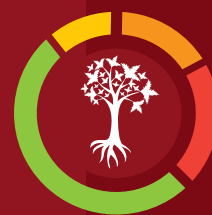




Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia:

SECTOR
FORESTAL
2015



DNP Departamento
Nacional
de Planeación



**TODOS POR UN
NUEVO PAÍS**
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN



BID

IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA

SECTOR FORESTAL

Néstor M. Riaño, Sergio A. Orrego, Héctor I. Restrepo,
Ángela Duque V., Diego Obando B., Daniel Orozco J., Luis B.
Hernández, Yuliet P. Giraldo, Carlos A. León, Silvia Calderón,
Germán Romero, Daniel A. Ordoñez, Andrés Álvarez, Leonardo
Sánchez-Aragón, Carlos E. Ludeña.



DNP Departamento
Nacional
de Planeación



Instituto de Hidrología,
Meteorología y
Estudios Ambientales





Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia

Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo

Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Forestal / Néstor M. Riaño, Sergio A. Orrego, Héctor I. Restrepo, Ángela Duque V., Diego Obando B., Daniel Orozco J., Luis B. Hernández, Yuliet P. Giraldo, Carlos A. León, Silvia Calderón, Germán Romero, Daniel A. Ordóñez, Andrés Álvarez, Leonardo Sánchez-Aragón, Carlos E. Ludeña.

p. cm. — (Monografía del BID; 256)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Economic impact analysis—Colombia. 2. Climatic changes—Colombia. 3. Forest management—Colombia. 4. Carbon sequestration—Colombia. I. Riaño, Nestor M. II. Orrego, Sergio A. III. Restrepo, Héctor I. IV. Duque, Ángela. V. Obando, Diego. VI. Orozco Daniel. VII. Hernández, Luis. VIII. Giraldo, Yuliet P. X. Calderón, Silvia. XI. Romero, Germán. XII. Ordóñez, Daniel A. XIII. Álvarez, Andrés. XIV. Sánchez-Aragón, Leonardo. XV. Ludeña, Carlos E. XVI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático y Sostenibilidad. XVII. Series.

IDB-MG-256

Clasificación JEL: Q54, Q57, O54

Palabras clave: cambio climático, impactos económicos, captura de carbono, especies forestales, trópico, Colombia

Este documento es uno de los análisis sectoriales que conforman la serie "Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia" del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el marco del Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático (ERECC) en América Latina y el Caribe, coordinado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

El presente documento fue preparado por Nestor M. Riaño, Programa Caficultura y Variabilidad Climática, Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafe, y Sergio A. Orrego, Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín), bajo la coordinación de Silvia Calderón, Germán Romero, Daniel A. Ordóñez y Andrés Álvarez, Departamento Nacional de Planeación (DNP) y Carlos Ludeña y Leonardo Sánchez-Aragón (BID), y los aportes de Carlos de Miguel, Karina Martínez y Mauricio Pereira (CEPAL). Se agradece a Alexander Martínez y Andrea C. Torres por el material fotográfico aportado, y a Diana Gutiérrez por los comentarios al documento.

Citar como:

Riaño, N., S. Orrego, H. I. Restrepo, Á. Duque, D. Obando, D. Orozco, L. B. Hernández, Y. P. Giraldo, C. A. León, S. Calderón, G. Romero, D. A. Ordóñez, A. Álvarez, L. Sánchez-Aragón y C. E. Ludeña. 2015. *Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Forestal*. Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 256, Washington D.C.

Copyright © 2015 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra está bajo una licencia Creative Commons IGO 3,0 Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (CC-IGO 3,0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3,0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



<http://www.iadb.org>

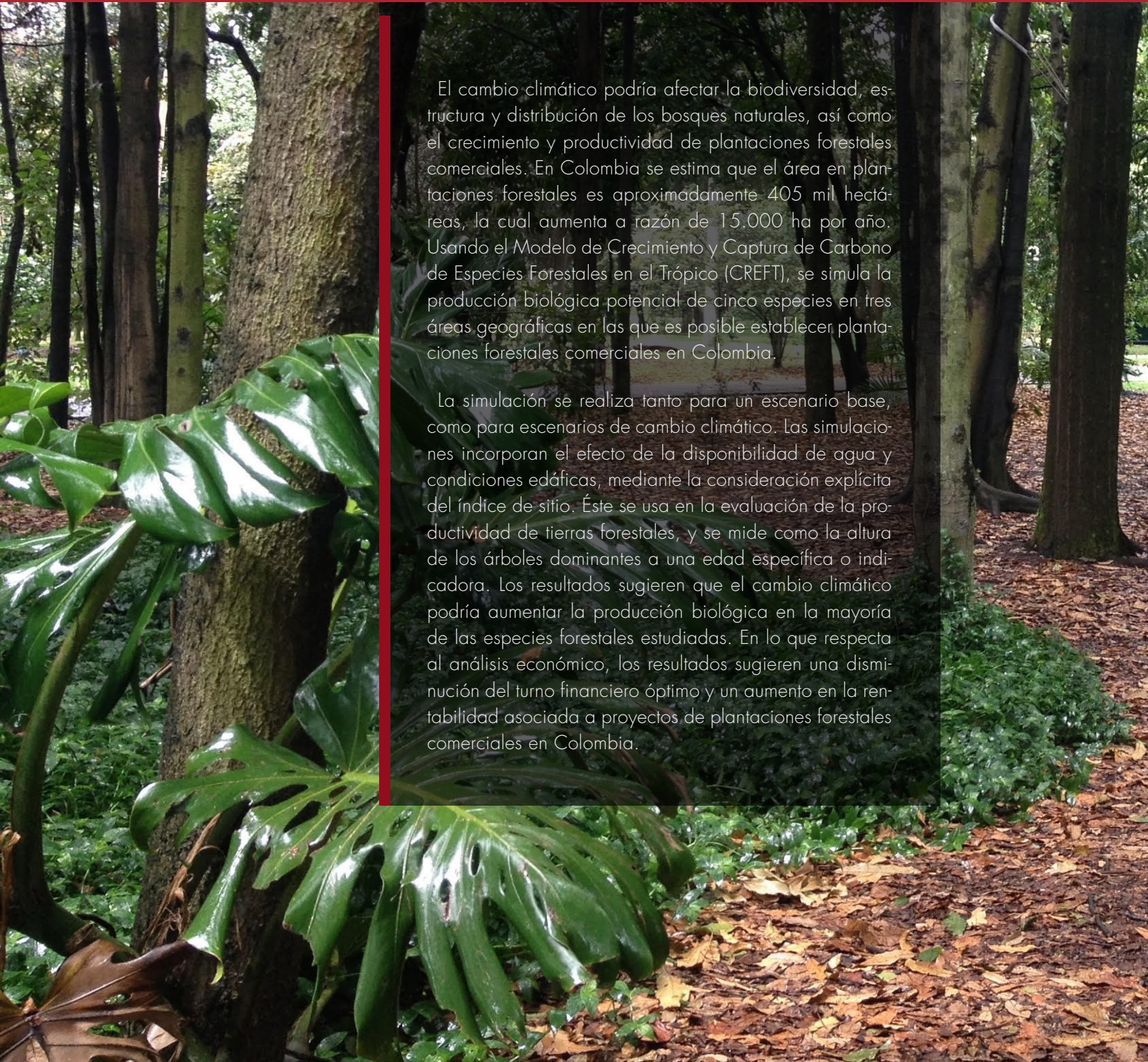
Contenido

IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA: SECTOR FORESTAL

| | | |
|-----------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 6 |
| 2. | METODOLOGÍA E INFORMACIÓN NECESARIA | 7 |
| 2.1. | Modelos de rendimiento forestal | 7 |
| 2.1.1. | Modelos para la simulación forestal | 9 |
| 2.1.2. | Modelo CREFT: crecimiento y captura de carbono de especies forestales en el trópico | 10 |
| 2.2. | Escenarios de cambio climático | 17 |
| 2.3. | Núcleos y especies forestales | 18 |
| 2.3.1. | Núcleo forestal Puerto Libertador | 18 |
| 2.3.2. | Núcleo forestal Villanueva | 19 |
| 2.3.3. | Núcleo forestal Monterrey Forestal | 19 |
| 2.3.4. | Núcleo forestal Región Andina | 19 |
| 2.4. | Métodos para la generación de series de variables climáticas con resolución diaria para el modelo CREFT | 20 |
| 3. | RESULTADOS | 24 |
| 3.1. | Producción forestal, 2010-2100 | 24 |
| 3.2. | Análisis del efecto potencial del cambio climático sobre el turno forestal óptimo y la rentabilidad de plantaciones de <i>Pinus Patula</i> | 28 |
| 4. | MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO | 31 |
| 5. | RECOMENDACIONES DE POLÍTICA | 34 |
| 6. | REFLEXIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE INFORMACIÓN | 36 |
| 7. | CONCLUSIONES | 36 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 37 |



Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: SECTOR FORESTAL



El cambio climático podría afectar la biodiversidad, estructura y distribución de los bosques naturales, así como el crecimiento y productividad de plantaciones forestales comerciales. En Colombia se estima que el área en plantaciones forestales es aproximadamente 405 mil hectáreas, la cual aumenta a razón de 15.000 ha por año. Usando el Modelo de Crecimiento y Captura de Carbono de Especies Forestales en el Trópico (CREFT), se simula la producción biológica potencial de cinco especies en tres áreas geográficas en las que es posible establecer plantaciones forestales comerciales en Colombia.

La simulación se realiza tanto para un escenario base, como para escenarios de cambio climático. Las simulaciones incorporan el efecto de la disponibilidad de agua y condiciones edáficas, mediante la consideración explícita del índice de sitio. Éste se usa en la evaluación de la productividad de tierras forestales, y se mide como la altura de los árboles dominantes a una edad específica o indicadora. Los resultados sugieren que el cambio climático podría aumentar la producción biológica en la mayoría de las especies forestales estudiadas. En lo que respecta al análisis económico, los resultados sugieren una disminución del turno financiero óptimo y un aumento en la rentabilidad asociada a proyectos de plantaciones forestales comerciales en Colombia.



1

Introducción

El cambio climático podría afectar la biodiversidad, estructura y distribución de los bosques naturales (Dale et al., 2010; Bush et al., 2011; Wang et al., 2012), así como el crecimiento y productividad de plantaciones forestales comerciales (Spittlehouse y Stewart, 2003; Savolainen et al., 2007). El cambio climático puede afectar los bosques por la alteración en la frecuencia, intensidad y duración de las sequías e incendios; el inusitado desarrollo de especies introducidas; cambios en la presencia de insectos y brotes de fitopatógenos; el incremento en la ocurrencia y magnitud de huracanes, vendavales, tormentas de nieve, inundaciones y deslizamientos; e interacción entre las diferentes fuentes de perturbación mencionadas (Dale et al., 2001). El cambio climático es el resultado de crecientes emisiones de CO₂ a la atmósfera, originadas por la quema de combustibles fósiles y cambios en el uso de la tierra, específicamente deforestación ocurriendo principalmente en los trópicos (Doumenge et al., 1995; Wibowo y Byron, 1999; Achard et al., 2002; Mahapatra y Kant, 2005; FAO, 2011).

En las próximas dos décadas se espera que aumente el área en plantaciones forestales comerciales, de las cuales se obtendrán productos forestales y, por tanto, podrían reducir la presión ejercida sobre los bosques naturales (Carle y Holmgren, 2008; Amacher et al., 2009; Günter et al., 2009). Además, las plantaciones forestales tienen importancia ambiental por la captura de carbono atmosférico, constituyendo una estrategia factible de mitigación del cambio climático (Sedjo et al., 1995; Wright et al., 2000; van Kooten et al., 2004; Gutiérrez et al., 2006).

En Colombia el área aproximada en plantaciones forestales es 405 mil hectáreas, la cual aumenta a razón de 15.000 ha por año (FAO, 2010). El sector forestal colombiano parece ser bastante atractivo para inversionistas (Cubbage et al., 2007; Cubbage et al., 2010; López et al., 2010) debido a la existencia de un área potencial para el establecimiento de plantaciones forestales estimada en 16 millones de hectáreas (Aldana, 2004), por la magnitud de las tasas de crecimiento, la estratégica ubicación del país (Mendell et al., 2006), y la oportunidad de desarrollo de negocios y la comercialización de productos forestales en el mercado local (PricewaterhouseCoopers, 2007).

El crecimiento forestal es el resultado de dos factores que operan en direcciones opuestas: la tendencia de crecimiento ilimitada o potencial biótico y las restricciones sobre el crecimiento que impone el ambiente (Zeide, 1993). En la literatura especializada, son cuatro los principales factores que se suelen mencionar como determinantes del crecimiento forestal:

- i) la edad del rodal (Moser y Hall, 1969);
- ii) la capacidad productiva del área o calidad del sitio (Walters et al., 1989; Cieszewski y Bailey, 2000; Hall y Bailey, 2001; Louw y Scholes, 2002; Cieszewski, 2004; Diéguez-Aranda et al., 2006; Louw y Scholes, 2006; Bravo-Oviedo et al., 2007);
- iii) las características inherentes al rodal, como densidad de siembra y genética (Reineke, 1933; Pienaar y Turnbull, 1973; Sharma y Zhang, 2004; Calegario et al., 2005);
- iv) el manejo silvicultural como aclareos, podas y fertilización (Pienaar, 1979; Hall y Clutter, 2004). De los cuatro factores, la calidad del sitio es el más estudiado por su significativa

influencia en el crecimiento, y por ser el resultado de condiciones bióticas, edáficas y climáticas (Clutter et al., 1992) que determinan la producción y la productividad forestal.

Tanto la producción forestal, expresada como volumen de madera o cantidad de biomasa seca por unidad de área, como la productividad forestal, equivalente a la producción por unidad de tiempo, podrían afectarse por el cambio climático. El cambio climático se suele estudiar mediante el comportamiento futuro de las variables de temperatura y precipitación en escenarios contrastantes de cambio climático.

Usando un modelo basado en procesos que se desarrolló en Colombia, el Modelo de Crecimiento y Captura de Carbono de Especies Forestales en el Trópico (CREFT), se simuló la producción biológica potencial en cinco especies y en tres áreas geográficas en las que es posible establecer plantaciones forestales comerciales en Colombia. Las especies forestales y áreas estudiadas fueron: *Pinus patula* en la región del eje cafetero y flanco suroccidental y andino de la cordillera central; *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* en la región Caribe y el Alto Magdalena; *Eucaliptus pellita* y *Pinus caribaea* en la región de la Orinoquía. La simulación de la producción forestal potencial con el modelo CREFT se realizó para un escenario base (1970-2010), y para escenarios de cambio climático (2010-2100), en los que se utilizaron series de clima generadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) de las variables temperatura máxima y mínima media mensual, así como series de brillo solar, calculadas por los autores del presente trabajo y considerando resultados de investigaciones previas. Las simulaciones incorporan también el efecto de la disponibilidad de agua y condiciones edáficas, mediante la consideración explícita del índice de sitio, el cual se emplea para la evaluación de la productividad de tierras forestales, y se mide como la altura de los árboles dominantes a una edad específica o indicadora.

