BID
MME
MADR
MAVDT
DNP

Banco Interamericano de Desarrollo
Ministerio de Minas y Energía
Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Territorial
Departamento Nacional de Planeación

Centro Nacional de Producción Más Limpia
Universidad Pontificia Bolivariana
EMPA Materials Science & Technology

Proyecto:
"Estrategias de energía sostenible y biocombustibles
para Colombia ATN/JC-10826-CO y ATN/JF-10827-CO"

# "Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia".

# Capitulo III:

# Estudio SIG - Potencial de Expansión

Sostenibilidad de biocombustibles en Colombia SBC

**PREPARADO PARA**: Banco Interamericano de Desarrollo (BID) – Ministerio de Minas y Energía
**ELABORADO POR:** Consorcio CUE
**FECHA:** Enero 2012
**CIUDAD:** Medellín

# TABLA DE CONTENIDO

**1 OBJETIVO DEL ESTUDIO ..... 1**

**2 METODOLOGÍA ..... 3**

2.1 MARCO CONCEPTUAL ..... 3
2.2 ALCANCE ..... 4
2.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO ..... 4

**3 APTITUD BIOFÍSICA ..... 6**

3.1 FACTORES CLIMÁTICOS ..... 8
*3.1.1 Precipitación ..... 9*
*3.1.2 Temperatura ..... 11*
*3.1.3 Otros factores climáticos ..... 13*
*3.1.4 Agregación del mapa climático ..... 14*
3.2 FACTORES AGRONÓMICOS ..... 16
*3.2.1 Inundación ..... 16*
*3.2.2 Erosión natural ..... 18*
*3.2.3 Profundidad del suelo ..... 19*
*3.2.4 Fertilidad del suelo ..... 21*
*3.2.5 Drenaje natural ..... 23*
*3.2.6 Pendiente ..... 25*
3.3 APTITUD AGRONÓMICA ..... 27
3.4 APTITUD BIOFÍSICA ..... 29
*3.4.1 Mapa de aptitud para la palma de aceite ..... 30*
*3.4.2 Mapa de aptitud para los cultivos de caña de azucar ..... 34*
3.5 PRODUCTIVIDAD POTENCIAL ..... 36
*3.5.1 Productividad de la caña de azúcar ..... 36*
*3.5.2 Productividad de palma de aceite ..... 37*

**4 RESTRICCIONES LEGALES ..... 39**

**5 LIMITACIONES ECOLÓGICAS ..... 42**

5.1 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO GEI ..... 42
*5.1.1 Emisiones de carbono por el cambio de uso del suelo ..... 44*
*5.1.2 Enlazando las emisiones de GEI de ubicaciones especificas a los resultados por defecto de ACV ..... 67*
*5.1.3 Deuda de carbono regionalizada para los biocombustibles en Colombia. ..... 71*
*5.1.4 Sensibilidad para las distancias de transporte ..... 74*
5.2 ESCASEZ DE AGUA ..... 75
5.3 BIODIVERSIDAD ..... 79

**6 CRITERIOS SOCIO-ECONÓMICOS ..... 82**

6.1 ACCESO A INSTALACIONES DE PROCESAMIENTO ..... 82
6.2 ACCESO A MERCADOS ..... 83
6.3 ACCESO A LA RED VIAL ..... 85
6.4 SEGURIDAD ..... 87
6.5 SEGURIDAD ALIMENTARIA ..... 89

**7 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES ..... 91**

7.1 PALMA DE ACEITE ..... 92
7.2 CAÑA DE AZÚCAR ..... 98
7.3 CONCLUSIÓN ..... 105

**8 REFERENCIAS ..... 106**

**9 ANEXOS ..... 112**

9.1 TIPOLOGÍAS DE USO DEL SUELO Y SUS RESERVAS DE CARBONO DE LA BIOMASA ..... 112
9.2 MAPA DE VEGETACIÓN POTENCIAL NATURAL ..... 129

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clases de aptitud definidas por FAO (FAO 1981) Los colores de las diferentes clases también reflejan los colores utilizados por los mapas de aptitud. ..... 7

Tabla 2: Cantidad de precipitación y relación con las categorías de aptitud de la FAO para el cultivo de caña de azúcar y palma de aceite. (Fuente: Mapa de precipitación del IDEAM, clasificación del IDEAM (2009b)y Cenicaña (2011). ..... 9

Tabla 3: La temperatura de extensas zonas de Colombia es adecuada para la producción de caña de azúcar. (Fuente: Mapa de temperatura del IDEAM, clasificación del IDEAM 2009b and Cenicaña 2011). ..... 12

Tabla 4: Matriz para determinar la aptitud climática. S1: Apto, S2: Apto con restricciones moderadas, S3: Apto con restricciones severas, N1: No apto condicional: N2: No apto permanentemente. (Fuente: IDEAM 2009). ..... 14

Tabla 5: Inundación - Clasificación de aptitud específica por cultivo (Fuente: Mapa de inundación de la clasificación del IGAC adaptado del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011) ..... 17

Tabla 6: Erosión del suelo – Clasificación de aptitud específica para cultivo. (Fuente: Mapa de erosión del IGAC, clasificación adaptada del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011). ..... 18

Tabla 7: profundidad del suelo - clasificación de aptitud especifica por cultivo. (Fuente: Mapa de profundidad del suelo del IGAC, clasificación adaptada del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011). ..... 20

Tabla 8: Fertilidad del suelo - clasificación de aptitud específica para el cultivo. (Fuente: Mapa de fertilidad del IGAC, clasificación adaptada del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011). ..... 22

Tabla 9: Drenaje Natural – Clasificación de aptitud específica por cultivo. (Fuente: mapa de drenaje natural del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011). ..... 24

Tabla 10: Pendiente – clasificación de aptitud específica por cultivo. Fuente: Mapa de pendiente de USGS, clasificación adaptada del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011). ..... 26

Tabla 11: Matriz para determinar la aptitud agronómica. S1: Apto, S2: Apto con restricciones moderadas, S3: Apto con restricciones severas, N1: No apto condicional, N2: No apto permanentemente. Fuente: Adaptado de IDEAM (2009b). ..... 28

Tabla 12. Matriz para determinar la aptitud agronómica (incluida la pendiente). S1: apto, S2: apto con restricciones moderadas, S3: apto con restricciones severas, N1: no apto condicional, N2: no apto permanentemente. (Fuente: Adaptada del IDEAM (2009b). ..... 28

Tabla 13: Matriz para determinar la aptitud biofísica. S1: Apto, S2: Apto con restricciones moderadas, S3: Apto con restricciones severas, N1: No apto condicional, N2: No apto permanentemente. (Fuente: Adaptada del IDEAM (2009b). ..... 30

Tabla 14: Rendimientos anuales asumidas por cada clase de aptitud en ton de caña de azúcar por hectárea. ..... 37

Tabla 15: Las cosechas anuales son tomadas para cada clase de aptitud en tonelada FFB por hectárea. ..... 38

Tabla 16: Extensión superficial (km2) de las zonas de carbono, tipologías de uso del suelo por zonas vegetales en Colombia. (Fuente: CUE). ..... 49

Tabla 17: Distribución de las reservas de carbono sobre y debajo de bajo la superficie del suelo para las plantaciones de Palma de aceite en Sumatra, Indonesia. (Fuente: Syahrinudin 2005, Tabla 5.10) ..... 52

Tabla 18: Valores por defecto para el cálculo SIG (Fuente: CUE) ..... 68

Tabla 19: Clasificación de Estrés Hídrico adaptada de (Mora, Arcila-Burgos et al. 2009). ..... 76

Tabla 20: Niveles de restricción para áreas de conservación prioritaria de acuerdo al SINAP (Sistema Nacional de Áreas Protegidas). ..... 79

Tabla 21: Inventarios de biomasa y suelos forestales del IPCC, por zonas vegetales. Los valores en paréntesis representan rangos. ..... 112

Tabla 22: Biomasa superficial (AGB) diferente para cada zona de carbono medida como toneladas de material seca por hectárea que fue clasificado como no significativo para el propósito de este proyecto y se le dio la clasificación de No Aplicable, N.A. (código numérico = 9999) ..... 126

Tabla 23: Tallo / raíz definida para cada Zona de Carbono. No Aplica (NA, código numérico = -9999) Los valores son definidos cuando los estimativos no son relevantes para los propósitos del proyecto. ..... 127

Tabla 24: Biomasa encima del suelo (AGB) más Biomasa debajo del suelo (BGB), medida como Toneladas de Carbono por ha, es calculada para cada zona de carbono. No Aplica (NA, código numérico = -9999) Los valores son definidos cuando los estimativos no son relevantes para los propósitos del proyecto. ..... 128

Tabla 25: Características de la biomasa de vegetación potencial conocida como bosques naturales. ..... 129

Tabla 26: Características de la biomasa de vegetación potencial fuera de bosques naturales. Los valores No Aplica (NA, código numérico = -9999) se definen cuando los estimativos no son factibles y no son relevantes para el proyecto. ..... 129

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cultivos de caña de azúcar (verde) y palma de aceite (azul) en Colombia en el año 2008. (Fuente: CUE, Cenicaña y Cenipalma). 2

Figura 2: Vista general sobre el concepto SIG. (Fuente: CUE). 4

Figura 3: Exclusión de la altitud, zonas urbanas y cuerpos de agua para la palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). (Fuente: CUE, basado en el mapa base del país, el mapa de cuerpos de agua del IGAC y el modelo de elevación de USGS). Las áreas excluidas son aquellas que no están en verde. 6

Figura 4: Esquema general sobre los criterios biofísicos empleados. (Fuente: CUE) 7

Figura 5: Precipitación: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha) 11

Figura 6: Temperatura: Mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha) 13

Figura 7: Radiación solar diaria (izquierda), humedad relativa (centro) y velocidad de viento (derecha) de Colombia. (Fuente: IDEAM 2005 y 2006). 14

Figura 8: Condiciones climáticas: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). 15

Figura 9: Inundación: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). 17

Figura 10: Erosión: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). 19

Figura 11: Profundidad del suelo: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). 21

Figura 12: Fertilidad: mapa de aptitud para la palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). 23

Figura 13: Drenaje: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). 25

Figura 14: Pendiente: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). 27

Figura 15: Aptitud agronomica: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). 29

Figura 16: Aptitud biofísica de los cultivos de palma de aceite. 31

Figura 17: Mapa de aptitud biofisica (cada pixel:5km x 5km) y ampliado a los cultivos actuales de palma (marcados en azul) en Nariño (1), Meta (2), Magdalena y Cesar (3) y Santander (4). 32

Figura 18: mapa de aptitud de la FAO para los cultivos de palma de aceite (FAO and IIASA 2006). 33

Figura 19-Izquierda: Aptitud biofísica para los cultivos de caña de azúcar. Derecha: vista detallada del Valle del Rio Cauca (azul= área de cultivo actual de caña de azúcar). 34

Figura 20: Mapa de aptitud de la FAO para cultivos de azúcar (FAO y IIASA 2006). 35

Figura 21: Rendimientos anuales de Caña de azúcar de los sitios muestreados en el Valle geográfico del rio Cauca (en tonelada por hectárea). 36

Figura 22: Productividad anual de palma de aceite en Colombia (ton por hectárea-año). (Fuente CUE) 37

Figura 23: En gris las áreas sin ninguna restricción legal IGAC: Territorios colectivos (2010.) UAESPNN: Sistema Nacional de Parques Naturales (2008). 40

Figura 24: Ecosistemas de bosque en las Zonas de reserva Forestal de Ley 2 de 1959 (IDEAM, 2007) 41

Figura 25: Concepto para modelar un mapa de emisiones de GEI (Fuente: CUE). 43

Figura 26: Reservas de carbono del suelo: por encima del suelo, por debajo del suelo y carbono orgánico del suelo. (Fuente: CUE) ..... 44

Figura 27: Concepto esquemático para calcular las emisiones GEI para el cambio de la utilización de la tierra. (Fuente: CUE). ..... 45

Figura 28: Ejemplo esquemático del cambio en el uso del suelo de bosques naturales a cultivos de palma de aceite (derecha). (Fuente: CUE) ..... 46

Figura 29: Diagrama de flujo de proceso para evaluar la reserva de carbono de la biomasa para el uso del suelo de referencia. (Fuente: CUE). ..... 47

Figura 30: Reclasificación de las ecozonas en zonas vegetales definidas por la FAO y el IPCC (izquierda) y el mapa de uso del suelo del año 2000 (derecha, la leyenda se presenta en la Tabla 16 del IGAC 2002). ..... 48

Figura 31: Carbono total de la biomasa del uso del suelo de referencia en Colombia (en toneladas de carbono por hectárea) ..... 50

Figura 32: Acumulación de biomasa de la palma de aceite (izquierda) y de la caña de azúcar (derecha). La línea roja indica el promedio de biomasa acumulado en un periodo de 20 años. (Fuente: CUE). ..... 51

Figura 33: Diagrama de flujo de proceso para evaluar la reserva de carbono en la biomasa de los cultivos de materias primas para biocombustibles. (Fuente: CUE). ..... 51

Figura 34: Desarrollo de planta simulada (modelo CS) para la AGB de la caña de azúcar en Brasil. (Fuente: Macedo 2010) ..... 52

Figura 35: Relación Raíz-tallo (en base a peso seco) para la caña de azúcar sembrada en maceta (c.v. Q96) (re dibujado de Smith, 1998)" (Macedo 2010). ..... 53

Figura 36: Cambio potencial en las reservas de biomasa, si el suelo es empleado para cultivos de palma de aceite (derecha) y caña de azúcar (izquierda) en toneladas de carbono por hectárea. ..... 54

Figura 37: Evaluación del cambio del carbono orgánico del suelo (Fuente: CUE) ..... 55

Figura 38: Mapa de reserva de carbono de un sistema natural de referencia. (Fuente: CUE) ..... 57

Figura 39: Factores de cambio relativo de reservas (izquierda) y el $SOC_0$ (derecha) para Colombia. (Fuente: CUE). ..... 59

Figura 40: El $SCO_t$ después de la transformación del suelo a palma de aceite (izquierda) y caña de azúcar (derecha). ..... 60

Figura 41: Cambio en el SOC de convertir el uso del suelo de referencia a cultivos de palma de aceite (en ton C por hectárea). ..... 62

Figura 42: Cambio en el SOC de convertir el uso del suelo de referencia a cultivos de caña de azúcar de (en ton C por hectárea). ..... 63

Figura 43: Cambio en la reserva de carbono debido al cambio del uso del suelo actual por palma de aceite (Izquierda) y Caña de azúcar (derecha) en toneladas de carbono por hectárea. (Fuente: CUE). ..... 64

Figura 44: Cambio en la reserva de carbono debido al cambio de uso del suelo uso actual a palma de aceite en kg CO2 por kg RFF cosechado. ..... 65

Figura 45: Cambio en la reserva de carbono debido a la trasformación del uso del suelo actual a cultivos de caña de azúcar en kg $CO_2$ por kilogramo de caña de azúcar cosechada. 66

Figura 46: Emisiones relativas de GEI para etanol de caña de azúcar regionalizada para Colombia. El ahorro (verde) y las emisiones (rojo) de GEI son relativos a las emisiones de GEI. 69

Figura 47: E Emisiones de GEI relativas al etanol de caña de azúcar regionalizado para Colombia. Los ahorros (verde) y emisiones de GEI (rojo) son relativos a las emisiones de GEI. 70

Figura 48: Deuda de carbono del biodiesel producido de la palma de aceite en Colombia (en años). Fuente CUE. 72

Figura 49: Deuda de carbono del etanol producido de la caña de azúcar en Colombia (en años). Fuente: CUE. 73

Figura 50: Kg CO2 emitidos por vehículo-km para la palma de aceite (izquierda) y caña de azúcar (derecha) si solo se pudieran usar las plantas de producción existentes. 75

Figura 51: Índice de estrés hídrico de Colombia (IDEAM 2009b). 76

Figura 52: Índice de estrés hídrico de Pfister et al.2009 77

Figura 53: Índice de uso de Aguas en Colombia en año seco (IDEAM 2010). 78

Figura 54: Áreas de conservación prioritaria de acuerdo a SINAP. (Corzo 2008). 80

Figura 55: Áreas de bosques de Colombia (IGAC 2002). 81

Figura 56: Resumen esquemático de los factores socio-económicos considerados. 82

Figura 57: Acceso a fábricas de palma existentes (izquierda) y fábricas de caña de azúcar (derecha). La distancia de amortiguación es de 30 km. 83

Figura 58: Acceso a mercados. (IDEAM 2009c) 84

Figura 59: Acceso a las principales vías y ríos (<15 km, marcadas en verde) y otras vías (<10 km, marcadas en verde claro y < 5 km en naranjado) (Fuente: IDEAM 2009c). 86

Figura 60: Mapa de riesgo de seguridad de Colombia, bajo (verde), medio (verde claro) y alto (amarillo) (Fuente: IDEAM 2009c). 88

Figura 61: Mapa de la producción agrícola actual. (Fuente: IGAC 2002). 90

Figura 62: Palma de aceite; aptitud biofísica (izquierda) sobrepuesta con las áreas protegidas (derecha). 92

Figura 63: Aptitud de la palma de aceite excluyendo las áreas edafo-climáticas no aptas y las áreas protegidas, sobrepuesto con áreas con menos de 40% de ahorros de GEI (Izquierda) y áreas de biodiversidad de alta prioridad (derecha). Fuente: CUE 93

Figura 64: Aptitud de palma de aceite. Excluye las áreas protegidas y biofísicamente no aptas, áreas con menos de 40% en ahorros de GEI, puntos críticos de biodiversidad, sobrepuesto con un mapa de las áreas agrícolas (izquierda) y áreas con acceso a vías (derecha). 94

Figura 65: Aptitud de la palma de aceite, excluyendo las áreas protegidas y no aptas biofísicamente, áreas con menos de 40% en ahorro de GEI, puntos críticos de biodiversidad, áreas agrícolas y áreas de acceso limitado (áreas naranja). Fuente: CUE 95

Figura 66: Área apta para el cultivo de palma de aceite en Colombia para 10 departamentos. (Fuente: CUE). Áreas aptas, aptas con restricciones moderadas y aptas con restricciones severas (izquierda), áreas aptas y aptas con restricciones moderadas (derecha). ..... 97

Figura 67: Área apta para la plantación de palma de aceite en Colombia para 10 departamentos Fuente: CUE. Aptitud Alta, Moderada, marginal y actualmente no aptas. ..... 98

Figura 68: Caña de azúcar: adaptación biofísica (izquierda) sobrepuesta con las áreas protegidas (derecha). Fuente: CUE. ..... 99

Figura 69: Aptitud de la caña de azúcar. Excluye las áreas protegidas y biofísicamente no aptas, sobrepuesto con áreas con ahorros menores de 40% en GEI (izquierda).y áreas prioritarias de biodiversidad (derecha). ..100

Figura 70: Aptitud de caña de azúcar. La aptitud excluye las áreas protegidas y biofísicamente no aptas, con menos de 40% en ahorros de GEI, áreas prioritarias de biodiversidad, sobrepuesto con las áreas utilizadas para la agricultura (izquierda) y áreas con acceso a vías (derecha).....101

Figura 71: Aptitud de la caña de azúcar. La aptitud de la caña de azúcar de la figura anterior excluye las áreas protegidas y no aptas biofísicamente, áreas con menos de 40% en ahorros de GEI, áreas de alta prioridad para la biodiversidad, áreas utilizadas actualmente para la agricultura y áreas de acceso limitado (áreas naranja). Fuente: CUE. .....102

Figura 72: Área apta para el cultivo de caña de azúcar en Colombia para 10 departamentos. Áreas aptas, aptas con restricciones moderadas y aptas con restricciones severas (izquierda), áreas aptas y aptas con restricciones moderadas (derecha). (Fuente: CUE). .....103

Figura 73: Área apta para el cultivo de gaña de azúcar para 10 departamentos en Colombia. Áreas de aptitud Alta, moderada, marginal y actualmente no aptas. Fuente: CUE. .....104

Figura 74: Total de Carbono en la Biomasa (Toneladas de C per hectárea) de zonas potenciales de acuerdo a zonas vegetales. .....130

## GLOSARIO

| | |
|---|---|
| ACV | Análisis de Ciclo de Vida |
| ACVS | Análisis de Ciclo de Vida Social |
| AGB | Biomasa por encima del suelo |
| BGB | Biomasa por debajo del suelo |
| BID | Banco Interamericano de Desarrollo |
| BLIHR | Iniciativa de los Líderes Empresariales sobre los Derechos Humanos |
| CED | Demanda de Energía Acumulada |
| CH | Clasificación Ecoinvent para datos suizos |
| CML | Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden |
| CTA | Cooperativa de Trabajo Asociado |
| CUE | Consorcio de autores del estudio (CNPML-UPB-EMPA) |
| CUT | Confederación Unitaria de Trabajadores |
| DALY | Disability Adjusted Life Years |
| DQO | Demanda Química de Oxigeno |
| EI99 | Eco indicador 99 |
| EICV | Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida |
| EtOH | Etanol |
| FAO | Food and Agriculture Organization of United Nations |
| FC | Fracción de Carbono |
| GBEP | Global Bioenergy Partnership |
| GEI | Gases de Efecto Invernadero |
| GIS | Geographic Information System (SIG en esp.) |
| GRI | Iniciativa de Reporte Global |
| GWP | Potencial de calentamiento global |
| IAvH | Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt |
| ICV | Inventario de Ciclo de Vida |
| ICV | Índice de Calidad de Vida |
| IDEAM | Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales |
| IEA | Agencia Internacional de Energía |
| IFC | Corporación Financiera Internacional |
| IGAC | Instituto Geográfico Agustín Codazzi |
| iLUC | Cambios indirectos del uso del suelo |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| LUC | Cambio del uso del suelo |
| LUC | Cambio en el uso del suelo |
| MADR | Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural |
| MAVDT | Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial |

| | |
|---|---|
| MDL | Mecanismo de Desarrollo Limpio |
| MEP | Metilester de Palma |
| MOD | Materia Orgánica Descompuesta |
| MP | Material Particulado |
| NBI | Necesidades Básicas Insatisfechas |
| OIT | Organización Internacional del Trabajo |
| PAH | Hidrocarburos aromáticos policíclicos |
| PDD | Documento de Diseño del Proyecto |
| PIB | Producto Interno Bruto |
| PST | Partículas Sólidas Totales |
| RED | Renewable Energy Directive |
| RER | Clasificación Ecoinvent para promedio europeo |
| RFF | Racimos de Fruto Fresco |
| RSB | Mesa Redonda sobre Biocombustibles. Sostenibles |
| RSPO | Mesa redonda sobre el Aceite de Palma Sostenible |
| SD | Desviación estándar |
| SIG | Sistema de Information Geográfico |
| SINAP | Sistema Nacional de Áreas Protegidas |
| SOC | Carbono orgánico del suelo |
| SQCB | Sustainability Quick Check for Biofuels |
| TAR | Tratamiento de Aguas Residuales |
| UAESPNN | Unidad Administrativa Especial Sistema de Parques Nacionales Naturales |
| UCTE | Union for the coordination of Transmission of Electricity (Europe) |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change |
| VGRC | Valle Geográfico del Río Cauca |
| VOC | Compuestos orgánicos volátiles |
| WWF | World Wide Fund for Nature |

# 1 Objetivo del estudio

Aunque el área de cultivo actual para los cultivos energéticos en Colombia es limitada (ver Figura 1), se espera que la demanda creciente de biocombustibles y otros productos provenientes de la caña de azúcar y la palma de aceite motiven una gran expansión de las materias primas para biocombustibles.

