestal 7575 de 1995 prohíbe el cambio de uso del suelo en propiedad pública o privada, esta última, salvo que sea autorizada por la Administración Forestal del Estado, previa evaluación. Estas áreas serían potenciales de recibir beneficios por el Certificado para la Conservación del Bosque.

En esta alternativa la permanencia del carbono sería garantizada por medio de una figura legal que crearía un registro del área destinada a compensar las emisiones de carbono como una servidumbre ecológica, donde el uso del suelo forestal debe ser mantenido a perpetuidad. En este caso no se permitirá el aprovechamiento de los recursos forestales, es decir, se establecerá una plantación que crecerá hasta un momento dado y de ahí mantendrá una biomasa promedio alrededor de su máxima capacidad. De esta manera la tierra destinada a este uso perpetuo, no recibirá ingresos por venta de madera o por venta de carbono y no tendrá la posibilidad de cambiar el uso del suelo nunca más.

El área necesaria para la compensación de emisiones de GEI por medio de un proyecto forestal de este tipo se calcula como la relación entre las emisiones totales del período a compensar y el valor de las remociones antropogénicas netas alcanzado en el último año del período de evaluación propuesto. A pesar de que es difícil establecer qué pasará con ese bosque, se debe tener en cuenta que existe un riesgo de re-emisión de este carbono a la atmósfera, ya que una plantación de este tipo no está exenta de daños por ataque de plagas, incendios, incluso de actividades humanas que comprometan el carbono removido, por esta razón, se debe tener en cuenta este riesgo y actuando con principios precautorios, se debe aumentar el área del proyecto proporcionalmente al factor de riesgo de re-emisión, tomando como base los análisis de riesgo propuestos en el VCS.

A pesar de que es una alternativa que limita el uso de la tierra por siempre y que se convierte en un gasto a perpetuidad, resulta ser interesante cuando se compara la inversión en este proyecto (establecimiento y manejo) con los costos de la compra de los créditos permanentes necesarios para la compensación de emisiones de GEI. Sin embargo, es una alternativa que no puede ser utilizada por siempre, ya que para cada período en que se utilice para compensar, el área nunca podrá volver a ser utilizada para este propósito, de esta manera, poco a poco las áreas disponibles para establecer los proyectos forestales se agotan finalmente (Figura 6).

La selección de la especie del proyecto será clave para la maximización del crecimiento y almacenamiento de carbono. Para los proyectos forestales de la alternativa 1, se deberá utilizar especies de rápido crecimiento, con una alta producción de biomasa y que soporte altas densidades de plantación durante todo su crecimiento y preferiblemente con alta densidad de madera. En el caso de realizar enriquecimientos de bosques secundarios, se debe pensar en una especie o mezcla de especies que toleren las condiciones iniciales. Para el presente estudio la alternativa 1 se basará en el abandono de un potrero.

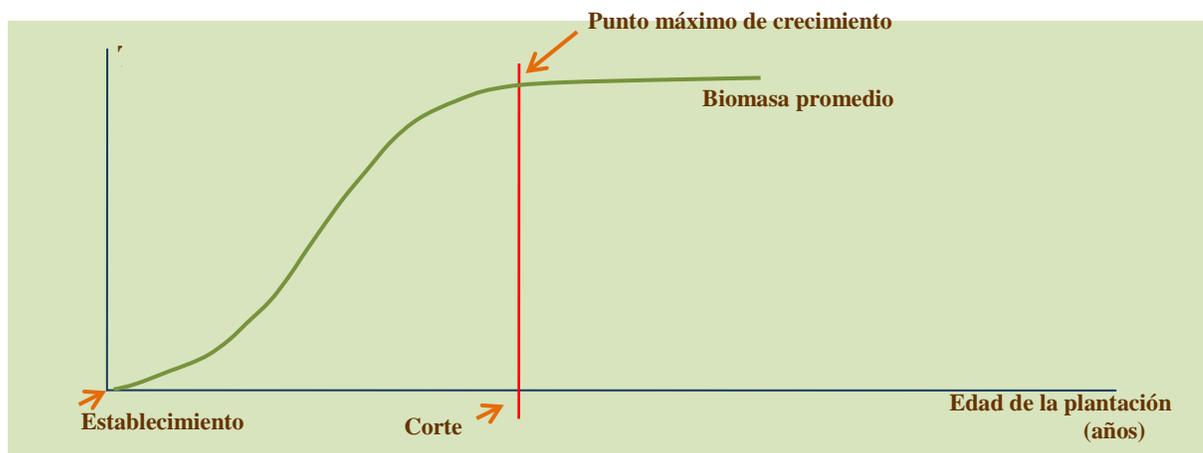


Figura 6. Carbono almacenado en un proyecto sin aprovechamiento forestal

Como ya fue mencionado, es importante tener en cuenta, que en este caso no podrá considerarse ningún tipo de aprovechamiento. Si dentro de las actividades previstas en el

manejo silvicultural, es necesario hacer raleos o entresacas deberá ser tenido en cuenta en la modelación y se deberá descontar la pérdida de este carbono.

3.5.2. Alternativa 2: Establecimiento de un proyecto forestal a perpetuidad con aprovechamientos forestales

De manera similar a la alternativa 1, esta alternativa presentará la limitación de permanencia del uso forestal. Sin embargo, esta alternativa permite el aprovechamiento forestal (raleos y/o cosechas al final del turno). De esta manera, las áreas en donde se establezcan este tipo de proyectos permanecerán bajo uso de manejo forestal sostenible, con ciclos forestales (turnos) repetidos a perpetuidad. Así, el carbono de estas áreas tendrá valores bajos para algunos años y luego valores altos en los años finales, por lo que el valor de las remociones netas para el cálculo del área del proyecto será el valor promedio del carbono removido durante el turno del proyecto (Figura 7).

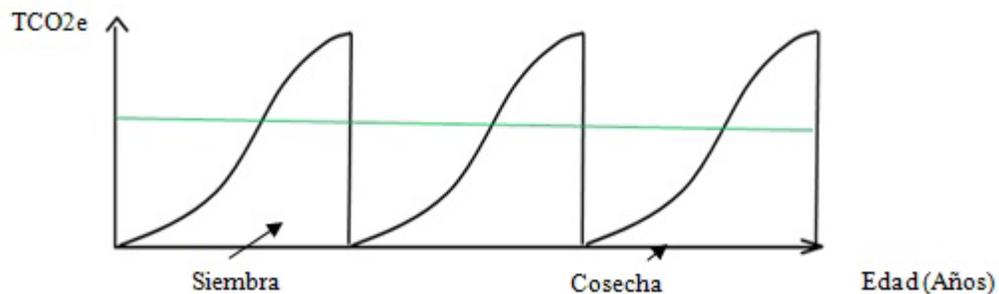


Figura 7. Carbono almacenado en plantaciones sometidas a manejo silvicultural

Esta opción puede representar una inversión mucho mayor que la compra de créditos permanentes de carbono para la compensación de emisiones de GEI, Sin embargo, a diferencia de ser solo un gasto durante los años que se presenten raleos y tala rasa, se generaran ingresos por productos forestales, sin embargo, se requerirá una inversión más alta debido a los costos de cosecha, transporte, etc. Una posibilidad para evitar los egresos debidos a raleos y talas rasas sería la venta de madera en pie, aunque se perdería el potencial de utilizar los productos forestales, ya que es difícil garantizar el destino de los productos en los agentes externos.

A pesar de que se puede necesitar una mayor cantidad de capital para el establecimiento de este tipo de proyectos, esta alternativa permite el aprovechamiento forestal que generara un retorno económico por la venta de la madera. Es una alternativa interesante ya

que por mínimo que sea el beneficio obtenido por las ventas de la madera, será mucho mejor tener este pequeño saldo positivo, que un saldo negativo equivalente a la compra de los créditos de carbono, para compensar el período evaluado. Por lo tanto, será una alternativa válida de compensación de emisiones si se cuenta con el capital suficiente para realizar la inversión.

Las especies adecuadas para esta alternativa, deben ser especies en las cuales se pueda obtener un beneficio económico por la venta de la madera. Dado que serán proyectos que permanecerán mucho tiempo en pie, se deben buscar especies que poseen velocidades rápidas de crecimiento y gran capacidad de almacenamiento de carbono. Una de estas especies podría ser *Araucaria hunsteinii*, conocida localmente como Klinki.

3.5.3. Alternativa 3: Establecimiento de proyecto forestal por una rotación y compra de créditos en el último año

Consiste en el establecimiento de proyectos forestales por un ciclo único (turno forestal), y a diferencia de las anteriores alternativas, ésta no limita el uso de la tierra, ya que sólo será establecida por un turno y después de éste, el área utilizada para la compensación quedará liberada y podrá ser destinada a cualquier uso diferente. Cuando se presenta la cosecha forestal y no se siembran nuevamente árboles, el carbono removido tomará diferentes rumbos. Sin embargo, a pesar del rumbo que tome, tarde o temprano retornará nuevamente a la atmósfera y la compensación de emisiones nuevamente tendrá un saldo negativo. De esta manera y para garantizar la permanencia del carbono y continuar haciendo efectiva la compensación, se considera la compra de créditos permanentes con los recursos provenientes de la venta de la madera. Estos créditos podrán ser comprados en cualquier momento del turno de rotación (siempre y cuando el flujo de caja lo permita), pero la compra más grande se realizara al finalizar el turno, ya que es en ese momento que se presenta el mayor beneficio.

Es una alternativa que a simple vista parece el establecimiento normal de un proyecto forestal; sin embargo, esta alternativa lo que hace es comprar tiempo y generar recursos para hacer sostenible económicamente la actividad de compensación de emisiones, convirtiéndose en un certificado temporal de compensación de emisiones mientras se generan los recursos necesarios por la misma actividad para comprar el certificado permanente. Dependiendo del

beneficio obtenido por la venta de la madera, se convertirá en una alternativa interesante, ya que la actividad forestal es normalmente rentable “*per se*”, y de esta manera se estaría cumpliendo con el objetivo de la compensación, generando un recurso económico que aparte de permitir la compra de los créditos permanentes necesarios para garantizar la permanencia perpetua, podría incluso generar recursos económicos para el cambio a tecnología limpia que permita la reducción de emisiones de GEI. De esta manera, cada año se generaría menos emisiones de GEI, y se reduciría la demanda de áreas para este propósito.

Ya que inicialmente esta alternativa solo planea un turno forestal, el beneficio proveniente por la venta de la madera debe ser muy alto, y así poder alcanzar a generar la cantidad necesaria para comprar los créditos necesarios. Por esta razón, las especies utilizadas para la implementación de esta alternativa deberán ser especies cuya madera tenga un alto valor en el mercado. Si se piensa en especies nativas, se recomienda el uso de *Swietenia macrophylla* (caoba), *Cedrela odorata* (cedro) y *Bombacopsis quinata* (pochote) y para especies introducidas se destaca como especie promisorias para este tipo de proyectos la Teca (*Tectona grandis*). Al evaluar esta alternativa es importante tener en cuenta que se debe tener en cuenta el VET de la actividad que seguiría después de la cosecha de los árboles.