Los valores de producción forestal simulados con el modelo CREFT y un flujo de ingresos y egresos promedio pero representativo de proyectos forestales de plantaciones de *Pinus patula*, por ser la especie con mayor área plantada en Colombia, se usaron en un análisis económico sectorial orientado a la evaluación de posibles cambios en los turnos financieros óptimos y en la rentabilidad de los proyectos.

Los resultados sugieren que el cambio climático podría aumentar la producción biológica en la mayoría de las especies forestales estudiadas. En lo que respecta al análisis económico en *Pinus patula*, los resultados sugieren una disminución del turno financiero óptimo y un aumento en la rentabilidad asociada a proyectos de plantaciones forestales comerciales en Colombia, esto contrasta con resultados en sectores como agricultura y ganadería, que presentan pérdidas potenciales en rendimientos, tal y como se muestra en BID-CEPAL-DNP (2014).

2

Metodología e información necesaria

2.1. Modelos de rendimiento forestal

El estudio del crecimiento de árboles y rodales se remonta a los orígenes mismos de la silvicultura. Sin embargo, las primeras aproximaciones cuantitativas datan de principios



del siglo XX, con la aplicación de tablas y curvas de rendimiento para ciertas especies forestales y áreas geográficas específicas (Pienaar y Turnbull, 1973; Dennis et al., 1985; Peng, 2000). Posteriormente, emergieron técnicas de suavizamiento tales como el análisis de regresión (Pienaar y Turnbull, 1973), y luego la aparición de los computadores y de nuevas técnicas estadísticas conllevó al uso de modelos que remplazaron las tradicionales tablas de rendimiento (Moser y Hall, 1969).

Las predicciones del crecimiento y el rendimiento en plantaciones forestales son importantes por varias razones (Moser y Hall, 1969; Hall y Bailey, 2001): *i)* para entender la compleja interacción entre los factores del sitio y la productividad forestal; *ii)* para evaluar los beneficios de las prácticas silviculturales y la capacidad de adaptación ambiental de especies forestales; *iii)* para identificar riesgos ambientales y económicos; *iv)* para predecir la rentabilidad; *v)* para desarrollar programas de planificación de la producción forestal.

En la modelación de las interacciones entre el ambiente y el rendimiento forestal existen tres modelos distintos: empíricos, basados en procesos e híbridos, entendiendo estos últimos como un nivel intermedio entre los modelos empíricos y aquellos basados en procesos. En cualquiera de estos modelos se pueden emplear los siguientes niveles de detalle: árbol individual dependiente de la distancia, árbol individual independiente de la distancia y rodal (Peng, 2000). La aplicación de los modelos depende, en esencia, del propósito particular del estudio, así como de la disponibilidad de datos (tabla 1).

Tabla 1. Principales características de los modelos de crecimiento y rendimiento forestal

| | Modelos empíricos | Modelos basados en procesos |
|---|--|--|
| Aplicación principal | Manejo forestal | Investigación científica |
| Manejo forestal | Alta | Baja |
| Investigación | Intermedio | Alto |
| Servicios de extensión | Alto | Bajo |
| Tiempo de predicción | Corto plazo | Largo plazo |
| Complejidad | De baja a alta | Alta |
| Flexibilidad | Intermedia | Baja |
| Parámetros del modelo | De pocos a muchos | Muchos |
| Mediciones de parcelas | Muchas | Ninguna a pocas |
| Medición de factores ambientales | Índice de sitio, características ambientales | Temperatura, luz, agua, nutrientes y perturbaciones. |

Fuente: Peng (2000).

La tendencia de los trabajos más recientes de modelación del rendimiento forestal consiste en el uso de varios métodos estadísticos, los cuales proporcionan información para la toma de decisiones sobre la planificación de la producción forestal (Calegario et al., 2005). En el análisis empírico del crecimiento y el rendimiento forestal se han empleado básicamente tres técnicas de modelación estadística: regresión no paramétrica (Sironen et al. 2003), árboles de regresión (Gadbury et al., 1998) y modelos de efectos mixtos (Walters et al., 1989; Clutter et al., 1992; Trasobares et al., 2004; Wang et al., 2005; Louw y Scholes 2006; Bravo-Oviedo et al., 2007; Zapata, 2007).

Aunque en algunos casos el primer método de modelación explica satisfactoriamente el rendimiento forestal, éste generalmente se considera exploratorio (Härdle, 1989), al igual que la segunda técnica de modelación. En cuanto a los modelos de efectos mixtos, éstos describen relaciones entre una variable de respuesta y covariables agrupadas en uno o más factores (Pinheiro y Bates, 2000).

2.1.1. Modelos para la simulación forestal

Los modelos basados en procesos, también conocidos como modelos exploratorios, causales o mecanicistas, se basan en procesos de tipo biológico, químico y físico, que constituyen el fundamento del crecimiento y desarrollo vegetal y buscan representar las relaciones de causalidad en forma explícita (France et al., 1984; Whisler et al., 1986). Este tipo de modelos de simulación de tipo exploratorio se construyen sobre la base de una estructura organizada de tipo jerárquico, lo que los hace viables de desarrollar en la agricultura. Los sub-modelos están conectados según los niveles de la organización (ecosistema, plantación, árbol, órgano, tejido) y conducen al entendimiento de niveles jerárquicos superiores mediante la investigación y el estudio riguroso de niveles jerárquicos inferiores (Montoya et al., 2009).

Los modelos basados en procesos se diseñaron inicialmente para la investigación y posteriormente se implementaron como herramienta de toma de decisiones (Monserud, 2003). En plantaciones forestales los modelos basados en procesos inicialmente comenzaron con relaciones empíricas de productividad-ambiente, a escalas espaciales de finas a gruesas. Varios autores (Johnsen et al., 2001; Korzukhin et al., 1996; Stage, 2003) consideran los modelos basados en procesos muy convenientes para investigar la dinámica forestal en condiciones ambientales no observadas en el presente. Las aproximaciones iniciales de los modelos basados en procesos se centraron en el crecimiento de árboles de una sola especie a determinada edad y para un rodal forestal homogéneo, con retos representados en su aplicación a múltiples especies y rodales forestales mixtos (Mäkelä, 2003).

Este tipo de modelos se caracterizan por su complejidad y cantidad de procesos, requiriendo la estimación de una considerable cantidad de parámetros y variables para usarse como herramientas de manejo (Bartelink y Mohren 2004). La complejidad dificulta el seguimiento a un comportamiento determinado y encontrar la causa que es importante para evaluar la confiabilidad y larobustez del modelo. Sin embargo, ejemplos como el modelo forestal 3PG (Physiological Principles in Predicting Growth), desarrollado y descrito por Landsberg y Waring (1997), es considerado sencillo y se usa en plantaciones como herramienta de manejo (Almeida et al., 2004). También se reportan casos en los que las simulaciones con modelos basados en procesos son iguales o de mayor precisión que los tradicionales modelos estadísticos de crecimiento y rendimiento en una perspectiva de manejo forestal (Fontes et al., 2006; Miehle et al., 2009).

Una caracterización de los veinticinco principales modelos basados en procesos utilizados en Europa, sugiere que dados los subsistemas ecológicos involucrados, se requiere para la calibración y validación gran cantidad de datos, los cuales no siempre están disponibles. En general, los modelos basados en procesos se han parametrizado principalmente para especies de coníferas y latifoliadas y son relativamente nuevos en el sector forestal,



apareciendo a partir de la década de los años noventa, lo que contrasta con los modelos empíricos propuestos hace más de dos centurias (Fontes et al., 2010).

Aunque los modelos causales relacionan procesos que se manifiestan a diferentes escalas, se recomienda no trabajar con escalas excesivamente amplias (Leffelaar, 1990). Es por ello recomendable considerar procesos de cloroplastos a hojas, de hojas a ramas, y de allí a la copa y al tallo. También se considera importante la escala temporal de las simulaciones, aunque estudios a escala diaria u horaria podría ser computacionalmente intensivos o producir errores de medición de los procesos, lo que podría generar estimaciones poco confiables.

En general, las variables de entrada al sistema en los modelos basados en procesos corresponden a elementos climáticos como la temperatura y la precipitación, así como la radiación y el déficit de presión de vapor de agua en el aire. La textura y profundidad, son los datos de entrada más comunes relacionados con los suelos del sitio. La mayoría de los modelos simulan el crecimiento de rodales, expresado en volumen, altura media, diámetro medio, índice de área foliar o existencias de carbono (Fontes et al., 2010).

2.1.2. Modelo CREFT: crecimiento y captura de carbono de especies forestales en el trópico

Fontes et al. (2010) señalan la existencia de pocos modelos basados en procesos para las áreas tropicales, considerando posiblemente como inadecuados el uso de modelos propuestos para regiones templadas. Es por ello que Riaño et al. (2005) desarrollaron en Colombia una herramienta computacional denominada CREFT. Esta herramienta permite simular adecuadamente procesos eco-fisiológicos como la fotosíntesis, la respiración y la distribución de asimilados. Procesos que son determinados por la oferta climática de un sitio, específicamente la radiación fotosintéticamente activa (RFA) y la temperatura.

La construcción del modelo se basa en la estrategia propuesta por De Wit y Penning de Vries (1982), la cual define cuatro niveles de producción. El primer nivel corresponde a la capacidad de producción potencial alcanzada en condiciones con suficiente y adecuada cantidad de agua y nutrientes en el suelo (Riaño et al., 2012). El segundo nivel corresponde a la situación en la que el crecimiento es limitado por el déficit de agua. En el nivel tres el factor limitante importante es el nitrógeno, y en el cuarto la disminución de fósforo y otros elementos nutricionales. Actualmente el nivel de desarrollo del modelo CREFT en Colombia corresponde al primer nivel; es decir, a producción biológica potencial.

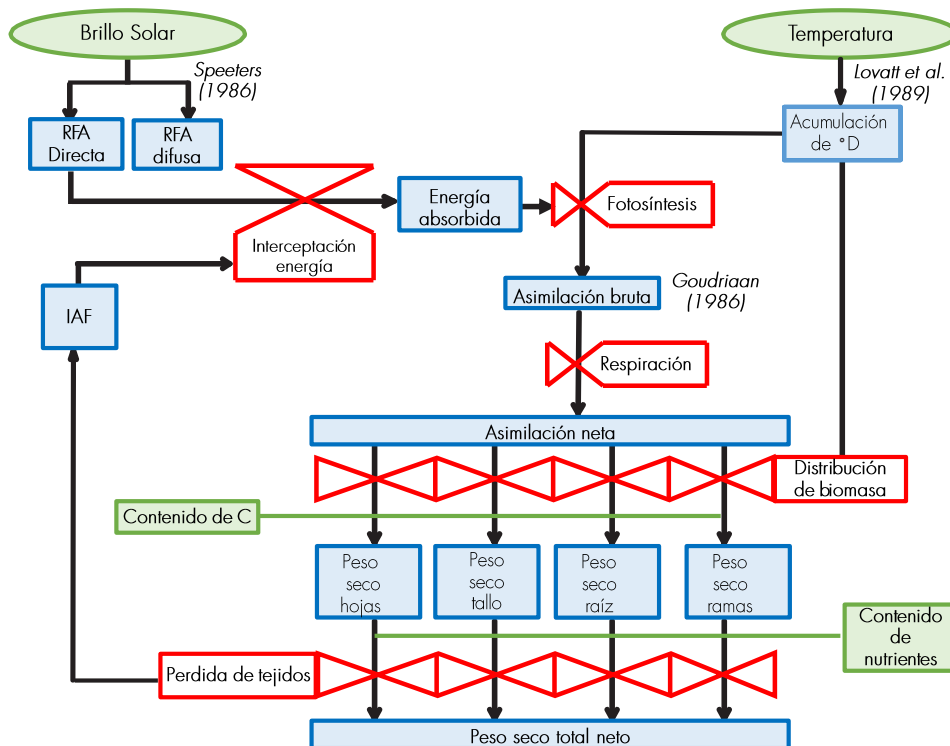
Para el desarrollo del modelo se realizaron mediciones de intercambio gaseoso bajo diferentes condiciones ambientales, con el propósito de determinar los valores de respuesta de la fotosíntesis a la RFA y a la temperatura. Así, a partir de modelos matemáticos se obtuvieron los parámetros fisiológicos de eficiencia cuántica, respiración oscura y asimilación máxima. También se evaluó la distribución de la radiación en la planta, midiendo la cantidad de radiación sobre la copa de los árboles y dentro de ella, determinando otros parámetros como el coeficiente de extinción de la luz (k).

El software CREFT tiene una escala temporal diaria y corre bajo entorno Web. Las especies forestales inicialmente parametrizadas en CREFT fueron especies forestales con importancia comercial en el país. Específicamente *Pinus patula*, *Pinus caribaea*, *Pinus tecunumanii*, *Eucaliptus grandis*, *Eucaliptus pellita*, *Acacia mangium*, *Tectona grandis*, *Gmelina arborea*, así como *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* y *Pachira quinata*.

Otra característica del modelo CREFT es que permite a través de una subrutina denominada SueMulador (Simulación de Clima), obtener valores diarios faltantes en una serie de datos meteorológicos y para el sitio en que se realiza la simulación de la producción potencial. Entre los resultados de la simulación se tiene el crecimiento a nivel de árbol o de rodal expresado en volumen, la distribución del peso de la biomasa y el almacenamiento de carbono.

En la figura 1 se resume el modelo CREFT, en la que las elipses representan las variables de entrada, los triángulos los procesos, los rectángulos las variables de estado (valores que resultan de un proceso y alimentan otro) o cálculos adicionales, y las flechas representan rutas críticas. Adicionalmente, se presenta la correspondiente cita que respalda un módulo o proceso del sistema. Los insumos mínimos requeridos para estimar el crecimiento biológico potencial en el CREFT son datos diarios de clima del sitio donde se desea realizar la simulación. Específicamente, brillo solar y temperatura máxima y mínima diarios.

■ **Figura 1.** Esquema del sistema del modelo CREFT, variables de entrada, variables de estado y procesos simulados



Fuente: Elaboración propia



Módulo de clima, radiación y temperatura

Parte de la radiación directa se transforma en difusa (o radiación sin ninguna dirección preferencial) debido al fenómeno de la dispersión, resultante de la presencia en la atmósfera de vapor de agua, partículas de polvo y otras moléculas presentes en el aire. Otra parte de la radiación solar es absorbida por la atmósfera. La forma más utilizada para medir la radiación incidente es mediante el brillo solar. Éste equivale al tiempo durante el cual las nubes no ocultan el sol, y técnicamente mide el número de horas al día durante el cual la intensidad de la radiación solar directa es superior a 250 Wm^{-2} . El instrumento recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) es el registrador Campbell-Stokes.