Sin embargo, los beneficios potenciales de una producción de biocombustibles cada vez mayor solamente puede ser alcanzada si se asegura una expansión sostenible de materias primas para biocombustibles.

El propósito del estudio es proporcionar un primer filtro de las áreas potencialmente aptas para caña de azúcar y palma de aceite a nivel nacional. La aptitud de cultivar materias primas para biocombustibles es evaluada usando un conjunto de variables biofísicas, legales, ambientales y socioeconómicas, abordando asuntos de sostenibilidad claves. El Análisis de Ciclo de Vida de los Biocombustibles Colombianos ha demostrado la importancia de los efectos del cambio del uso del suelo en el balance de carbono. Por consiguiente, se ha puesto un enfoque especial en el mapa de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) de los potenciales cambios en el uso de la tierra.

Los mapas de aptitud generados permiten identificar patrones generales de áreas aptas, las cuales proveen una base de conocimiento científico para una planeación mejorada del uso de la tierra e inversiones en proyectos de biocombustibles sostenibles. Además, el estudio señala áreas de interés, donde se requiere investigación detallada para la planeación de proyectos específicos.

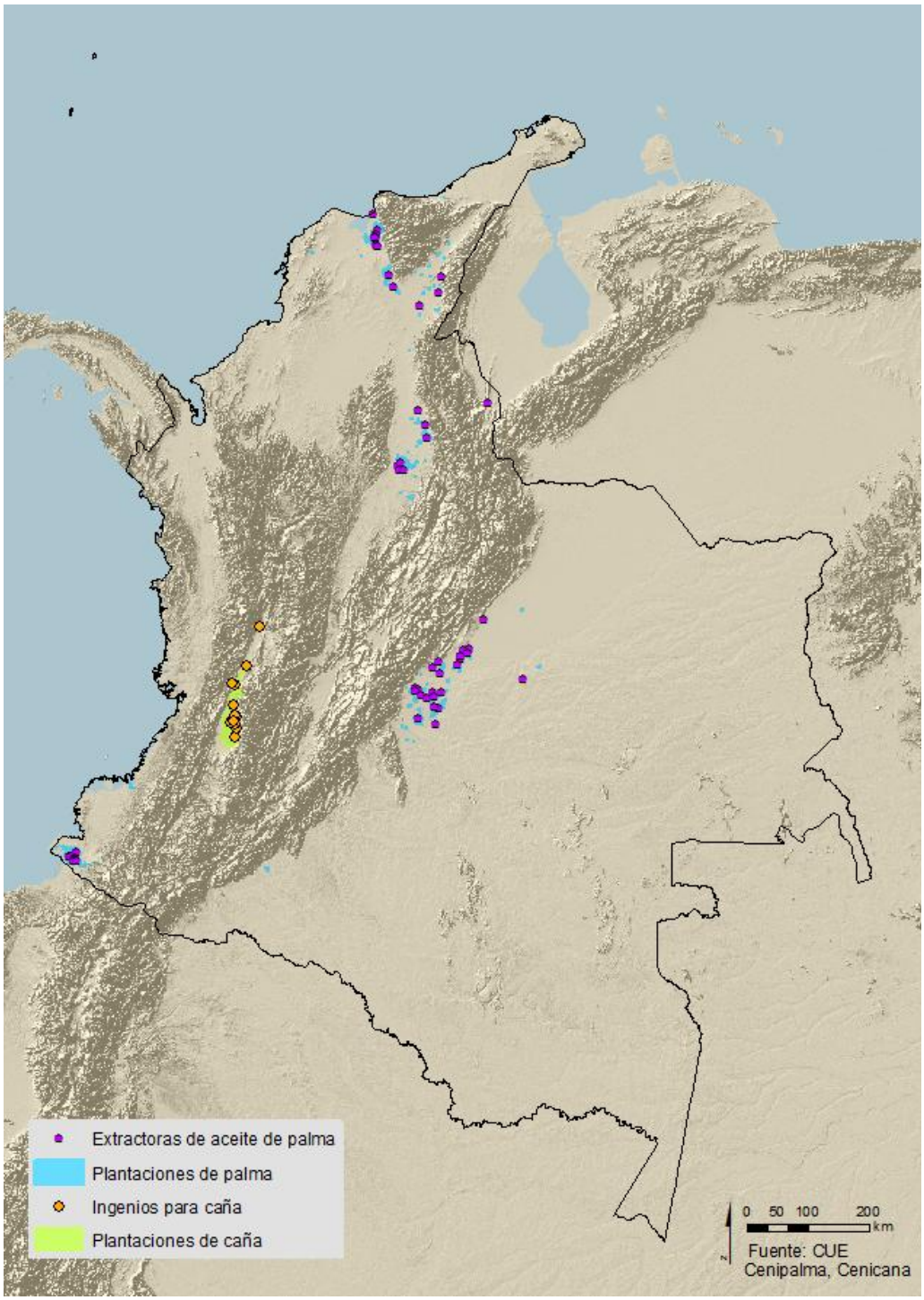



*Figura 1: Cultivos de caña de azúcar (verde) y palma de aceite (azul) en Colombia en el año 2008. (Fuente: CUE[1], Cenicaña y Cenipalma).*

[1] Todas las figuras y tablas establecidas en este estudio son referenciadas como CUE (Consocio CNPML-UPB-EMPA)

# 2 Metodología

En la siguiente sección, se describe el marco metodológico para evaluar el potencial de expansión sostenible para caña de azúcar y palma de aceite, así como también el alcance geográfico y temporal. Además, se explican las principales limitaciones metodológicas del estudio.

## 2.1 Marco conceptual

La evaluación de la aptitud del potencial de expansión de la caña de azúcar y palma de aceite está basada en un enfoque multicriterio, tomando en cuente aspectos biofísicos, legales, ambientales y socioeconómicos (ver Figura 2).

- Primero, se evalúan las características climáticas y biofísicas con el fin de identificar todas las áreas en las cuales puede ser cultivada la caña de azúcar y la palma de aceite.
- En un segundo paso, se excluyen las áreas con restricción legal prioritaria, como parques nacionales o reservas indígenas.
- Tercero, se identifican las áreas con algo impacto respecto la biodiversidad, escasez de agua y a las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI). Este estudio se ha enfocado la evaluación de las emisiones de GEI relacionadas con el cambio en el uso de la tierra, dado su relevancia para satisfacer los esquemas de certificación de sostenibilidad y al hecho que este aspecto amenudo ha sido desatendido en estudios de aptitud basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) actuales.
- Cuarto, se consideraron criterios socioeconómicos (basados principalmente en investigaciones existentes).
- Finalmente, se obtienen los mapas clave de aptitud de todas las categorías para discutir la sostenibilidad del potencial espacial.

En las siguientes secciones, se describen las metodologías detalladas para generar los mapas presentadas en la Figura 2.

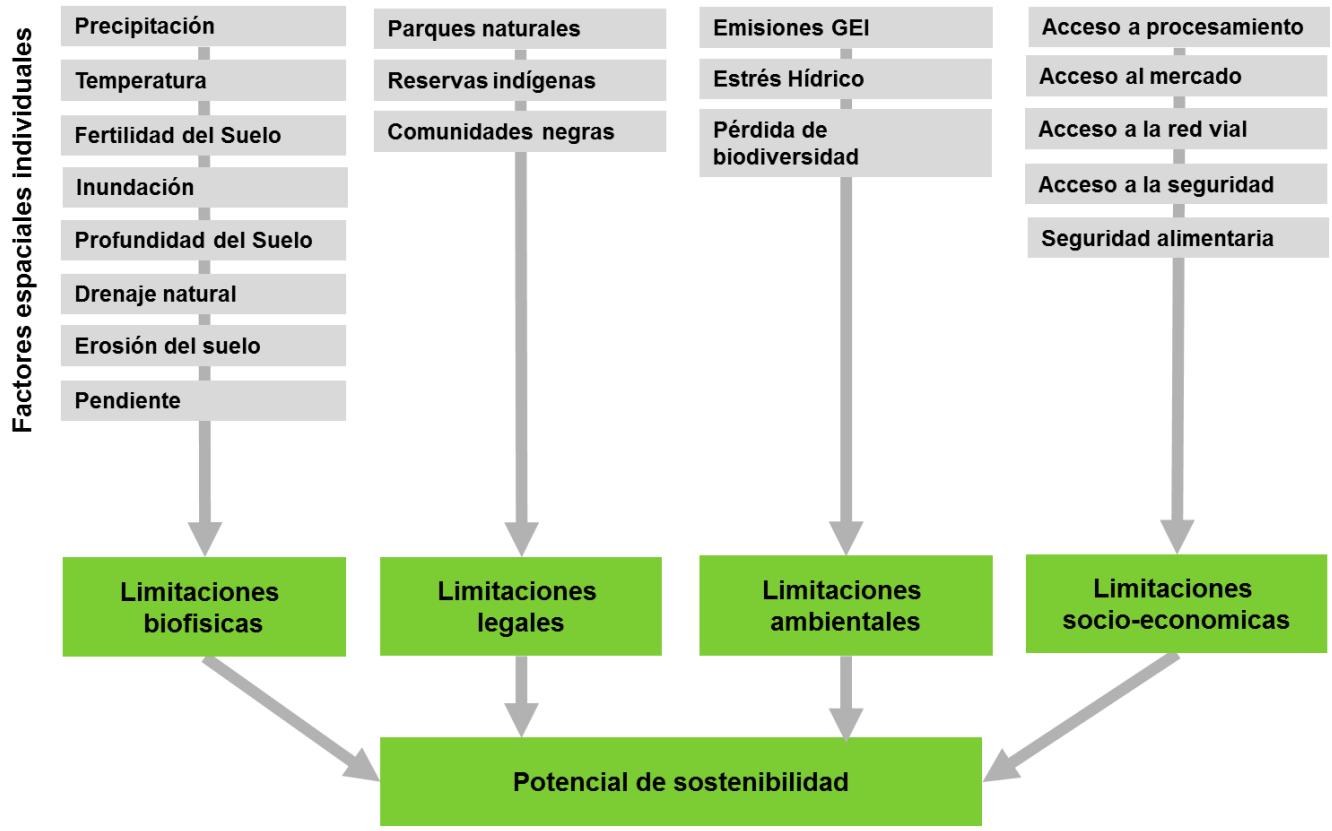



*Figura 2: Vista general sobre el concepto SIG. (Fuente: CUE).*

## 2.2 Alcance

El estudio es realizado para toda Colombia (alcance geográfico) para el año de referencia 2009[2]. La escala del trabajo es en la mayoría de los casos 1:500.000 y cuadriculas de celdas de 5 km x 5 km para los cálculos raster. Todos los mapas están basados en el sistema de coordinadas proyectadas "MAGNA-SIRGAS / Zona Bogotá, Colombia".

## 2.3 Limitaciones del estudio

El modelo basado en SIG usado para obtener las áreas de expansión potencial para materias primas de biocombustibles está basado en un enfoque multicriterio. La metodología de los pasos unitarios, así como también las limitaciones implícitas y opciones de mejora, son descritas más adelante en los capítulos subsiguientes.

No obstante, a continuación se discuten algunas limitaciones metodologías más generales del enfoque aplicado.

[2] Algunos mapas son de antes del 2009 (respectivamente referenciados).

Primero, existen varias definiciones de una producción de biocombustible sostenible y aunque se consideraron aspectos clave en este estudio, se podría haber agregado más criterios (p.e derechos humanos). Además, cada criterio usado dentro de este estudio puede ser puesto en operación de muchas maneras. Por ejemplo, debería la biodiversidad ser medida como el número de especies de plantas vasculares, animales, especies bajo protección, o ninguna de estos? Por ejemplo, lo mismo sucede para la aptitud climática, la cual dependen de varios factores (precipitación, radiación solar, temperatura, humedad, velocidad del viento, etc.) de los cuales no todos están, lo cual puede reflejarse en este estudio.

Asimismo los cambios y fluctuaciones temporales (p.e precipitación promedio anual versus la cantidad de meses secos) son relevantes para determinar la aptitud del cultivo, pero no siempre pueden ser tomadas en cuenta. Adicionalmente, el estudio tiene un alcance temporal y por lo tanto requiere una actualización continua de los mapas base, con el fin de reflejar apropiadamente los desarrollos futuros.

La resolución usada en este estudio (principalmente 1:500.000) es suficiente para identificar patrones generales de aptitud a nivel nacional. Sin embargo, los mapas base de baja resolución no reflejan circunstancias locales y por lo tanto los mapas base usados en este estudio no pueden usarse para planear proyectos específicos de biocombustibles.

Dado a los limitados recursos y a la limitada disponibilidad de los mapas requeridos, el estudio a pesar de todo es capaz de identificar áreas de enfoque donde el cultivo de materias primas para biocombustibles es comúnmente apto. No obstante, se requiere de estudios posteriores basados en mapas base de mayor resolución y considerar factores adicionales con el fin de permitir la planeación de proyectos específicos dentro de las áreas de enfoque identificadas. Más aun, no todos los aspectos de sostenibilidad pueden ser aboradas apropiadamente mediante un enfoque espacial (p.e trabajo infantil) y por consiguiente el estudio debe ser complementado con otros métodos.

Como se menciona anteriormente, la metodología y sus limitaciones están descritas en los capítulos subsiguientes y tienen que ser tomadas en cuenta con el fin de interpretar correctamente los resultados.

# 3 Aptitud biofísica

Con base en los requerimientos específicos de cultivo, las áreas potenciales de cultivo son evaluadas y clasificadas en diferentes niveles de aptitud. La tierra potencialmente apta se determina por factores climáticos y agronómicos, y la clasificación se basa en el sistema de clasificación FAO (FAO1981).

En un primer paso, se excluyeron los cuerpos hídricos y suelos urbanos del área de Colombia. Más adelante, la altitud se emplea como un criterio de exclusión, el cual refleja las restricciones climáticas que ciertos los cultivos tienen sobre cierta altitud. Para la palma de aceite, la altura máxima es de 1000 metros sobre el nivel del mar (IDEAM (2009b)), mientras que la caña de azúcar puede crecer hasta los 2500 metros sobre el nivel del mar (Cenicaña 2011) Debido a diferentes condiciones climáticas, la caña de azúcar en el Brasil es generalmente cultivada por debajo de 1000 metros NETAFIM (Netafim 2008). En la Figura 3 se muestran las áreas de Colombia sin los cuerpos de agua, zonas urbanas y excluyendo las áreas sobre 1000 m (izquierda para palma de aceite) y sobre 2500 m (derecha para caña de azúcar).

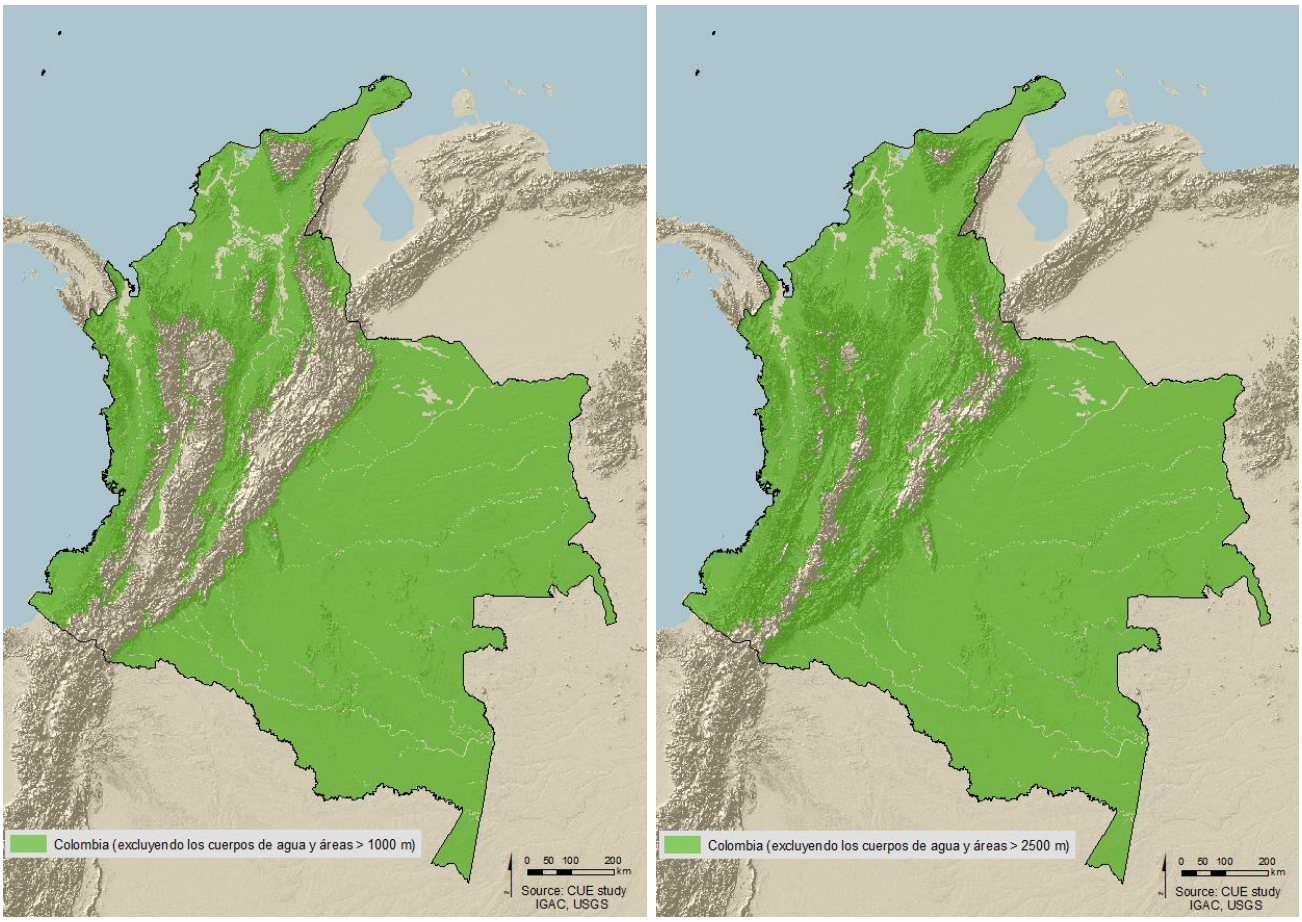



*Figura 3: Exclusión de la altitud, zonas urbanas y cuerpos de agua para la palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha). (Fuente: CUE, basado en el mapa base del país, el mapa de cuerpos de agua del IGAC y el modelo de elevación de USGS). Las áreas excluidas son aquellas que no están en verde.*

En un Segundo paso, se consideran los factores climáticos y agronómicos que determinan el potencial de aptitud de las condiciones del cultivo (ver Figura 4). Los criterios se escogieron de acuerdo a la selección realizada por el IDEAM (2009), teniendo en cuenta la temperatura anual promedio, precipitación anual, fertilidad del suelo, inundación, profundidad del suelo, drenaje natural, erosión del suelo y pendiente.

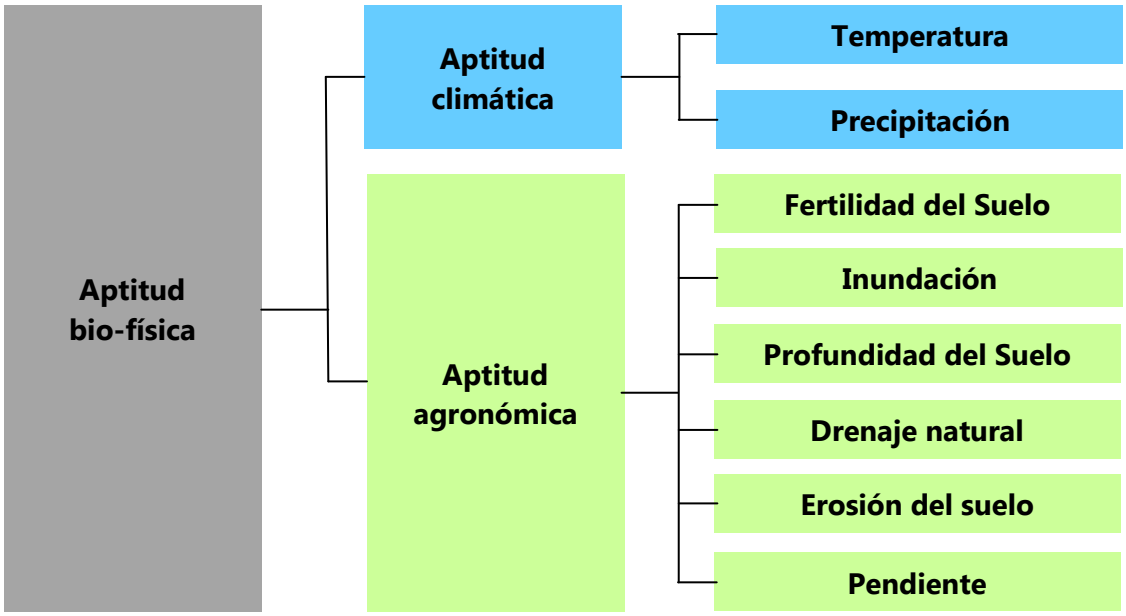



*Figura 4: Esquema general sobre los criterios biofísicos empleados. (Fuente: CUE)*

Se utilizó el mapa climático de IDEAM (IDEAM 2005a) y los mapas agronómicos base están basados en el mapa de suelos de IGAC (IGAC 2003) con una escala de trabajo de 1:500.000. Para cada factor climático y agronómico, se determinó la aptitud específica de cada cultivo. El sistema de clasificación de aptitud se basa en las clasificaciones definidas por FAO (ver Tabla 1).