3.5.4. Alternativa 4: Establecimiento de proyecto forestal de una rotación con buffer para el riesgo de remisión

La alternativa 4 es una derivación directa del “*buffer*” (reserva colectiva) del VCS, que consiste en dejar un porcentaje de los créditos por carbono removido en un banco colectivo administrado por el VCS, que no puede ser transado en el mercado mientras no sea liberado por el VCS. La sumatoria de los créditos colectivos de todos los proyectos bajo el VCS sirve en algún momento para compensar los riesgos de liberación de GEI por fuera de los planes validados de manejo en los proyectos registrados (por ejemplo si algunos de los propietarios de un proyecto incumplen sus compromisos, o si ocurren eventos naturales como incendios, plagas, huracanes o similares que afecten las existencias de carbono).

El porcentaje de créditos colectivos se determina con base en un análisis de riesgo que propone el VCS 2007. Sin embargo, debido al objetivo de este estudio (que no es la venta de créditos sino la compensación de emisiones), el banco colectivo no será en créditos sino en áreas. Las alternativas 3 y 4 son muy similares, ya que ambas consisten en el establecimiento

de un turno forestal y posteriormente la liberación del uso forestal. Sin embargo, la diferencia radica en que la alternativa 4 intenta solucionar el problema de la “no permanencia”, con un excedente en el área necesaria para la compensación. Es decir, las remociones netas de la alternativa 3 y 4 son exactamente las mismas, sin embargo, el área necesaria para compensar en la alternativa 4 será mayor. La diferencia de áreas será calculada con base en una fracción porcentual y será estimada según los criterios de riesgo del VCS.

Esta alternativa puede ser controversial, ya se basa en remociones temporales (no limita el uso de la tierra), pero que compensa permanentemente las emisiones. Es por esta que se ha creado este concepto, con base en el VCS, pues de alguna manera se está utilizando un área mucho mayor a la que se debe compensar, haciendo que las remociones netas sean mucho mayores. Como la actividad forestal con buenos criterios de manejo es usualmente rentable *per se*, gran porcentaje de las tierras forestales se mantendrán en este uso (con turnos repetidos). Si en el porcentaje restante llegara a haber cambios de uso del suelo (antrópico o biológico), se puede asumir que el carbono reemitido a la atmósfera, estaría compensado por el excedente en área que en alguna proporción mantendrá su uso forestal. El porcentaje de excedente del área de esta alternativa fue tomado con base en la mayor escala de riesgo propuesta por el VCS (50%).

Las especies recomendadas para utilizar en la implementación de esta alternativa deberán ser especies cuya madera tenga un alto valor en el mercado. De manera similar que la alternativa 3, inicialmente contempla una sola rotación, así que se debe intentar maximizar el beneficio Neto de la venta de los productos maderables, por eso la recomendación de utilizar especies con alto valor comercial. Las especies recomendadas para la alternativa 4 pueden ser las mismas que en la alternativa 3. En todo caso, es necesario tener en cuenta al momento de implementar las alternativas las condiciones climáticas y las características del sitio donde serán implementadas (temperatura, suelos, precipitación, entre otras).

3.6. Evaluación Económica

La evaluación económica tiene por objeto aclarar el valor de cada uso del bosque, y no necesariamente asignar un valor total a la naturaleza (Michael 1995). La mayor parte de las decisiones sobre inversiones forestales comerciales se basa en una comparación de las

estimaciones de costos y rendimientos previstos. También las decisiones sobre un proyecto público suelen considerar de algún modo los costos directos o de mercado y los beneficios directos. De hecho, es difícil identificar decisiones sobre proyectos forestales que no consideren los valores de mercado, por lo menos en cuanto al costo de la inversión. Del mismo modo, es también difícil encontrar decisiones sobre proyectos forestales que hayan considerado estimaciones cuantitativas de los servicios ecológicos no mercantiles relacionados con los bosques: protección de la biodiversidad, protección de la cuenca hidrográfica, captura del carbono, etc. Para hacer dicho análisis y poder determinar el beneficio económico, existen varios criterios de selección para el inversionista.

Por lo general se ha utilizado el Valor Actual Neto (VAN) como indicador de rentabilidad. El VAN es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual (es decir, actualizar mediante una tasa) todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto (Clutter *et ál.*1983). El VAN es muy conocido para calcular el valor de uso de un bien en términos monetarios, utilizando una tasa de descuento como el costo del capital. Matemáticamente se expresa como la serie periódica de un flujo de caja de un turno de rotación. Los criterios de selección para un proyecto forestal son:

1. Si el VAN>0 el proyecto puede aceptarse
2. Si el VAN<0 el proyecto no es rentable, por lo tanto debe rechazarse
3. Si el VAN=0 el proyecto no producirá ni pérdidas ni ganancias, por lo que se deberán elegir otros criterios de decisión.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_f}{(1+K)^t} - I_0 \quad (16)$$

donde:

V_F = Flujo de caja

I_o = Valor del desembolso inicial de la inversión

K = Tipo de interés

n = Número de períodos

Sin embargo, en el análisis de inversión de proyectos forestales, se presenta una característica que el VAN no tienen en cuenta, el costo de oportunidad de la tierra, que se presenta debido a los largos períodos de los proyectos.

El VET es el criterio más descriptivo y permite hacer diferenciación entre series de infinitas y una rotación seguida por la venta de la tierra, es decir; es el valor actual neto (VAN) de los beneficios futuros menos el VAN de los costos futuros, calculados justo antes de reanudar una nueva rotación (Klemperer 1996).

Este indicador económico es por definición más sencillo de analizar y puede ser más fácilmente interpretado ya que, como su nombre lo dice, tiene una relación con el valor de la tierra. Asumiendo que los dueños de la tierra son tomadores de precios, este es el valor que tiene la tierra bajo la actividad en evaluación (Corella 2009). El VET es apropiado para las situaciones en que se deba tener en cuenta el costo de la tierra, su fundamento se ajusta a la definición de activo y es aplicado especialmente a los proyectos que tienen el mismo horizonte de planificación, es decir que mantienen la actividad productiva a perpetuidad. El VET es calculado mediante la fórmula:

$$VET = \frac{I_H - C_a * (1+r)^{T-1}}{(1+r)^T - 1} \quad (17)$$

donde:

C_a = Costo de forestación

I_H = Ingreso por aprovechamiento

T = Edad en años

r = Tasa de descuento

La regla de decisión que se utiliza para determinar la rentabilidad es que el VET deberá ser mayor que el valor de la tierra. Con base en las alternativas forestales propuestas en el numeral 3.5., se hará la selección del criterio de evaluación económico. Para la aplicación de estos conceptos y la validez de los resultados se deben tener en cuenta cuatro premisas:

1. Todos los precios de la madera y de los insumos son conocidos y constantes durante el período de análisis.
2. Los rendimientos de la producción forestal son conocidos y libres de riesgos biológicos y ambientales.

3. La tierra es un bien de mercado que puede ser vendida, comprada o rentada en un mercado perfecto.
4. El mercado de capitales es perfecto, con tasas son conocidas y constantes. Existe una única tasa de interna de interés para prestar y arrendar dinero y no se contempla racionamiento de capital.

3.6.1. Determinación de turnos óptimos

A pesar de que en muchos casos la determinación de la edad de corta se realiza con base en criterios biológicos, el manejo forestal permite aplicar algunos conceptos económicos para la toma de esta decisión. El cálculo del turno de corta óptimo es uno de los puntos clave en la economía forestal clásica y su objetivo es la selección óptima de cuándo aprovechar un bosque (Navarro 2009). Desde hace mucho tiempo Faustmann (1849); Pressler (1858) y Ohlin (1921) desarrollaron independientemente este concepto, llegando a la misma conclusión: “el ciclo de corta es aquel año con que maximizamos el valor de la tierra forestal”. Este concepto fue el utilizado en este estudio para determinar los turnos óptimos.

3.6.2. Criterio de evaluación para las alternativas 1 y 2

A pesar de que estas alternativas difieren considerablemente en algunos aspectos, presentan como característica común el uso a perpetuidad de la tierra. Por esta razón, el flujo de caja será proyectado a infinitas rotaciones y posteriormente descontado para evaluar el VET, de los beneficios (positivos) o gastos (negativos).

3.6.3. Criterio de evaluación para las alternativas 3 y 4

Para la evaluación económica de las alternativas 3 y 4 se utilizará el VAN para los cultivos forestales y el VET de la actividad posterior a la actividad forestal, ya que estas a diferencia de las alternativas anteriores, solo se establecen por una rotación y luego liberan nuevamente la tierra

3.7. Análisis de sensibilidad

En este estudio se realizará un análisis *Ceteris paribus*, en donde, se cambiará una variable a la vez, dejando el resto constantes. Las variaciones que se tendrá en cuenta para el análisis de sensibilidad son: variación en las emisiones anuales, en el precio y en la tasa de descuento.

4. Estudio de caso

Como estudio de caso para el presente trabajo, se utilizó la información obtenida por Guerra (2007), en donde fueron identificadas y cuantificadas las fuentes de emisiones de GEI de CATIE, a través de procedimientos científicos aceptados internacionalmente y adaptados al quehacer de la institución (Cuadro 3). El valor promedio de las emisiones obtenidas para el período de estudio se asumirá constante con el fin de calcular el área necesaria, los costos, los beneficios y las ventajas y limitaciones de cada una de las alternativas acá propuestas.

Cuadro 3. Emisiones anuales del CATIE para los años 2003 a 2006. (Expresadas en t-CO₂e)

| Actividad / Año | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Fermentación entérica | 1052,94 | 1.002,80 | 714,50 | 739,57 |
| CH ₄ por fertilizantes | 9,66 | 9,20 | 6,56 | 6,79 |
| NO ₂ por fertilizantes | 86,25 | 82,14 | 58,53 | 60,58 |
| NO ₂ en caña | 72,38 | 72,38 | 87,62 | 56,47 |
| NO ₂ en café | 36,71 | 36,71 | 41,34 | 43,00 |
| NO ₂ en lechería | 24,23 | 25,85 | 27,47 | 29,08 |
| Viajes aéreos | 539,00 | 756,40 | 793,40 | 661,10 |
| Consumo eléctrico | 266,00 | 254,00 | 246,00 | 240,00 |
| Consumo directo de combustible fósil | 452,20 | 586,60 | 411,20 | 367,60 |
| Consumo de papel | 4,30 | 4,92 | 4,46 | 3,36 |
| Total | 2.543,67 | 2.831,00 | 2.391,08 | 2.207,55 |
| Promedio | 2.493,33 | | | |

Los escenarios serán ajustados de acuerdo con las características de los reservorios y fuentes de emisión de CATIE. A continuación se describen los diferentes componentes de los escenarios para cada una de las alternativas.

4.1. Escenario de Línea Base

El cálculo del cambio de las existencias en la línea base se realizó con la metodología descrita en el numeral 3.1, donde también se menciona que la biomasa no leñosa siempre será mantenida como constante. Todos los parámetros para el cálculo de los valores se tomaron de las tablas de IPCC (Cuadro 4). Para todos los escenarios se asumió que el proyecto se establece en áreas de pastizales de CATIE, donde predomina principalmente el uso ganadero y se asumió que no existe vegetación leñosa.