Angström (1924), Spitters (1986a), Burman y Pochop (1994), y Gómez y Guzmán (1995), desarrollaron y adaptaron una metodología a partir de la cual se logra estimar la radiación total y sus componentes con base en los datos de brillo solar medido (n), latitud (λ) y día del año a partir del primero de enero (t_d), usando la siguiente ecuación:

$$S_g = S_0 \cdot (a + b \cdot (n/N)) \quad (1)$$

donde:

S_g Radiación global ($\text{W} \cdot \text{m}^2$).

S_0 Radiación extraterrestre o "radiación de Angot" ($\text{W} \cdot \text{m}^2$).

a y b Coeficientes de la regresión de Ångström (se utilizaron los valores de a y b propuestos por Gómez y Guzmán (1995)).

n Brillo solar medido.

N Brillo solar astronómicamente posible.

La radiación extraterrestre o "radiación de Angot" (S_0) ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) según Van der Goot (1997) está descrita por la siguiente ecuación:

$$S_0 = S_{cs} [1 + 0,033 \cos(360t_d \cdot 1.365)] \text{sen } \beta \quad (2)$$

donde:

S_{cs} Constante solar ($1.360 \text{ W} \cdot \text{m}^2$).

$\text{Sen } \beta$ Seno del ángulo de elevación solar, con respecto al horizonte.

t_d Día a partir del primero de enero.

El Factor $\text{Sen}\beta$ se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{sen } \beta = \text{sen } \lambda \cdot \text{sen } \delta + \cos \lambda \cdot \cos \delta \cos[15(t_h - 12)] \quad (3)$$

donde:

λ Latitud.

δ Angulo de declinación solar.

th Hora del día.

Según Spitters (1986b) el ángulo de declinación solar se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\text{sen } \delta = -\text{sen}(23,45) \cdot \cos[360 \cdot (t_d + 10)/365] \quad (4)$$

El brillo solar astronómicamente posible (N) se calculó por medio de la siguiente ecuación, propuesta por Gómez y Guzmán (1995):

$$N = 2/15(\text{arcos}(-\tan \lambda \cdot \tan \delta)) \quad (5)$$

En síntesis, a partir de la información de brillo solar medido, latitud y día a partir del primero de enero, es posible calcular de manera confiable la radiación global y la RFA. Para la consideración de la temperatura como fuente de variación en las tasas de crecimiento de las diferentes especies forestales, se generaron las ecuaciones que describen el desarrollo en función del tiempo térmico (Grados día acumulados-Dacum), el cual se calculó por medio de las ecuaciones propuestas por Lovatt et al. (1989).

Cada etapa del desarrollo de un organismo tiene su propia exigencia de temperatura, desarrollo que puede estimarse por medio de los Dacum entre los umbrales de temperaturas fisiológicas adecuadas (límite inferior Li y límite superior Ls). Para calcular el Dacum o tiempo térmico en el modelo se usó el método de *Seno Simple*, el cual describe un comportamiento de temperatura diaria simétrico alrededor de la temperatura máxima y con temperaturas mínimas iguales. Dinámica d método De Seno Simple e temperatura que es característica de las condiciones ecuatoriales inter-tropicales. Los valores cardinales de temperatura para cada especie forestal se obtuvieron de experimentos realizados en campo a partir de mediciones de fotosíntesis a diferentes temperaturas.

Módulo de interceptación de la radiación y fotosíntesis

Se calcularon los parámetros de asimilación máxima (Am), RFA y épsilon (ϵ), ajustando los datos de asimilación de CO_2 mediante el modelo descrito en la siguiente ecuación:



$$A = (A_m + R_d) \left[1 - e^{-\frac{\varepsilon \cdot RFA}{A_m + R_d}} \right] - R_d \quad (6)$$

donde:

- A Asimilación neta de CO_2 en hojas individuales ($\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$).
- A_m Asimilación máxima de CO_2 como la asíntota de la regresión que describe la relación entre la RFA y la asimilación instantánea de CO_2 en hojas individuales ($\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$).
- R_d Respiración oscura ($\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$).
- ε Rendimiento cuántico de la hoja (aceleración de la fase inicial de la regresión que describe la relación entre la RFA y la asimilación instantánea de CO_2 en hojas individuales).

Las demás relaciones empíricas de dos variables se ajustaron con modelos no lineales y el algoritmo de Levenberg-Marquardt (1963) utilizando Sigmaplot 10. Se asoció la asimilación con las variables TL y RFA , y la asimilación con el Déficit de Presión de Vapor del aire DPV y la RFA . En cada caso se utilizaron relaciones empíricas tridimensionales las cuales se modelaron a través del ajuste de paraboloides de la forma:

$$f = y_0 + ax + by + cx^2 + dy^2 \quad (7)$$

Para obtener los máximos se igualaron las derivadas parciales a cero como lo indica la ecuación, se calcularon los puntos críticos y se reemplazaron en la función original.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= a + 2cx = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y} &= b + 2dy = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Para calcular la fotosíntesis del dosel completo de la planta a partir de la asimilación máxima en hojas individuales, el modelo CREFT usa la ecuación propuesta por Goudriaan (1986), la cual relaciona algunos parámetros generados en mediciones de hojas individuales con el Índice de Área Foliar IAF , la RFA y el coeficiente de extinción de la luz, k , para obtener una estimación aproximada del valor de la asimilación instantánea de CO_2 en la planta completa mediante la siguiente ecuación:

$$A_p = \frac{A_m}{k} L_n \left(\frac{A_m + \varepsilon \cdot k \cdot RFA}{A_m + \varepsilon \cdot k \cdot RFA \cdot e^{-kLAF}} \right) AFT \quad (9)$$

donde:

- A_p* Asimilación instantánea de CO₂ en la planta completa (μmol(CO₂) m²s⁻¹).
- A_m* Asimilación máxima como la asíntota de la regresión que describe la relación entre la RFA y la asimilación instantánea de CO₂ en hojas individuales (μmol(CO₂)m²s⁻¹).
- ε* Rendimiento cuántico de la hoja como la aceleración de la fase inicial de la regresión que describe la relación entre la *RFA* y la asimilación instantánea de CO₂ en hojas individuales (μmol(CO₂)m²s⁻¹).
- k* Coeficiente de extinción de la luz.
- LAF* Índice de área foliar (parámetro que ingresa al modelo en función del tiempo térmico).
- AFT* Área foliar total (m²).

Para la determinación de la cantidad de energía usada por los cultivos, los estudios de interceptación de radiación generalmente usan modelos que consideran cantidad, dimensiones y orientación del follaje, distribución del área foliar, ángulos de inserción de las ramas y hojas y la radiación solar directa y difusa (Ross, 1981). La aplicación de los modelos se complica por la excesiva cantidad de variables requeridas.

Existen modelos de radiación que describen el comportamiento de la luz a través del follaje, ya sea en plantas individuales, o en follajes densos (Saeki, 1993) y discontinuos (Jackson y Palmer, 1979). Estos modelos se basan en la ley de Beer, la cual establece que la radiación solar que incide en la parte aérea de la planta disminuye exponencialmente con el índice de área foliar acumulado. La ley establece que la transmisión de la energía luminosa a través de un sistema, está en función de la absorción y reflexión de fotones con frecuencia y longitud de onda determinadas, así como de la concentración de moléculas que interfieren el paso de la misma. La ley está dada por la siguiente ecuación:

$$I = I_0 e^{-k[\text{moléculas}]} \quad (10)$$

donde:

- I* Energía luminosa transmitida a través de un espacio determinado.
- I_o* Energía luminosa que entra al sistema.
- k* Tasa de absorción de la energía en un espacio determinado.
- moléculas* Concentración de moléculas en el sistema.



Al usar la ley en el estudio de la transmisión de energía a través del dosel, Monteith (1965), determinó que la energía se extingue exponencialmente desde el tope del dosel hasta el piso por la acumulación de las hojas en distintas capas. Fue por ello que se reescribe la Ley de Beer como:

$$I = I_0 e^{-kIAF} \quad (11)$$

donde:

I Energía luminosa transmitida hasta una profundidad del dosel determinada.

I_0 Energía luminosa en el tope del dosel.

k Coeficiente de extinción de la radiación a través de la capa de hojas hasta la profundidad determinada.

IAF Índice de área foliar acumulado hasta la profundidad determinada.

El valor del coeficiente de extinción de la luz (k) a través del dosel para una especie vegetal, dependerá directamente de su arquitectura y particularmente del área foliar. Lo anterior permite estimar el IAF de la especie, realizando mediciones de la energía luminosa en el tope del dosel y hasta una distancia vertical determinada.

Módulo de distribución de biomasa

La biomasa es posible clasificarla como biomasa aérea (aquella fitomasa viva que se encuentra por encima del nivel del suelo), masa muerta o necromasa (compuesta por detritos gruesos y finos que se acumulan sobre el suelo), y biomasa subterránea, que corresponde fundamentalmente a las raíces (Rodríguez, 1989).

Para cada una de las especies forestales consideradas en el modelo CREFT, se establecieron parcelas de 250 m² en rodales de edades distintas. Los árboles en la parcela se marcaron, numeraron y se midió su diámetro normal a 1,3m de altura (dn), el que se usó para calcular el área basal por árbol (Gx_i) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Gx_i = (\pi \cdot (dn^2)/4) \quad (12)$$

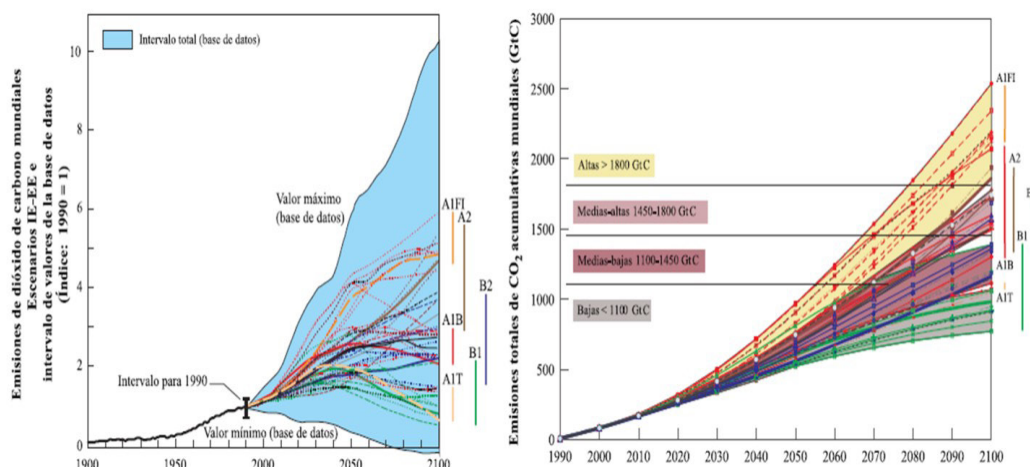
Luego se calculó el área basal de la parcela (G), mediante la sumatoria de las áreas basales individuales. El área basal de la parcela (G) se dividió por el número de árboles dentro de la parcela, obteniendo el área basal promedio. De la ecuación anterior se despejó dn , para obtener el diámetro normal promedio (dnx), también denominado diámetro promedio cuadrático. Luego en campo se seleccionó el árbol con valor de dn más cercano al dnx , el cual se cosechó y se le midió su longitud, diámetros a cada décimo de su longitud, el espesor de la corteza, y se obtuvo el peso fresco de cada parte del árbol, incluida la raíz.

2.2. Escenarios de cambio climático

La valoración del cambio climático futuro se basa en una estructura jerárquica, incluyendo desde modelos de circulación general atmósfera-océano (AOGCM), modelos del sistema terrestre de complejidad intermedia (EMIC), y modelos simples de clima (SCM). Los modelos están modulados por concentraciones diferenciales de gases con efecto invernadero (GEI) y escenarios contrastantes de emisiones, desde aquellos que no consideran mitigación hasta aquellos escenarios en los que la mitigación es un aspecto fundamental. Las proyecciones de cambio climático se basan ahora en promedios obtenidos de varios modelos. No obstante, todos los modelos en los escenarios de no-mitigación, proyectan incrementos en la temperatura media superficial del aire (SAT) durante el siglo XXI, asociados con incrementos por efectos antrópicos de las concentraciones de GEI y también con fuerzas radiativas. Para estudiar el impacto económico del cambio climático en el sector forestal, particularmente de plantaciones comerciales y un horizonte temporal hasta finales del presente siglo, se seleccionaron tres escenarios consignados en el reporte especial del IPCC sobre escenarios de emisiones sin mitigación (IPCC, 2007) (figura 2), los cuales se han regionalizado para Colombia.

El escenario A2 con incrementos de 3,4 °C, rango de 2,0 °C a 5,4 °C, asociado con un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas de evolución del clima futuro (IPCC, 2000).

■ **Figura 2.** Escenarios del IPCC para las emisiones de CO₂ a escala mundial y emisiones acumuladas



Fuente: IPCC (2000)



El escenario B2 con incrementos de 2,4 °C, rango de 1,4 °C a 3,8 °C, describe un mundo en el cual predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población crece progresivamente a un ritmo menor que en el escenario A2, con niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional (IPCC, 2000).

El escenario A1B con incrementos de 2,8 °C, rango de 1,7 °C a 4,4 °C, se asocia con un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Esta línea evolutiva considera la utilización equilibrada de todo tipo de fuentes de energía de origen fósil y no fósil (IPCC, 2000).

Para Colombia, el IDEAM (2010) usó la herramienta RCLimindex y el análisis de series históricas de 600 estaciones, con información de precipitación acumulada diaria y los extremos diarios de temperatura máxima y mínima. En general, se identificó un comportamiento uniforme en el incremento de la temperatura, con mayor aumento de la temperatura mínima (noche) que la temperatura máxima (día). La temperatura promedio para el país permite concluir que aumentará 0,17 °C por década. En cuanto a la precipitación se presentarían disminuciones en unos sitios pero aumentos en otros, lo cual podría explicarse por la variabilidad topográfica del país y la exposición de diferentes regiones a corrientes de aire con humedad.

2.3. Núcleos y especies forestales

Para el presente estudio se seleccionaron las siguientes cinco especies forestales: *Pinus patula*, *Tectona grandis*, *Eucaliptus pellita*, *Gmelina arborea*, y *Pinus caribaea*. Especies que se consideran representativas del área total de plantaciones forestales comerciales en Colombia, así como de diversas y contrastantes regiones geográficas. Las especies forestales seleccionadas están sembradas en núcleos forestales (figura 3), los cuales se describen de manera general a continuación.

2.3.1. Núcleo forestal Puerto Libertador

En la costa norte de Colombia, suroccidente del departamento de Córdoba, zona del alto San Jorge, la empresa Carbones del Caribe del grupo Argos extrae carbón, y su filial la Reforestadora del Caribe S.A. realiza actividades de reforestación, al oeste del municipio de Puerto Libertador, con ubicación 7°53' de latitud norte y 75°40' de longitud oeste. Las especies forestales sembradas son *Tectona grandis* y *Acacia mangium*, con un área sembrada equivalente a 1.745 y 98 ha, respectivamente. En la zona el relieve representativo es plano (0 a 500 msnm), con presencia de colinas. Los suelos corresponden a los típicos de planicie aluvial no inundable, desarrollados en colinas, bien drenados, fértiles, profundos y mecanizables. Taxonómicamente los suelos pertenecen al grupo de los entisoles, con escaso desarrollo genético.