*Tabla 1: Clases de aptitud definidas por FAO (FAO 1981) Los colores de las diferentes clases también reflejan los colores utilizados por los mapas de aptitud.*

| Clases de aptitud | Descripción | Valor |
|---|---|---|
| S1 Apto | Suelos que no presentan limitaciones significativas para la aplicación continua de un uso dado, o limitaciones menores que no reducirán de manera significativa la productividad o los beneficios ni incrementaran los insumos por encima de un nivel aceptable. | 8 |
| S2 Apto con restricciones moderadas | Suelos que tienen limitaciones que de manera agregada son moderadamente severas para la aplicación continua de un uso dado; las limitaciones reducirán la productividad o beneficios a un punto que, a pesar de ser aun rentable, es menos rentable de lo que esperaría la tierra clase S1. | 4 |
| S3 Apto con restric- | Suelos que presentan limitaciones que de manera agregada son severas para la | 2 |

| Clases de aptitud | Descripción | Valor |
|---|---|---|
| ciones severas | aplicación continua de un uso dado y por lo tanto reducirá la productividad o beneficios, o incrementara los insumos necesarios, por lo tanto los gastos serán marginalmente justificados. | |
| N1 No apto condicional. | Suelos que tienen limitaciones que pueden ser superadas en el futuro pero que en el momento no pueden ser corregidas con el conocimiento existente bajo unos costos aceptables; las limitaciones son por lo tanto severas para mantener de manera exitosa una utilización sostenida de un uso dado. | 1 |
| N2 no apto perma-nentemente | Suelos que presentan limitaciones severas para hacer cualquier utilización exitosa de la tierra en un uso dado. | 0 |

Los parámetros para la aptitud de los cultivos de palma de aceite son extraídos y ligeramente adaptados del estudio de palma IDEAM (2009b). El estudio de aptitud para el cultivo de palma en Colombia fue realizado a escala 1:500.000 con la participación del IDEAM, IGAC, MAVDT, MADR, IAvH, WWF, Cenipalma and Fedepalma (IDEAM (2009a), IDEAM (2009b), IDEAM (2009c)). Este proyecto multidisciplinar ha beneficiado a las partes interesadas de manera individual en diferentes perspectivas y experiencias, sin embargo, no existe un consenso en todos los aspectos evaluados, y así algunos generan controversia.

Para la caña de azúcar se utilizan los mismos parámetros de aptitud y los valores de aptitud específicos del cultivo se determinaron con base en entrevistas con expertos (Cenicaña 2011). A continuación, cada parámetro de aptitud para la caña de azúcar y la palma de aceite es descrito y discutido en el contexto de otros estudios científicos. Adicionalmente, se presentan los pasos de agregación empleados para obtener el mapa final de aptitud biofísica.

## 3.1 Factores climáticos

Los factores climáticos más importantes que tienen impacto directo en el crecimiento de la cosecha son la temperatura, la precipitación, el brillo y la radiación solar, el viento y la humedad relativa[3]. La variación diaria, estacional o anual de estos parámetros determinan los rendimientos de la cosecha. Sin embargo, la temperatura media anual y la precipitación son a menudo utilizadas para aproximar la aptitud climática de cosechas específicas. Por lo tanto, estos dos factores se utilizan a continuación.

No obstante, mientras interpreta los resultados debe tener en cuenta que otros factores que no se tomaron en cuenta en este estudio podrían también influenciar la aptitud climática. Tales factores como la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa son descritos brevemente en el

[3] Cenipalma está trabajando en el ajuste de los parámetros empleados, especialmente la radiación solar, la cual refinará, más adelante, el estudio de palma de aceite.

capítulo 3.1.3. Además de la integración de estos indicadores climáticos, también la integración de indicadores que reflejen la variación temporal mejora la exactitud de la "aptitud climática". Los efectos de la estacionalidad y duración de las temporadas de lluvia y sequia podrían, por ejemplo, se abordados mediante la integración de variables como la acumulación de la precipitación durante el trimestre más seco del año o la duración de la temporada de sequía. Además, la temperatura máxima y mínima afecta el crecimiento de las plantas y por lo tanto dichos factores también deberían ser aboradados en estudios posteriores.

Por otro lado, las condiciones climáticas difieren localmente y por consiguiente una mayor resolución espacial de mapas base también mejora la exactitud del mapa de aptitud climática.

### 3.1.1 Precipitación

Esta variable expresa el volumen de agua que cae en un área dentro de un cierto periodo de tiempo (medido en milímetros por año). La precipitación se considera como un factor climático estrechamente relacionado con la aptitud de la tierra para el cultivo de caña de azúcar y palma de aceite. Este supuesto está relacionado con los efectos de la deficiencia de humedad en el crecimiento y la posible reducción de la cosecha debido a la sequía.

El mapa de precipitación es tomado del IDEAM (IDEAM 2005a) y los rangos de aptitud para la caña de azúcar y la palma de aceite se listan en la Tabla 2 y se describen a continuación.

*Tabla 2: Cantidad de precipitación y relación con las categorías de aptitud de la FAO para el cultivo de caña de azúcar y palma de aceite. (Fuente: Mapa de precipitación del IDEAM, clasificación del IDEAM (2009b)y Cenicaña (2011).*

| Atributo | Variable | Palma de aceite | Valor | Caña de azúcar | Valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Precipitación** Media anual (mm/año) | <500 | N2 –No apto permanentemente | 0 | N2 – No apto permanentemente | 0 |
| | 500 – 1000 | S3-Apto con restricciones severas | 2 | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 |
| | 1000 – 2200 | S2-Apto con restricciones moderadas | 4 | S1 – Apto | 8 |
| | 2200 – 3500 | S1-Apto | 8 | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 |
| | 3500 – 4500 | S2- Apto con restricciones moderadas | 4 | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 |
| | > 4500 | N2 - No apto permanentemente | 0 | N2 – No apto permanentemente | 0 |

**Palma de aceite:** Los valores de la Tabla 2 provienen del estudio de aptitud para la palma de aceite colombiana IDEAM (2009b), e indican que la palma de aceite requiere una distribución uniforme de precipitacion a través de todo el año, los periodos secos no deben exceder tres meses continuos y la

precipitación anual debe estar por encima de los 1000mm. Los supuestos hechos en ese estudio son consistentes con los encontrados en la literatura (Sys 1985; Ogunkunle 1993), indicando que los periodos secos no deben exceder los cuatro meses y que la precipitación anual debe estar por encima de 1250 mm (aproximadamente 104 mm por mes) preferiblemente. Hartley, Goh y Corley y Tinker consideraron que la precipitación ideal debería de estar por encima de los 2000mm para el cultivo de la palma de aceite. (Hartley 1988; Goh 2000; Corley and Tinker 2003). Lubis y Adiwigande especificaron que la precipitación debería de estar entre 1500 y 2500 mm y equitativamente distribuida durante el año (Lubis and Adiwiganda 1996).

**Caña de azúcar:** Las variables de aptitud y las categorías fueron definidas por expertos en caña de azúcar (Cenicaña 2011). Los rangos de valores de precipitación que se toman en este estudio son un poco diferentes a los que se hallaron en la literatura. De acuerdo con EMBRAPA, los cultivos de caña de azúcar son de fácil adaptación a las regiones tropicales, las cuales tienen un clima húmedo y crecen predominantemente en áreas donde la lluvia está bien distribuida, con una cantidad de lluvia que se encuentra arriba de los 1000 mm al año (EMBRAPA 2005-2007). También Paiboonsank et al. considera que las áreas donde la precipitación está por debajo de los 900 mm al año no es adecuada para cultivar caña de azúcar (DLD 1992; Paiboonsak, Chanket et al. 2004). Sin embargo, si se dispone de irrigación suficiente, los requerimientos de precipitación para el cultivo pueden ser balanceados en aquellas áreas donde la lluvia se encuentra por debajo de los 1000mm. Por lo tanto, estas áreas también se consideran aptas para el cultivo de la caña de azúcar en este estudio.

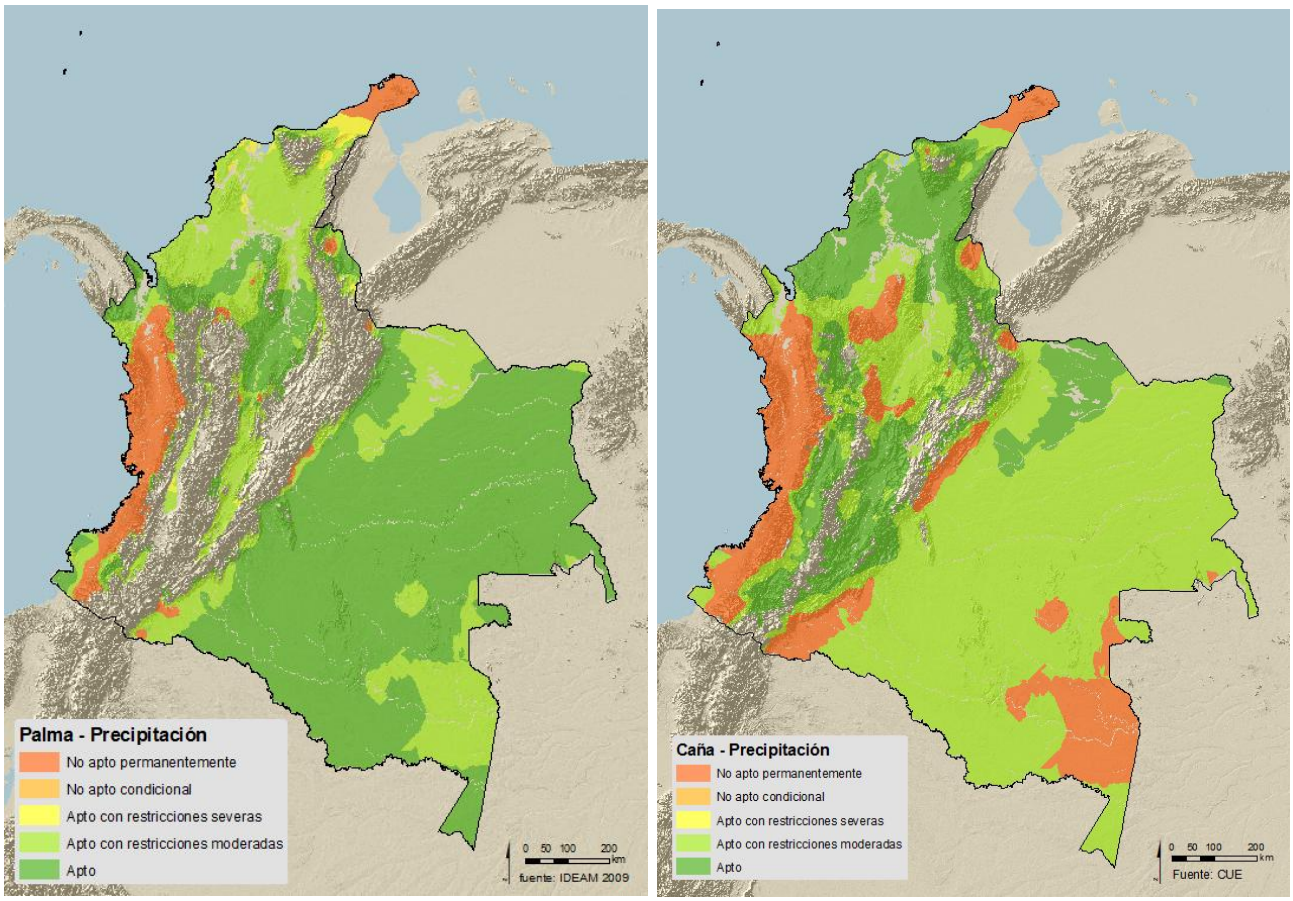



*Figura 5: Precipitación: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha)*

Áreas extensas de Colombia son aptas en términos de precipitación para el cultivo de caña de azúcar y palma de aceite (Ver.

Figura 5). Sin embargo, una precipitación especialmente alta en la costa pacífica donde las lluvias anuales pueden llegar hasta 7000mm, no es adecuada para los cultivos de biocombustibles.

### 3.1.2 Temperatura

Esta variable se refiere a la cantidad acumulada de energía térmica en el aire, expresada en grados Celsius y es medida en datos espaciales continuos para las estaciones climáticas colombianas.

La temperatura es un factor determinante en el crecimiento y desarrollo de la palma debido a su efecto directo en la velocidad de la mayoría de los procesos fisiológicos de la planta. Dentro del estudio, se utilizó la temperatura promedio para determinar la aptitud de los cultivos, mientras que las temperaturas extremas no fueron consideradas.

El mapa de temperatura es tomado del IDEAM (IDEAM (2005a)[4] y los rangos de aptitud para la caña de azúcar y la palma de aceite están listados en la Tabla 3 y se describen a continuación.

[4] El mapa de temperature desarrollado por IDEAM 2009 fue obtenido a partir de datos de elavacion y por lo tanto solo es una aproximacion del mapa de temperature real.

*Tabla 3: La temperatura de extensas zonas de Colombia es adecuada para la producción de caña de azúcar. (Fuente: Mapa de temperatura del IDEAM, clasificación del IDEAM 2009b and Cenicaña 2011).*

| Atributo | Variable | Palma de Aceite | Valor | Caña de azúcar | Valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Temperatura media anual (°C)** | <10 | N2 - No apto permanentemente | 0 | N2 - No apto permanentemente | 0 |
| | 10 - 15 | N2 - No apto permanentemente | 0 | S2 – No apto con restricciones moderadas | 4 |
| | 15- 20 | N2 - No apto permanentemente | 0 | S2 – No apto con restricciones moderadas | 4 |
| | 20 - 25 | S2 – No apto con restricciones moderadas | 4 | S1 – Apto | 8 |
| | 25 - 30 | S1 – Apto | 8 | S1 – Apto | 8 |
| | 30 - 35 | S2 – No apto con restricciones moderadas | 4 | S2 – No apto con restricciones moderadas | 4 |
| | > 35 | N2 - No apto permanentemente | 0 | S2 – No apto con restricciones moderadas | 4 |

**Palma de aceite:** La palma no tolera variaciones en la temperatura y crece entre los 20 y 35°C IDEAM (2009b). También Ogunkunle considera que las temperaturas adecuadas están por encima de 22°C y las no adecuadas por debajo de 18°C (Ogunkunle 1993). Hartley y Corley & Tinker consideran que las temperaturas medias máximas deben estar entre 29 y 33°C y las temperaturas medias mínimas entre 22 and 24°C como condiciones óptimas para el cultivo de la palma de aceite (Hartley 1988; Corley y Tinker 2003).

**Caña de azúcar:** las variables y categorías de aptitud están definidas por expertos en la caña de azúcar (Cenicaña 2011). Los rangos de los valores para la temperatura asumidos en este estudio son consistentes con los reportados en la literatura. De acuerdo con EMBRAPA (2005-2007), los cultivos de caña de azúcar se pueden adaptar muy bien a regiones tropicales que presentan clima cálido, y crecen predominantemente en temperaturas que oscilan entre 19 and 32 ºC.

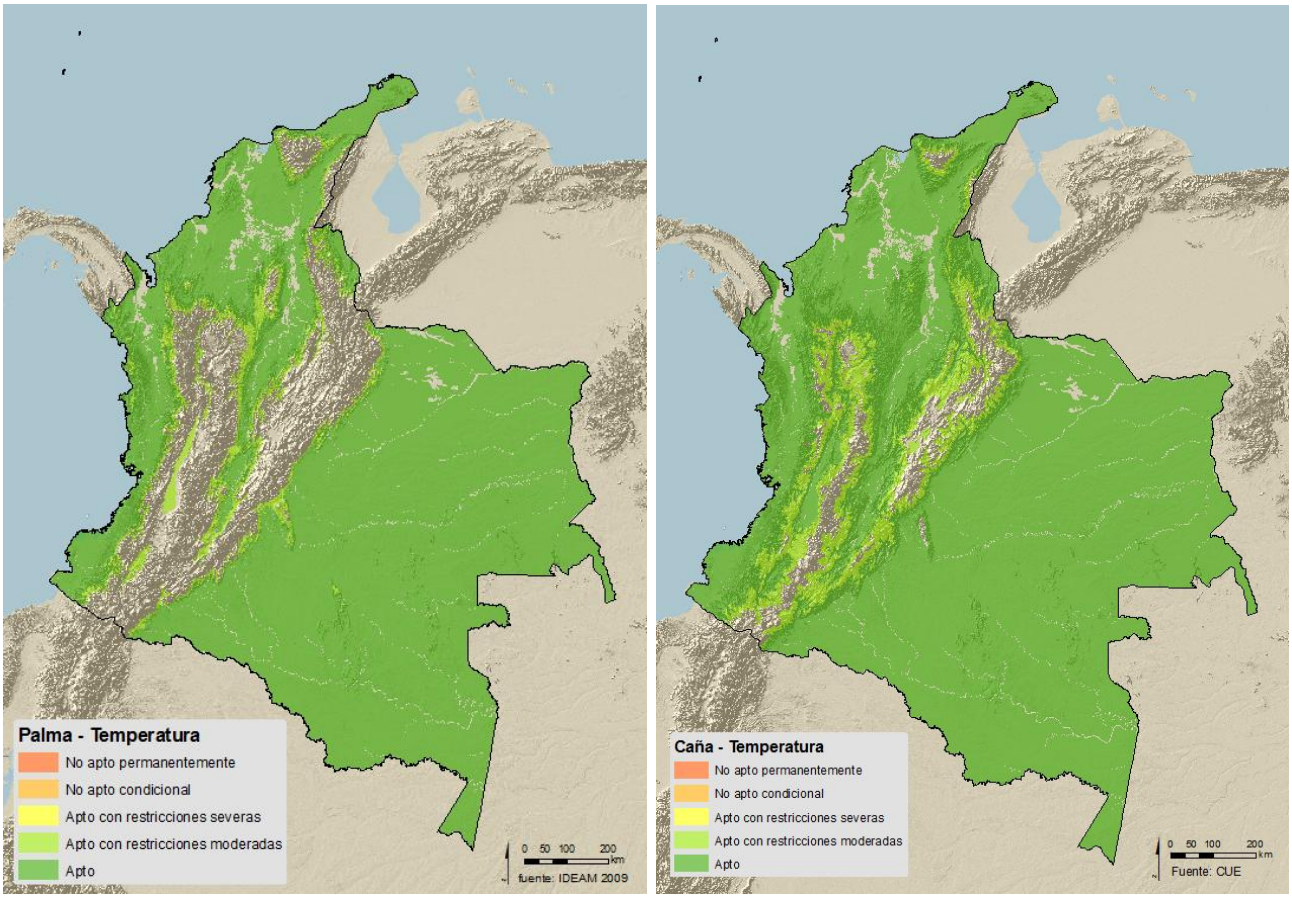



*Figura 6: Temperatura: Mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha)*

Colombia tiene unas condiciones de temperatura óptimas para el cultivo de caña de azúcar y palma de aceite. Solo las áreas más elevadas se consideran no aptas, las cuales se excluyeron con el criterio de altitud.

### 3.1.3 Otros factores climáticos

Como se mencionó anteriormente, la aptitud climática para cultivar palma de aceite y caña de azúcar no solo está determinada por la temperatura anual y la precipitación. Otros factores como la radiación solar, horas de luz solar, exposición al viento y humedad relativa, afectan también, el crecimiento del cultivo. A continuación se ilustran los mapas base de radiación solar anual IDEAM (2005b), humedad relativa y velocidad promedio de viento IDEAM (2006) y los posibles efectos se discuten en la sección 3.1.4.

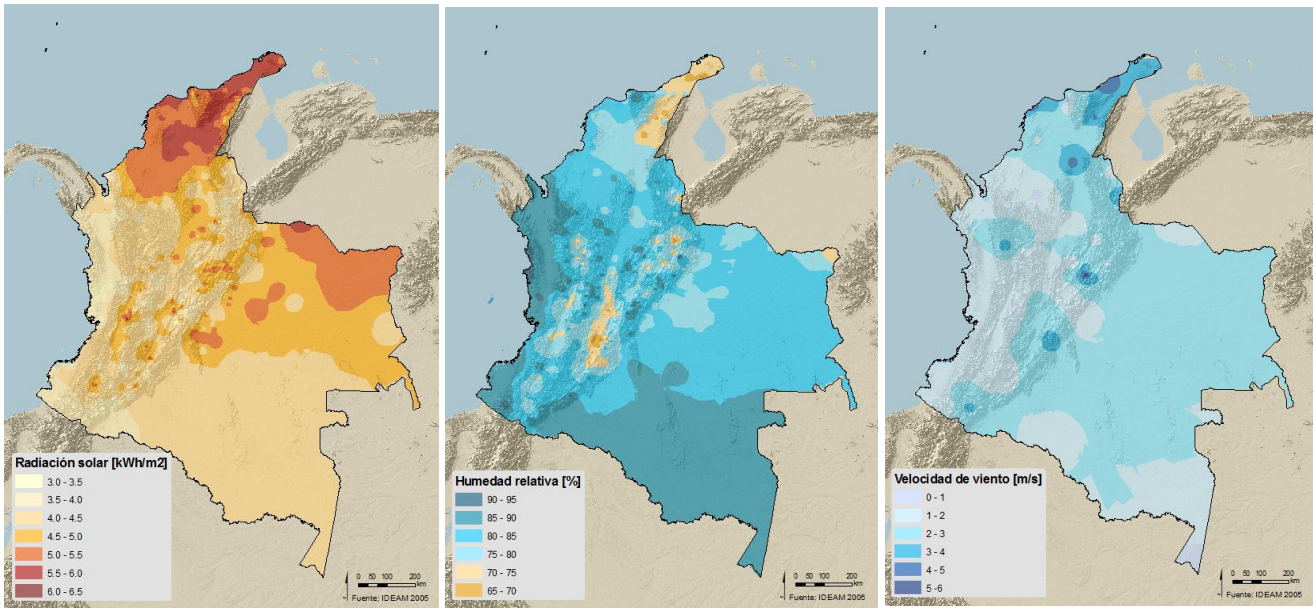



*Figura 7: Radiación solar diaria (izquierda), humedad relativa (centro) y velocidad de viento (derecha) de Colombia. (Fuente: IDEAM 2005 y 2006).*

Además de los diferentes factores climáticos, las variaciones temporales determinan el crecimiento de los cultivos. Así, no solo la temperatura anual y la precipitación son factores relevantes, sino también la distribución (fluctuación diaria y estacional) afecta la producción de la biomasa. Esto significa que integrando por ejemplo, la temperatura máxima y mínima en periodos secos, el mapa de sostenibilidad podría mejorarse más adelante. Sin embargo, con base en los recursos disponibles las distribuciones temporales no se consideraron en este estudio.

### 3.1.4 Agregación del mapa climático

Con base en la precipitación, la temperatura y la altitud, el mapa de aptitud climática se basa en la matriz presentada en la Tabla 4. La aptitud climática es una función de la temperatura y la precipitación, y se deriva a partir de los valores de aptitud de estos dos parámetros (N2:0, N1:1, S3:2, S2:4, S1:8).