Cuadro 4. Parámetros para el cálculo de los valores

| Variable | Valor del parámetro | Fuente |
|---|---------------------|---|
| Biomasa Pico (tdm) | 2,66 | Valor promedio todos Tabla 6.4 IPCC 2006 |
| Relación parte aérea - parte radical (t.d.m tdm. ⁻¹) | 1,6 | Valor por defecto para pastizales Tabla 6.1 IPCC 2006 |
| Fracción de Carbono (tC tdm. ⁻¹) | 0,47 | Valor por defecto para todas las partes del árbol Tabla 4.3 IPCC 2006 |

4.2. Escenario de proyecto

4.2.1. Vegetación leñosa

El escenario de la alternativa 1 consiste en el abandono de un potrero utilizado en ganadería, el cual ira evolucionando hacia un bosque secundario. Se plante un manejo básico en el cual se hará un mantenimiento mínimo como cercas y guardafuegos. Se asume que la evolución de este potrero tenderá hacia un bosque secundario. Para la cuantificación de la biomasa se tomará como base un escenario de bosque secundario, desarrollado en el software CO2 FIX utilizado para la modelación abandono de potreros en Esparza, Costa Rica por Zamora (2006).

Para las demás alternativas, se evaluaron diferentes especies comunmente utilizadas en el Catie, concluyendo que *Vochysia ferruginea* podría ser la más adecuada. Entre las razones para esta elección están: nivel de adaptación de la especie, su tasa de crecimiento anual, tiempo de rotación corto, la demanda en el mercado de Costa Rica y las altas tasas de captura de carbono. Para la modelación de esta especie se tomaron datos reportados en el documento

Fondo Verde (2009), y para el cálculo del carbono se utilizaron todos los valores por defecto del IPCC, relacionados a la especie o a sus características.

4.2.2. Preparación del sitio

Se asumió que no había vegetación leñosa presente en la línea base y a pesar de que se consideran nulos los cambios de existencias de la vegetación no leñosa, debe ser tenida en cuenta la pérdida de esta vegetación al momento de establecer el proyecto. Se considerará una preparación de sitio básica, en donde solamente se eliminará la vegetación no leñosa de la línea base (4.1.), de manera tal que se generará una pérdida de carbono en el primer año del proyecto. Esta pérdida será equivalente al carbono estimado para el primer año de la línea base. Para la alternativa 1 no será considerada la pérdida de biomasa inicial, ya que para este estudio esta alternativa se enfoca hacia el enriquecimiento de bosques secundarios.

4.2.3. Fertilización

La fertilización puede ser una fuente de GEI pero según la decisión 5/CMP de la JE del MDL, no es considerada como significativa, por esta razón no será tomadas en cuenta en este estudio.

4.2.4. Aplicación de Cal

A pesar de que el IPCC describe el procedimiento para calcular las emisiones de CO₂ por aplicación de cal, ninguna metodología de las aprobadas por el MDL exige la cuantificación de esta fuente de emisión, por esta razón no se considera la aplicación de cal para el presente estudio.

4.2.5. Raleos

A excepción de la alternativa 1, en todas las demás alternativas se propuso un régimen de raleos que consiste en: un raleo no comercial con el objetivo de mejorar las condiciones de crecimiento para las especies que no presentan autoraleo; y dos raleos comerciales (Cuadro 5).

Cuadro 5. Resumen del programa de raleos para las alternativas 2,3 y 4

| No. raleo | Edad de la plantación (años) | No. remanentes | Tipo de raleo |
|------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 1 | 4 | 350 | Comercial |
| 2 | 6 | 280 | Comercial |
| 3 | 9 | 220 | Comercial |

Los modelos de crecimiento utilizados estiman el volumen total para cada uno de los años. Sin embargo, el volumen que se comercializa o que se utiliza para los productos es siempre inferior a este volumen. Los desperdicios generados en la transformación de la madera, serán estimados con una fracción porcentual que se define de acuerdo a unos rangos de clases diamétricas.

4.2.6. Productos maderables

A pesar que en la metodología se construyó un marco teórico para diferentes destinos de uso de los productos forestales, es difícil, establecer el valor porcentual para cada uno de estos usos, ya que no se conoce o no se ha implementado un sistema de monitoreo después de las cosechas que permita analizar estos datos. Para el presente estudio se asumirá que el 100% de la madera será cosechada. Posteriormente para el análisis de sensibilidad se asumirá una pérdida del 25% por transformación de productos forestales y el destino final será reciclar este producto. De esta manera, al finalizar el ciclo del producto reciclado, se asumirá que termina en un relleno sanitario como se describe en el numeral 3.2.4.1.

4.3 Fugas

No se asumirán fugas por desplazamiento de la actividad de la LB, ya que se puede suponer que no se continuará con la actividad de la LB, o en caso de que se continúe, la actividad será desplazada a áreas con características similares a la LB. De esta manera la fuga sería nula. No se asumirán fugas por uso de combustible fósil, ya que uno de los supuestos es que la madera es consumida por la misma institución.

4.4. Balance Neto

| Año | Balance Neto Para la alternativa 1 (t- CO ₂ e) | Balance Neto para las alternativas 2, 3 y 4(t-CO ₂ e) |
|-----|---|---|
| 1 | -0,03 | -11,71 |
| 2 | 18,67 | -6,93 |
| 3 | 44,05 | 15,85 |
| 4 | 76,11 | 72,32 |
| 5 | 114,69 | 91,78 |
| 6 | 157,83 | 174,38 |
| 7 | 201,76 | 222,21 |
| 8 | 246,49 | 322,37 |
| 9 | 292,00 | 432,21 |
| 10 | 338,21 | 428,02 |
| 11 | 385,21 | 520,50 |
| 12 | 432,85 | 611,70 |
| 13 | 481,18 | 699,75 |
| 14 | 529,57 | 783,33 |
| 15 | 578,05 | -18,23 |
| 16 | 625,79 | |
| 17 | 672,74 | |
| 18 | 718,60 | |
| 19 | 763,17 | |
| 20 | 806,46 | |
| 21 | 848,36 | |
| 22 | 888,98 | |
| 23 | 928,26 | |
| 24 | 966,26 | |
| 25 | 1.002,92 | |
| 26 | 1.038,39 | |
| 27 | 1.072,57 | |
| 28 | 1.105,57 | |
| 29 | 1.137,38 | |
| 30 | 1.168,00 | |

4.5. Supuestos del Análisis Económico

4.5.1 Cálculo de la tasa de descuento

La tasa de descuento o tipo de descuento es una medida financiera que se aplica para determinar el valor actual de un pago futuro. Será calculada con base en la tasa de inflación y la tasa de interés nominal. Para la tasa de inflación se tomaron los valores de enero a diciembre de 2008. Sin embargo, para la tasa de interés nominal es difícil encontrar una fuente puntual para un préstamo, específicamente para la actividad forestal, por esta razón se tomó como referencia el crédito personal prendario del Banco de Crédito Agrícola de Cartago (BCAC) ya que éste sería el más adecuado para este tipo de actividad. Para el cálculo de la tasa de descuento se utilizó la ecuación 18:

$$d = \frac{(1+TIN)}{(1+TIA)} - 1 \quad (18)$$

donde:

TIN = Tasa de interés nominal

TIA = Tasa de inflación Acumulada.

De esta manera se obtuvo la tasa de interés real con riesgo 0. Sin embargo, por principio precautorio se debe aumentar esta tasa con base en los riesgos presentes en el proyecto de inversión (Cuadro 6).

Cuadro 6. Valores utilizados para calcular la tasa de descuento mínima aceptable

| | | |
|---------------------------------|----------|-------------|
| Tasa de inflación acumulada | % | 11,75% |
| Tasa de interés Nominal | % | 12,75% |
| Tasa de interés real "Riesgo 0" | % | 0,9% |
| Premium riesgo inversión | % | 1,5% |
| Premium riesgo biológico | % | 1,0% |
| Premium riesgo cambio climático | % | 1,0% |
| Tasa Mínima Aceptable | % | 4,4% |

4.5.2. Costos y precios

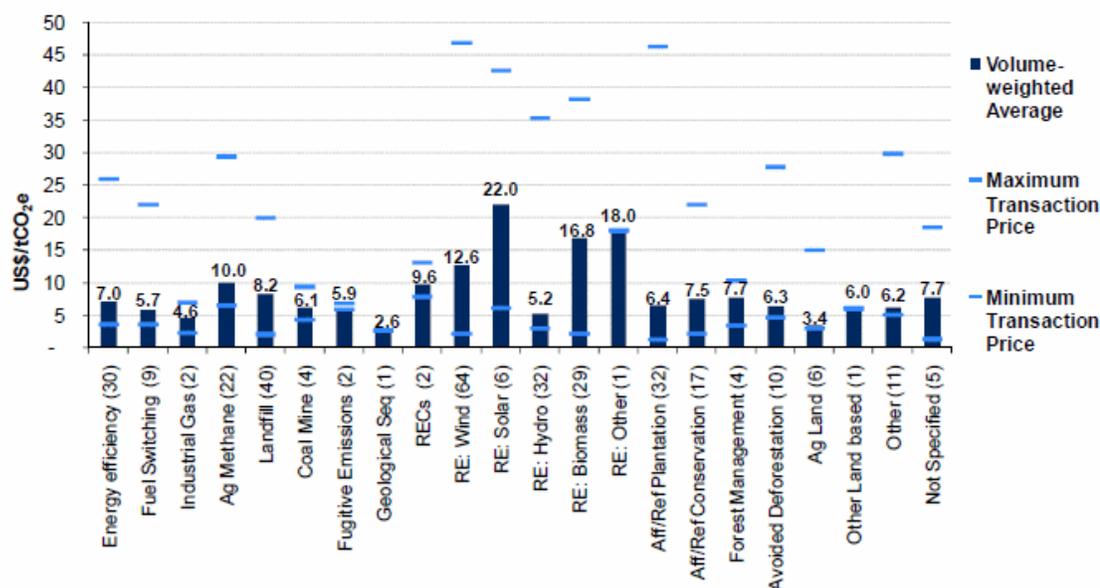
Todos los costos y precios silviculturales fueron tomados del documento Fondo Verde (Navarro 2009). Las labores que se propone implementar son las actividades básicas de una plantación comercial forestal. (Cuadro 7).

Cuadro 7. Resumen de los costos del aprovechamiento forestal por m^3

| Actividad | Unidad | Valor |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------|
| Costo de corta | (\$ m^{-3}) | U\$5,00 |
| Costo de arrastre con tractor | (\$ m^{-3}) | U\$15,58 |
| Transporte a aserradero | (\$ m^{-3}) | \$25 |
| Costo de acceso a la legalidad | (\$ m^{-3}) | U\$3,60 |
| Venta de madera | (\$ m^{-3}) | U\$200 |

El precio de los créditos de carbono se tomo de un estudio sobre los mercados de carbono voluntario (Hamilton *et ál.* 2009). En este estudio se tienen datos de todos los precios de los diferentes tipos de créditos de carbono que existen en este mercado. Para este estudio se toma el valor promedio de todos estos datos US 8.4 por tonelada (Fuente: Hamilton *et ál.* 2009

Figura 8).