2.3.2. Núcleo forestal Villanueva

El núcleo está localizado en el departamento de Casanare, noroccidente de la Orinoquia, en la formación geológica conocida como "Mesa de San Pedro", con una extensión de 3.525 ha. Limita con el área urbana del municipio de Villanueva y con fincas de propiedad de particulares, en las que prevalecen la ganadería y el establecimiento de cultivos. En el núcleo se encuentra La hacienda Huerta la Grande, ubicada a 4°39' de latitud norte y 72°54' de longitud oeste. Las especies forestales más sembradas son *Pinus caribaea*, 1.427 ha, y *Eucaliptus pellita*, 374 ha. De acuerdo con los registros en la Estación Climatológica Huerta La Grande, la precipitación acumulada anual es 2.845 mm y la temperatura media promedia anual es 26 °C. La Mesa de San Pedro cuenta con suelos arenosos a francos arenosos, muy lavados y, por consiguiente, con bajo nivel de fertilidad, ácidos, pobres en materia orgánica, fósforo, potasio, magnesio y elementos menores (Refocosta, 2013).

2.3.3. Núcleo forestal Monterrey Forestal

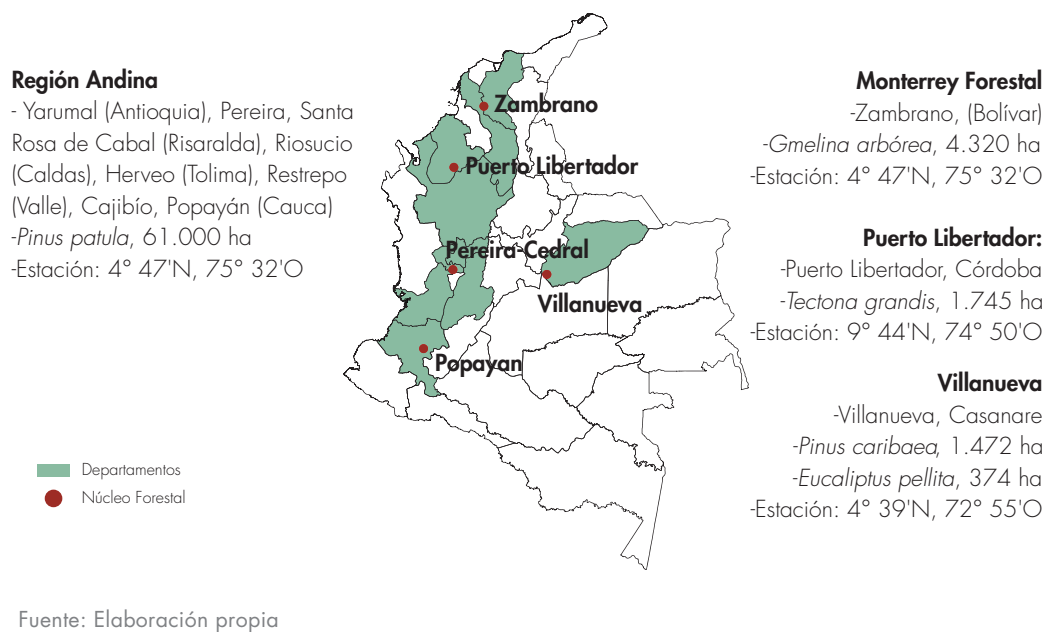
La reforestadora Pizano S.A. y su filial Monterrey Forestal Ltda., poseen 20.000 ha, de las cuales 12.148 ha están dedicadas a la producción forestal. La actividad se desarrolla principalmente en la hacienda Monterrey ubicada en los municipios de Zambrano y Córdoba (Bolívar), a 9°39' de latitud Norte y 74°54' de longitud Oeste. Las principales especies forestales sembradas son *Gmelina arborea* y *Pachira quinata*, 4.320 y 1.480 ha, respectivamente. La temperatura es relativamente uniforme durante el año, con una media promedio anual de 27,5 °C, mientras los registros de precipitación de los últimos 38 años muestran un promedio acumulado anual de 970 mm, presentando una estructura climática monomodal con las mayores lluvias ocurriendo entre junio y septiembre, y las menores entre noviembre y febrero. La zona corresponde a bosque seco tropical, según la clasificación de Holdridge (Rubiano, 2010).

2.3.4. Núcleo forestal Región Andina

De acuerdo con Ospina et al. (2011) la especie *Pinus patula* continúa siendo ampliamente utilizada en los proyectos de reforestación en la región andina de Colombia, con un área sembrada de 61.000 ha en el año 2010. Los principales núcleos forestales de *P. patula* se encuentran en los departamentos de Antioquia, Risaralda, Caldas, Tolima, Valle del Cauca y Cauca. Los principales reforestadores en el país con la especie *P. patula* son Smurfit Kappa-Cartón de Colombia S.A, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-Programa KFW, Argos e Industrias Forestales Doña María S.A. La especie se cultiva en la franja altitudinal 1.500-3.100 msnm, y precipitaciones acumuladas anuales entre 600 y 2.500 mm. Los núcleos forestales de Cartón de Colombia con *P. patula* equivalen a un área de 24.580 ha. La estación meteorológica que representa análogamente el clima de muchos de los núcleos con *P. patula* es la estación El Cedral, ubicada en el municipio de Pereira, 4°42' de latitud Norte y 75°32' de longitud Oeste, a una altitud de 2.120 msnm, con temperatura media promedia anual de 15 °C y precipitación acumulada anual de 2.750 mm.



■ **Figura 3.** Localización de los núcleos forestales considerados en el estudio

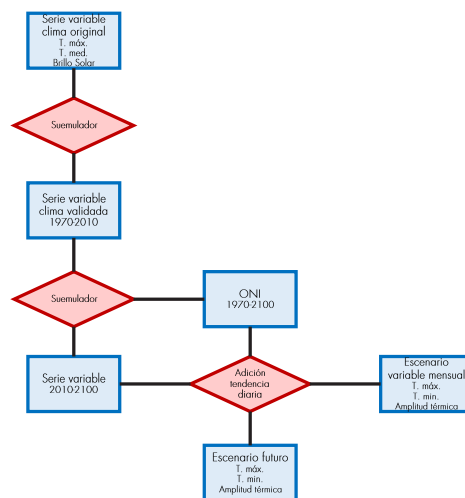


2.4. Métodos para la generación de series de variables climáticas con resolución diaria para el modelo CREFT

En cada núcleo forestal se identificó la estación climatológica más cercana. Estas correspondieron a las estaciones Monterrey (Finca Monterrey, Zambrano, Bolívar), estación El Cedral (Finca El Cedral, Pereira, Risaralda), estación Huerta la Grande (Hacienda Huerta la Grande, Villanueva, Casanare) y Turipaná (Centro Nacional de Investigaciones de Corpoica /Turipaná, Cereté, Córdoba), de las cuales el IDEAM proporcionó las series de datos diarios para las variables climáticas temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, periodo 1970-2010. El IDEAM suministró también los resultados de las simulaciones de datos climáticos medios y acumulados mensuales para las mismas variables antes mencionadas, y para los escenarios de cambio climático.

La ruta crítica empleada para calcular los datos diarios de las variables de clima y los escenarios climáticos se presenta en la figura 4. Se validaron las series diarias originales para las variables climáticas (temperatura máxima, temperatura mínima y brillo Solar) se validaron con el software SueMulador (Chica et al., 2013), para el periodo 1970-2010 y cada una de las estaciones seleccionadas. La validación permitió el cálculo de datos faltantes y asegurar que los valores de los datos estuviesen en el rango previsible. Usando el SueMulador cada serie de datos validada se utilizó como semilla para el cálculo de los datos a resolución diaria, periodo 2010-2100. El SueMulador es una herramienta de simulación de clima que se basa en un proceso estocástico que usa cadenas de Markov de grado 2, alimentado con índices de oscilación del niño (ONI) (Anexo 1). Los índices caracterizan los meses en función de los tres estados asociados al ONI (Niño, Niña y Neutro). Uno de los tres estados se asocia a cada registro de la variable según la fecha, para luego calcular los datos faltantes en la serie actual o la serie futura que se desea generar.

■ **Figura 4.** Ruta crítica para el cálculo de datos diarios en series futuras de escenarios de cambio climático, 2010-2100

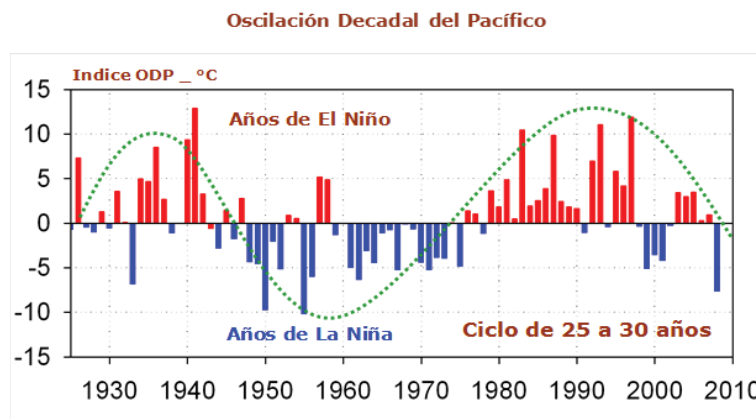


Fuente: Elaboración propia

Los índices ONI disponibles desde 1950 se incorporan automáticamente al SueMulador directamente de la página de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA), y se actualizan con una periodicidad mensual. Para calcular los valores diarios de cada una de las variables de clima hasta el año 2100, se procedió a incorporar los valores de índice ONI hasta ese año, usando como referencia los reportes asociados con la oscilación decadal del Pacífico. Esta oscilación permite determinar una onda cíclica de la temperatura de la superficie oceánica del Pacífico, con la presencia de ONI y una probabilidad de presencia de los fenómenos Niño, Niña o Neutro, para el periodo 1920-2010 (figura 5).

Se aplicó luego a los datos un modelo de Fourier para estimar la frecuencia y longitud de onda que mejor explican la oscilación, que se asume se mantendrá hacia el futuro. El

■ **Figura 5.** Adaptación del comportamiento de la oscilación decadal del pacífico y el índice ONI, 1920-2010



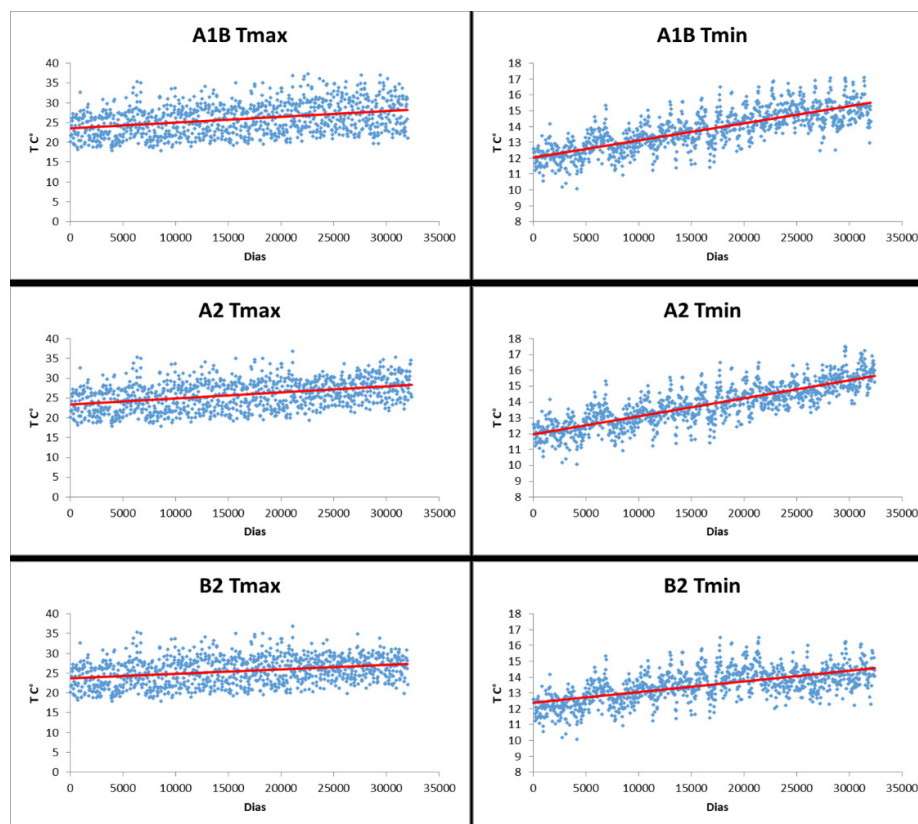
Fuente: Elaboración propia



mejor modelo correspondió al evento que inició en abril de 1980 y terminó en abril de 2013, y como ya se indicó se asume que se repite de manera cíclica desde mayo de 2013 hasta diciembre de 2100. Con el fin de incorporar la variabilidad climática en los escenarios futuros A2, A1B y B2 usados en el presente estudio, se utilizó el SueMulador para calcular los valores diarios de las variables climáticas temperatura máxima y mínima. Puesto que la información de escenarios para brillo solar no fue suministrada, y dado que es una variable de entrada fundamental para correr el modelo CREFT, se procedió a calcularla para cada uno de los escenarios en función de la amplitud térmica, representada como las diferencia entre la temperatura máxima y mínima, siguiendo los criterios de Donatelli y Campbell (1998)¹,

Con datos de escenarios mensuales suministrados por el IDEAM, se estimó un modelo lineal simple. El valor estimado de la pendiente se distribuyó uniformemente para los días comprendidos entre el 1 de enero de 2010 y el 31 de diciembre de 2100, y se adicionó a los valores diarios calculados por el SueMulador para el mismo periodo de estudio. Ello se realizó para cada una de las variables de clima y los escenarios considerados (figuras 6 y 7; tabla 2).

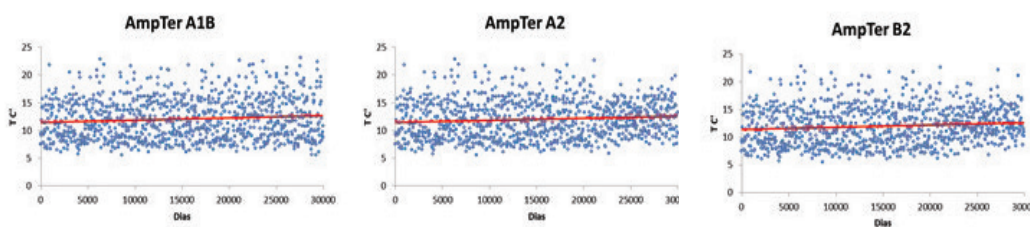
■ **Figura 6.** Comportamiento de la temperatura máxima y mínima para los escenarios de cambio climático A1B, A2 y B2, estación el Cedral, 2010-2100



Fuente: Elaboración propia

¹ Estos autores reportan una correlación aceptable entre la amplitud térmica y el brillo solar.