*Tabla 4: Matriz para determinar la aptitud climática. S1: Apto, S2: Apto con restricciones moderadas, S3: Apto con restricciones severas, N1: No apto condicional: N2: No apto permanentemente. (Fuente: IDEAM 2009).*

| | | **Precipitación** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 4 | 8 |
| **Temperatura** | 0 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 |
| | 1 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 |
| | 2 | N2 | N1 | S3 | S3 | S3 |
| | 4 | N2 | N1 | S3 | S2 | S2 |
| | 8 | N2 | N1 | S3 | S2 | S1 |

La Figura 8 muestra que los llanos orientales de Colombia, los valles andinos y el norte de Colombia son áreas aptas para el cultivo de caña de azúcar y palma de aceite desde el punto de vista climático. La península de la Guajira y la costa pacífica presentan patrones de precipitación muy bajos y relativa-

mente altos, respectivamente. En este sentido, estas áreas no se consideran aptas para el cultivo de materia prima para biocombustibles.

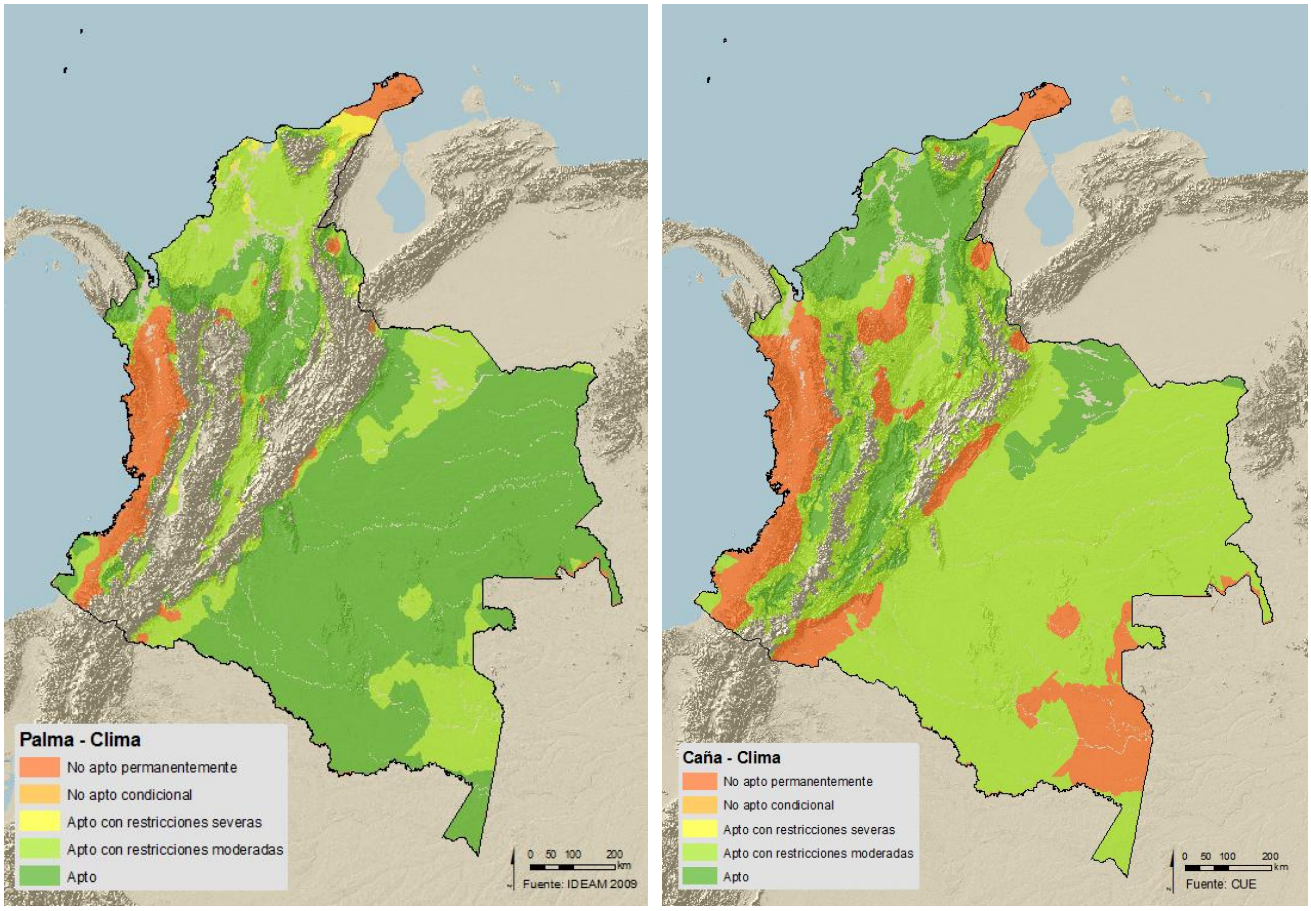



*Figura 8: Condiciones climáticas: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha).*

Generalmente, los patrones de aptitud de la Figura 8 están resaltados si se consideran otros factores climáticos aparte de la temperatura promedio y la precipitación (Ver sección 3.1.3).

Para la palma de aceite, la radiación solar óptima se encuentra entre 4 y 5 kWh por $m^2$, mientras una radiación solar por encima de 6 kWh no es apta para cultivar palma de aceite. (Corley y Tinker 2003). La península de la Guajira presenta alta radiación solar, lo cual no es favorable para los cultivos de palma de aceite. Además de la radiación solar, las condiciones de viento y la baja humedad relativa no son favorables para cultivar palma de aceite en la Guajira. En la península se están presentando periodos secos más largos, lo cual disminuye la aptitud para el cultivo de palma de aceite. Por otra parte, algunas partes del departamento de Arauca no son favorables para el crecimiento de la palma de aceite debido a la radicación solar relativamente alta.

La caña de azúcar puede crecer de manera óptima si la humedad relativa está alrededor de 55 a 85% y la radiación solar alrededor de 18 a 36 $MJ/m^2$ (NETAFIM 2011). Esto hace que la costa Pacífica y algunas partes del Amazonas no sean aptas para el cultivo de caña.

## 3.2 Factores Agronómicos

Además de las condiciones climáticas, la disponibilidad de nutrientes, el oxígeno y la humedad de la tierra son factores importantes para el cultivo de la caña de azúcar y el aceite de palma. Entre las condiciones óptimas para el cultivo de materias primas, se incluye la erosión controlada, la humedad adecuada, drenaje de agua excesiva, riesgos mínimos de inundación y un suministro adecuado y balanceado de nutrientes. Si estos factores se dan naturalmente o si requiere poca intervención humana, la tierra se considera adecuada para el crecimiento del cultivo. Por lo tanto, se analizan los siguientes factores: Inundación, drenaje natural, erosión del suelo, profundidad del suelo, fertilidad del suelo y la pendiente[5].

### 3.2.1 Inundación

La inundación está determinada por el drenaje del suelo, relacionada directamente con la pendiente de cada unidad geomorfológica y áreas con condiciones que facilitan las inundaciones por rebasar el drenaje natural. Los daños por causa de las inundaciones pueden suceder por dos razones: Por agua represada y agua en movimiento. Los periodos de agua represada reducen la disponibilidad de oxígeno en los suelos. El agua en movimiento por su parte, puede derribar, arrancar o cubrir de lodo la materia prima del biocombustible. La inundación con agua salina causa daños debido a la salinización de los suelos. El riesgo de inundación depende principalmente de las propiedades del suelo, especialmente de las características hidrológicas y de las condiciones climáticas de la región. Con base en el mapa base de suelos del IGAC (IGAC 2003), las características de inundación se clasifican en:

**Sin inundación:** Características de la unidad de suelo donde el agua es removida con facilidad.

**Con inundación:** Características de la unidad de suelo donde el agua es removida lentamente y sucede con frecuencia y regularidad. Áreas con condiciones que facilitan las inundaciones por rebasar el drenaje natural. Esta categoría se divide en dos sub categorías:

- **Inundación permanente:** Permanentemente inundada o áreas anegadas.
- **Inundación ocasional:** Áreas de inundación donde acorde con la descripción, las inundaciones ocurren con menor frecuencia.

Dado que la inundación de un área puede ser prevenida hasta cierto punto a través de la implementación de medidas técnicas, solo los cuerpos de agua (incluyendo una distancia de amortiguación de 200 m) se consideran no aptos permanentemente. Además, las áreas que se inundan ocasionalmente son categorizadas por Fedepalma como aptas con restricciones severas por las mismas razones. En el reporte de palma (IDEAM 2009a) son clasificadas como actualmente no aptas.

5 En el estudio de palma, también se excluyen las áreas de conservación natural, debido a que no es un factor puramente eda-foclimático (IDEAM 2009b). Sin embargo, los aspectos de conservación y la fragilidad del ecosistema se consideran en las limitaciones ambientales (Ver sección 3).

*Tabla 5: Inundación - Clasificación de aptitud específica por cultivo (Fuente: Mapa de inundación de la clasificación del IGAC adaptado del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011)*

| Atributo | Variable | Palma de aceite | Valor | Caña de azúcar | Valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Inundación** | Sin inundación | S1 – Apto | 8 | S1 – Apto | 8 |
| | Inundación permanente | N2 – No apto permanentemente | 0 | N2 – No apto permanentemente | 0 |
| | Inundación ocasional | S3 – Apto con restricciones severas | 2 | S3 – Apto con restricciones severas | 2 |

**Palma de aceite:** Los cultivos de palma de aceite son aptos en tierras que no se inundan frecuentemente IDEAM (2009b). Ogunkunle et al. también considera áreas aptas aquellas que no se inunden con frecuencia (Sys 1985; Ogunkunle 1993). Más adelante se especifica que las áreas de cultivo que permanecen inundadas más de 2 o 3 meses en cinco de cada diez años, no son aptas para el cultivo de palma de aceite.

**Caña de azúcar:** De acuerdo con EMBRAPA (2005 – 2007), los suelos con inundaciones permanentes no son aptos para el cultivo de caña de azúcar. Además, los suelos planos deben ser drenados debidamente antes de ser cultivados. Este factor se considerará en el indicador de drenaje natural (ver capítulo 3.2.5).

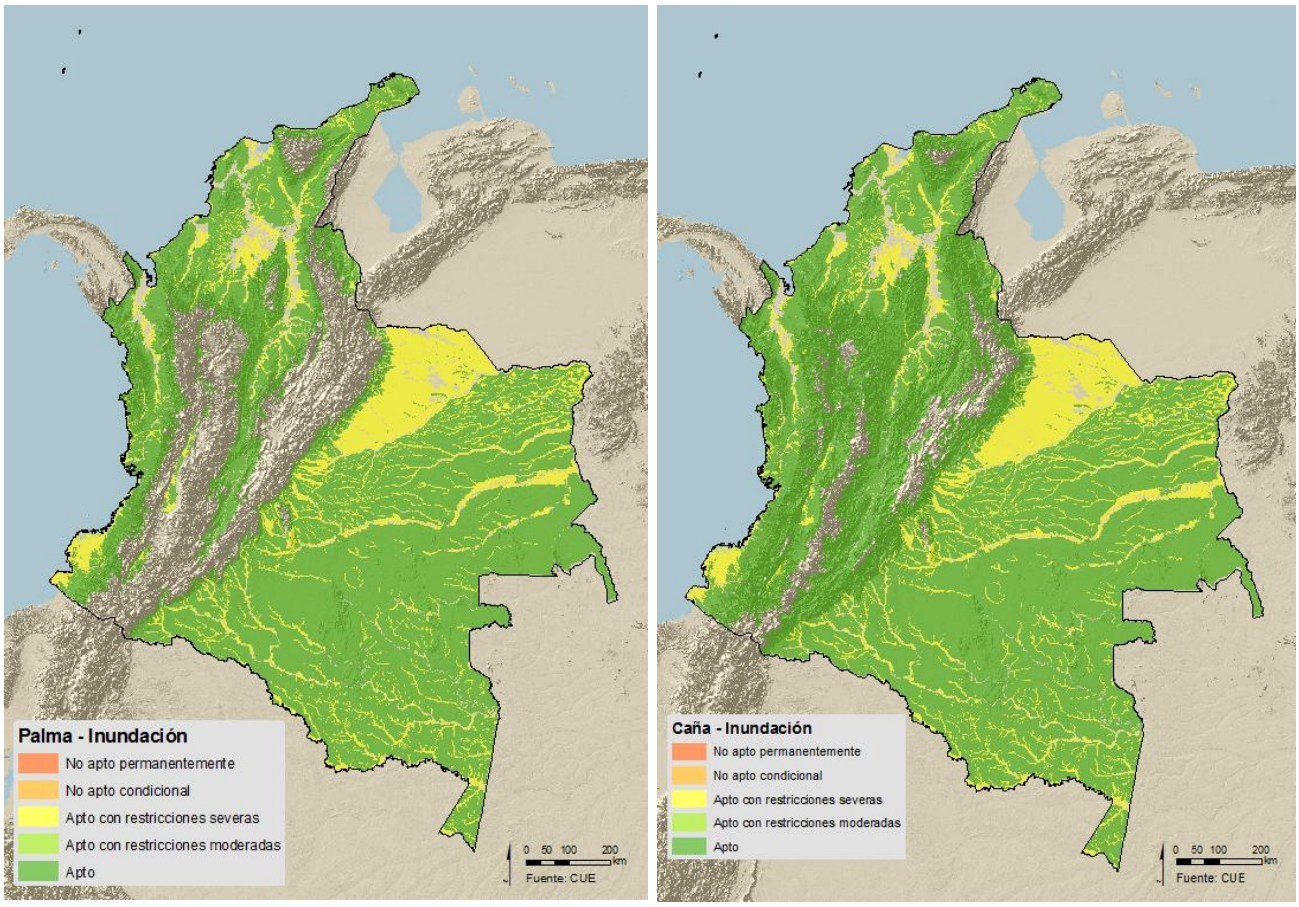



*Figura 9: Inundación: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha).*

Las principales áreas de inundación esta localizadas en las áreas relativamente planas cercanas a ríos o cordilleras, especialmente en el pie de monte oriental de la Cordillera Andina, el área de los ríos que fluyen hacia la costa pacífica y cerca de Tumaco. Sin embargo, allí podrían existir áreas con riesgo mínimo de inundación, como es el caso de Casanare, donde los mapas base a escala 1:500.000 son muy generales y no reflejan las condiciones locales. Mediante el uso de mapas de mayor resolución (<1:100.000) y tomando en cuente las variaciones temporales (p.e frecuencia, duración o intensidad de inundaciones) el estudio puede ser aún más refinado y la aptitud de la tierra en términos de riesgo de inundación puede ser reflejada mejor.

### 3.2.2 Erosión natural

La degradación de la tierra está asociada con la perdida de las capas de la superficie fértil del suelo causada por la gravedad, el agua o el viento. La degradación del suelo tiene una fuerte influencia en el crecimiento del cultivo y por la tanto en la productividad. Dentro del estudio se empleó el mapa base de suelos del IGAC (IGAC 2003) y la erosión natural se clasifica de la siguiente forma:

- **Ninguna o leve:** No significativo o presenta pequeños surcos dispersos.
- **Leve a moderado:** Presenta surcos erosionados en estado avanzado (formados por una combinación de pequeños surcos desatendidos).
- **Severo a muy alto:** Exposición de los horizontes subterráneos en la superficie del suelo.

En principio, se empleó la metodología desarrollada por el IDEAM para categorizar la aptitud de la palma de aceite. Sin embargo, la erosión leve a moderada se clasificó como moderadamente apta, en vez de apta con restricciones severas (Basado en entrevistas con expertos de Cenipalma).

*Tabla 6: Erosión del suelo – Clasificación de aptitud específica para cultivo. (Fuente: Mapa de erosión del IGAC, clasificación adaptada del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011).*

| Atributo | Variable | Palma de aceite | Valor | Caña de azúcar | Valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Erosión** | Sin erosión | S1 – Apto | 8 | S1 – Apto | 8 |
| | Erosión Moderada | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 | S3 – Apto con restricciones severas | 2 |
| | Erosión Severa | N2 – No apto permanentemente | 0 | N2 – No apto permanentemente | 0 |

**Palma de aceite:** La literatura disponible sobre los efectos de la erosión en la palma de aceite es limitada. Sin embargo, Corley & Tinkr (2003) consideran que los suelos muy secos y porosos son desfavorables para el cultivo de la palma de aceite.

**Caña de azúcar:** Chartres (1981), basado en BAI (1978) considera como aptos los suelos sin grandes problemas topográficos o de erosión, mientras que los suelos que presentan deficiencias topográficas y riesgo de erosión se consideran como no aptos. (BAI 1978; Chartres 1981).

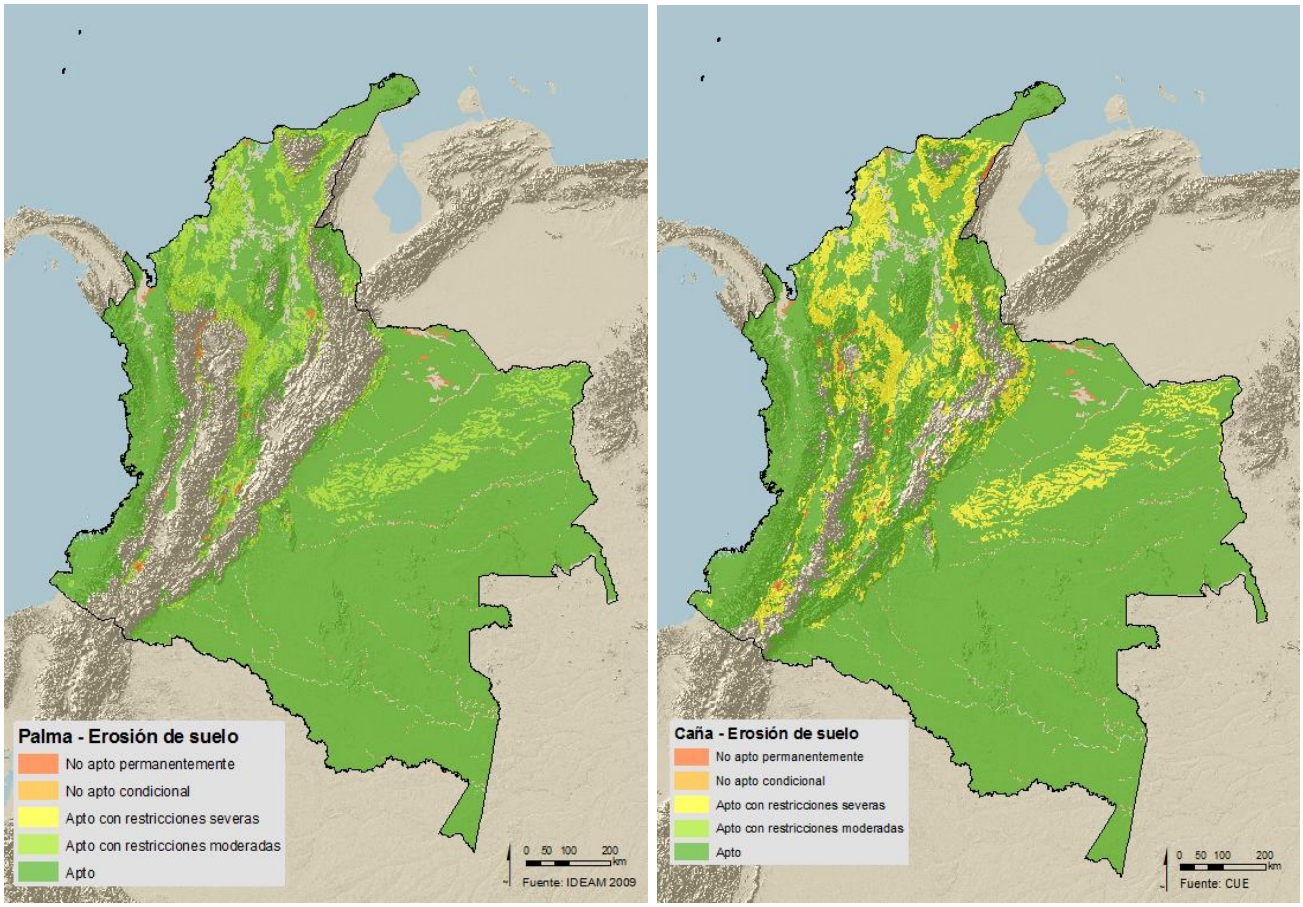



*Figura 10: Erosión: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha).*

El cultivo de caña de azúcar y palma de aceite en Colombia, no está restringido en un alto grado por la erosión. El riesgo de erosión existe en algunas zonas aisladas en la cordillera de los Andes y a lo largo de los grandes ríos (Ver. Figura 10). Además, podrían existir riesgos de erosión del suelo en bosques que son convertidos a cultivos para biocombustibles, dada la estructura frágil del suelo en los bosques húmedos. Este aspecto es considerado en la sección de ecología mediante la exclusión de todas las áreas de bosques naturales por esta y otras razones.

### 3.2.3 Profundidad del suelo

Entre los factores físicos y químicos más relevantes para la producción de la caña de azúcar y la palma de aceite, está la profundidad del suelo, la cual está definida por su grosor. La profundidad efectiva es la profundidad hasta un horizonte limitado, tal como piedras y gravilla. La facilidad de penetración es mejorada por la textura y es favorecida por una capa gruesa o estructura densa con una consistencia

muy firme. Esta cualidad se expresa integralmente como "condiciones para el desarrollo de un sistema efectivo de raíces".

De acuerdo con la información del mapa de suelos del IGAC (IGAC 2003) y los requerimientos definidos por Cenipalma, se establecieron las siguientes clasificaciones:

- **Muy superficial:** Raíces que penetran por debajo de 25 centímetros
- **Superficial:** Raíces que penetran hasta una profundidad de 50 centímetros
- **Moderadamente profundas:** Raíces que penetran hasta los 100 cm.
- **Profundo:** Raíces que penetran a una profundidad mayor de 100 cm.

*Tabla 7: profundidad del suelo - clasificación de aptitud especifica por cultivo. (Fuente: Mapa de profundidad del suelo del IGAC, clasificación adaptada del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011).*

| Atributo | Variable | Palma de aceite | Valor | Caña de azúcar | Valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Profundidad del suelo (cm)** | >100 cm | S1 – Apto | 8 | S1 – Apto | 8 |
| | 50 - 100 cm | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 | S1 – Apto | 8 |
| | 25-50 cm | S3 – Apto con restricciones severas | 2 | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 |
| | < 25 cm | N2 – No apto permanente-mente | 0 | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 |

**Palma de aceite:** En países como Malasia la profundidad efectiva del suelo se considera óptima solo cuando es igual o mayor a 100 cm (Balasundram, Robert et al. 2006). Este cirterio tambien aplica para Colombia. Ogunkunle et al. también considera altamente aptas las profundidades del suelo por encima de los 90 cm, y asume que las profundidades de la tierra mayores a 100 cm son todavía más aptas (Sys 1985; Ogunkunle 1993). Además, toda la raíz fina de la palma de aceite se encuentra en esos primeros 100 cm, mientras la mayoría están concentradas en los primeros 30 cm Corley & Tinker (2003). Los mismos autores también afirman que la palma de aceite solo pude crecer en suelos con una profundidad efectiva de 50 cm si está bien provista de nutrientes y agua.