Fuente: Hamilton *et ál.* 2009

Figura 8. Rangos de créditos y precios promedio por proyecto

5. RESULTADOS

5.1. Alternativa 1

Esta alternativa remueve 1.168 toneladas de CO₂ por hectárea, de esta manera sería necesario abandonar 2,67 ha para que en 30 años alcancen ese stock de Carbono. Sin embargo, es importante resaltar que el valor de fijación puede ser mayor ya que en 30 años este bosque no ha alcanzado la madurez, pero para efectos de este estudio la evaluación del stock de carbono se hará en el año 30.

Los costos de establecimiento y mantenimiento de estas 2,67 ha, son básicamente la construcción de guardafuegos y la vigilancia de las plantaciones por 30 años. Estos costos proyectados en infinitas rotaciones en valores descontados a una tasa de 4,4% tienen un valor de (U\$1.026). Es decir, que si el CATIE decidiera optar por esta alternativa debería invertir el dinero equivalente hoy (U\$1.026); este valor es casi 20 veces menor que el valor de compra de los 2.493,33 créditos hoy día (U\$21.019) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Resumen de los costos para las actividades de la alternativa 1

| Ítem | Ha | Total |
|--|----------|------------|
| Área (ha) | | 2,67 |
| Remociones del proyecto (t-CO ₂) | 1.168,00 | 3.116,66 |
| Inversión total (Descontada) | (U\$384) | (U\$1.026) |

5.2. Alternativa 2

Esta alternativa puede remover en promedio 289,17 por hectáreas en períodos de 15 años. De esta manera, si la tierra permanece en el uso de manejo forestal sostenible a perpetuidad, este será el valor potencial que podría remover y mantener en la biomasa. Para compensar las emisiones de la institución se necesitarían 10,78 hectáreas de plantación ya con el factor de riesgo incluido. En esta alternativa las futuras rotaciones de 15 años podrían generar U\$142,316 netos. Sin embargo, para esto se requiere de una inversión mucho mayor, ya que para establecer la plantación y poder extraer la madera la inversión total sería de (U\$100,597). A pesar de ser una inversión considerablemente mayor a la compra de créditos, ésta genera un retorno económico positivo, es decir, el proyecto forestal es rentable por sí solo,

y adicionalmente puede hacer económicamente sostenible la compensación de emisiones de GEI (Cuadro 9).

Cuadro 9. Resumen de los costos para las actividades de la alternativa 2

| Ítem | Ha | Total |
|---|-------------------|--------------------|
| Área (ha) | 10,78 | |
| Remociones del proyecto (t-CO ₂ e) | 289,17 | 3.116,66 |
| Retorno | U\$13,204 | \$142,316 |
| Inversión total (Descontada) | (U\$9,334) | (\$100,597) |

En primera instancia la inversión total para el establecimiento de la cobertura forestal es mucho mayor a la compra de créditos. Sin embargo, para el establecimiento y mantenimiento del proyecto solo se requieren (U\$11.872), el resto del dinero requerido es para los aprovechamientos forestales (U\$88.724). El dinero requerido para los aprovechamientos, se repagará inmediatamente con la venta de la madera. Sin embargo, se puede pensar en vender la madera en pie, con el fin de no requerir esa demanda de capital, y trasladarle el costo de aprovechamiento al comprador.

5.3. Alternativa 3

La alternativa 3 solo contempla una rotación y alcanza a remover durante su ciclo de rotación óptima (15 años) 783,33 t-CO₂ por ha. Este carbono removido volverá a salir a la atmósfera al finalizar su período de rotación. Esta alternativa requiere una inversión de (U\$29,709) para el establecimiento, mantenimiento y cosecha de 3,18 ha, obteniendo un retorno Neto de inversión de U\$19,982 por concepto del uso forestal. Adicionalmente, cuando se cortan los árboles en el año 15, se regresará al uso ganadero, por lo que se le debe adicionar este beneficio descontado. De esta manera el Beneficio Total Neto del uso forestal con el retorno Ganadero es de U\$ 21,675. Si se compara este valor con el valor de la compra de los créditos hoy desde el año (U\$21,019) se puede concluir que las actividades forestales tienen potencial para financiar el costo de la compensación de emisiones y nuevamente el área podrá ser liberada para cualquier uso diferente al forestal (Cuadro 10). En resumen esta alternativa, lo que hace es aplazar la compensación mientras se auto-generan recursos para financiarla.

Cuadro 10. Resumen de los costos para las actividades de la alternativa 3

| Ítem | Ha | Total |
|--|-------------------|--------------------|
| Área (ha) | | 3,18 |
| Remociones del proyecto (t-CO ₂) | 783,33 | 2.493,49 |
| Retorno (Forestal + Ganadería) | U\$6.810 | U\$21.675 |
| Inversión total (Descontada) | (U\$9,334) | (U\$29.709) |
| Compra de créditos (Descontada) | | (U\$21.019) |

Es claro como conclusión preliminar que las actividades forestales tienen el potencial para generar el recurso de la venta de la madera. Sin embargo, esta conclusión requiere de análisis de inversiones más detallados, que incluyan la evaluación de estrategias de optimización del establecimiento de las plantaciones de acuerdo a los precios de la madera, y del carbono.

En términos de eficiencia, puede ser mucho mejor establecer las plantaciones forestales necesarias para compensar por un periodo de tiempo determinado, como por ejemplo el turno forestal propuesto (15 años).

Es importante resaltar, que en este caso con el precio de la tonelada de carbono en U\$8,4 la alternativa, en caso de que este precio suba, puede ser una opción no tan interesante, como se ve en el análisis de sensibilidad

5.4. Alternativa 4

Al igual que la alternativa 3, la alternativa 4 sólo presenta una rotación y en ambos casos se remueven 783,33 t-CO₂e por hectárea. Sin embargo, a diferencia de la alternativa 3, no se deben comprar créditos en el último año, ya que la permanencia del carbono será garantizada por un recargo en el área total. Según el VCS, el máximo valor porcentual para el riesgo de reemisión es del 50% y fue el utilizado en este caso. De esta manera, el área de la alternativa 4 es 50% mayor que con la alternativa 3. Sin embargo, al aumentar el área necesaria, aumenta el beneficio de la inversión y adicionalmente no se requiere la compra de créditos en el último año. Para compensar las emisiones anuales del CATIE, se necesitaría disponer de 4,77 ha bajo este enfoque durante 15 años, generando un retorno de la inversión de U\$29.972 por el uso forestal durante 15 años, sin embargo debe adicionarse el valor del uso ganadero que se establece después de cosechar los árboles descontado 15 años U\$ 2.539. El

Beneficio Neto esperado por esta alternativa sería de \$32,512. Se pueden cosechar los arboles ya que se ha utilizado un factor de riesgo para compensar la no permanencia con el área adicional reforestada (Cuadro 11). Se generaría una rentabilidad aceptable y no se tendría que comprar créditos en el último año o limitar de forma perpetua el uso de la tierra. Adicionalmente, en caso de que se estableciera esta adaptación del Buffer del VCS, como algún estándar, en algún momento se puede pensar, que al ser la posibilidad de mantenerla perpetuamente en uso forestal es rentable “per-se”, De esta manera el área de buffer, podría ser liberada gradualmente y se podría pensar en vender los créditos de carbono de esta área, como lo plante el VCS para el mercado del carbono.

Cuadro 11. Resumen de los costos para las actividades de la alternativa 4

| Ítem | Ha | Total |
|--|-------------------|--------------------|
| Área (ha) | 4,77 | |
| Remociones del proyecto (t-CO ₂) | 783,33 | 3.739 |
| Retorno | U\$\$6.810 | U\$32.512 |
| Inversión total (Descontada) | (U\$9,334) | (U\$44,563) |
| Compra de créditos (Descontada) | \$0 | |

5.5. Disponibilidad de tierras y costo de oportunidad

La implementación de proyectos forestales para la compensación de emisiones de GEI presenta dos grandes limitaciones: la disponibilidad de áreas y el costo de oportunidad.

5.5.1. Disponibilidad de tierras

El escenario desarrollado para la LB en todos los casos asume el uso del suelo en ganadería. Según Guerra (2007) el CATIE cuenta con 164 ha en este tipo de uso. En el caso de las alternativas de uso forestal a perpetuidad (1 y 2) una vez que la tierra es utilizada, no se podrá volver a hacer uso de ella nunca más. De esta manera, las 164 ha disponibles para la implementación de proyectos forestales para la compensación de GEI solo podrán ser utilizadas por unos cuantos períodos después de cambiar el uso del suelo ganadero a suelo forestal. Así, la institución tendrá dos alternativas: primero, destinar la tierra a otro uso (p.e. agrícola); sin embargo, el área disponible bajo este uso de suelo también terminara saturándose; segundo, podrá realizar inversión en la compra de nuevas tierras para el

establecimiento de proyectos de reforestación con fines de compensación de emisiones pero el análisis económico y los resultados serían muy diferentes.

No obstante, en cualquiera de los casos, nunca será posible compensar las emisiones de GEI con proyectos forestales todos los años, ya que la disponibilidad de tierra tiene un límite y en algún momento no se podrá hacer uso de todas las hectáreas. De esta manera, la implementación de las alternativas 1 y 2 se convierte en una herramienta temporal para la compensación de GEI que sin embargo permitirá generar recursos financieros para el cambio de tecnología que permita reducir las emisiones anuales de la institución.

La alternativa 3 no limita el uso de la tierra, ya que ésta después de un período en uso forestal libera nuevamente la tierra para otros usos. Para que esto suceda, se debe diseñar junto con el turno óptimo un programa de ordenamiento forestal. La ventaja que tiene esto es que permite un cambio de uso después del establecimiento de plantaciones durante un período, ya que con el dinero de la venta de la madera cosechada se puede comprar los créditos permanentes necesarios para la compensación y disponer de la tierra nuevamente.

La alternativa 4, de manera similar a la alternativa 4 no restringe eternamente el uso forestal, ya que destina un porcentaje del área reforestada para compensar el riesgo de reemisión. De esta manera al finalizar el turno forestal, podrá disponer de las áreas nuevamente para otro uso, o incluso el uso forestal ya que con este uso genera beneficio económico al mismo tiempo que compensa las emisiones de GEI. De igual manera que la alternativa 3, se deberá diseñar un plan de ordenamiento con base en los turnos óptimos y las áreas disponibles. En caso de que esta actividad dese mantenerse por más tiempo y se pueda comprobar que el riesgo de reemisión del carbono, haya sido reducido bajo los estándares del VCS, podría contemplarse la venta de los créditos que hayan sido liberados de la zona Buffer.

Por lo tanto, cada alternativa tiene una disponibilidad de años para la compensación (Cuadro 12). Las alternativas de uso a perpetuidad (1 y 2) terminarán por llenar definitivamente las áreas disponibles, mientras que las alternativas 3 y 4 permitirán en algún momento después de la cosecha nuevamente el uso de estas áreas, por esta razón como mínimo se debe disponer de tierra por lo menos la duración del turno óptimo de cada una de ellas.