Figura 7. Comportamiento de la amplitud térmica para los escenarios de cambio climático A1B, A2 y B2, estación el Cedral, 2010-2100



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Variación de variables de clima para los escenarios de cambio climático en estaciones localizadas en los núcleos forestales, 2010-2100

| Estación | Escenario | Variable | Variación °C/día |
|------------------|-----------|------------------|------------------|
| Cedral | A1B | T. máxima | 0,00014907 |
| | | T. mínima | 0,00010718 |
| | | Amplitud térmica | 0,00004189 |
| | A2 | T. máxima | 0,00015379 |
| | | T. mínima | 0,00011428 |
| | | Amplitud térmica | 0,00003952 |
| | B2 | T. máxima | 0,00011016 |
| | | T. mínima | 0,00006778 |
| | | Amplitud térmica | 0,00004238 |
| Turipaná | A1B | T. máxima | 0,00016022 |
| | | T. mínima | 0,00013484 |
| | | Amplitud térmica | 0,00002537 |
| | A2 | T. máxima | 0,00017540 |
| | | T. mínima | 0,00014139 |
| | | Amplitud térmica | 0,00003402 |
| | B2 | T. máxima | 0,00016089 |
| | | T. mínima | 0,00012763 |
| | | Amplitud térmica | 0,00003326 |
| Huerta la Grande | A1B | T. máxima | 0,00021300 |
| | | T. mínima | 0,00014766 |
| | | Amplitud térmica | 0,00006534 |
| | A2 | T. máxima | 0,00016435 |
| | | T. mínima | 0,00012710 |
| | | Amplitud térmica | 0,00003725 |
| | B2 | T. máxima | 0,00006052 |
| | | T. mínima | 0,00006501 |
| | | Amplitud térmica | -0,00000518 |
| Monterrey | A1B | T. máxima | 0,00018748 |
| | | T. mínima | 0,00014004 |
| | | Amplitud térmica | 0,00004744 |
| | A2 | T. máxima | 0,00023665 |
| | | T. mínima | 0,00011111 |
| | | Amplitud térmica | 0,00012554 |
| | B2 | T. máxima | 0,00018884 |
| | | T. mínima | 0,00005586 |
| | | Amplitud térmica | 0,00013298 |

Fuente: Elaboración propia



3

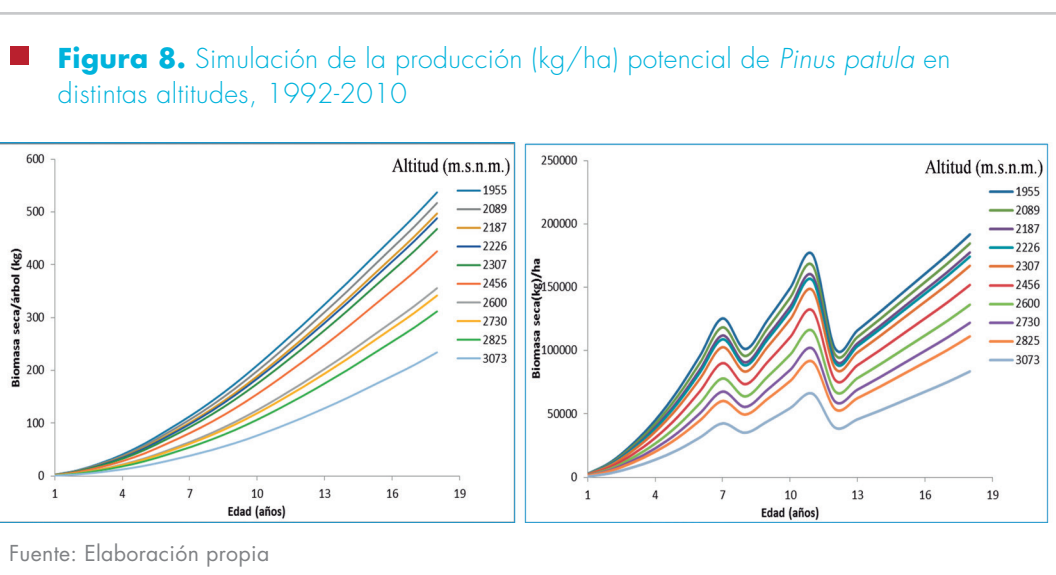
Resultados

3.1. Producción forestal, 2010-2100

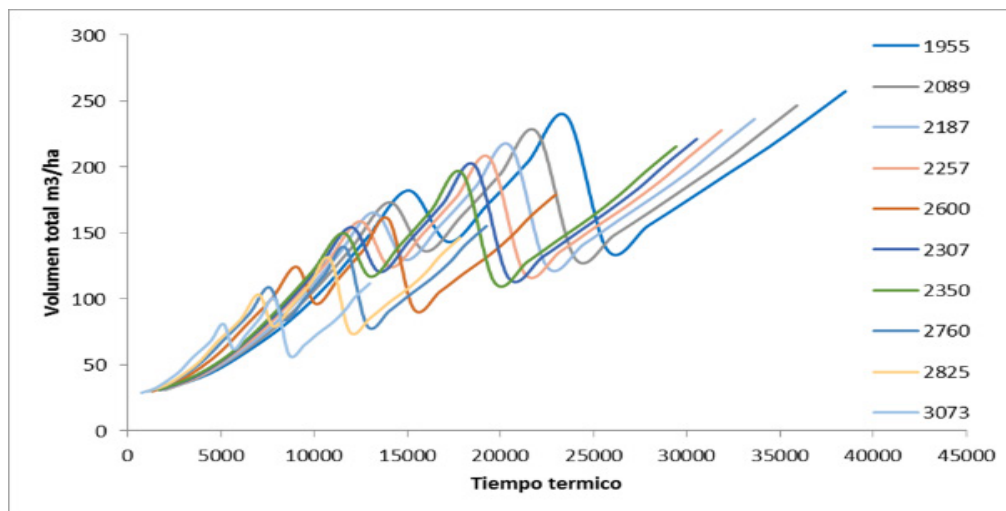
El CREFT es una herramienta computacional que se fundamenta en simulaciones de procesos ecofisiológicos como la fotosíntesis, la respiración y la distribución de biomasa en los diferentes órganos del árbol modulados por la oferta climática de un sitio. Las variables de entrada al modelo son la radiación fotosintéticamente activa (RFA), calculada a partir del brillo solar y las temperaturas máxima y mínima diarias, la localización geo-referenciada del sitio y la fecha de siembra.

La validación de las simulaciones que se obtienen del CREFT de la producción potencial para las especies forestales incluidas en el estudio, se realizó con valores observados de clima para el periodo 1985-2010 en las estaciones asociadas a cada núcleo forestal. Para la validación de las simulaciones del CREFT se usaron los periodos de cosecha definidos por las empresas forestales. Estos fueron 25 años para *Tectona grandis*, 18 años para *Pinus patula*, 17 años para *Pinus caribaea*, 15 años para *Eucaliptus pellita* y 13 años para *Gmelina arborea*.

Para plantaciones de *Pinus patula*, las cuales se encuentran sembradas en un amplio gradiente altitudinal, en la figura 8 se presenta la simulación de la producción forestal para el rango de altitud 1.955-3.073 m.s.n.m. Los resultados muestran la sensibilidad del modelo a la altitud y las variables de clima. La simulación presentó correlación superior al 85% ($p < 0,0001$) al compararse con datos de producción forestal medidos en plantaciones de *Pinus patula*, suministrados por empresas forestales. En general, la variable que modula la producción es el tiempo térmico, el cual se utiliza como tiempo fisiológico para comparar la respuesta de una planta a diversas condiciones ambientales (figura 9).



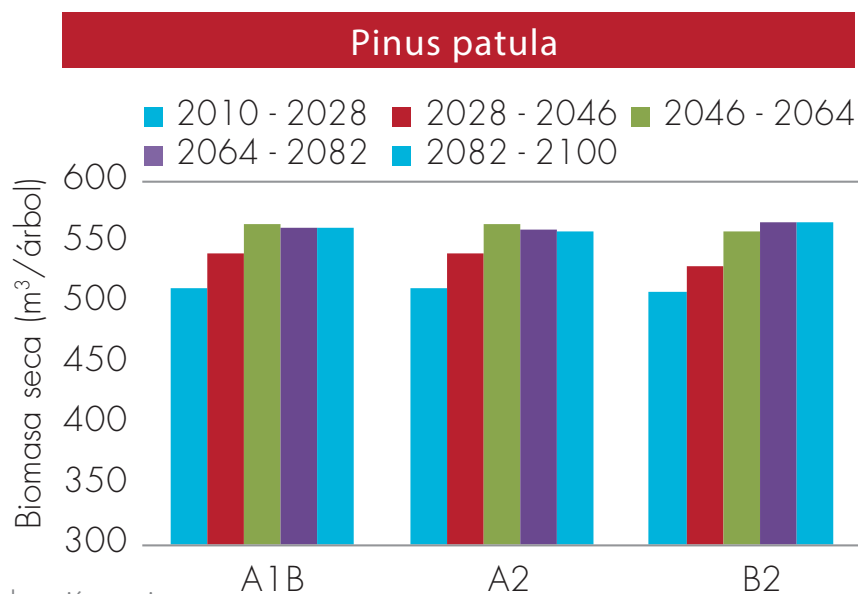
■ **Figura 9.** Simulación de la producción (m³/ha) potencial de *Pinus patula* en distintas altitudes y un tiempo térmico acumulado para 18 años, 1992-2010



Fuente: Elaboración propia

La simulación en *Pinus patula* indica que la producción forestal potencial aumenta hasta el tercer periodo de cosecha o turno forestal (2046-2064), para estabilizarse luego en valores aproximados de 435 m³ha⁻¹ en el año 2100 (figura 10). El resultado es similar para todos los escenarios de cambio climático analizados.

■ **Figura 10.** Producción forestal (m³/ha) de *Pinus patula* bajo los escenarios de cambio climático A1B, A2 y B2 en núcleos forestales localizados en el centro de Colombia

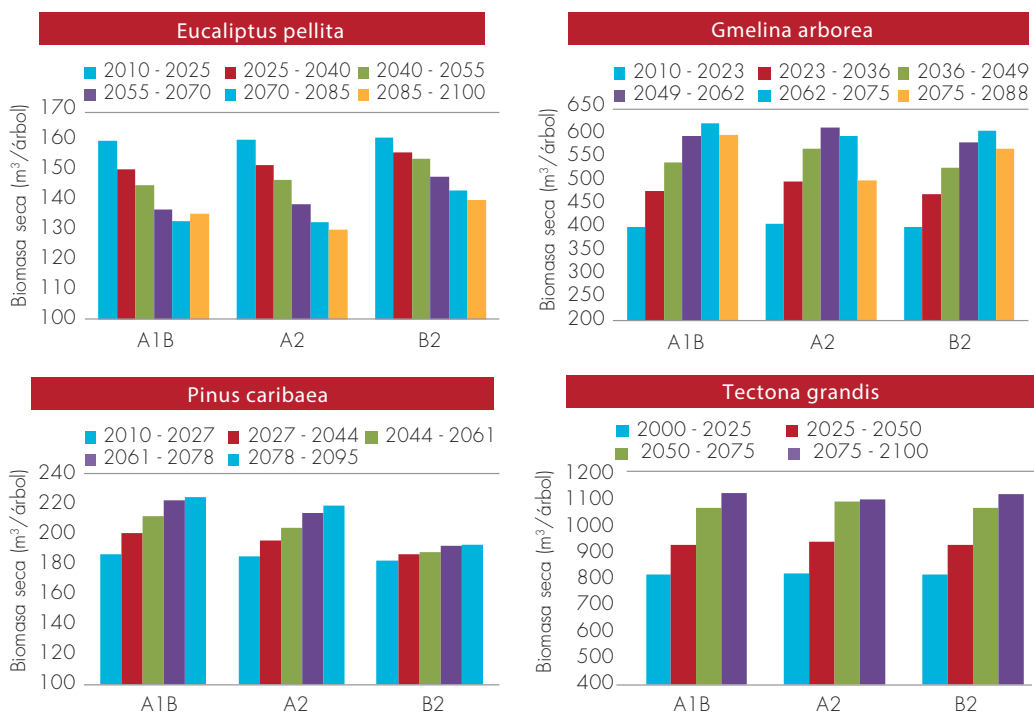


Fuente: Elaboración propia



Para las otras especies forestales la respuesta de la producción potencial depende del escenario climático considerado en la simulación. Para *Tectona grandis* los resultados sugieren un aumento en la producción potencial en los cuatro turnos forestales y todos los escenarios de cambio climático considerados (figura 11). En *Eucaliptus pellita* los resultados revelan una disminución en la producción potencial en todos los escenarios de cambio climático.

■ **Figura 11.** Producción forestal (m^3/ha) potencial de *Tectona grandis*, *Eucaliptus pellita*, *Pinus caribaea*, *Gmelina arborea*, bajo los escenarios de cambio climático A1B, A2 y B2 en Colombia



Fuente: Elaboración propia

Para *Pinus caribaea*, considerada como especie nativa en condiciones ecuatoriales tropicales, los resultados sugieren aumentos sustanciales en la producción potencial (m^3ha^{-1}) en áreas de baja altitud donde suele cultivarse y en los escenarios A1B y A2. El incremento en la producción potencial es menor en el escenario B2 (figura 11, parte inferior izquierda). Para la especie *Gmelina arborea* y las condiciones de caribe seco los resultados indican un aumento en la producción potencial hasta el año 2075, y luego una disminución al fin del siglo, en el escenario de cambio climático A2 (figura 11, parte inferior derecha).

Los cambios en la producción potencial de las diferentes especies, comparado con una línea de base, sugieren para *Pinus patula* un 8% de aumento hasta mediados del siglo, y luego estabilización de la producción forestal potencial (figura 12). Ello es evidencia de un comportamiento de aclimatación, reportado en la literatura para varias especies

en condiciones contrastantes de oferta climática. En general, los aumentos en producción aumentarían de 26.535.000 a 28.657.800 m³, para las 61.000 ha en las que se han establecido plantaciones de *Pinus patula* en Colombia. Además, los turnos forestales podrían reducirse de 18 a 13,5 años, lo cual para el periodo analizado (2010–2100) aumentarían de 5 a 6,7 turnos financieros forestales.

Para *Tectona grandis* los resultados sugieren aumentos en la producción forestal en el rango 10-15%, principalmente desde la mitad hasta el fin del siglo (figura 12). Ello implica que la producción potencial en el núcleo forestal estudiado aumentaría de 698.000 m³ en las 1.745 ha cultivadas a 767.800 m³, en sólo un turno financiero forestal adicional. Ello equivale a manifestar que la producción forestal actual de 400 m³ en un turno de 25 años, se obtendría en 22,5 años.