**Caña de azúcar:** De acuerdo con EMBRAPA (2005-2007), la profundidad del suelo ideal para el cultivo de caña de azúcar es más de 100 cm. Chartres (1981) considera como aptos los suelos con una profundidad por encima de los 100 cm y moderadamente aptos para profundidades entre 50 y 100cm. Los valores definidos por Cenicaña son más moderados debido a que la caña de azúcar también puede ser cultivada en áreas con poca profundidad del suelo se adoptan medidas adecuadas.

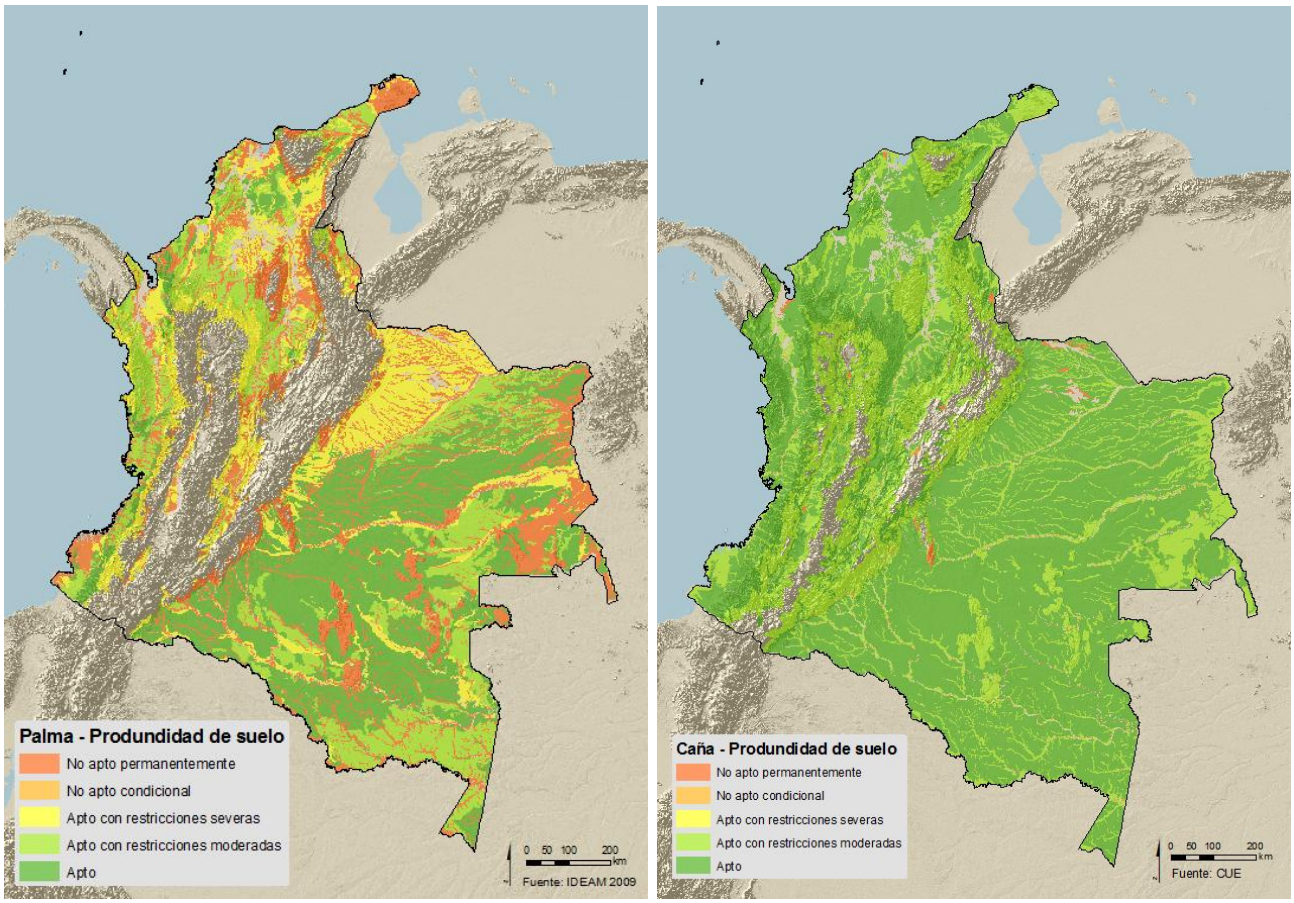



*Figura 11: Profundidad del suelo: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha).*

En general, la caña de azúcar requiere menos profundidad del suelo que la palma de aceite y por lo tanto el área potencial de cultivo de caña de azúcar es mayor. (Ver. Figura 11). Sin embargo, la profundidad del suelo depente fuertemente de circunstancias locales y al usar mapas base de 1.500.000, grandes áreas, como por ejemplo, Casanare, tiende a ser generalizadas. Por lo tanto se sugiere que posteriores estudios de aptitud regionales y locales deberían considerar mapas de mayor resolución (al menos 1:100.000) con el fin de reducir estos efectos.

### 3.2.4 Fertilidad del suelo

Este atributo se refiere a la composición natural de los elementos formadores del suelo, tomando en cuenta la capacidad de retención de nutrientes, la saturación base y la salinidad[6]. El mapa base de fertilidad se toma del IGAC (IGAC 2003) y se clasifica por expertos en las siguientes categorías:

[6] En ciertas regiones como la zona norte de Colombia, puede ser necesario excluir las áreas con suelos salinos para el cultivo de materias primas para biocombustibles.

*Tabla 8: Fertilidad del suelo - clasificación de aptitud específica para el cultivo. (Fuente: Mapa de fertilidad del IGAC, clasificación adaptada del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011).*

| Atributo | Variable | Palma de aceite | Valor | Caña de azúcar | Valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Fertilidad** | Alto | S1 – Apto | 8 | S1 – Apto | 8 |
| | Moderado | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 |
| | Bajo | S3 – Apto con restricciones severas | 2 | S3 – Apto con restricciones severas | 2 |

**Palma de aceite:** La clasificación fue realizada por Cenipalma IDEAM (2009b). Ogunkunle y Mutert consideran como requerimientos importantes para la aptitud de los cultivos de palma de aceite propiedades del suelo como, el intercambio catiónico, el carbono orgánico, la tasa Mg:K, el nitrógeno y fosforo total, (Ogunkunle 1993; Mutert 1999).

**Caña de azúcar:** La clasificación fue realizada por expertos en agricultura de Cenicaña (2011). De acuerdo con el EMBRAPA (2005-2007), el desarrollo del sistema de raíces de la caña de azúcar, depende del PH, la saturación base, porcentaje de aluminio y el contenido de calcio en las capas más profundas del suelo. También Paiboonsank, Kuppatawuttinan, DLD y Chartres consideran la fertilidad, en términos de nitrógeno, potasio, fosforo y otros contenidos químicos como una propiedad muy importante del suelo para el cultivo de la caña de azúcar (Chartres 1981; DLD 1992; Kuppatawuttinan 1998; Paiboonsak, Chanket et al. 2004). Sin embargo, la falta de nutrientes también pude ser compensada aplicando fertilizante mineral u orgánico y por lo tanto los suelos poco fértiles también se pueden cultivar.

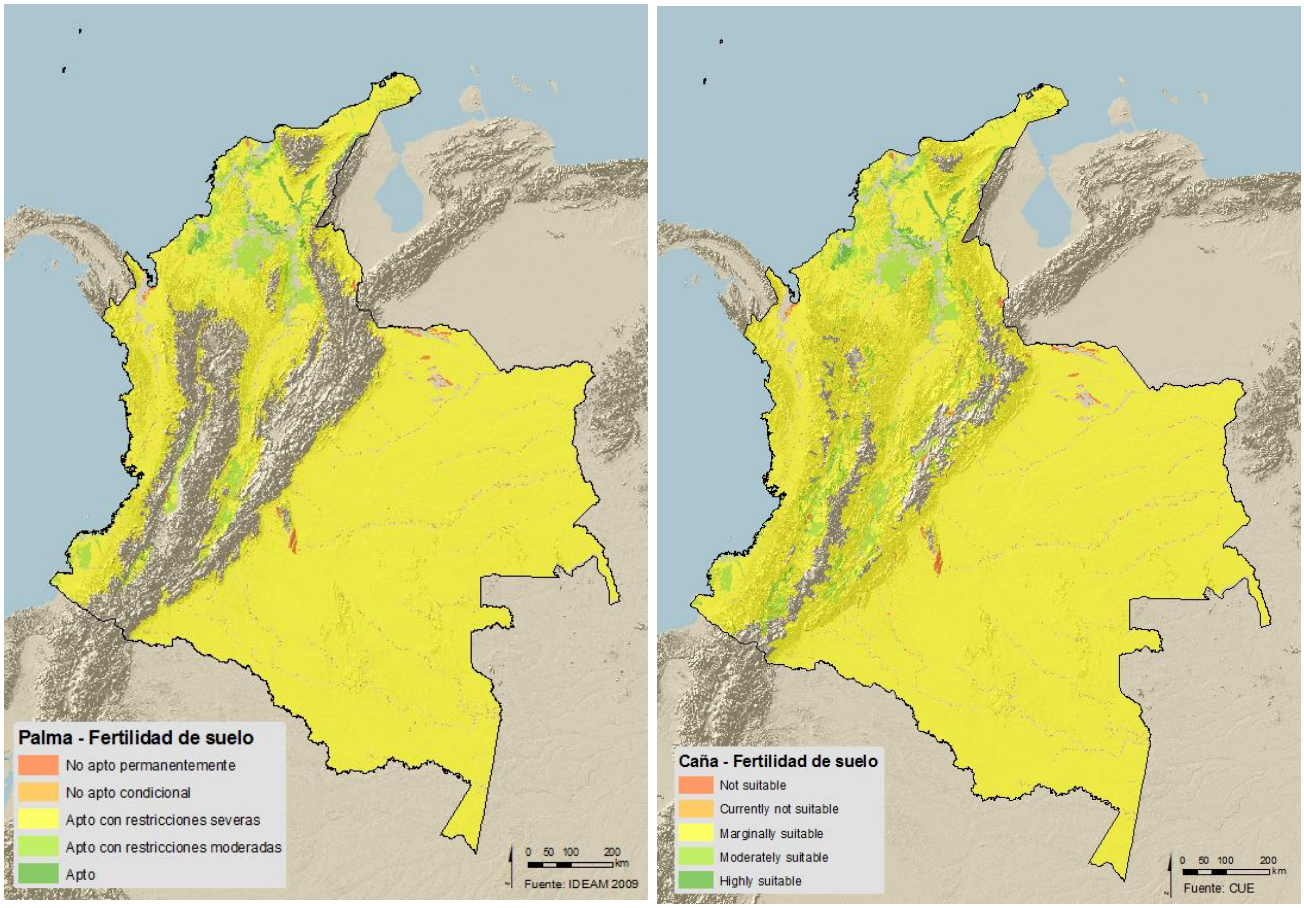



*Figura 12: Fertilidad: mapa de aptitud para la palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha).*

La mayoría de los suelos de Colombia se consideran moderadamente aptos para los cultivos de caña de azúcar y palma de aceite. Sin embargo, las planicies aluviales en los valles andinos del norte de Colombia se consideran como más fértiles y por lo tanto más aptos para el cultivo (ver Figura 12).

De nuevo, la baja resolución del mapa de fertilidad (escala 1:500.000) tiende a la generalización de variabilidades locales. Deberían usarse mapas de mayor resolución y otros factores clave como la disponibilidad de nutrientes determinada por ejemplo mediante la textura, el carbono orgánico del suelo o el pH del suelo y la habilidad de retención de nutrientes (saturación base, intercambio de cationes y la capacidad de la fracción arcillosa) en investigaciones posteriores, con el fin de mejorar la exactitud de la variable "fertilidad del suelo".

### 3.2.5 Drenaje natural

El drenaje natural se refiere a la capacidad del suelo para evacuar o retener agua de la superficie terrestre o de la zona de raíces. Las plantas necesitan absorber oxígeno a través del sistema de raíces. Como el oxígeno se propaga diez mil veces más rápido en el aire del suelo que en el agua, el anegamiento restringe drásticamente la absorción de oxígeno y por lo tanto le hace daño a la planta. El ma-

pa base de drenaje se toma del mapa de suelos del IGAC (IGAC 2003) y es calificado en las siguientes categorías.

- **Drenaje bueno a moderado:** El agua se remueve fácilmente y el suelo no muestra signos de condiciones de óxido-reducción.
- **Drenaje moderado:** El drenaje es lento, nivel freático moderadamente profundo o la capa superior tiene conductividad hidráulica saturada moderadamente baja.
- **Excesivamente drenado:** Agua que se remueve muy rápidamente; un nivel freático profundo,, textura gruesa, conductividad hidráulica saturada elevada.
- **Pantanoso o muy mal drenado:** el suelo se mantiene húmedo cerca de la superficie por largos periodos de tiempo y el nivel freático es poco profundo y se mantiene cerca de la superficie por largos periodos de tiempo. Este tipo de suelos requiere drenaje artificial, pero si las áreas están bien drenadas, estas pueden ser potencialmente aptas para el cultivo. Por consiguiente, la clasificación de "permanentemente no apto", como se definió en el estudio de palma IDEAM (2009b) fue cambiado a "No apto condicional".

*Tabla 9: Drenaje Natural – Clasificación de aptitud específica por cultivo. (Fuente: mapa de drenaje natural del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011).*

| Atributo | Variable | Palma de aceite | Valor | Caña de azúcar | Valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Drenaje** | Buen o medianamente buen drenaje | S1 – Apto | 8 | S1 – Apto | 8 |
| | Drenaje moderado | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 |
| | Excesivo o mal drenado | S3 – Apto con restricciones severas | 2 | S3 – Apto con restricciones severas | 2 |
| | Pantanoso o muy mal drenado | N1 – No apto condicional | 1 | S3 – Apto con restricciones severas | 2 |

**Palma de aceite:** La clasificación fue realizada por Cenipalma (IDEAM 2009b). La importancia del drenaje natural se subrayada por Ogunkunle (1993) en donde los suelos que no tienen un buen drenaje se consideran no aptos para el cultivo de la palma de aceite.

**Caña de azúcar:** La clasificación empleada fue llevada a cabo por expertos en agricultura de Cenicaña (2011). Paiboonsank (2004) y DLD (1992) considera suelos altamente aptos, con buen o muy buen drenaje, suelos moderadamente aptos con drenaje moderado, suelos marginalmente aptos con algo de mal drenaje y suelos no aptos con mal o muy mal drenaje.

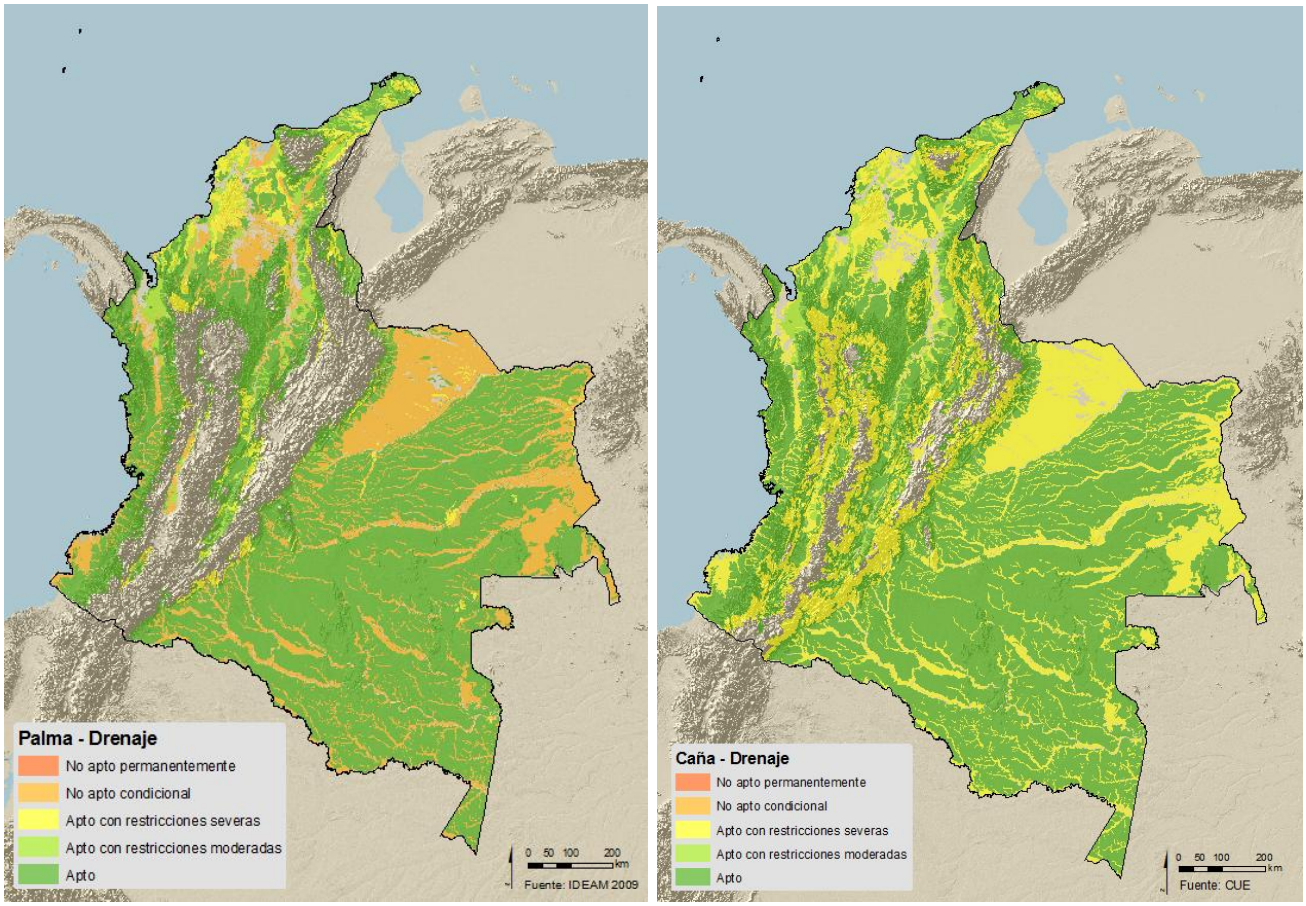



*Figura 13: Drenaje: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha).*

Las áreas que son aptas con restricciones severas en términos de drenaje están localizadas cerca de cuerpos hídricos y en el piedemonte de las cordilleras (Ver. Figura 13).

No obstante, la evolución del drenaje natural de suelos basada en mapas base de baja resolución (1:500.000) induce a la generalización de los patrones y por lo tanto grandes áreas clasificadas como poco aptas podrían, a pesar de todo, presentar áreas con aptitud alta. Por lo tanto, la escala del mapa base de drenaje debería ser reducida en estudios posteriores con el fin de contabilizar mejor las heterogeneidades locales.

### 3.2.6 Pendiente

La pendiente tiene una alta relevancia en el manejo y cosecha del cultivo, permitiendo actividades de maquinaria para la tierra y el transporte de la cosecha. Problemas de erosión son evidentes en pendientes que exceden el 16%, los cuales se incrementan con la falta de cobertura natural.

La pendiente proviene de un modelo de elevación digital (USGS 1996) y emplea la siguiente clasificación, de acuerdo a Cenipalma y Cenicaña.

*Tabla 10: Pendiente – clasificación de aptitud específica por cultivo. Fuente: Mapa de pendiente de USGS, clasificación adaptada del IDEAM 2009b y Cenicaña 2011).*

| Atributo | Variable | Palma de aceite | Valor | Caña de azúcar | Valor |
|---|---|---|---|---|---|
| **Pendiente** | 0% a 12% | S1 – Apto | 8 | S1 – Apto | 8 |
| | 12% a 25% | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 | S2 – Apto con restricciones moderadas | 4 |
| | 25% a 35% | S3 – Apto con restricciones severas | 2 | S3 – Apto con restricciones severas | 2 |
| | >35% | N2 – No apto permanentemente | 0 | N2 –No apto permanentemente | 0 |

**Palma de aceite:** Los supuestos presentados en este estudio son consistentes con los encontrados en la literatura (Sys 1985; Ogunkunle 1993), los cuales consideran que las áreas con una inclinación mayor a los 30% no son aptas y aquellas áreas con inclinaciones entre 0 y 8% son altamente aptas.

**Caña de azúcar:** De acuerdo con EMBRAPA (2005-2007), los suelos con pendiente leves ente 2 a 5% (el valor de 5% para suelos más arcillosos) son más aptos para el cultivo de la caña de azúcar. Paiboonsank (2004) y Kuppatawuttinan (1998), en sus supuestos, son más restringidos, considerando como no apto, pendientes por encima de 12%, 5% a 12% como marginalmente apto y de 0% a 5% como altamente apto.