Cuadro 12. Número de años posibles en cada una de las alternativas para la compensación

| Ítem | Alternativa | | | |
|---|-------------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Remociones del proyecto (t-CO ₂ e ha ⁻¹) | 1.168,00 | 289,17 | 783,33 | 783,33 |
| Área Neta necesaria (ha) | 2,67 | 10,78 | 3,18 | 4,77 |
| Cantidad de años para compensación | 61 | 15 | 52 | 34 |

En resumen, si CATIE decide abandonar la ganadería y dejar con los potreros evolucione hacia un bosque secundario, y en caso de que las emisiones se mantengan constantes podría compensar durante 61 años más. A partir de ahí, deberá pensar en una estrategia. Con la alternativa 2, solo puede compensar por 15 años más. Sin embargo con la alternativas 3 y 4, que permiten la liberación del uso forestal establecido hacia el uso anterior (ganadero), vemos que pueden utilizar este método de compensación por 34/52 años más, respectivamente. De esta manera, como el ciclo propuesto es de 15 años, Catie podrá ordenar la finca de manera forestal sostenible, donde solamente requerirá de 47,70 hectáreas para el caso de la alternativa 3, ya que después de 15 años el área podría ser utilizada nuevamente para compensar. Igualmente para la alternativa 4, se requerirían de 71,55 hectáreas. Sin embargo, con la alternativa 4, como después de los 15 años, las primeras 4,77 hectáreas, podrán ser nuevamente utilizadas, y si esto sucediese, no habría reemisión de carbono a la atmosfera y la zona de buffer podría ser liberada gradualmente. Esta liberación en algún momento podría establecer la posibilidad de venta de estos créditos.

5.5.2. Costo de oportunidad de la tierra

Todas las alternativas de compensación mediante plantaciones forestales resultan ser económicamente más atractivas que solamente la compra de créditos. Unas generan ingresos y otras requieren de una menor inversión, haciendo que la elección de cada una de ellas dependa de los recursos y condiciones de la institución. Sin embargo, un aspecto que debe ser tenido en cuenta es el costo del cambio de uso de la tierra, a costa de las inversiones alternativas disponibles, o también el valor de la mejor opción no realizada. Este costo se conoce como costo de oportunidad, el cual se define como la tasa de interés o retorno esperado que se deja de ganar al invertir en un activo. En general, es aquello a lo que debe renunciarse para obtener una cosa. Es decir, es el valor de la menor alternativa sacrificada. De esta manera, deberá tenerse en cuenta el sacrificio económico que representa el dejar de recibir una cantidad de

dinero por la actividad de uso anterior, en este caso la ganadería. De acuerdo con Pitacuar (2010), el uso ganadero a perpetuidad puede generar U\$1.631 por hectárea, descontados al 3.51% anual. Para efectos de este trabajo se utilizó el mismo flujo de caja descontado a una tasa diferente de 4,39% anual, obteniendo un valor de U\$ 1.014 /ha.

A excepción de la alternativa 1, todas las demás poseen un VET superior a la ganadería, de esta manera el cambiar la actividad ganadera por la actividad forestal, representa una mejora en los beneficios económicos, fuera de los beneficios adicionales no cuantificados en este estudio, ya que la ganadería de tipo extensivo es la causa principal de la degradación de los suelos ocasionada por un manejo inadecuado de las actividades que se realizan en la ganadería como. Básicamente debido a un desconocimiento de prácticas culturales de: rotación de potreros, fertilización de pastos, control de malezas, siembra de pastos de mejor rendimiento y alternativas para la alimentación, entre otras. La alternativa, sistemas de producción intensiva, aunque un poco costosos en el establecimiento, es una buena posibilidad.

Las actividades ganaderas han deforestado miles y miles de hectáreas de bosque, trayendo como consecuencia erosión y compactación del suelo, así como pérdida de la cobertura vegetal. También la ganadería ha ocupado grandes extensiones de terreno con aptitud para la agricultura. En la ganadería extensiva el problema radica en los desechos, los cuales dejarían de ser un residuo de la actividad y convertirse, mediante un buen manejo en un producto como: lombrinaza o como mínimo abono orgánico, reemplazando así los químicos. Otra alternativa es producir biogás, lo cual genera mayor utilidad bruta pero mayor mano de obra. Igualmente con tecnologías como el Forraje Verde Hidroorgánico, permite contar con alimento para el ganado durante todo el año, sin que los factores climáticos influyan., lo que generalmente conlleva al desplazamiento a nuevas áreas en busca de alimento para el ganado.

Un informe publicado por el instituto de vigilancia mundial *The World Watch Institute* (2009), encontró que la ganadería y sus subproductos en realidad representan al menos 32.6 mil millones de toneladas de dióxido de carbono anuales, o el 51% de emisiones de gases de invernadero cada año a nivel mundial, contrario a un reporte citado por la FAO (2006) estimado en un 18% de las emisiones de GEI por las actividades ganaderas.

Con impactos tan grandes en las emisiones, el cambiar de actividad, favorecería a futuro a la institución, ya que estas emisiones en promedio para la institución representan 877

toneladas de CO₂ provenientes de la fermentación entérica. Sin embargo, este efecto no fue considerado en este estudio, ya que los escenarios propuestos asumen que las emisiones se mantienen constantes.

Alternativa 1

Con base en esto, la implementación de la alternativa 1, a pesar de requerir menos inversión que la compra de créditos, no podrá nunca más recibir ingresos por ésta u otra actividad. La diferencia entre comprar los créditos hoy y el valor de implementación del área bajo los parámetros de la alternativa 1 es de (U\$19.997), es decir si el CATIE dispone de 2,67 hectáreas para uso forestal a perpetuidad para compensar las emisiones de un año, estaría generando un ahorro de (U\$19.997), ya que no tendría que comprar los créditos necesarios para la compensación. Sin embargo, este costo no es real, ya que se debe tener en cuenta el dinero que se deja de recibir por actividad ganadera. Al tener en cuenta el costo de oportunidad de desplazar la actividad ganadera, la institución dejaría de recibir (U\$3.732) por disponer 2,67 ha de ganadería en actividades de compensación de emisiones. El costo de implementar esta alternativa menos el costo de oportunidad equivale un gasto de (U\$3.732) en valor presente, valor que sigue siendo más bajo que la compra de los créditos necesarios para la compensación.

Alternativa 2

En el caso de la alternativa 2, para el establecimiento y mantenimiento de 10,78 hectáreas de plantación con *Vochysia Ferruginea*, se requieren de (U\$11.872) en valor presente. A primera vista es menos dinero que realizar la compra de créditos hoy día, sin embargo, para lograr finalizar el ciclo forestal se requiere de inversiones adicionales para el aprovechamiento y la cosecha final. La ventaja es que esas inversiones se pagan con la venta de los productos forestales y al finalizar el turno forestal estas plantaciones podrían estar generando un beneficio Neto de \$142.316 en valor presente.

De igual manera que en la alternativa 1, se debe tener en cuenta el costo de oportunidad de la tierra, es decir el beneficio al que se está renunciando por cambiar el uso del suelo. Según el VET del uso ganadero, estas tierras podrían generar en valor de uso ganadero U\$10.930 mientras que cambiándolas a la actividad forestal pueden generar U\$ 142.310. De esta manera se pueden mejorar los beneficios netos en U\$131.386 fuera de los demás beneficios mencionados anteriormente.

Alternativa 3

El análisis para el costo de oportunidad de la tierra es un poco más complejo, ya que esta alternativa parte del supuesto, que la actividad forestal estará establecida por un ciclo de corta (15 años y posteriormente regresara a uso ganadero).

Con un primer análisis basado en los beneficios de cada uso del suelo (ganadero y forestal) se puede establecer que la actividad forestal, puede generar los recursos necesarios para la compra de los créditos de carbono con el precio de hoy día. El beneficio Neto de el uso forestal por 15 años mas el beneficio neto de la ganadería después de este ciclo es de U\$21.675 para 3,18 hectáreas. Sin embargo, a esto se le debe restar el beneficio que recibiría esta área en uso ganadero a perpetuidad U\$3.042. De esta manera el Beneficio Neto con la inclusión del costo de oportunidad de la tierra es de U\$18.633, siendo un valor menor al costo de los créditos equivalentes para la compensación de emisiones. Si CATIE utilizara 3,18 hectáreas de ganadería con proyectos forestales bajo la alternativa 3, necesitaría una inversión de (U\$ 2.386) para compensar las emisiones de un año. Si decidiera mantener el uso ganadero y comprar créditos, requería de (U\$20.005) para la compensación de las emisiones anuales.

Con un primer análisis parece una alterativa interesante y el planteamiento del establecimiento de las áreas forestales podría hacerse de una manera diferente y más eficiente. El beneficio del establecimiento de 3,18 hectáreas bajo este escenario generan U\$ 18,633, transformando ese valor en una anualidad tendríamos que cada hectárea puede generar U\$ 542.

De esta manera, si se requieren generar U\$21.019 que es el valor de los créditos, podrían establecer 39 hectáreas en un año y ya se estaría generando anualmente la cantidad necesaria para compensar por 15 años de acuerdo al turno propuesto. Esta opción puede ser interesante, ya que en términos de escala y eficiencia forestal puede ser mucho mejor establecer bloques más grandes en vez de bloques pequeños cada año. Adicionalmente este planteamiento contempla el uso de menos hectáreas.

Alternativa 4

De manera similar a la alternativa 3, esta permite cosechar los productos forestales. Alternativa 4 tienen la misma capacidad de remoción que la 3, sin embargo, es multiplicada por el máximo factor de riesgo de re-emisión establecido por el VCS (50%). Así que en lugar de requerir 3,18 requiere de 4,77 hectáreas. Es importante anotar que el concepto de buffer acá

propuesto es con base el concepto buffer del VCS utilizado en el mercado de créditos y que este concepto, podrá ser utilizado en caso de ser avalado por un estándar internacional. Asumiendo que esto se diera, se puede plantear que si la actividad forestal es más rentable que la actividad ganadera, posiblemente la institución, considere el no revertir nuevamente el uso a ganadería. De esta manera el uso forestal sería mantenido y se podría demostrar que no ha habido re-emisión del carbono a la atmósfera, por lo que el área buffer sería liberado gradualmente de acuerdo a las normas del VCS, y de esta manera generar créditos y transarlos en el mercado del carbono.

5.6. Productos forestales

Al considerar el almacenamiento de carbono en los productos forestales aumenta el período de permanencia del carbono en la biosfera y de esta manera, las remociones netas de los proyectos forestales aumentan considerablemente. El incluir o no los productos forestales tendrá implicaciones directas sobre el monitoreo y validación del proyecto, ya que por los altos niveles de incertidumbre de la vida de los productos forestales, es difícil establecer el destino final. Por esta razón muchos de los estándares, MDL p.e. no los considera. Sin embargo, con la metodología propuesta es posible simular qué pasaría con los productos forestales con base en algunos de estos supuestos. El supuesto en este caso es que el 100% de la madera cosechada será destinada a productos forestales, con una pérdida por transformación del 25%. A todos los productos se les aplicó la curva de decaimiento del IPCC con una vida media de 30 años. También se asumió un reciclaje del 100% de estos productos, de tal manera, que se repetirá un ciclo de decaimiento para terminar finalmente en un relleno sanitario.

Para lograr esto y facilitar el futuro proceso de validación y certificación de los créditos, se deberán mantener los productos forestales dentro de los límites físicos de la institución; es decir, toda la madera que se destine a productos forestales debe ser considerada y deberá permanecer dentro de los límites de la institución o dentro de los límites que permitan su verificación.