La especie *Pinus caribaea* incrementaría su producción forestal en casi 15% y los escenarios A1B y A2, y sólo un aumento del 3% en el escenario B2 al terminar el siglo (figura 12). En consecuencia, la producción potencial aumentaría de 412.160 m³ en 1.472 ha

■ **Figura 12.** Cambio porcentual del crecimiento de las especies estudiadas bajo los escenarios de cambio climático A1B, A2 y B2 en Colombia, 2010 -2100



Fuente: Elaboración propia



cultivadas a 515.200 m³. De otro lado los turnos serían más cortos, por lo que en 90 años se tendrían 6,6 turnos financieros forestales y no 5,3 con las condiciones actuales.

La especie *Gmelina arborea* es la que presentó los mayores aumentos en la producción forestal potencial, con incrementos de 42% y el escenario A2 a mediados del siglo. En los otros escenarios, incrementos similares se alcanzan en el año 2070 (figura 12). Sin embargo, el clima en el caribe seco colombiano a finales del siglo, reducen sustancialmente la producción forestal potencial en todos los escenarios de cambio climático. No obstante, los aumentos simulados en la una limitación física importante sería la disponibilidad de agua. La especie con mayor sensibilidad al cambio climático fue *Eucalyptus pellita*, la cual en la Orinoquía presentaría los resultados sugieren lo poco apta que sería la especie para proyectos de desarrollo forestal en la Orinoquía en escenarios de cambio climático.

3.2. Análisis del efecto potencial del cambio climático sobre el turno forestal óptimo y la rentabilidad de plantaciones de *Pinus patula*

La decisión de manejo forestal más importante es la determinación del tiempo de aprovechamiento de rodal, conocido como turno óptimo. Faustmann proporcionó en el año de 1849 una solución, la cual es la más aceptada y considerada como la correcta por los economistas (Samuelson, 1995; Diaz-Balteiro, 1997; Newman, 2002). Ésta consiste en evaluar un proyecto forestal con el valor presente neto (VPN) de los flujos de caja netos futuros de infinitas rotaciones. Esta aproximación se conoce como valor económico o valor esperado del suelo (VES) (Clutter et al., 1992; Diaz-Balteiro, 1997). En general, el turno forestal óptimo se calcula como (Klemperer, 2003):

$$VES = \frac{\sum_{j=0}^u FC_j (1+i)^{u-j}}{(1+i)^u - 1} \quad (13)$$

Los ingresos de la variable *FC* se calcularon como el producto entre el volumen de madera en dos diferentes rangos de uso y su correspondiente precio de madera. Los datos de producción forestal o volumen de *Pinus patula* corresponden a cada uno de los tres escenarios de cambio climático (A1B, A2 y B2) y el escenario actual (establecimiento de plantación antes de 2010). Si bien los datos provenientes por CREFT tienen asociados cuatro categorías de índice de sitio, lo cual corresponde a las diferencias que se presentan en el nivel de producción y productividad de un rodal, en este análisis sólo se tuvo en cuenta el índice de sitio uno que corresponde al de mayor producción y productividad. Dicha decisión se basa en que el índice de sitio proveniente de CREFT corresponde a las características edáficas y topográficas, no climáticas, las cuales se espera que no cambien considerablemente en el periodo de análisis de 90 años (2010-2100). Por otra parte, en el análisis económico se consideraron dos rangos de uso de la madera: aserrío y otros usos (estacones y pulpa), con

precios de madera en pie iguales a 100.000 y 33.333 pesos (1/3 del precio de aserrío) por metro cúbico, respectivamente. Los egresos, a su vez, están representados por costos de establecimiento y manejo de la plantación desde el año 0 hasta el año de cosecha. Específicamente para *Pinus patula* en Colombia, se determinó el promedio de los costos de establecimiento y manejo con base en datos de estructura de costos de varias empresas y proyectos forestales (tabla 3).

Tabla 3. Costos de establecimiento y manejo de varios proyectos de plantaciones forestales de *Pinus patula* en Colombia (en pesos colombianos)

| Año | Prooriente | La Cabaña | Midas (2010) | Torres (2012) | Restrepo et al. (2012) | Promedio |
|-----|------------|-----------|--------------|---------------|------------------------|-----------|
| 0 | 2.040.000 | 2.953.485 | 2.274.625 | 2.159.362 | 1.981.692 | 2.281.833 |
| 1 | 385.272 | 781.578 | 775.733 | 535.574 | 1.421.892 | 780.010 |
| 2 | 385.272 | 446.616 | 858.752 | 668.391 | 649.368 | 601.680 |
| 3 | 385.272 | 111.654 | 219.558 | 545.768 | 268.704 | 306.191 |
| 4 | 385.272 | 111.654 | 372.107 | 453.101 | 490.385 | 362.504 |
| 5 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | 170.179 | 193.050 |
| 6 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | 116.438 | 179.615 |
| 7 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | 116.438 | 179.615 |
| 8 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | 116.438 | 179.615 |
| 9 | 385.272 | 223.308 | | 105.096 | 118.678 | 208.088 |
| 10 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | 118.678 | 180.175 |
| 11 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | 322.445 | 231.117 |
| 12 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | 120.917 | 180.735 |
| 13 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | 120.917 | 180.735 |
| 14 | 385.272 | 223.308 | | 105.096 | 120.917 | 208.648 |
| 15 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | 123.156 | 181.295 |
| 16 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | | 200.674 |
| 17 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | | 200.674 |
| 18 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | | 200.674 |
| 19 | 385.272 | 111.654 | | 105.096 | | 200.674 |

Fuente: Elaboración propia con base en datos proporcionados por las empresas como respuesta a la solicitud formal realizada por el DNP.

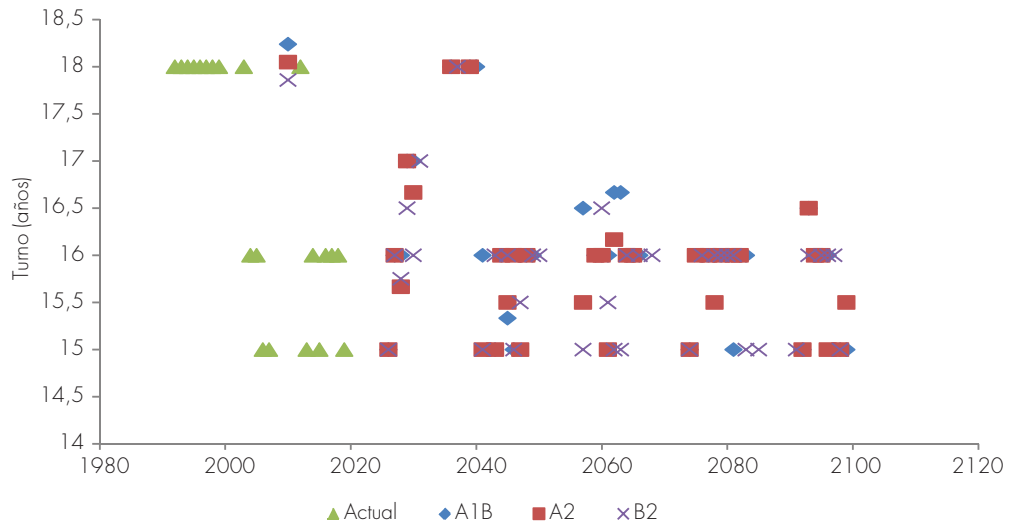
Los resultados del análisis económico sectorial permiten concluir que, en general, el cambio climático podría disminuir la duración de los turnos óptimos forestales (figura 13) y aumentar el valor económico del suelo (figura 14) en plantaciones forestales de *Pinus patula* en Colombia. Con relación al turno económico, la reducción máxima esperada podría ser tres años, mientras que la rentabilidad presenta un incremento con tendencia hacia una asíntota de VES de 16 millones de pesos por hectárea. No se aprecian diferencias en el comportamiento de los cambios en el turno óptimo forestal ni en la rentabilidad entre los tres escenarios de cambio climático, aunque si existe diferencia con relación al escenario actual (sin cambio climático).

Estos resultados sólo tienen en cuenta la incidencia que podría tener el cambio climático sobre la producción forestal, considerado como efecto directo sobre la rentabilidad de



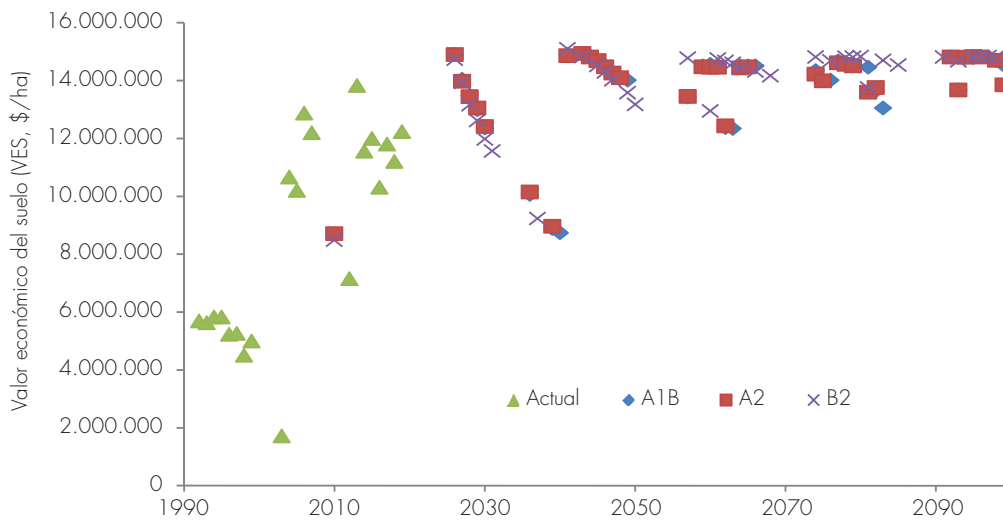
plantaciones forestales de *Pinus patula*. Sin embargo, en futuros estudios es importante incluir posibles efectos indirectos del cambio climático relacionados con sequías prolongadas, inundaciones, ataques de insectos y aparición inusitada de patógenos como hongos, bacterias, fitoplasmas etc.

■ **Figura 13.** Turno óptimo forestal de plantaciones de *Pinus patula* para el periodo 2010-2100



Fuente: Elaboración propia

■ **Figura 14.** Valor económico del suelo de plantaciones forestales de *Pinus patula* para el periodo 2010-2100 (pesos por hectárea)



Fuente: Elaboración propia

4 Medidas de adaptación al cambio climático

De acuerdo con el IPCC², adaptación se define como “ajuste de los sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados, o a sus efectos, que atenúa los efectos perjudiciales o explota las oportunidades beneficiosas”. En el marco de este documento se hace referencia particularmente a la adaptación planificada. Es decir, a la adaptación resultante de una decisión expresa en un marco de políticas, basada en el reconocimiento que las condiciones han cambiado o están próximas a cambiar y que es necesario adoptar medidas para retornar a un estado deseado, para mantenerlo o para alcanzarlo.

También es importante destacar que un aspecto fundamental a tener en cuenta en la adopción de soluciones pertinentes en materia de adaptación al cambio climático, es la consideración de las prácticas en materia de ecosistemas, recurso hídrico, salud humana y en general, actividades naturales y antrópicas relacionadas con el cambio climático.

En la medida en que se desarrollen capacidades frente a los efectos adversos del cambio climático se podrían reducir los índices de vulnerabilidad en el país y contribuir con la aplicación de variables relacionadas con el desarrollo sostenible. Siendo así, deben formularse medidas estratégicas vinculadas con el sector forestal, tales como manejo de recursos hídricos, biodiversidad, agricultura, modelación y gestión de riesgos meteorológicos y, generación de modelos económicos para sistemas productivos forestales.

En consecuencia, las medidas propuestas, que permitirán asumir el reto de la adaptación al cambio climático en el sector forestal y aprovechar las ventajas y oportunidades que resultan de los cambios, incluyen medidas agrupadas en las siguientes categorías:

- i) Mejorar la generación de información y conocimiento sobre impactos del clima en sector productivo y tecnologías apropiadas para adaptarse al cambio.
- ii) Mejorar las condiciones que faciliten las inversiones en el sector.
- iii) Incorporar lineamientos de potencial forestal en el ordenamiento territorial.
- iv) Promover el uso eficiente del recurso y aprovechamiento de servicios ecosistémicos.

Es importante resaltar la necesidad de ampliar el conocimiento técnico con respecto a la adaptación de las plantaciones forestales al cambio climático, y que será necesario realizar acciones de validación o incorporación de tecnologías pertinentes, determinar sus impactos en la productividad y, en consecuencia, su justificación como alternativas de adaptación al cambio climático. A continuación, se describen las medidas de adaptación para cada una de las categorías mencionadas.

2 Cuarto Informe de Evaluación (CIE) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) “Cambio climático 2007”. Apéndice. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/vg2/ar4-vg2-annex-sp.pdf>



i) Mejorar la generación de información y conocimiento sobre impactos del clima en el sector productivo y tecnologías apropiadas para adaptarse al cambio climático.

- Mejorar los estudios y plataformas de información de clima, suelos y seguimiento al crecimiento de las plantaciones, relacionados con modelos y sistemas de información para la asistencia agro-meteorológica a los agentes del sector forestal, tales como un calendario agroclimático de referencia para la planificación de las actividades forestales y la identificación de zonas agroecológicas adecuadas para desarrollar proyectos o programas forestales productivos. En tal sentido sería de la mayor importancia actualizar los estudios de zonificación potencial para la producción forestal, llevados a cabo por Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF) con anterioridad, tomando en cuenta escenarios de cambio climático.
- Fortalecer los programas de investigación en mejoramiento genético, que permita potencializar las oportunidades que genera el cambio climático sobre el crecimiento y rendimiento forestal, las cuales están asociadas con el aumento en la productividad disminuyendo los turnos forestales que propician un mejor uso de la tierra y una mayor eficiencia en la inversión y en el retorno y beneficios de la misma. Adicionalmente, las oportunidades descritas conllevan un incremento en los servicios ecosistémicos asociados con la implementación de áreas cultivadas en bosques productivos. Debido a que la investigación forestal demanda gran cantidad de recursos y tiempo, sería pertinente, dentro de dicho fortalecimiento, aunar los esfuerzos que realiza el sector productivo privado a través de su vinculación con la cooperativa de mejoramiento forestal Camcore, con entes nacionales como CONIF y Corpoica, de tal forma que se dé inicio a estos procesos de largo aliento, en particular para especies forestales nativas de alto potencial.
- Fortalecer los sistemas de monitoreo en variables relacionadas con la dispersión de plagas y enfermedades de plantaciones y la adaptación de las especies a los cambios presentes y futuros, considerando que el incremento en éstas ocasiona efectos negativos sobre la productividad e incrementa los costos del manejo de las plantaciones. En tal sentido se podría consolidar una red de información silvo-climática, donde confluyan los actores del sector público y privado, de tal forma que se cuente con herramientas para la toma de decisiones, en caso de aparición o incrementos en la dinámica de plagas y enfermedades que amenacen la actividad forestal productiva. En esta red de información podrían incorporarse variables relacionadas con los hábitos y características fenológicas de las especies y su relación con la temperatura, la precipitación, la humedad relativa, así como la resistencia a plagas y enfermedades. Asimismo, incluir información sobre las enfermedades y los agentes causales de enfermedades forestales, así como sobre los medios de dispersión de los agentes dañinos y su relación con las especies forestales.
- Fortalecer la educación profesional y tecnológica en aspectos relacionados con el manejo silvicultural de las plantaciones y en el procesamiento y transformación de los productos derivados del bosque plantado, con el fin de darle mayor agregación de valor, haciendo la actividad más atractiva para los productores e inversionistas, a la vez que se reducen los riesgos asociados con la actividad forestal.

ii) Mejorar las condiciones de que faciliten las inversiones en el sector.