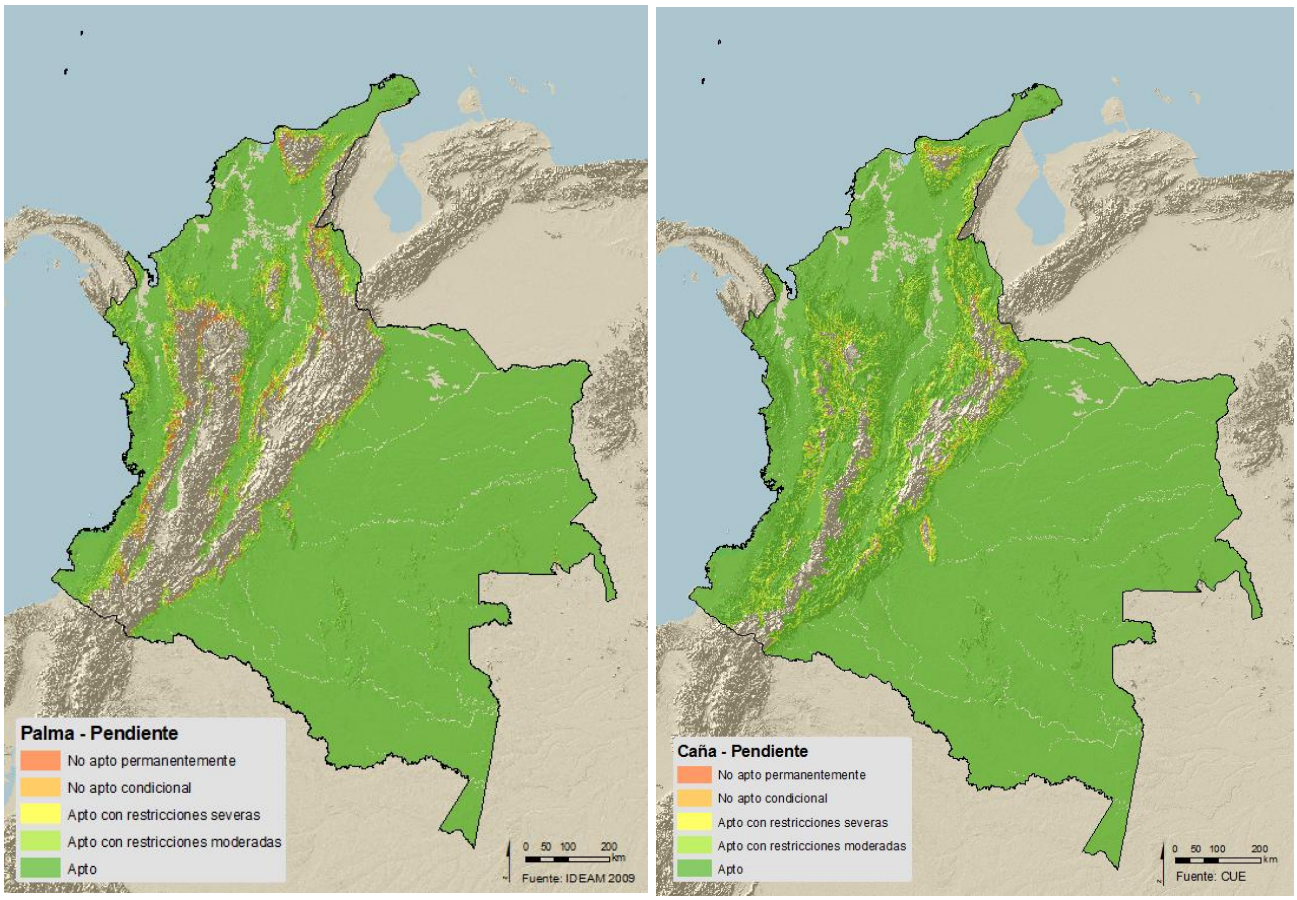



*Figura 14: Pendiente: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha).*

Colombia se considerada como adecuada en el cultivo de la caña de azúcar y la palma de aceite, excepto en pequeñas áreas en las cordilleras de los Andes. Sin embargo, el mapa está basado en un modelo de elevación a un kilómetro, permitiendo aplanamiento de pequeñas pero pronunciadas pendientes. (Ver. Figura 14).

## 3.3 Aptitud Agronómica

Los diferentes indicadores agronómicos se compilaron de acuerdo a su capacidad para ser controlados y modificados. Las variables que son difícilmente modificables (valores clave fijos) son inundación, erosión y profundidad del suelo; mientras la fertilidad y el drenaje natural pueden manejarse externamente (valores clave variables), por ejemplo, la aplicación de fertilizantes.

Con el fin de agregar los factores agronómicos para los valores de las variables finos y variables, se multiplican los valores que van de 0 a 8 para fertilidad y drenaje natural, así como inundación, erosión y profundidad del suelo. Para cada malla, los valores de los parámetros fijos (inundación, erosión y profundidad del suelo) y variables (fertilidad y drenaje natural) se emplean para derivar la aptitud agronómica basada en la siguiente matriz (Ver Tabla 11). Para palma y caña de azúcar se tomaron los

mismos valores (IDEAM (2009b)) y donde fue requerido, se expandió con valores suministrados por expertos de Cenipalma.

*Tabla 11: Matriz para determinar la aptitud agronómica. S1: Apto, S2: Apto con restricciones moderadas, S3: Apto con restricciones severas, N1: No apto condicional, N2: No apto permanentemente. Fuente: Adaptado de IDEAM (2009b).*

| | | **Variable- Fertilidad y drenaje natural** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **64** | **32** | **16** | **8** | **4** | **2** | **0** |
| **Inundación, erosión, profundidad del suelo** | **512** | S1 | S1 | S1 | S2 | S2 | N1 | N2 |
| | **256** | S2 | S2 | S2 | S2 | S3 | N1 | N2 |
| | **128** | S3 | S3 | S3 | S3 | S3 | N1 | N2 |
| | **64** | S3 | S3 | S3 | S3 | S3 | N1 | N2 |
| | **32** | S3 | S3 | S3 | S3 | S3 | N1 | N2 |
| | **16** | N1 | N1 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 |
| | **0** | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 |

Adicionalmente, se consideró el efecto de la pendiente empleando la siguiente matriz. Como se muestra en la Figura 14 la pendiente no afecta la aptitud, ya que es un efecto local y dichos efectos desaparecen conforme se emplean resoluciones a gran escala, así el potencial de aptitud podría ser levemente sobrevalorado.

*Tabla 12. Matriz para determinar la aptitud agronómica (incluida la pendiente). S1: apto, S2: apto con restricciones moderadas, S3: apto con restricciones severas, N1: no apto condicional, N2: no apto permanentemente. (Fuente: Adaptada del IDEAM (2009b).*

| | | **Pendiente** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **0** | **1** | **2** | **4** | **8** |
| **Agronomía** | **0** | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 |
| | **1** | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 |
| | **2** | N2 | N1 | S3 | S3 | S3 |
| | **4** | N2 | N1 | S3 | S2 | S2 |
| | **8** | N2 | N1 | S3 | S2 | S1 |

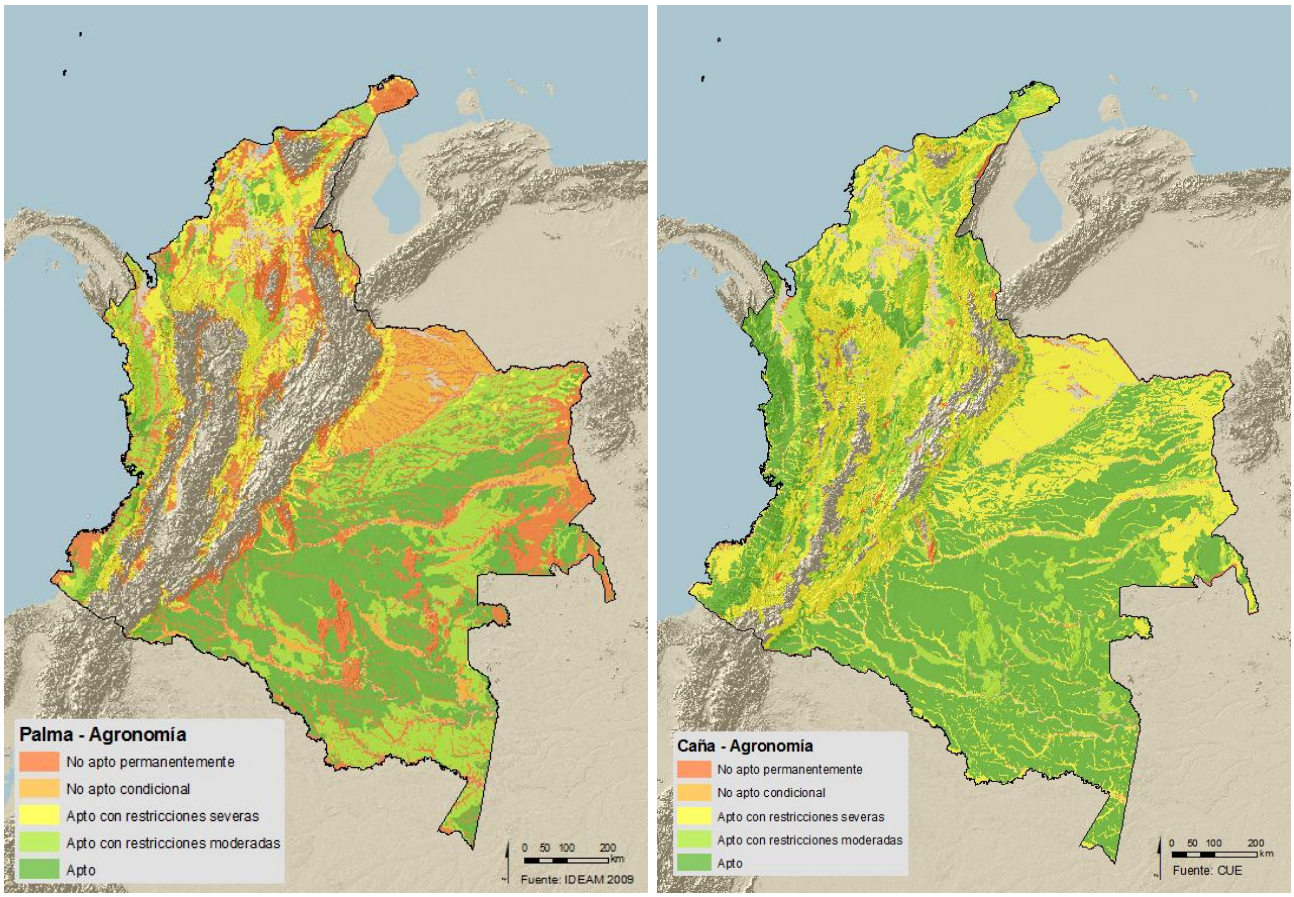



*Figura 15: Aptitud agronomica: mapa de aptitud para palma (izquierda) y caña de azúcar (derecha).*

En general, La aptitud agronómica es más baja para los cultivos de palma de aceite que para los de caña de azúcar, debido principalmente a la necesidad de suelos profundos.

## 3.4 Aptitud biofísica

El potencial de expansión biofísico para el cultivo de palma de aceite y caña de azúcar se establece al relacionar la aptitud agronómica y climática de cada cultivo. Para cada malla los valores del mapa de aptitud climática (ver sección 3.1) y el mapa de aptitud agronómica (ver sección 3.2) fueron empleados para derivar la aptitud biofísica a partir de la siguiente matriz.

*Tabla 13: Matriz para determinar la aptitud biofísica. S1: Apto, S2: Apto con restricciones moderadas, S3: Apto con restricciones severas, N1: No apto condicional, N2: No apto permanentemente. (Fuente: Adaptada del IDEAM (2009b).*

| | | **Clima** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **0** | **1** | **2** | **4** | **8** |
| **Agronomía** | **0** | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 |
| | **1** | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 |
| | **2** | N2 | N1 | S3 | S3 | S3 |
| | **4** | N2 | N1 | S3 | S2 | S2 |
| | **8** | N2 | N1 | S3 | S2 | S1 |

### 3.4.1 Mapa de aptitud para la palma de aceite

En general, grandes zonas de Colombia son altamente aptas para el cultivo de la palma de aceite. La aptitud esta principalmente limitada por el alto nivel de precipitación de la costa pacífica (hasta 7000mm por año) o por muy poca lluvia en la península de la Guajira (por debajo de los 500 mm). Además, los suelos poco profundos en la zona Oriental del piedemonte de la cordillera de los Andes limitan la aptitud para el cultivo de la palma de aceite.

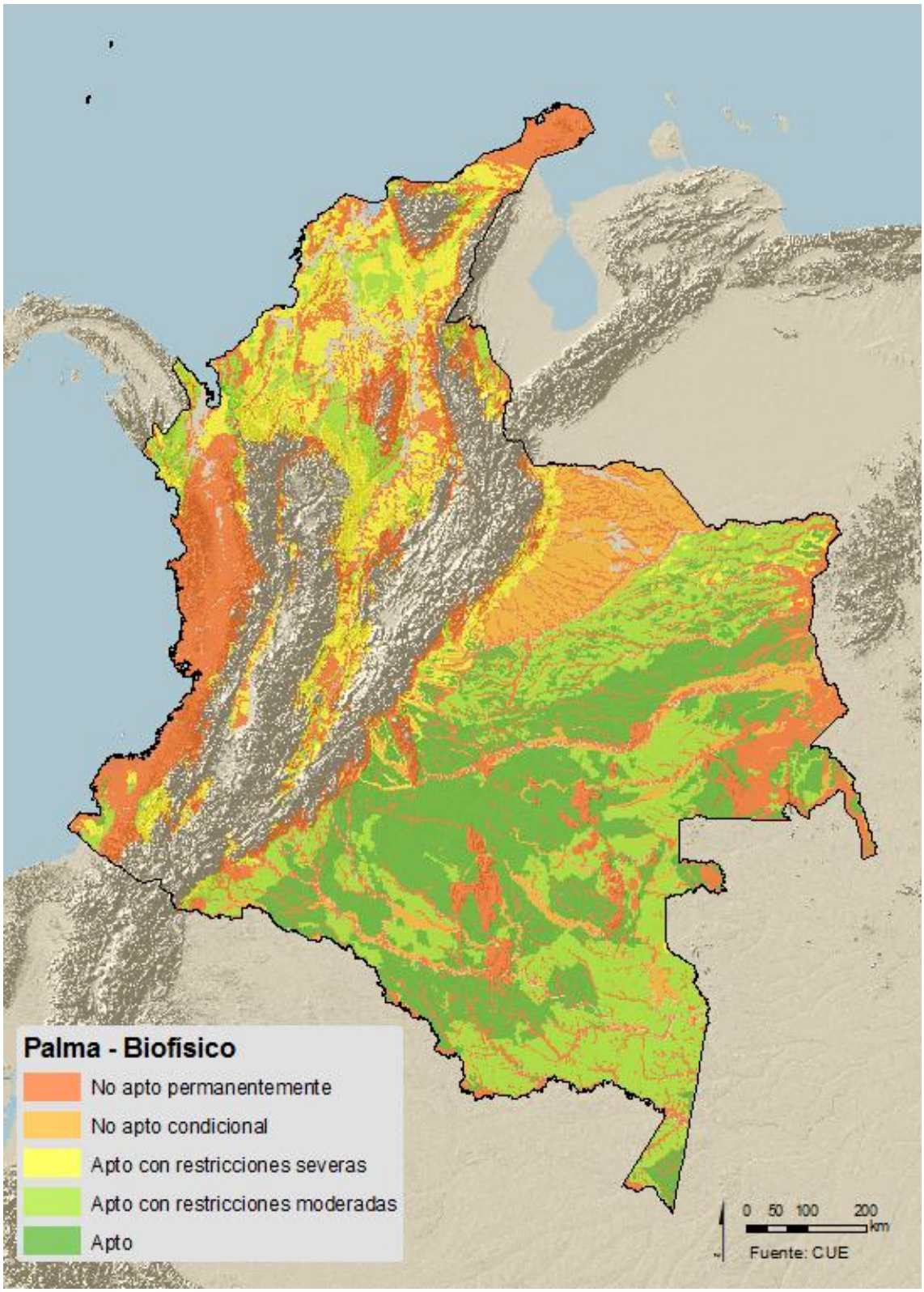



*Figura 16: Aptitud biofísica de los cultivos de palma de aceite.*

Validando el modelo de aptitud con el área de cultivo actual del Suroeste (Nariño), Este (Meta), Norte (Magdalena, Cesar) y el Centro (Santander) muestra una relativa similitud (ver Figura 17). Sin embargo, los diferentes niveles de detalle entre los mapas de aptitud (1:500.000) y las áreas cultivadas (menos

de 5 km de resolución) conducen en parte a la clasificación de cultivos de palma establecidos actualmente en suelos no aptos. Por lo tanto, el mapa de aptitud puede ser tomado como herramienta para detectar áreas de expansión general, pero el nivel de detalle no es suficiente para planear terrenos individuales.

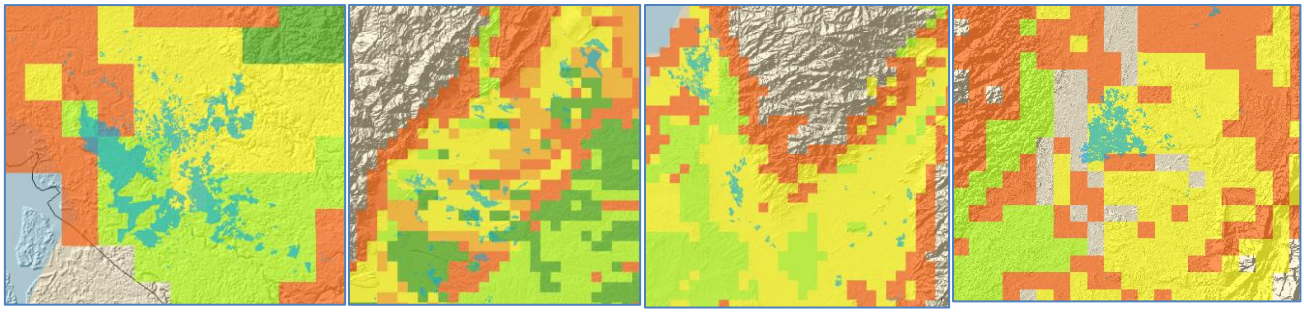


*Figura 17: Mapa de aptitud biofisica (cada pixel:5km x 5km) y ampliado a los cultivos actuales de palma (marcados en azul) en Nariño (1), Meta (2), Magdalena y Cesar (3) y Santander (4).*

Comparando el modelo de aptitud con el modelo de aptitud conducido por la FAO, se puede observar que en general los patrones de aptitud son similares (FAO y IIASA 2006). La base para los mapas de aptitud FAO son parámetros climáticos (clima térmico, duración del periodo de crecimiento y el grado de variabilidad climática), características del suelo (profundidad, fertilidad, drenaje, textura) pendiente y uso del suelo (excluidos bosques naturales y áreas protegidas[7]). En consecuencia, se aplicaron patrones similares, lo cual condujo a patrones similares de aptitud con algunas diferencias. Por ejemplo el norte de la costa pacífica (excepto para Nariño) es considerada como no apta en el estudio del IDEAM (IDEAM 2009a) debido a las altas precipitaciones, mientras el estudio de la FAO consideró esta área potencialmente apta.

Adicionalmente, un estudio espacial detallado sobre la sostenibilidad de los diferentes cultivos mostró patrones de aptitud similares para la palma de aceite en Antioquia (potencial alrededor de Caucasia y a lo largo del rio Magdalena en la frontera con Santander) BIRD (2007).

[7] Excluidas las áreas forestales y áreas con restricciones legales y ecológicas (Sin restricciones biofísicas)

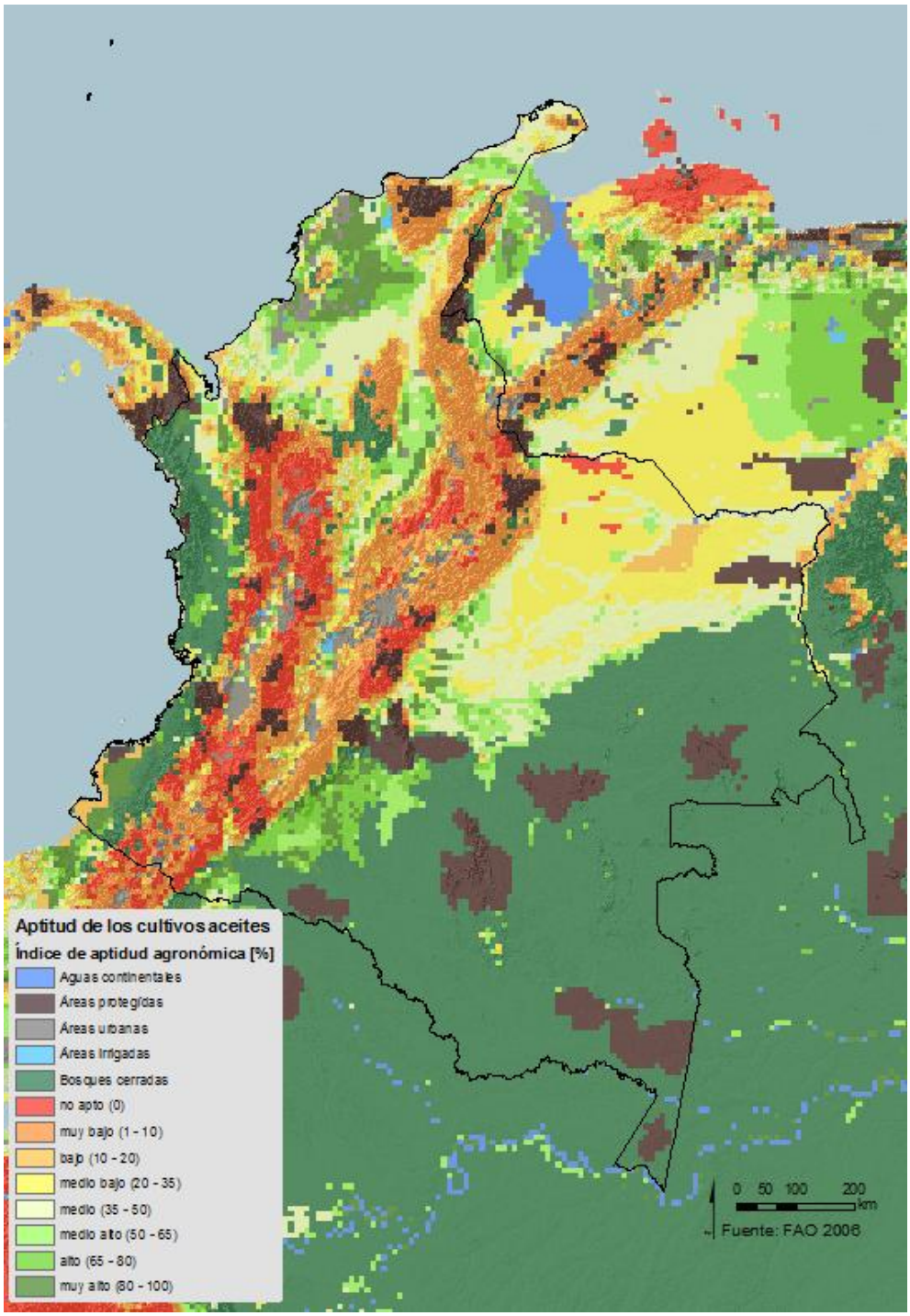



*Figura 18: mapa de aptitud de la FAO para los cultivos de palma de aceite (FAO and IIASA 2006).*

En general se identificaron la mayoría de áreas aptas en términos de condiciones biofísicas al este de Colombia (Meta, Guaviare y Caquetá), en el norte de Colombia (Magdalena, áreas cercanas a Panamá) y en los valles Interandinos (Santander y la parte norte de Antioquia). Las áreas más grandes, aptas para el cultivo de palma de aceite se encuentran en el oriente de Colombia. Sin embargo, el alto impacto en la biodiversidad y las emisiones de carbono que se generan al convertir bosques naturales en cultivos de palma de aceite limita drásticamente la aptitud. Estos efectos son discutidos más adelante.