La venta de madera a terceros podría ser una opción interesante, ya que ésta podría ser negociada en pie, y así no se generarían costos por aprovechamiento, y por lo tanto se disminuirían los costos de inversión en cada alternativa. Pero por otro; sin embargo, si se

entrega la madera a un tercero, será difícil establecer el proceso de monitoreo y de evaluación. La inclusión del análisis del destino de los productos forestales tiene una implicación directa sobre las áreas, ya que al mantener más carbono en la biósfera cada una de las alternativas demandaría menor área para su implementación (Cuadro 13).

Cuadro 13. Variaciones para las alternativas 2, 3 y 4 con la inclusión de productos forestales.

| Ítem | Productos forestales vida media 30 años | | | Productos forestales vida media 100 años | | |
|---|--|------------|------------|---|------------|------------|
| | Alternativa | | | Alternativa | | |
| | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| Toneladas de CO ₂ removidas con el proyecto (ha) | 382,88 | 882,15 | 882,15 | 383,18 | 883,19 | 883,19 |
| Área Neta necesaria | 8,14 | 2,83 | 4,24 | 8,13 | 2,82 | 4,23 |
| Retorno | \$107,484 | \$17,743 | \$26.615 | \$107.399 | \$17.722 | \$26.583 |
| Establecimiento y mantenimiento | (\$8.967) | (\$3.113) | (\$4.670) | (\$8.959) | (\$3.110) | (\$4.665) |
| Aprovechamientos forestales | (\$67.009) | (\$23.267) | (\$34.901) | (\$66.956) | (\$23.240) | (\$34.860) |
| Inversión total | (\$75.976) | (\$26.381) | (\$39.571) | (\$75.916) | (\$26.349) | (\$39.524) |
| Compra de créditos | | | | | | |

Costos e ingresos en U\$ dólares

Poder contar el carbono en los productos forestales puede tener efectos significativos en la cantidad de área requerida para las compensaciones, así mismo como en el comportamiento económico que de esto se deriva, sin embargo, el poder disminuir las áreas necesarias cada año para compensación se convierte en una estrategia de vital importancia, ya que el capital natural es fuertemente limitado. Por ejemplo en el caso de la alternativa 2, remueve de la atmosfera 289,17, si se cuentan los productos forestales remueve 382,88, lo que representa un aumento en el almacenamiento del 32%.

Al contar el almacenamiento de los productos forestales bajo los supuestos utilizados, las tasas de almacenamiento hacen que el área necesaria para la compensación sea menor. Sin embargo, pesar de que en este estudio, no se considera la sustitución de materiales, algunos estudios han demostrado que esta práctica puede tener un impacto en la reducción de emisiones de GEI, ya que la fabricación de elementos comúnmente utilizados en construcción demandan altas cantidades de energía y en muchos casos esta energía proviene de la combustión de combustibles fósiles. Por ejemplo, Pat Borer del Centro de Tecnología

Alternativa determinó en un estudio que para producir un metro cúbico (m³) de madera son necesarios 110 KWh/m³ de combustibles fósiles; mientras que para el mismo volumen de cemento se requieren 2,860 KWh/m³, 103,000 KWh/m³ para el acero y 75,600 KWh/m³ para aluminio (Borer, 2000).

Al contrario de lo que debería ser por los efectos del cambio climático, estas cifras han ido cambiando negativamente (Mackenzie 2003), El Porcentaje de casas construidas 100% con madera fue de 33.4% en 1894, 10,3% en el 2000. En el mismo estudio se plantea que esta cifra aún sigue decreciendo.

El incluir o no los materiales sustitos de construcción no tendría un cambio sobre el balance neto DENTRO de la institución, sin embargo, su efecto Global es inmediato por la reducción de la demanda de estos materiales y sus respectivas emisiones de CO₂. De esta manera, CATIE debería potenciar el uso de madera como sustituto de materiales para la construcción, a pesar de que su beneficio interno en términos de CO₂ no se vería modificado, estaría logrando un impacto en la reducción de emisiones mucho más alto a nivel global.

5.7. Análisis de sensibilidad

Al momento de tomar la decisión sobre la alternativa financiera en la que se quiere invertir, es necesario conocer el grado de riesgo que representa esa inversión. Para esto se recurre al análisis de sensibilidad, analiza de forma inmediata la solidez o fragilidad del proyecto, a su vez permite evaluar la influencia que pueden tener los cambios en determinadas variables en la rentabilidad del proyecto. El análisis de sensibilidad de un proyecto de inversión es una herramienta sencilla de aplicar y proporciona la información básica para tomar una decisión acorde al grado de riesgo que se decida asumir. La conclusión más importante del análisis de sensibilidad es que en todos los casos la compensación de emisiones de GEI con proyectos forestales son más rentables que la compra de créditos permanentes. También se encontró que la variación en el precio de la madera tendrá gran incidencia en la elección de la alternativa más adecuada para las condiciones de la institución (capital natural y capital financiero) Los resultados detallados del análisis de sensibilidad se describen a continuación.

5.7.1. Variaciones en las emisiones anuales

En caso de que la institución aumentara en un 25% las emisiones anuales, la demanda de tierra también aumentaría en todas las alternativas. Sin embargo, en el caso de las alternativas que generan beneficio económico (2, 3 y 4) este beneficio también se vería aumentado. En el caso de la alternativa 1, se vería reflejado un aumento en los costos de establecimiento y mantenimiento.

Por otro lado, una disminución en las emisiones de un 25% representa una disminución en las áreas necesarias para la compensación, impactando directamente en una reducción de los beneficios en las alternativas (2, 3 y 4). A pesar de que una reducción en las emisiones disminuiría los beneficios en el caso de las alternativas 2, 3, y 4, también disminuirían los costos en el caso de la alternativa 1. El punto más importante es que con una reducción de las emisiones se reduce también el área necesaria para la implementación de los proyectos forestales y por lo tanto la institución tendrá más tiempo para implementar políticas de reducción más fuertes y realizar cambios de tecnología durante este tiempo (Cuadro 14).

Cuadro 14. Comportamiento en las 4 alternativas ante variaciones en el porcentaje de emisiones

| Ítem | + 25 % de las emisiones anuales | | | |
|--|---------------------------------|-------------|------------|------------|
| | Alternativa | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Toneladas de CO 2 removidas con el proyecto (ha) | 1.168 | 289.17 | 783,33 | 783,33 |
| Área Neta necesaria | 3,34 | 13,47 | 3,98 | 5,97 |
| Retorno | (\$1.282) | \$177.895 | \$24.977 | \$37.465 |
| Establecimiento y mantenimiento | (\$1.282) | (\$14.840) | (\$4.383) | (\$6.574) |
| Aprovechamientos forestales | - | (\$110.906) | (\$32.753) | (\$49.130) |
| Inversión total | (\$1.282) | (\$125.746) | (\$37.136) | (\$55.704) |

Costos e ingresos en U\$ dólares

Uno de los supuestos de esta investigación era que las emisiones se mantenían constantes, sin embargo, una de estas alternativas se implementará realmente en áreas ganaderas y se cambiará por uso forestal. De esta forma las emisiones de CATIE podrían reducirse considerablemente, ya que las emisiones por ganadería representan aproximadamente el 35% del total, siendo este el valor más alto, seguido de las emisiones por concepto de transporte aéreo. Así que un cambio en el uso del suelo podría permitir a un

menor costo en términos de áreas la compensación de emisiones de GEI por más tiempo, sumado otros beneficios que han sido descritos por el cambio de uso de suelo.

5.7.2. Variación en el precio de venta de la madera

La selección de la especie será diferente para cada una de las alternativas y constituye un aspecto clave, pues afecta directamente las variables de producción, ya que una especie de rápido crecimiento puede requerir de menos área que una de porte mayor y de crecimiento lento. Por otro lado, si se escoge una especie con poco mercado y con precios de venta bajos, la rentabilidad del proyecto hará que esta no sea atractiva. De esta manera el precio no tendría incidencia, sobre el capital natural (área), aunque tendría una implicación directa en los retornos de la inversión, por consiguiente la decisión final sobre cuál de las alternativas es más rentable se vería fuertemente afectada.

El precio de venta para la *Vochysia* fue estimado con base en datos de la OMF. Sin embargo, es claro que existen diferencias en el mercado entre los precios de la madera según la especie, esta variación en el precio de la madera es altamente sensible y por esta razón solo se considerará un aumento del 10% por arriba y por abajo del precio base.

La alternativa 1 no se ve afectada por este indicador ya que ésta no genera beneficios por venta de madera. En el caso de la alternativa 2, a pesar de que genera cambios significativos en la rentabilidad, y que hace que las rentabilidades sean más o menos atractivas para la institución, no tiene impacto sobre el área necesaria para la implementación de la alternativa. Sin embargo, al utilizar especies más valiosas como Cedro o Caoba, los beneficios esperados podrían ser muchos mayores, ya que a mayor beneficio del uso forestal, será mucho más atrayente para dejar la ganadería.

En la alternativa 3 tampoco se genera impacto sobre el área, sin embargo, el impacto en la rentabilidad si tiene una incidencia bastante fuerte, presentándose una relación directamente proporcional entre el incremento del precio de venta de la madera y los ingresos del proyecto. Con un mejor precio de venta se podrán generar mayores recursos económicos necesarios para la compra de los créditos permanentes cuando finalice el turno de rotación óptimo. Esta alternativa debe generar el recurso necesario para la compra de créditos de

carbono, de esta manera, si se utilizan especies con precios de la madera más altos, se obtendrán mejor beneficio económico; de esta manera puede ser que el área necesaria para obtener el dinero equivalente para la compra de créditos sea mucho menor.

La adecuada selección de la especie para cada una de las alternativas se convierte en un factor clave en la toma de decisiones, ya que en el caso de las alternativas 2 se deben escoger especies de rápido crecimiento para que demanden poca área. En el caso de la alternativa 3, se deberá escoger una especie con altos precios de mercado para generar un retorno económico suficiente para comprar los créditos después de la corta e incluso generar recursos para cambios de tecnología que permitan la reducción de emisiones (Cuadro 15).

Cuadro 15. Comportamiento de las alternativas 2,3 y 4 ante variaciones en el precio de la madera

| Ítem | 10 % + Precio Alternativa | | | 10%- precio Alternativa | | |
|--|---------------------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|
| | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 |
| Toneladas de CO 2 removidas con el proyecto (ha) | 289,17 | 783,33 | 783,33 | 289,17 | 783,33 | 783,33 |
| Área Neta necesaria | 10,78 | 2,39 | 4,77 | 10,78 | 2,39 | 4,77 |
| Retorno | \$177.707 | \$24.951 | \$37.426 | \$106.925 | \$15.013 | \$22.519 |
| Establecimiento y mantenimiento | (\$11.872) | (\$3.506) | (\$5.259) | (\$11.872) | (\$3.506) | (\$5.259) |
| Aprovechamientos forestales | (\$88.724) | (\$26.203) | (\$39.304) | (\$88.724) | (\$26.203) | (\$39.304) |
| Inversión total | (\$100.597) | (\$29.709) | (\$44.563) | (\$100.597) | (\$29.709) | (\$44.563) |

Costos e ingresos en U\$ dólares

5.7.3. Variación en la tasa de descuento

La elección de la tasa de descuento dependerá en gran medida del carácter del inversionista. Es difícil establecer la impaciencia de una institución como el CATIE, y la elección de la tasa de descuento para el análisis estará condicionada a factores internos y externos. En este estudio se toma una tasa de descuento base calculada a partir de la tasa de inflación y la tasa de interés nominal, ajustada con riesgos de inversión.