- Mejorar las condiciones de la infraestructura vial y de comunicaciones para garantizar a los inversionistas unas condiciones que permitan costo-efectivamente el aprovechamiento de las plantaciones forestales. Es decir, una vez redefinidas las áreas de potencial forestal productivo, es pertinente valorar las inversiones en infraestructura, la cual permite movilizar los productos cosechados a los sitios de procesamiento o de embarque.
- Incentivar la implementación de sistemas de transformación y agregación de valor a los productos derivados de la actividad forestal, mediante el fortalecimiento de instrumentos como el Incentivo a la Capitalización Rural (ICR)³ y el Fondo Agropecuario de Garantías (FAG)⁴, entre otros, favoreciendo un mayor desarrollo del sector a lo largo de toda la cadena productiva y contribuyendo a la economía regional y nacional.

iii) Incorporar lineamientos de potencial forestal en el ordenamiento territorial.

- Una vez redefinidas las áreas potenciales de producción forestal productiva, en función de los escenarios de variabilidad y cambio climático, a partir de la generación de mapas a escalas adecuadas y con información sobre el manejo de la incertidumbre sobre la zonificación de dichas áreas, informar a los municipios para que sean incorporadas estas áreas dentro de los Planes de Ordenamiento Territorial.

iv) Promover el uso eficiente del recurso y aprovechamiento de servicios ecosistémicos.

- Implementar, a partir de modelos productivos ya establecidos y probados, sistemas forestales multifuncionales que propicien la conectividad ecosistémica, mejorando el intercambio genético y el aumento de la biodiversidad, a través de sistemas agroforestales, sistemas silvopastoriles y herramientas de manejo del paisaje (cercas vivas, corredores biológicos, bosquetes en potreros, entre otros) que determinan una mejor eficiencia de los sistemas productivos agrícolas y pecuarios, contribuyendo al desarrollo sostenible y el mantenimiento de los ecosistemas, además de producir ingresos adicionales a los productores. Tal es el caso de las recientes valoraciones económicas y sobre la biodiversidad que se llevan a cabo por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) sobre biodiversidad en zonas cafeteras, que ha permitido generar certificados de compensación de emisiones y que se ofrecen al mercado.
- Incentivar el desarrollo de sistemas dendroenergéticos que permitan hacer un uso eficiente de los productos derivados de la actividad forestal productiva. En cuanto a esta consideración, es indispensable seleccionar especies de rápido crecimiento y acumulación de biomasa, a la vez que se adoptan y adaptan sistemas eficientes de generación energética, que permitan disminuir el uso de fuentes fósiles y disminuya la presión sobre los bosque naturales para el suministro de leña.

3 Aporte en dinero (reembolsable) que Finagro a través de un intermediario financiero, desembolsa a los productores del sector agropecuario para que modernicen su actividad agropecuaria y mejoren sus condiciones

4 Respalda el valor re-descontado de los créditos de capital de trabajo e inversión dirigidos a financiar nuevos proyectos de producción, comercialización y transformación primaria del sector agropecuario, presentados ante Finagro. Pueden aplicar los productores que no puedan ofrecer las garantías requeridas por los intermediarios financieros.



5

Recomendaciones de política

Se proporcionan argumentos y lineamientos para que los tomadores de decisión desarrollen políticas efectivas forestales considerando el cambio climático. Las estrategias de adaptación al cambio climático en el sector forestal deberán orientarse en los tres siguientes ejes:

- a) Eficiencia en el manejo de los recursos, considerando los impactos del cambio climático.
- b) Implementación de tecnologías de producción silvicultural que garanticen la adaptación al cambio climático.
- c) Conocimiento de las especies forestales y los cambios en la productividad asociados a la variabilidad climática.

Considerando estos ejes y los resultados de las simulaciones para determinar la productividad de las especies forestales, bajo diferentes escenarios de cambio climático, se presentan a continuación algunas líneas de acción o medidas de política pública para los tomadores de decisión orientadas a mejorar su calidad, efectividad y el logro de los objetivos propuestos en el marco de las políticas y estrategias nacionales de cambio climático. Las mismas están agrupadas en función de las siguientes dimensiones: instrumentos financieros y de mercado, acciones de investigación y desarrollo, fortalecimiento institucional e instrumentos jurídicos.

i) Acciones de investigación y desarrollo.

- Fortalecer plataformas de información geográficas y alfa-numéricas, que permitan articular y mantener actualizado el inventario forestal natural y productivo nacional, en concordancia con las áreas agroecológicas definidas para planificar el direccionamiento de los incentivos establecidos o por establecer y para determinar el flujo de los productos del bosque plantado hacia los centros de transformación. En tal sentido asegurar el funcionamiento y actualización permanente de la ventanilla única forestal del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), que está permitiendo el intercambio de información de las licencias de movilización de madera cultivada, que expide el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), con los recursos del Certificado de Incentivo Forestal (CIF), asignados para los predios de producción. De otra parte, implementar dentro de las plataformas existentes como AgroNET e incluir en el marco del Censo Nacional Agropecuario liderado por el MADR y ejecutado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), información del inventario forestal nacional como herramienta para el diseño de la política sectorial y la toma de decisiones.
- Diseñar mecanismos de investigación, información y divulgación que permitan el acceso a semillas y material vegetal de calidad certificada y con controles fitosanitarios definidos y establecidos, para asegurar la maximización del potencial productivo de las plantaciones forestales. Para ello es importante asegurar recursos permanentes para CONIF, que le permitan mantener las mediciones en parcelas permanentes de crecimiento y rendimiento, a la vez que sirvan para construir indicadores de la dinámica de plagas y enfermedades, que sean la base para la construcción de alertas tempranas.

De otra parte, para las especies actualmente cultivadas y cuya investigación en mejoramiento genético, silvicultura y en el mantenimiento de las fuentes semilleras, la realizan con recursos propios y de convocatorias en conjunto con las Universidades, es pertinente asegurar recursos permanentes del MADR o del Sistema General de Regalías (SGR) para ciencia y tecnología, que les garantice llevar a cabo este tipo de actividades de largo plazo. De otra parte y dada la potencialidad del sector frente a los efectos de la variabilidad y el cambio climático, se debe incluir en la agenda del MADR, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y de Colciencias el apoyo a la investigación en temas de selección de genotipos, identificación y mantenimiento de fuentes semilleras y en el desarrollo de técnicas de conservación y multiplicación de especies que producen madera y subproductos de alto valor que puedan ser utilizadas para la reforestación productiva en áreas estratégicas.

- Fomentar la investigación a través de CONIF, fortaleciendo la institución con recursos humanos y tecnológicos, para que en conjunto con los desarrollos realizados por la industria garanticen contar con tecnologías de producción, manejo y transformación costo efectivamente apropiadas y que generen interés en los inversionistas para favorecer la expansión del sector forestal en el país.
- Propiciar la transferencia de tecnología y los beneficios de la implementación de los sistemas multifuncionales, con diversos subsectores del sector agropecuario, para mejorar la eficiencia productiva y ambiental de los sistemas de producción enunciados con anterioridad. Considerando que el subsector forestal forma parte del sector agropecuario, la pertinencia del diseño de esta política recae en el MADR. Para ello se pueden utilizar las lecciones aprendidas y los resultados de proyectos exitosos como el desarrollado por la Federación de Cafeteros en asocio con el Banco de Crédito para la Reconstrucción (KfW) y el MADR, en el cual se han intervenido más de 60.000 hectáreas de sistemas multifuncionales, para las condiciones de ladera andina.
- Promover e incentivar la certificación de los bosques plantados con el fin de que los productos derivados de la actividad puedan acceder a mercados internacionales reconocidos. Esta iniciativa si bien ha sido implementada por algunas de las empresas reforestadoras, poder competir en los mercados locales e internacionales, particularmente con Consejo de Administración Forestal (FSC), podría ser articulada por Fedemaderas con el apoyo del MinComercio, ProColombia y el MADR, de tal forma que todas las plantaciones comerciales en Colombia tuviesen un sello diferenciador en el mercado que les mejore su competitividad.

ii) Fortalecimiento institucional

- Favorecer la articulación de los beneficios derivados de la expansión, en áreas previamente definidas y seleccionadas, a través de los sistemas implementados (monocultivos, corredores biológicos, cercas vivas, etc.) con la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono, que permita generar beneficios económicos y ambientales, relacionados con los servicios ecosistémicos que brinda la ejecución de los sistemas forestales.



iii) Instrumentos financieros y de mercado.

- Mejorar los incentivos existentes para promover el desarrollo del sector, tales como el Incentivo a la Capitalización Rural (ICR) y el CIF como herramienta para garantizar la sostenibilidad económica de la actividad forestal privada y atraer inversionistas interesados en aprovechar los beneficios de la productividad forestal frente a los escenarios futuros considerados en el estudio realizado. En tal sentido, el MADR, deberá revisar los porcentajes que cubre el ICR y el valor del CIF por hectárea, en función del comportamiento del sector en escenarios futuros de variabilidad y cambio climático.

6

Reflexiones y recomendaciones sobre información

El uso generalizado de un modelo basado en procesos como el CREFT exige que el IDEAM genere variables de clima a resolución diaria en las estaciones climáticas que se localizan cerca a núcleos forestales representativos, así como en los escenarios de cambio climático. Y para calibrar los valores de producción forestal simulados con el modelo CREFT, sería deseable compararlos con valores de producción medidos en campo y proporcionados por CONIF o empresas forestales.

7

Conclusiones

Las simulaciones del modelo basado en procesos sugieren que para la mayoría de las especies forestales analizadas, el cambio climático podría favorecer su crecimiento y la producción potencial. Ello implicaría una mayor productividad medida en volumen por hectárea o la misma productividad obtenida en un menor turno forestal. En el presente estudio solo en la especie *Eucalyptus pellita*, sembrada en la Orinoquia colombiana, la simulación sugiere una reducción de 20% en la producción potencial. Esto equivale a aumentar el turno forestal óptimo en tres años

Los resultados del presente estudio constituyen una información valiosa para la evaluación de futuras inversiones en plantaciones forestales comerciales en Colombia. Probablemente, las inversiones en el sector forestal podrían ser mucho más atractivas, debido a que el cambio climático aumentaría la productividad forestal, así como la eficiencia económica al obtenerse producciones forestales históricas con un menor turno óptimo forestal.

Bibliografía

- Achard, F., Eva, H.D., Stibig, H.J., Mayaux, P., Gallego, J., Richards, T. y Malingreau J.P. 2002. Determination of the deforestation rates of the world's humid tropical forests. *Science* 297:999-1002.
- Aldana, C. 2004. Sector forestal colombiano: fuente de vida, trabajo y bienestar. CONIF, Bogotá.
- Almeida A.C., Landsberg J.J., Sands P.J., Ambrogio M.S., Fonseca S., Barddal S.M. y Bertolucci F.I. 2004. Needs and opportunities for using a process based productivity model as a practical tool in Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management* 193(1-2), 167-177.
- Amacher, G. S., Ollikainen, M. y Koskela E. 2009. *Economics of forest resources*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Angström, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* Vol. 50: 121 – 125.
- Bartelink H.H. y Mohren G.M.J. 2004. Modelling at the interface between scientific knowledge and management issues. Towards the sustainable use of Europe's forests. *Forest Ecosystem and Landscape Research: Scientific Challenges and Opportunities* 49, 21-30.
- BID-CEPAL-DNP. 2014. Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia - Síntesis. S. Calderón, G. Romero, A. Ordóñez, A. Álvarez, C. Ludeña, L. Sánchez, C. de Miguel, K. Martínez y M. Pereira (editores). Banco Interamericano de Desarrollo, Monografía No. 221 y Naciones Unidas, LC/L.3851, Washington D.C.
- Bravo-Oviedo, A., del Río, M. y Montero, G. 2007. Geographic variation and parameter assessment in generalized algebraic difference site index modelling. *Forest Ecology and Management* 247:107-119.
- Burman, R. y Pochop, L.O. 1994. *Evaporation, evapotranspiration and climatic data*. Amsterdam (Holanda): Elsevier. 278 p.
- Bush, M. B., Hanselman, J.A. y Hooghiemstra H. 2011. Andean montane forest and climate change. in M. B. Bush, J. R. Flenley, & W. Gosling, editors. *Tropical rainforest responses to climatic change*. Springer.
- Calegario, N., Daniels, R. F., Maestri, R. y Neiva, R. 2005. Modeling dominant height growth based on non-linear mixed-effects model: a clonal Eucalyptus plantation case study. *Forest Ecology and Management* 204: 11-20.
- Carle, J. y Holmgren P. 2008. Wood from planted forest: a global outlook 2005-2030. *Forest Products Journal* 58:6-18.
- Chica, H., Peña, A., Giraldo, J., Obando, D., y Riaño, N. 2013. SueMulador: Herramienta para La simulación de datos faltantes en series climáticas diarias de zonas ecuatoriales.
- Cieszewski, C. J. 2004. GADA derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from Richards, Weibull, and others exponential functions. *Second International Conference on Forest Measurements and Quantitative Methods and Management y The 2004 Southern Mensurationists Meeting*. Fiber Supply Assessment, Center for Forest Business Warnell School of Forestry and Natural Resources University of Georgia, Arkansas, USA.
- Cieszewski, C. J. y Bailey, R. L. 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science* 46:116-126.
- Clutter, J. L., Fortson, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., y Bailey, R. L. 1992. *Timber Management: A quantitative approach*. Reprint edition. John Wiley y Sons, Inc., New York.
- Cubbage, F. W., Mac Donagh, P., Sawinski, J., Rubilar, R., Donoso, P., Ferreira, A., Hoeflich, V., Morales, V., Ferreira, G., Balmelli, G. Siry, J., Baez, M., y Álvarez, J. 2007. Timber investment returns for selected plantations and native forest in South America and the Southern United States. *New Forests* 33:237-255.
- Cubbage, F., Koesbandana, S., Mac Donagh, P., Rubilar, R., Balmelli, G., Morales, V., de la Torre, R., Mura, M., Hoeflich, V. A., Kotze, H., González, R., Carrero, O., Frey, G., Adams, T., Turner, J., Lord, R., Huang, J., Macintyre, C., Mcginley, K., Abt, R. y Phillips, R. 2010. Global timber investments, wood costs, regulation, and risk. *Biomass and Bioenergy* 34:1667-1678.
- Dale, V., Joyce, L., McNulty, S., Neilson, R., Ayres, M., Flannigan, M., Hanson, P., Irland, L., Lugo, A.E., Peterson, C., Simberloff, D., Swanson, F., Stocks, B. y Wotton M. 2001. Climate change and forest disturbances. *BioScience* 51:723-734.
- Dale, V., Tharp, M.L., Lannom, K. y Hodges D.G. 2010. Modeling transient response of forest to climate change. *Science of the Total Environment* 408:1888-1901.
- De Wit, C.T. y Penning de Vries, F.W.T. 1982. L'analyse des systemes de production primaire. Djiteye, MA. Eds. Le productivité des pasturages Sahéliens Wageningen, Pudoc, p 20-23.
- Dennis, B., Brown, B.E., Stage, A.R., Burkhart, H.E. y Clark, S. 1985. Problems of modeling growth and yield of renewable resources. *The American Statistician* 39:374-383.