### 3.4.2 Mapa de aptitud para los cultivos de caña de azucar

En general, grandes zonas de Colombia son altamente aptas para el cultivo de la caña de azúcar. De nuevo, la alta precipitación anual de la costa Pacífica y de la región amazónica limita el potencial de expansión.

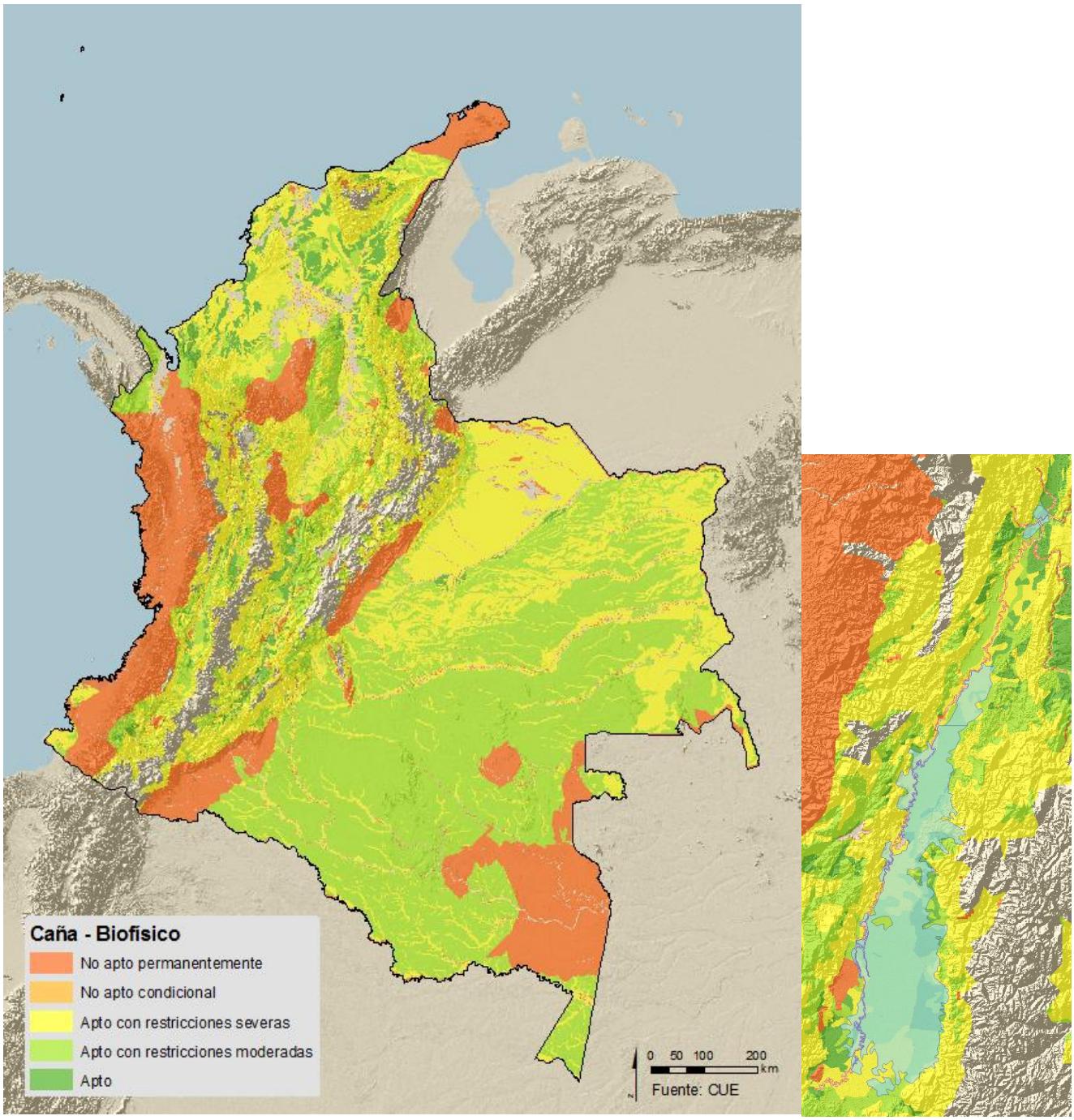



*Figura 19-Izquierda: Aptitud biofísica para los cultivos de caña de azúcar. Derecha: vista detallada del Valle del Rio Cauca (azul= área de cultivo actual de caña de azúcar).*

Al validar el modelo con las áreas actuales de la caña de azucar, se observa que grandes partes del Valle Geografico del Rio Cauca son consideradas como aptas y moderadamente aptas., y otras áreas menores como aptas con restricciones severas.

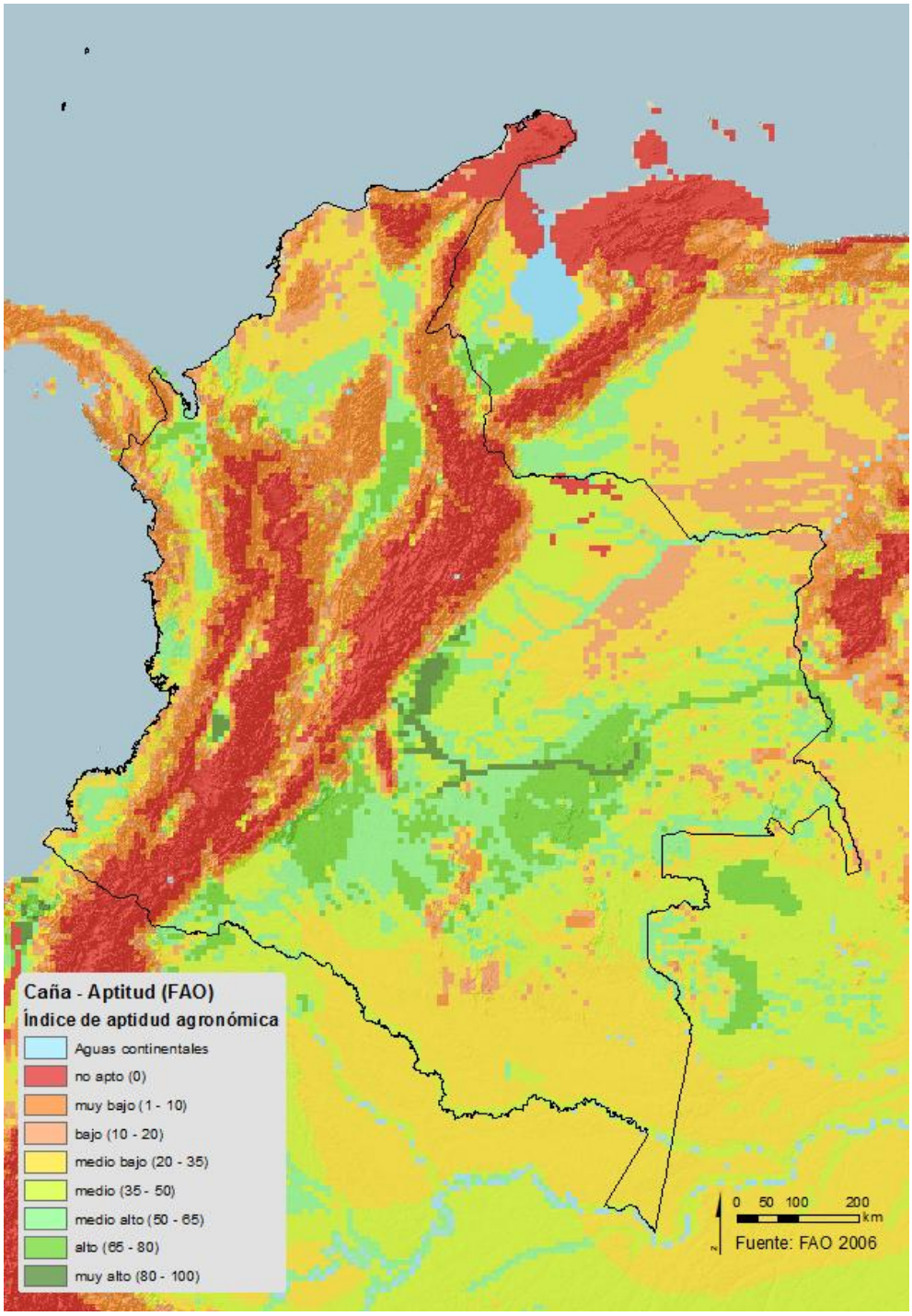



*Figura 20: Mapa de aptitud de la FAO para cultivos de azúcar (FAO y IIASA 2006).*

Comparando el mapa de aptitud con el mapa de aptitud para los cultivos de azúcar de la FAO (Figura 20), se observa que los patrones generales son similares, presentando algunas diferencias.

Debido a la alta precipitación en la costa pacífica, esta área fue excluida de este estudio, mientras el estudio de la FAO consideró estas áreas con aptitud media. Adicionalmente, grandes áreas en el Magdalena y Cesar se consideraron como aptas en este estudio, mientras el potencial de aptitud del área se clasificó como medio por la FAO. Por otro lado, el mapa de aptitud de la FAO muestra menor aptitud para áreas en el sur de Colombia. Lo anterior sugiere un error en el uso de los parámetros del presente estudio (por ejemplo, humedad relativa) de modo que las áreas de la Amazonía no se excluyeron empleando parámetros biofísicos. Sin embargo, a continuación se consideran los criterios ambientales y sociales, minimizando la aptitud para el cultivo de caña de azúcar en la región del Amazonas.

## 3.5 Productividad potencial

El rendimiento de la cosecha de cultivos para biocombustibles depende principalmente en las condiciones del suelo, las características genéticas del material de la semilla y las prácticas de administración. Debido a las diferencias locales, es imposible establecer y precisar una productividad potencial para toda Colombia. Es especialmente difícil relacionar factores biofísicos al rendimiento de la cosecha, ya que la mayoría de los factores puedan ser manipulados con prácticas agrícolas (irrigación, protección contra inundaciones, terracéo, fertilizaciones etc.). Sin embargo, el enfoque de este estudio es establecer un mapa rendimiento más general indicando los rangos típicos de productividad que son empleados para la elaboración del mapa de emisiones de GEI. Por lo tanto, las categorías de aptitud están enlazadas con los valores de productividad. La Interrelación entre aptitud y productividad se realizó con base en valores de la literatura y datos de campo de los sitios de estudio

### 3.5.1 Productividad de la caña de azúcar

La productividad máxima está basada en números reales de campo del Valle Geográfico Del Rio Cauca. En la Figura 21, se listan los rendimientos para las parcelas muestreadas (en toneladas por hectárea año). Bajo condiciones óptimas, la productividad promedio es de aproximadamente 120 toneladas por hectárea año. La productividad moderada (aptitud  clase 2) se encuentra alrededor de 90 toneladas por hectárea año.

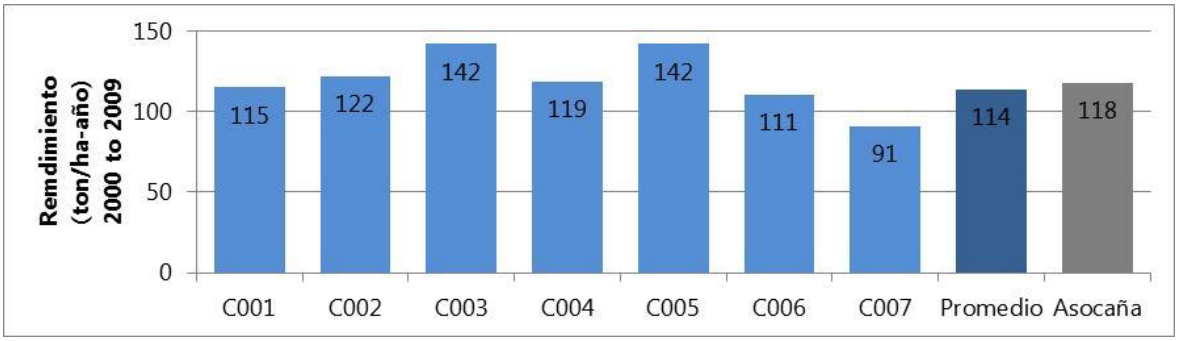
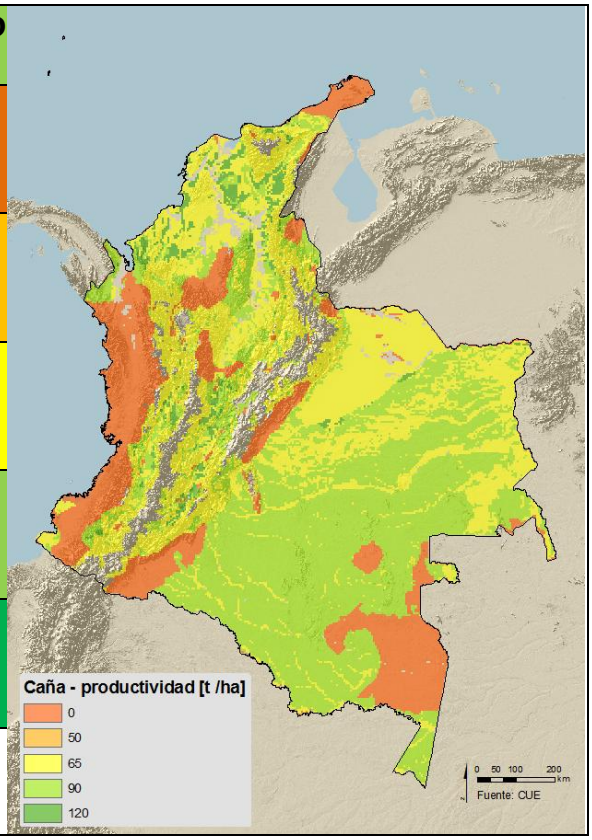



*Figura 21: Rendimientos anuales de Caña de azúcar de los sitios muestreados en el Valle geográfico del rio Cauca (en tonelada por hectárea).*

Los rendimientos para las áreas menos aptas han sido evaluadas basadas en las estadísticas de cultivo de FAO (FAOSTAT 2010). Para las áreas de la categoría - no apto condicional - se asumió una productividad potencial de 50 toneladas de caña de azúcar por hectárea año y 65 toneladas por hectárea año para los terrenos aptos con restricciones severas.

*Tabla 14: Rendimientos anuales asumidas por cada clase de aptitud en ton de caña de azúcar por hectárea.*

| APTITUD | PRODUCTIVIDAD (TON/HA) |
|---|---|
| N2 No apto permanentemente: | 0 |
| N1 Apto condicional: | 50 |
| S3 Apto con restricciones severas | 65 |
| S2 Apto con restricciones moderadas | 90 |
| S1 Apto | 120 |
| >2500m | excluido |




## 3.5.2 Productividad de palma de aceite

La productividad máxima se basa en rendimientos reales que han sido recolectados durante las visitas de campo. En la Figura 22, se listan los rendimientos de las parcelas tomadas como muestra (en toneladas por hectárea año). Bajo condiciones óptimas, el rendimiento promedio es de aproximadamente 25 toneladas de racimos de fruta fresca por hectárea – año. Los rendimientos moderados (aptitud clase 2) están alrededor de 20 toneladas por hectárea.

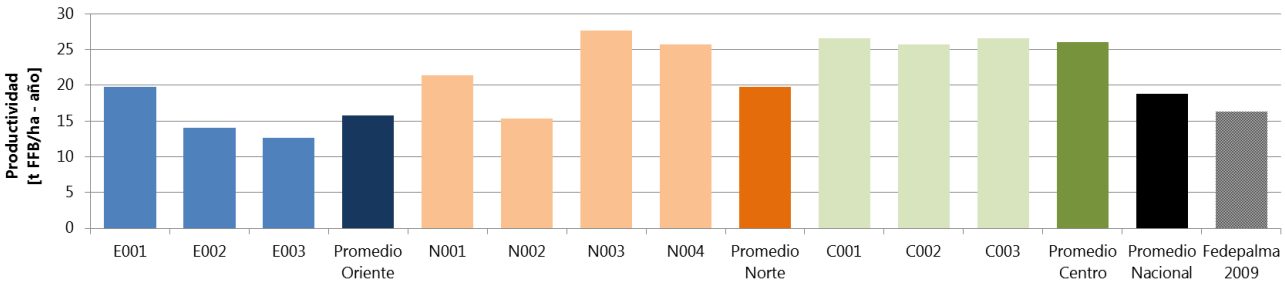
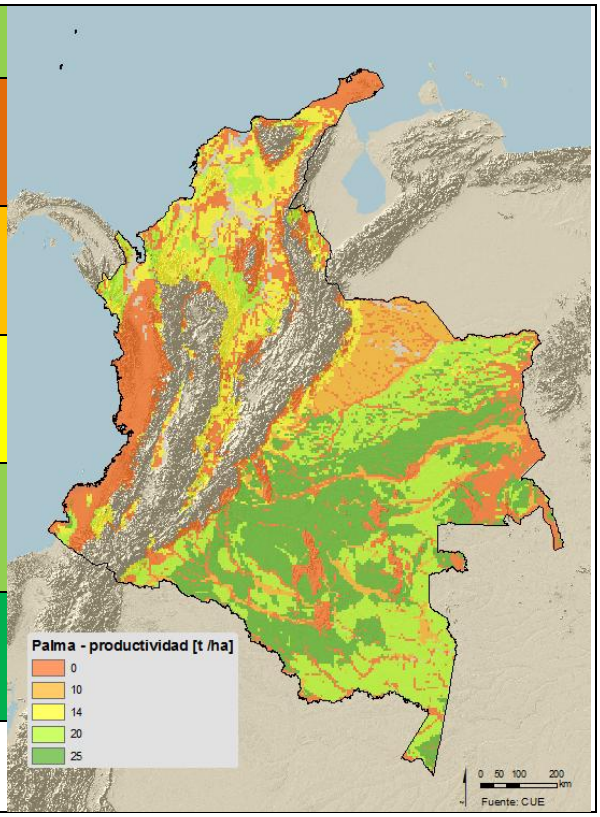



*Figura 22: Productividad anual de palma de aceite en Colombia (ton por hectárea-año). (Fuente CUE)*

El rendimiento para áreas menos aptas ha sido evaluado con base en los datos estadísticos dados por FAO (FAOSTAT 2010). Se han asumido rendimientos marginales de 10 toneladas de RFF por hectárea para la categoría - no apto condicional, 14 toneladas por hectárea año para la categoría – apto con restricciones severas.

*Tabla 15: Las cosechas anuales son tomadas para cada clase de aptitud en tonelada FFB por hectárea.*

| APTITUD | PRODUCTIVIDAD (TON/HA) |
|---|---|
| N2 No apto permanentemente | 0 |
| N1 No apto condicional | 10 |
| S3 Apto con restricciones severas | 14 |
| S2 Apto con restricciones mode-radas | 20 |
| S1 Apto | 25 |
| >1000m | excluido |



# 4 Restricciones Legales

Se excluyeron las áreas legalmente protegidas de las áreas potencialmente aptas para el cultivo de materia prima para biocombustibles (áreas naturales, resguardos indígenas y títulos colectivos de comunidades negras). Los parques naturales están marcados con restricciones permanentes (UAESPNN. 2008), mientras los resguardos indígenas y títulos colectivos de comunidades negras muestran limitaciones condicionales (IGAC. 2010). Estas limitaciones se refieren a dos aspectos clave: i) los territorios son colectivamente propios y no pueden ser vendidos, arrendados o transferidos a proyectos privados, y ii) los proyectos de biocombustibles en estas áreas solo pueden ser desarrollados bajo del liderazgo y consentimiento de las comunidades.

En la Figura 23 se ilustran los parques naturales, resguardos indígenas y títulos colectivos de comunidades negras que restringen el cultivo de materias primas para biocombustibles. Estas limitaciones excluyen grandes áreas de la costa Pacífica, la región del Amazonas y la península de la Guajira

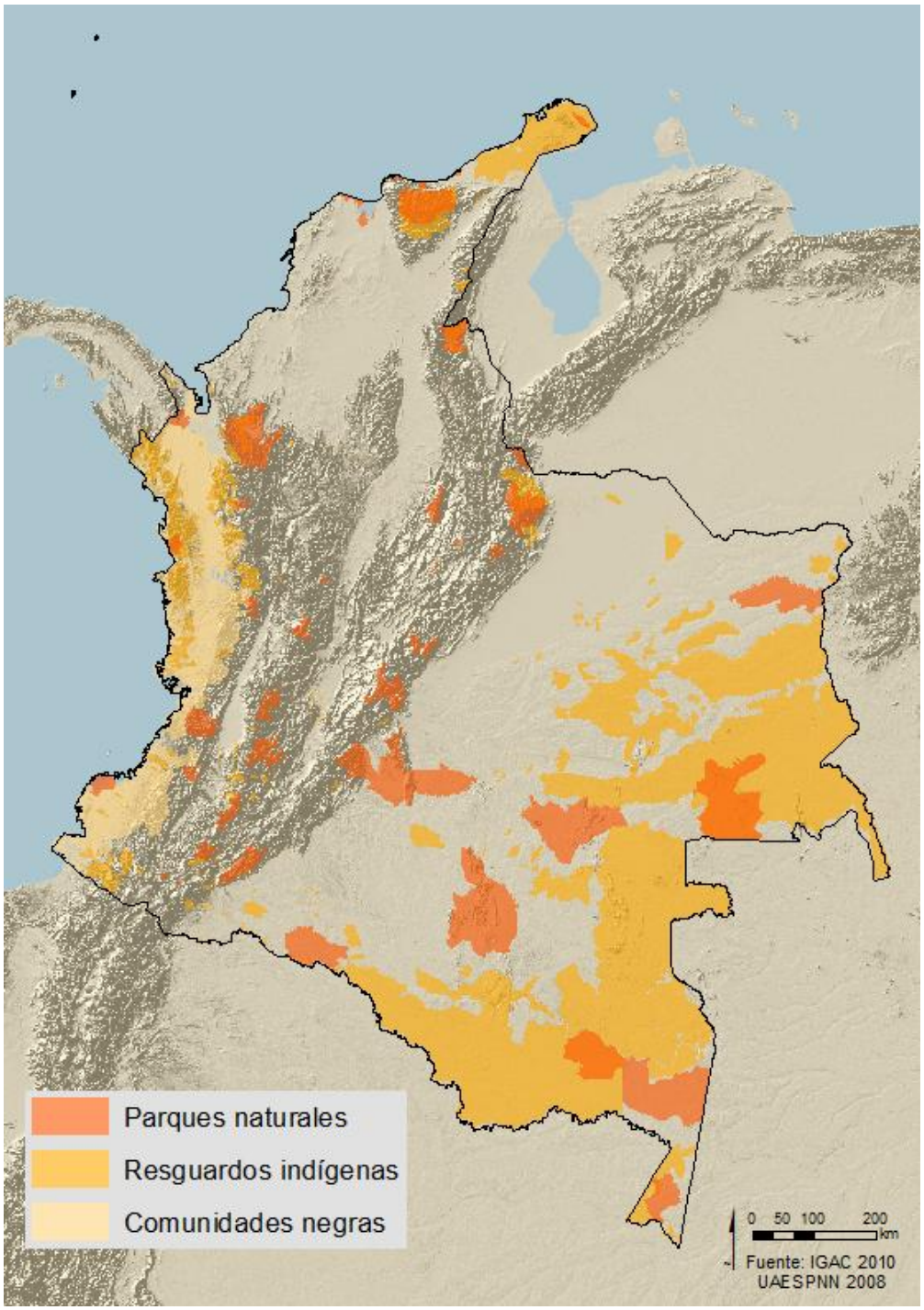



*Figura 23: En gris las áreas sin ninguna restricción legal IGAC: Territorios colectivos (2010.) UAESPNN: Sistema Nacional de Parques Naturales (2008).*

Por otra parte, las áreas forestales protegidas por la Ley 2 de 1959 están restringiendo legalmente la expansión potencial de las plantaciones de caña de azúcar y palma de aceite (Congreso de Colombia, 1959). Todas las áreas forestales son excluidas en el Capítulo 5 (limitaciones ecológicas) no solo debido a criterios legales, sino para evitar la perdidad de biodiversidad y la disminución de los servicios hidrológicos proveidos por los sistemas forestales.