En el caso de la alternativa 1, un aumento del 1% en la tasa de descuento representa una disminución en los gastos de establecimiento del proyecto, mientras que una disminución en la tasa del 1% representa un aumento en estos gastos. En las demás alternativas (2, 3 y 4) una disminución en la tasa de descuento siempre representa una disminución en los beneficios

y si se aumenta la tasa de descuento se aumentan los beneficios. En todos los casos, las variaciones en la tasa de descuento siempre mantuvieron beneficios positivos, sin embargo, en la alternativa 3 el efecto de la disminución de un punto en la tasa la convierte en una opción más interesante, ya que con este cambio los retornos de la inversión superan el equivalente al valor descontado del pago de los créditos en el último año. A pesar de que en algunos casos las variaciones en la tasa de descuento pueden tener efecto sobre la determinación del turno óptimo (Corella 2008), en este estudio no se presentó variación. Esto puede deberse a la poca variación en la tasa (solo un +- 1%), sin embargo, con variaciones más grandes probablemente sí se afecte el turno de rotación óptima y por consiguiente, el área necesaria para la compensación se vería afectada (Cuadro 16 y 17).

Cuadro 16. Comportamiento para todas las alternativas ante variaciones en la tasa de descuento en +1%

| Ítem | + 1 % tasa de descuento | | | |
|--|-------------------------|------------|------------|------------|
| | Alternativa | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Toneladas de CO 2 removidas con el proyecto (ha) | | 289,17 | 783,33 | 783,33 |
| Área Neta necesaria | | 10,78 | 2,39 | 4,77 |
| Retorno | (\$915) | \$104.958 | \$16.903 | \$25.355 |
| Establecimiento y mantenimiento | (\$915) | (\$11.654) | (\$3.442) | (\$5.162) |
| Aprovechamientos forestales | - | (\$77.966) | (\$23.025) | (\$34.538) |
| Inversión total | (\$915) | (\$89.620) | (\$26.467) | (\$39.701) |

Costos e ingresos en U\$ dólares

Cuadro 17. Comportamiento para todas las alternativas ante variaciones en la tasa de descuento en -1%

| Ítem | - 1 % tasa de descuento | | | |
|---|-------------------------|-------------|------------|------------|
| | Alternativa | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Toneladas de CO ₂ removidas con el proyecto (ha) | | 289,17 | 783,33 | 783,33 |
| Área Neta necesaria | | 10,78 | 2,39 | 4,77 |
| Retorno | (\$1.159) | \$202.658 | \$23.577 | \$35.366 |
| Establecimiento y mantenimiento | (\$1.159) | (\$12.103) | (\$3.574) | (\$5.361) |
| Aprovechamientos forestales | - | (\$101.180) | (\$29.881) | (\$44.821) |
| Inversión total | (\$1.159) | (\$113.282) | (\$33.455) | (\$50.183) |

Costos e ingresos en U\$ dólares

5.7.4. Variación en el precio del carbono

La variación en el precio del carbono, solo se sensibilizo para las alternativas 1 y 3, ya que independientemente las alternativas 2 y 4 se asume que tendrán retornos positivos, de esta manera por muy bajito que este el precio del carbono, estas dos alternativas siempre representaran un beneficio por lo menos mayor que 0, en contraposición a la compra de créditos.

En el caso de la alternativa 1, que comprende el abandono de potreros para esperar la formación de un bosque secundario, el costo necesario para mantener esta cobertura y alcanzar el stock de carbono equivalente a las emisiones de CATIE es de (U\$1.026). De esta manera para que la alternativa deje de ser atractiva y represente un gasto menor que la compra de créditos, el valor del crédito del carbono debería ser inferior a U\$2,4 por ton. Si el precio del carbono llegase a estar por debajo de este valor, sería más barato comprar los créditos que el mantenimiento para lograr que el potrero abandonado llegase a remover las emisiones de un año. Sin embargo, ya que en algunos estudios como el realizado por Hamilton *et ál.* (2009) se establece que, el precio medio del crédito de carbono en los mercados voluntarios negociados en el mercado OTC fue de U\$7,34/t-CO₂e en 2008, U\$6,10/t-CO₂e en 2007 y 4.10/t-CO₂e \$ en 2006. A pesar de que puede existir volatilidad en los mercados del carbono, la tendencia

general ha sido ir subiendo y el valor utilizado en esta investigación U\$8,43 / t-CO₂e está muy por encima del valor para que la alternativa no sea rentable.

Para la alternativa 3 se puede establecer que es una alternativa que puede ser fuertemente afectada por el precio del carbono. Con el establecimiento de un cultivo de *Vochysia Ferruginea* bajo las condiciones descritas en este documento, se podría llegar a generar el dinero equivalente para la compra de los créditos de carbono, sin embargo, una disminución pequeña en el precio del carbono, haría que se requiera de mas área para lograrlo. Sin embargo, como ya se menciona, se puede logra una mejor rentabilidad cambiando las especies forestales, así que la estrategia para abordar un posible aumento en el precio del carbón sería tratar de establecer especies de más alto valor donde las condiciones biofísicas de la finca de CATIE lo permitan.

6. CONCLUSIONES

La compensación de emisiones por medio de las alternativas 1 y 2, a pesar de que son económicamente viables y en ambos casos mejor opción que la compra de créditos de carbono solamente, pueden ser utilizadas como opción temporal, ya que las áreas destinadas a este uso, no podrán regresar a su uso anterior o diferente. En el caso de la alternativa 1 que consiste en el abandono de un potrero y un manejo básico se observa que la inversión para compensar emisiones de GEI, sería mucho menor que comprar los créditos; mientras que para la alternativa 2, que consiste en el establecimiento de una plantación de *Vochysia ferruginea* con rotaciones simultaneas perpetuamente, puede generar ingresos mucho mayores que el uso actual del suelo en ganadería, y a parte de compensar las emisiones, podría permitir la reducción de emisiones por fermentación entérica provenientes del uso ganadero. A pesar de todo esto es importante resaltar que en ambos casos, el área necesaria para su establecimiento se acaba entre 61 y 15 años. De esta manera la institución deberá utilizar otras aéreas que pueden tener una mayor rentabilidad o incluso pensar en la compra de tierras nuevas, sin embargo en ambos casos el comportamiento económico sería muy distinto y requerirá de estudios adicionales.

La implementación de plantaciones forestales por un solo turno como lo plantean las alternativas 3 y 4 pueden ser económicamente viables para la compensación de emisiones de GEI. Sin embargo, la elección de la manera en que se implementan dependerá en gran medida del área (Capital Natural) y del flujo de caja (Capital económico). Con base en el precio del carbono actual, la alternativa 3 que consiste en el establecimiento de un cultivo forestal por una rotación, donde al finalizar el turno forestal permite la corta de los árboles para generar ingresos por venta de madera, es una alternativa que puede generar mayores beneficios que el uso actual en ganadería, pudiendo incluso pagar los créditos necesarios para garantizar la permanencia del carbono, cuando los arboles sean derribados. Por otro lado la alternativa 4, de manera similar a la 3, posee un ingreso mucho mayor al uso ganadero, sin embargo, en esta alternativa, se contempla el tratamiento del riesgo de re-emisión de manera diferente, utilizando un 50% más de área como un buffer basado en el estándar del VSC. Al ser esta una actividad rentable per-se podrá motivar en algún momento el mantener este uso, de manera tal

que, el área buffer, podrá ser liberada gradualmente e incluso podría contemplarse la venta de los créditos de esta zona en el mercado del carbono.

El cambio de uso de suelo en Ganadería hacia plantaciones con fines de compensación, representa un aumento en el beneficio económico en todas las alternativas y mejora de las condiciones ambientales. Por otro lado, a pesar de que no fue tenido en cuenta en este estudio puede generar un impacto positivo en el balance neto de la institución, ya que representan aproximadamente el 35 % de las emisiones totales de la institución. Estas reducciones podrían ser incluidas en un mercado de carbono y podrían generar créditos permanentes que podrían ya sea ser vendidos o incluso utilizados en el balance Neto de las emisiones anuales.

La inclusión del análisis del destino de los productos forestales tiene fuerte influencia en los resultados de la compensación de emisiones. Ya que al hacer uso de ellos se aumenta el stock en la biosfera. Por lo tanto, se deben establecer mayores incentivos para hacer uso interno de los productos maderables dentro de la institución y de esta manera poder garantizar su permanencia en la biosfera. Por otro lado, a pesar de que no se tuvo en cuenta en este estudio, la implementación de una política de uso de productos forestales en CATIE, puede tener un beneficio importante para el balance global del planeta, ya que al sustituir, materiales como el hierro, aluminio, entre otros, se reduce la demanda de este productos por consiguiente la demanda energética mundial para la fabricación de ellos.

El precio de venta de la madera es una variable que influye fuertemente en la rentabilidad del proyecto. Por esta razón, la selección adecuada de las especies y la correcta aplicación de tratamientos silviculturales permitirán la compensación de las emisiones de GEI, así como la maximización de los beneficios. En este estudio solamente se utilizo *Vochysia Ferruginea*, ya que es una especie que en general puede ser utilizada y ha sido utilizada en la institución. Sin embargo, con base en estudios posteriores, se podrá establecer de acuerdo a condiciones particulares de los lotes o lugares destinados a plantar una matriz de ordenación que puede permitir el uso de una o varias especies que puedan maximizar los beneficios y a su vez compensar las emisiones.

A pesar de que establecer plantaciones forestales para la compensación de emisiones de GEI, puede ser un modelo económico viable por periodos limitados de tiempo, se debe tener cuidado en extrapolar estos resultados, ya que estos han sido formulados específicamente para las condiciones de CATIE.

A pesar de que la “Neutralidad en Carbono” es un tema bastante popular en estos días, no existe una posición de alguna entidad internacional que pueda establecer las reglas de este. Esta neutralidad puede ser definida como que el balance neto de emisiones de GEI de una organización, producto, servicio o proceso sea igual a cero, a través de una combinación de acciones directas como reducción de emisiones y/o acciones indirectas como remociones de carbono. Como aun no están claras las reglas y procedimientos para alcanzar este balance, esta investigación no es la excepción a ello. A pesar de que las alternativas acá propuestas permiten la compensación de emisiones de GEI bajo diferentes normas y procedimientos de estándares internacionales no garantizan en ningún momento una “Neutralidad en Carbono”.