- Diaz-Balteiro, L. 1997. Turno forestal económicamente óptimo: una revisión. *Economía Agraria* 180:181-224.
- Diéguez-Aranda, U., Granadas-Arias, J., Álvarez-González, J. G. y Gadow, K. V. 2006. Site quality curves for birch stands in north-western Spain. *Silva Fennica* 40:631-644.
- Donatelli, M. y Campbell, G. S. 1998. A simple model to estimate global solar radiation, p. 133 -134. En: *Proc. Eur. Soc. for Agron. Congr. 5th, Vol. 2, Nitra, Slovak Republic. 28 Junio-2 Julio 1998. The Slovak Agric. Univ., Nitra, Slovak Republic.*
- Doumenge, C., Gilmour, D., Ruíz Pérez, M. y Blockhus J. 1995. Tropical montane cloud forest: Conservation status and management issues. Pages 24-37 in L. S. Hamilton, J. O. Juvik, and F. N. Scatena, editors. *Tropical montane cloud forest. Proceedings of an international symposium on ecological studies.* Springer-Verlag, New York.
- FAO 2011. *Situación de los Bosques del Mundo.* Roma, Italia.
- FAO. 2010. *Global forest resources assessment 2010.* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fontes L., Bontemps, J.D., Bugmann, H., Van Oijen, M., Gracia, C., Kramer, K., Lindner, M., Rötzer, T. y Skovsgaard J.P. 2010. , *Models for supporting forest management in a changing environment.* Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) *Forest Systems* 19(SI), 8-29.
- Fontes L., Landsberg J., Tome J., Tome M., Pacheco C.A., Soares P., y Araujo C. 2006. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere* 36(12), 3209-3221.
- France J. y Thornley, J.H.M 1984. *Mathematical models in agriculture.* London. Butterworths, 335p.
- Gadbury, G., Iyer, H. Schreuder, H. y Ueng, C. 1998. A nonparametric analysis of plot basal area growth using tree based models. *United States Department of Agriculture – USDA.*
- Gómez G., L. y Guzmán O. 1995. Relación entre la radiación solar global y el brillo solar en el área de Cenicafé, Chinchina, Caldas. En: *Cenicafé Vol. 46 (4): 205 –218*
- Goudriaan, J. 1986. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. Short communication. En: *Agricultural and forest Meteorology, Holanda. Vol. 38 (1-3): 180 – 182.* 36
- Günter, S., González, P., Álvarez, G., Aguirre, N., Palomeque, X., Haubrich, F. y Weber, M. 2009. Determinants for successful reforestation of abandoned pastures in the Andes: soil conditions and vegetation cover. *Forest Ecology and Management* 258:81-91.
- Gutierrez, V.H., Zapata, M., Sierra, C., Laguardo, W. y Santacruz A. 2006. Maximizing the profitability of forestry projects under the Clean Development Mechanism using a forest management optimization model. *Forest Ecology and Management* 226:341-350.
- Hall, D. B. y Bailey R. L. 2001. Modeling and prediction of forest growth variables based on multilevel nonlinear mixed models. *Forest Science* 47:311-321.
- Hall, D. B. y Clutter, M. 2004. Multivariate multilevel nonlinear mixed effects models for timber yield predictions. *Biometrics* 60:16-24.
- Härdle, W. 1989. *Applied nonparametric regression.* Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- IDEAM. 2010. Segunda comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. Capítulo 4, Vulnerabilidad. 54p.
- IPCC. 2000. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Informe especial del Grupo de trabajo III Escenarios de Emisiones 27p.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007-AR4. The physical science basis. Chapter 11-regional climate projections.* 31p.
- Jackson, J. E. y Palmer, J. W. 1979. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. *Annals of Botany*, 381-383.
- Johnsen K., Samuelson, L., Teskey, R., McNulty, S. y Fox T. 2001. Process models as tools in forestry research and management. *Forest Science.* 47(1), 2-8.
- Klemperer, W. D. 2003. *Forest resource economics and finance.* McGraw-Hill.
- Korzukhin, M.D., Termikaelian, M.T. y Wagner R.G. 1996. Process versus empirical models: which approach for forest ecosystem management? *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere.* 26(5), 879-887.
- Landsberg, J.J. y Waring, R.H. 1997. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95(3), 209-228.
- Leffelaar, P.A. 1990. On scale problems in modelling: an example from soil ecology. En: *Theoretical production ecology, Wageningen.* pp. 57-73.

- Levenberg-Marquardt, D.W. 1963. An Algorithm for Least Squares Estimation of Parameters. *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*, (11) 431-441.
- López, J., De la Torre, R. y Cubbage, F. 2010. Effect of land prices, transportation costs, and site productivity on timber investment returns for pine plantations in Colombia. *New Forests* 39:313-328.
- Louw, J. H. y Scholes, M. C. 2002. Forest site classification and evaluation: a South African perspective. *Forest Ecology and Management* 171:153-168.
- Louw, J. H. y Scholes, M. C. 2006. Site index functions using site descriptors for *Pinus patula* plantations in South Africa. *Forest Ecology and Management* 225:94-103.
- Lovatt C.J., Streeter, S.M., Minter, T.C., O'connell, N.V., Flaherty, D.L., Freeman, M.W. y Goodell, P.B. 1984. Phenology of flowering in *Citrus sinensis* [L.] Osbeck, cv. Washington Naval orange. *Proceedings of the International Society of Citriculture* 1, 186-190
- Mahapatra, K. y Kant, S. 2005. Tropical deforestation: a multinomial logistic model and some country-specific policy prescriptions.
- Mäkelä A. y Makinen H. 2003. Generating 3D sawlogs with a process-based growth model. *Forest Ecology and Management*. 184(1-3), 337-354.
- Mendell, B., De la Torre, R. y Sydor, T. 2006. Timberland investments in South America: a profile of Colombia.
- Midas. 2010. Componente forestal comercial: Costos en las plantaciones apoyadas por el componente forestal comercial. USAID, Acción Social-Presidencia de la República, Bogotá.
- Miehle, P., Battaglia, M., Sands, P.J., Forrester, D.I., Feikema, P.M., Livesley, S.J., Morris, J.D. y Arndt, S.K. 2009. A comparison of four process-based models and a statistical regression model to predict growth of *Eucalyptus globulus* plantations. *Ecological Modelling* 220(5), 734-746.
- Monserud, R. 2003. Evaluating forest models in a sustainable forest management context. *For Biometry Modell. InfSci* 1, 35-47.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. In *Symp. Soc. Exp. Biol* (Vol. 19, No. 205-23, p. 4).
- Montoya, E.C.; Arcila, J.; Jaramillo, A.; Riaño, N. y Quiroga, F. 2009. Modelo Para Simular La Producción Potencial Del Cultivo Del Café En Colombia. *Boletín Técnico* 33.Cenicafé 52p
- Moser, J. W. y Hall, O. F. 1969. Deriving growth and yield functions for uneven-aged forest stands. *Forest Science* 15:183-188.
- Newman, D. H. 2002. Forestry's golden rule and the development of the optimal forest rotation literature. *Journal of Forest Economics* 8:5-27.
- Ospina, C.M., Hernández, R.J., Rodas, C.A., Urrego, J.B., Riaño, N.M., Aristizabal, F.A., Godoy, J.A. y Osorio, O.I. 2011. El Pino. *Pinus patula*. Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina colombiana. FNC, Cenicafé. 52 p.
- Peng, C. 2000. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. *Forest Ecology and Management* 132:259-279.
- Pienaar, L. V. 1979. An approximation of basal area growth after thinning based on growth in unthinned plantations. *Forest Science* 25:223-232.
- Pienaar, L. V. y Turnbull, K. J. 1973. The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *Forest Science* 19:2-22.
- Pinheiro, J. C. y Bates, D.M. 2000. *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer, New York.
- Pricewaterhousecoopers 2007. *Risks and Rewards: forest, paper & packaging in South America*. Connected-thinking.
- Refocosta. 2013. *Resumen plan forestal 2012-2020*. 32 p.
- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forest. *Journal of Agricultural Research* 46:627-638.z
- Restrepo, H. I., Orrego, S. A., del Valle J. I. y Salazar, J. C. 2012. Rendimiento, turno óptimo forestal y rentabilidad de plantaciones forestales de *Tectona grandis* y *Pinus patula* en Colombia. *Interciencia* 37(1):14-20
- Riaño N., Obando D., Chica H.A. y Castaño A. M 2012. (in press) Modelo de crecimiento y captura de carbono de especies forestales CREFT, usos y simulaciones. p 11.
- Riaño, N., Tangarife, G., Osorio, O., Giraldo, J., Ospina, C., Obando, D., Gómez, L.F. y Jaramillo, L. 2005. Modelo de crecimiento y captura de carbono para especies forestales en el trópico. CREFT V1.0. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Federación Nacional de Cafeteros, Centro Nacional de Investigaciones en Café "Pedro Uribe Mejía" CENICAFÉ, Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal CONIF. 51p.
- Rodríguez, L. 1989. Consideraciones sobre la biomasa, composición química y dinámica del bosque pluvial tropical de colinas bajas, Bajo Calima; CONIF Serie documentación N°16; Convenio CONIF- Holanda. Buenaventura, Colombia. 35 p.



- Ross, J., 1981. The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands. W. Junk (Editor), LA Haya, 391 pp.
- Rubiano, R. D. J. 2010. Variabilidad espacial de las propiedades del suelo en relación con su producción, en plantaciones industriales de Ceiba roja (*Pachira quinata*). Trabajo de grado para optar al Título de Maestría en Geomática Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, 194P.
- Saeki, T. 1993. Light relations in plant communities. En: Environmental control of plant growth. New York. Academy Press, pp. 79-94.
- Samuelson, P. A. 1995. Economics of forestry in an evolving society. *Journal of Forest Economics* 1:115-150.
- Savolainen, O., Bokma, F., Knürr, T., Kärkkäinen, K., Pyhäjärvi, T. y Wachowiak, W. 2007. Adaptation of forest trees to climate change. Page 111 in J. Koskela, A. Buck, and E. Teissier du Cros, editors. Climate change and forest genetic diversity: implications for sustainable forest management in Europe. Biodiversity International, Rome.
- Sedjo, R., Wisniewski, J., Sample, A.V. y Kinsman, J.D. 1995. The economics of managing carbon via forestry: assessment of existing studies. *Environmental and Resource Economics* 6:139-165.
- Sharma, M. y Zhang, S. Y.. 2004. Height-Diameter models using stand characteristics for *Pinus banksiana* and *Picea mariana*. *Scandinavian Journal Forest Research* 19:442-451.
- Sironen, S., Kangas, M., Maltamo, M. y Kangas, J. 2003. Estimating individual tree growth with nonparametric methods. *Canadian Journal Forest Research* 33:444-449.
- Spitters, C. J. T. 1986. Separating the diffuse and direct components of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming radiation. En: *Agricultural and Forest Meteorology*, Holanda. Vol. 38 (1): 217-229.
- Spitters, C. J. T. 1986. Separating the diffuse and direct components of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. En: *Agricultural and Forest Meteorology*, Holanda. Vol. 38 (1): 231-242.
- Spittlehouse, D. y R. Stewart 2003. Adaptation to climate change in forest management. *BC Journal of Ecosystems and Management* 4:1-11.
- Stage, A. 2003. How forest models are connected to reality: evaluation criteria for their use in decision support. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*. 33(3), 410-421.
- Torres, F. 2012. Apoyo a los componentes de evaluación del CIF: Costos de establecimiento de plantaciones forestales. CONIF, Bogotá.
- Trasobares, A., Tome, M. y Miina J. 2004. Growth and yield model for *Pinus halepensis* Mill. in Catalonia, north-east Spain. *Forest Ecology and Management* 203:49-62.
- Van Der Goot, E. 1997. Technical description of interpolation and processing of meteorological data in CGMS. Holanda. 23 p.
- Van Kooten, G.C., Eagle, A.J., Manley, J. y Smolak, T. 2004. How costly are carbon offsets? A meta-analysis of carbon forest sinks. *Environmental Science and Policy* 7:239-251.
- Walters, D. K., Gregoire, T. G. y Burkhart, H. E. 1989. Consistent estimation of site index curves fitted to temporary plot data. *Biometrics* 45:23-33.
- Wang, T., Campbell, E., O'neill, G. y Aitken, S. 2012. Projecting future distributions of ecosystem climate niches: uncertainties and management applications. *Forest Ecology and Management* 279:128-140.
- Wang, Y., Raulier, F. y Ung, C.H. 2005. Evaluation of spatial predictions of site index obtained by parametric and nonparametric methods - a case study of lodgepole pine productivity. *Forest Ecology and Management* 214:210-211.
- Whisler, F.D., Acock, B., Baker, D.N, Fye, R.E., Hodges, H.F., Lambert, J.R., Lemon, H.E, Mckinnion, J.M. y Reddy, V.R. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy* 40.141-208.
- Wibowo, D. H. y Byron, R.N. 1999. Deforestation mechanism: a survey. *International Journal of Social Economics* 26:455-474.
- Wright, J., Dinicola, A. y Gaitán, E. 2000. Latin American forest plantations: opportunities for carbon sequestration, economic development, and financial returns. *Journal of Forestry* 98:20-23.
- Zapata, M. 2007. Modelos de sitio para plantaciones tropicales. Caso de estudio: aplicación de modelos jerárquicos bayesianos. XVII Simposio Nacional de Estadística, Cali, Colombia.
- Zeide, B. 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science* 39:594-617.

IMPACTOS ECONÓMICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA

SECTOR FORESTAL

Publicaciones relacionadas:

- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Síntesis
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Transporte
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Ganadero
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Sector Pesquero
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Recurso Hídrico
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Especies Nativas y Biocomercio
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Costos Económicos de los Eventos Extremos
- Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Análisis Costo-Beneficio de Medidas de Adaptación



DNP Departamento
Nacional
de Planeación