BIBLIOGRAFÍA

- Armendáriz, A. 2007. Temen conflictos mundiales por el clima. La Nación (en línea). AR. jun. 8. Consultado 15 mar 2008. Disponible http://www.lanacion.com.ar/Archivo/nota.asp?nota_id=897767
- Avendaño, J. 2008. Modelos genéricos de biomasa aérea para especies forestales en función de la arquitectura y la ocupación del rodal. Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turriaba, CR, CATIE. 144 p.
- Baley, R. 2008. Otra verdad incómoda. Cómo las políticas de biocombustibles agravan la pobreza y aceleran el cambio climático. Intermón Oxfan. Intermón Oxfam. Oxford, UK. 68 p.
- Bastienne, J. 2001. Una tarea pendiente: Proyectos forestales para mitigación de gases de efecto invernadero. Ambiente y Desarrollo. Santiago de Chile, CL. 17(1)2-14p.
- Beek, R; Sáenz, G. 1992. Manejo forestal basado en la regeneración natural del bosque: Estudios de caso en los robledales de altura de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Catie. Turrialba, CR 50 p.
- Benjamín, J; Masera, O. 2001. Captura de carbón ante el cambio climático. Madera y Bosques. 7(1):3-12.
- Borer, P. 2000. The whole house book. Ecological building design and materials. Powys The Center for Alternative Technology. UK.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and change of tropical forest. Department of Natural Resources and Environmental Sciences. University of Illinois, Urbana. Illinois, US. 165p.
- Clutter, J; Forston, J; Pienaar, L; Brister, G; Bailey, R. 1983. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons. USA, 331 p
- Corella, O. 2009. Valoración de la base forestal de las plantaciones forestales y su contribución al abastecimiento de madera en la zona del Atlántico Norte de Costa Rica. Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turriaba, CR, CATIE. 147 p.

- Dajoz, R. 2000. Insects and forests. The role and diversity of insects in the forest environment. Intercept Ltda. Londres, UK. 668 p.
- Davel, M; Jovanovski, A; Mohr, D. 2005. Densidad básica de la madera de pino oregón y su relación con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina Argentina. *Bosque* 26(3):55-62.
- Delgado, L; Pedraza, R. 2002. La Madera muerta de los ecosistemas forestales. *Foresta Veracruzana* 4(002)59-66.
- Dickerson, R; Cicerone, R. 1986. Future global warming from atmospheric trace gases. *Nature* 319: 109-115.
- EARTH. 2007. Universidad Earth: Neutralidad del carbono. San José, CR. 16p.
- ECOSECURITIES. 2007. Guidebook to Financing CDM Projects. NL. 102 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2007. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Pago a los agricultores por servicios ambientales. Formulación de programas eficaces de pagos por servicios ambientales. Roma, IT. 255 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2007. Situación de los bosques en el mundo. Cuestiones seleccionadas de interés en el sector forestal. Roma, IT. 74-99.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2009. Los bosques y el cambio climático: Integrar las cuestiones sobre el cambio climático a las actividades fundamentales del sector forestal. Roma, IT. s.p.
- Faustmann, M. 1849. On the Determination of the Value Which Forest Land and Immature Stands Possess for Forestry. Oxford Institute Paper. Oxford, UK. 1(1)7-44.
- Fearnside, P. 1989. Extractive reserves in Brazilian Amazonia. *Bioscience*, 39: 387-393
- FIFA (Federación Internacional de Fútbol Asociado). 2006. Green Goal. Organizing Committee (OC) 2006 FIFA World Cup. Frankfurt, AL. 122 p.
- Ford, J. 2003. Implications of Harvested Wood Products Accounting - Analysis of issues raised by Parties to the UNFCCC and development of a Simple Decay approach. MAF

- Technical Paper. Ministry of Agriculture and Forestry, Wellington, New Zealand 2003(5) 30p.
- Guerra, L. 2007. Construcción de la huella de carbono y logro de carbono neutralidad para el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turriaba, CR, CATIE. 105 p.
- Gutiérrez, E. 2004. Los bosques como sumideros de carbono: una necesidad para cumplir con el Protocolo de Kioto. Universidad de Vigo. Madrid, ES. 12 p.
- Haltenhoff, H. 1998. Impacto del Fuego sobre el Medio Ambiente. Corporación Nacional Forestal. Santiago de Chile, VL. 18 p.
- Hamilton K; Bayon, R; Turner, G; Higgins D. 2007. State of the Voluntary Carbon Markets 2007: Picking Up Steam. Ecosystem Marketplace. Washington, US 60 p.
- Hamilton K; Sjardin, M; Shapiro, A; Marcelo, T. 2009. State of the Voluntary Carbon Markets 2009: Picking Up Steam. Ecosystem Marketplace. Washington, US 108 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change). 1996. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Braknell, UK. 491 p.
- IPCC. (Intergovernmental Panel On Climate Change). 2003. Good Practice guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry. Eds. J Penman; M Gytarsky; T Hiraishi; T Krug; D Kruger; R Pipatti; L Buendia; K Miwa; T Ngara; K Tanabe; Fabian Wagner. IGES. Hayama, JP. 595 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change). 2006. IPCC Guidelines for National Green House Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. IGES, JP. 678 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change). 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.

- ISO (International Organization for Standardization). 2008a. ISO 14064-1:2006 (en línea).
Consultado 5 mar 2008. Disponible
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38381
- ISO (International Organization for Standardization). 2008b. ISO 14064-2:2006 (en línea).
Consultado 5 mar 2008. Disponible
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38382
- ISO (International Organization for Standardization). 2008c. ISO 14064-3:2006 (en línea).
Consultado 5 mar 2008. Disponible
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38700
- Karjalainen, T; Kellomäki, S. 1996. Greenhouse gas inventory for land use change and forestry in Finland based on international guidelines. Mitigation and adaptation Strategies for Global Change. Helsinki, FI. 1:51-71.
- Kelling, C. 1998. Rewards and penalties of monitoring the earth. *Annu. Rev. Energy Environ.* 23:25–82.
- Klemperer, W.D. 1996. *Forest Resources and Finance*. McGraw-Hill. Series in Forest Resources. US. 551 p.
- Koh, M; Hoy, W. 2003. Sustainable biomass production for energy in Malaysia. *Biomass and Bioenergy*. ELSEVIER. London, UK. 25(5):17-52.
- Laarman, J; Contreras, H. 2000. Proyectos de asistencia para el desarrollo forestal: ¿su evaluación revela todos los beneficios? *Unasylva*, 164:20-30p.
- Loguercio, G. 2002. Fijación de carbono: un beneficio adicional para proyectos forestales en Patagonia. *Área de Gestión Ambiental. CIEFAP Patagonia Forestal*, 8(2):7-10.
- Lovelock, J. 2006. *La Venganza de la Tierra*. Editorial Planeta Chilena. Quebecor World. Santiago, CL. 249 p.
- McKenzie, F. 2003. *Our Changing Planet: an introduction to Earth System Science and Global Environmental Change*. 3 ed. Upper Saddle River. New York, US. 80p.
- Manso, J. 2000. Emisiones de gases y partículas producto de los incendios forestales. Ministerio de Ciencia, tecnología y Medio Ambiente, CIMAT. CU. 10p.

- Michael, S. 1995. Economic valuation of the multiple use of forests: the case of Bwindi Impenetrable National Park (BINP), Uganda. Universidad de Edimburgo, UK. 98p.
- Navarro, G. 2009. Cátedra Latinoamericana de Política y Economía Forestal. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Catie. Notas de clase. Turrialba, CR. 14p.
- Neff, T; Eichler, L; Deecke, I; Feshe, J. 2007. Actualización sobre los mercados para compensaciones forestales para la mitigación del cambio climático. Turrialba, CR. 42p.
- Ohlin, B. 1921. Till frågan om skogarnas omloppstid, Ekonomisk Tidskrift. Festschrift to Knut Wicksell. DE, 22:89-113.
- Pitacuar, M. 2010. Consideraciones ambientales y de mercado para la forma en que se asignan los bosques en el paisaje: caso Corredor Biológico San Juan La Selva. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, 98 p.
- Reed, K; Ehrhart, Ch. 2007. Haciendo lo correcto: Guía para responsabilizarnos de las emsiones de gases efecto invernadero. Care Danmark. Copenhague, K. 51 p.
- Rivas, D. 2007. Beneficios de los bosques. Asociación Mexicana de Arboricultura. México D.F.,MX. 1:1-5.
- Salinas, Z; Hernández, P. eds. 2008. Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía. Centro Agronómico Tropical y de Enseñanza, CATIE. Turrialba, CR. 234p.
- Sandberg, D; Pierovich, J; Fox, D; Ross, E. 1978. Effects of Fire on Air. General Technical Report WO-9 USDA. Forest Service. Denver, US. 40 p.
- Seminario La encrucijada energética: una visión general (2008, Madrid, ES). 2008. Los combustibles fósiles. Alternativas. Madrid, ES. 10 p.
- Schneider, SH; Londer, R. 1984. Coevolution of Climate and Life. San Francisco, USA. Sierra Club Books. 563 p.
- Story, L. 2008. F.T.C. Ask is Carbon-Offset Money is well spent. The New York Times (En línea). New York, US, ene. 9. Consultado 29 mar 2008. Disponible http://www.nytimes.com/2008/01/09/business/09offsets.html?_r=1&oref=slogin
- The World Watch Institute. 2009. Livestock and Climate Change. The World Watch Institute. Washington, US nov. 2009:10-19.

- TCNC (The Carbon Neutral Company) 2006. The Carbon Neutral® Protocol 2006: a framework for effective action on climate change.
- UN (United Nations). 2008. Debate temático de la Asamblea General: La lucha contra el cambio climático: Las Naciones Unidas y el mundo en acción (en línea). Consultado 5 mar 2008. Disponible http://www.un.org/spanish/aboutun/organs/ga/62/president/62/background_climatechange.shtml
- UNFCCC (United Nations for Climate Change Convention, AL). 2008. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (en línea). Consultado 5 mar 2008. Disponible <http://cdm.unfccc.int/Projects/index.html>
- UNFCCC (United Nations for Climate Change Convention, AL). 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Bonn, AL.
- UNFCCC (United Nations for Climate Change Convention, AL). 1992b. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Artículo. Bonn, AL.
- UNFCCC (United Nations for Climate Change Convention, AL). 1992c. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Artículo 7. Bonn, AL.
- UNFCCC (United Nations for Climate Change Convention, AL). 1998a. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Artículo 3. Bonn, AL.
- UNFCCC (United Nations for Climate Change Convention, AL). 1998b. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Artículo 12. Bonn, AL.
- UNFCCC (United Nations for Climate Change Convention, AL). 2001. Informe de la Conferencia de las Partes sobre su séptimo período de sesiones, celebrado en Marrakech (sic) del 29 de octubre al 10 de noviembre de 2001. Adición, Segunda parte. Medidas adoptadas por la Conferencia de las Partes. 3:1-68.
- UNFCCC (United Nations for Climate Change Convention, AL). 2005. Modalities and procedures for a clean development mechanism as defined in Article 12 of the Kyoto Protocol. CMP/2005/8/Ad1, 3/CMP.1 16 p.

- Vallejo, Á. 2005. Maia – software para el monitoreo de proyectos de remoción de carbono bajo el Mecanismo para un desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, 88 p.
- VCS (Voluntary Carbon Standard). 2007. Guidance for Agriculture, Forestry and Other Land Use Projects. 54 p.
- WRI (World Resources Institute). 2005. The Green House Protocol: The GHG Protocol for Project Accounting. Washington, US. 143 p.
- WRI (World Resources Institute). 2006. The Green House Protocol: The Land Use, Land-Use Change, and Forestry Guidance for GHG Project Accounting. Washington, US. 95 p.
- Zamora, S. 2006. Efecto de los pagos por servicios ambientales en la estructura, composición, conectividad y el *stock* de carbono presentes en el paisaje ganadero de Esparza, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, 70 p.