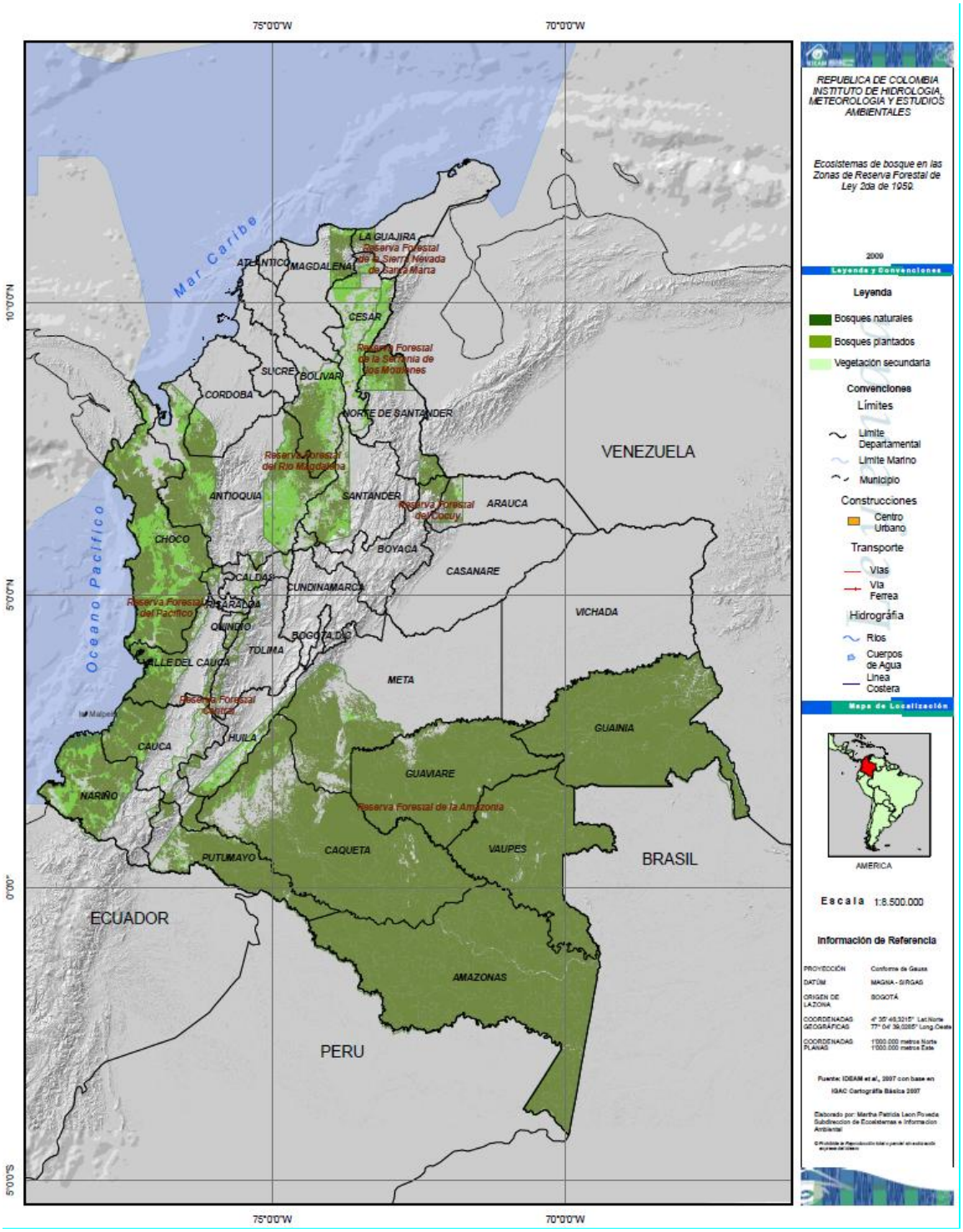



*Figura 24: Ecosistemas de bosque en las Zonas de reserva Forestal de Ley 2 de 1959 (IDEAM, 2007)*

# 5 Limitaciones ecológicas

En la sección 3, se determinaron las áreas potenciales para la aptitud de los cultivos de biocombustibles tomando en cuenta los factores biofísicos. En este capítulo, las áreas biofísicas aptas son aún más restringidas con criterios medioambientales, tales como las emisiones de carbono (sección 5.1), escasez hídrica (sección 5.2) y biodiversidad (sección 5.3).

## 5.1 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero GEI

Los actuales estudios de GEI muestran la importancia de considerar los cambios en el uso del suelo, con respecto al desempeño ambiental de los biocombustibles agrícolas. De acuerdo con Fargione et al. (2008), el cambio del uso del suelo causado por la producción de biocombustibles puede conducir a una "deuda de carbono" por la liberación de grandes cantidades de $CO_2$, el cual fue almacenado en el suelo y por encima de este. Si las plantaciones de palma de aceite se establecen en un bosque natural, tomaría 400 años para que la deuda de carbono sea compensada por la cantidad de biocombustible que se produzca[8]. Inclusive si las plantaciones de caña de azúcar se establecieran en una antigua sabana, tomara 17 años pagar esta deuda de carbono (Fargione, Hill et al. 2008).

Dentro de este estudio, se calcula la deuda de carbono para las plantaciones potenciales de caña de azúcar y de palma de aceite. De hecho un Análisis de Ciclo de Vida regional será realizado para cada malla en Colombia (5km x 5km) y basándose en el balance de GEI se obtiene la deuda de carbono.

[8] El pago de la deuda de carbono requiere un beneficio GHG neto para poder substituir los combustibles fósiles por biocombustibles.

*Figura 25: Concepto para modelar un mapa de emisiones de GEI (Fuente: CUE).*

En un primer paso, se calculan las emisiones de GEI relacionadas al Cambio del Uso del Suelo (LUC, por sus siglas en inglés). Posteriormente, se establece el mapa de biomasa y carbono del suelo para el uso del suelo de referencia en Colombia. Adicionalmente, se calcularon las reservas de biomasa y carbono del suelo para los cultivos de materia prima para biocombustibles, y se evaluaron los cambios potenciales del uso del suelo de referencia para los cultivos de caña de azúcar y palma de aceite. El mapa de productividad potencial se emplea para expresar el cambio en las reservas de carbono como kg $CO_2$ por kg de materia prima para el biocombustible (en vez de kg $CO_2$ por hectárea). En las etapas de cultivo, procesamiento y uso de los biocombustibles, se emplearon valores por defecto para las emisiones de GEI. Finalmente, se calculó la deuda de carbono y el beneficio neto si se reemplazan los combustibles fósiles por biocombustibles. El marco de trabajo general ilustrado en Figura 25 y se describe en los siguientes capítulos.

### 5.1.1 Emisiones de carbono por el cambio de uso del suelo

Dentro de este capítulo se calculan las emisiones de carbono debido al cambio de uso del suelo (LUC). Las reservas de carbono del suelo se determinan por el carbono contenido en la biomasa y en el carbono orgánico del suelo de la capa fértil (primeros 30 cm).

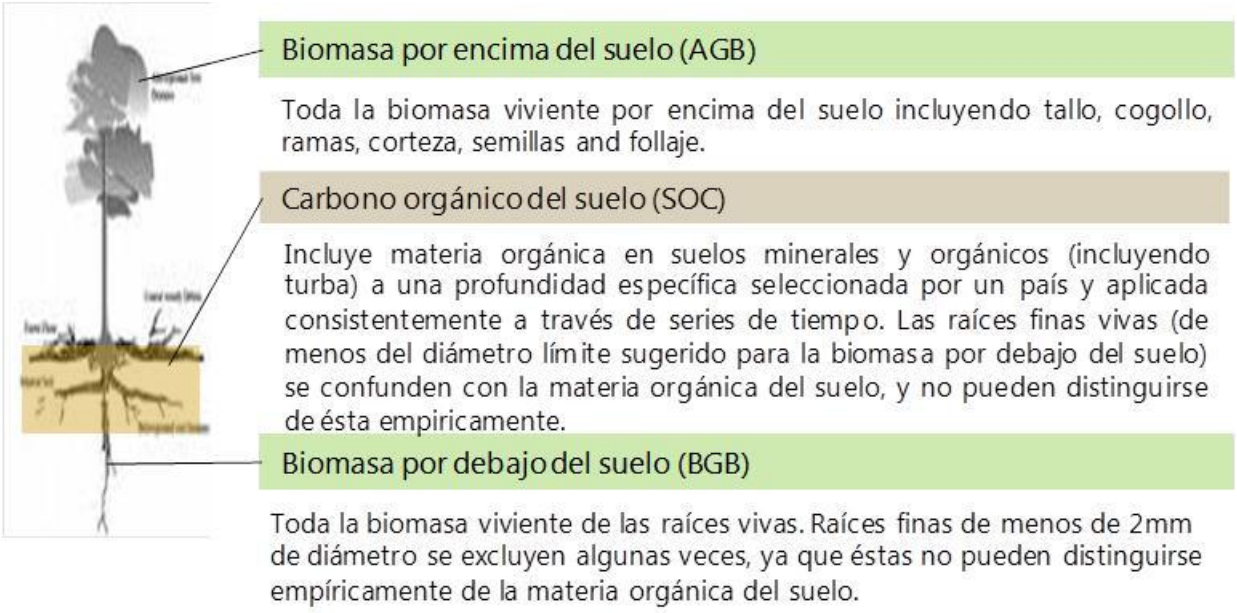



*Figura 26: Reservas de carbono del suelo: por encima del suelo, por debajo del suelo y carbono orgánico del suelo. (Fuente: CUE)*

La biomasa de las plantas almacena cantidades significativas de carbono a nivel del suelo y por debajo del suelo en muchos ecosistemas. La biomasa por encima del suelo (AGB - por sus siglas en inglés) asociada con las plantas herbáceas anuales y perennes es relativamente efímera, mientras que la AGB asociada con plantas leñosas puede acumular grandes cantidades de carbono (hasta cientos de toneladas por hectáreas) a través de su vida útil. Las raíces finas y gruesas constituyen el componente más significativo para la biomasa por debajo del suelo (BGB, por sus siglas en inglés), la cual puede ser relevante para sistemas herbáceos y leñosos. A medida que los ecosistemas pasan de un clima húmedo a un clima seco, las plantas distribuyen una proporción cada vez mayor de su biomasa debajo del suelo.

| Reserva de carbono total [tC/ha] = carbono de la biomasa por encima y por debajo del suelo [tC/ha]+ Carbono orgánico del suelo [tC/ha] |
|---|

La evaluación de las emisiones de carbono se basa en los siguientes supuestos:

- Solo se consideran los efectos directos de la trasformación directa de suelo (LUC indirectos no son considerados)
- El año de referencia es el 2000

- El cambio en las reservas de carbono se evalúan sobre un periodo de 20 años (IPCC/EU estándar)
- Se evalúa la biomasa que se encuentra por encima del suelo (plantas), por debajo del suelo (raíces) y el carbono del suelo en el año 0 y el año 20.
- Las fuentes de datos para las reservas de carbono son estudios regionales (IPCC Nivel 2/3) o - si los estudios no existen – valores por defecto (IPCC Nivel 1)

Básicamente esto significa, que las reservas de carbono para el suelo en el año 2000 (paso 1) es comparada con las reservas de carbono para los cultivos de biocombustibles (paso 2). Se calcula la diferencia en las reservas de carbono para 20 años como un promedio de cambio en las reservas de carbono por año.

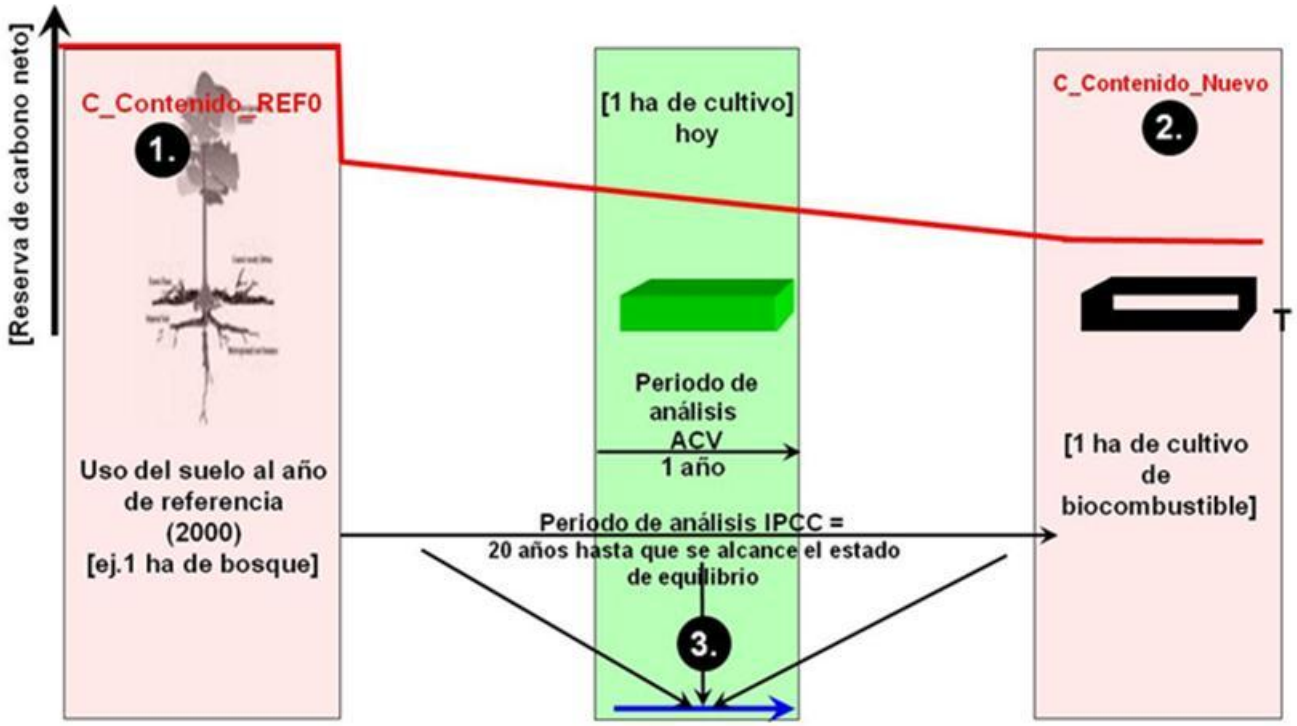



*Figura 27: Concepto esquemático para calcular las emisiones GEI para el cambio de la utilización de la tierra. (Fuente: CUE).*

En la Figura 28, se muestra un ejemplo esquemático del cultivo de palma en un bosque natural y suelo Agrícola.

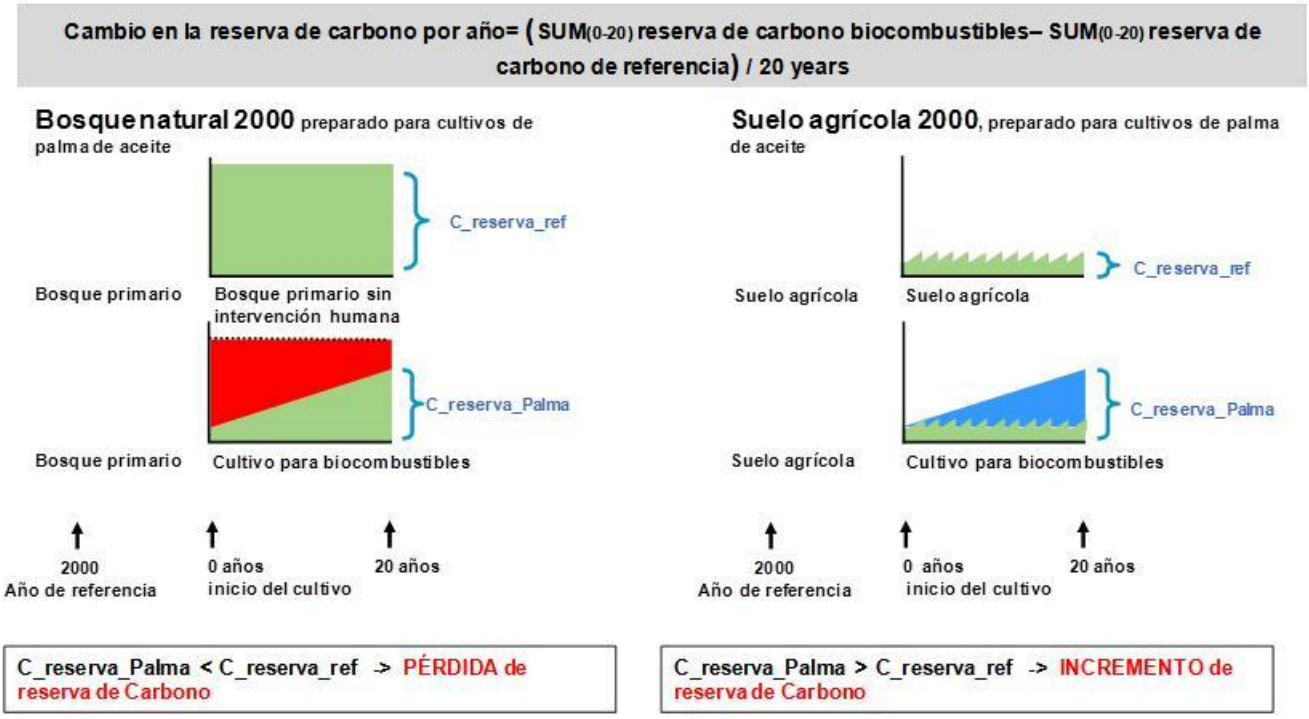



*Figura 28: Ejemplo esquemático del cambio en el uso del suelo de bosques naturales a cultivos de palma de aceite (derecha). (Fuente: CUE)*

El área roja indica la pérdida de carbono y el área azul representa el incremento en la reserva de carbono.

A continuación se describe el cambio de AGB y BGB (sección 5.1.1.1 ) y el cambio de carbono orgánico del suelo (sección 5.1.1.2). Finalmente, se calculó el cambio total de carbono (sección 5.1.1.3) y la deuda de carbono (sección 5.1.3).

### 5.1.1.1 Cambio del carbono en la biomasa

Con el fin de evaluar el cambio en el carbono de la biomasa, se calculó la reserva de la biomasa por encima y por debajo del suelo para el uso del suelo de referencia (año 2000) y el potencial de los cultivos de materia prima para biocombustibles después de 20 años. A continuación se describen las metodologías y se presentan los mapas intermedios.

#### 5.1.1.1.1 Uso del suelo de referencia – Cambio de carbono en la biomasa

La Figura 29 define el diagrama de flujo de los procesos empleados para identificar y cuantificar la reserva de carbono de la biomasa para el uso del suelo de referencia (año 2000).

La Figura 29 define el diagrama de flujo del proceso utilizado para identificar y cuantificar los reservorios de carbono de estos dos ecosistemas.

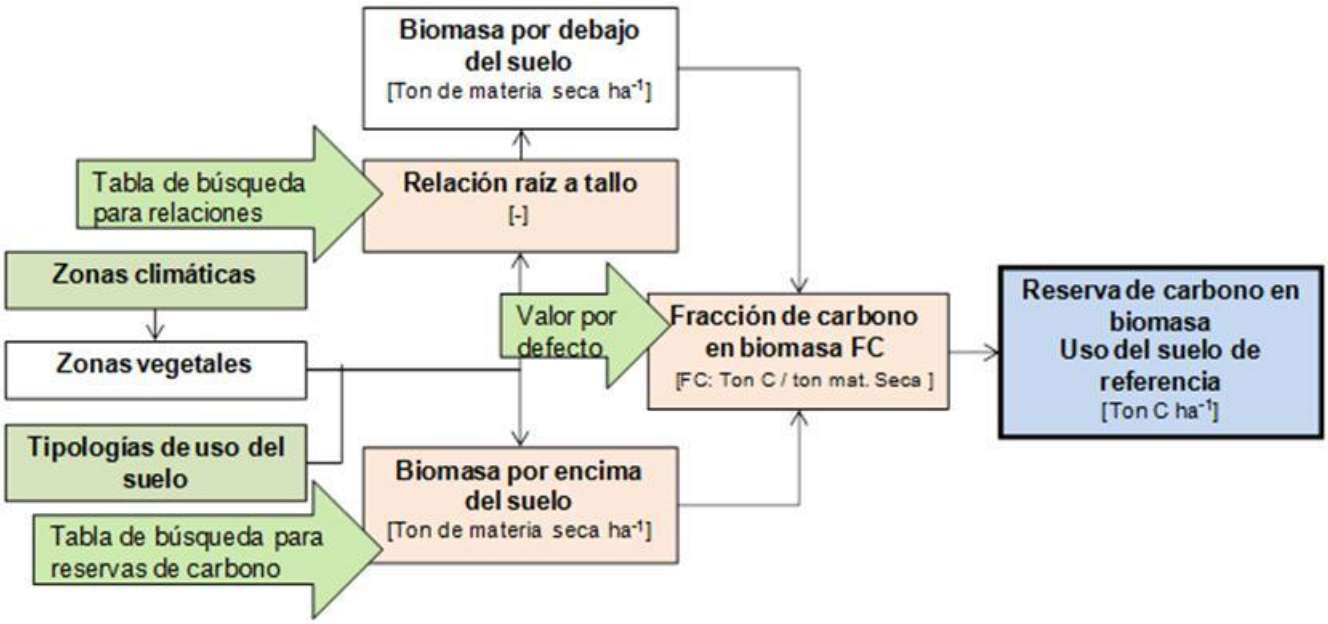



*Figura 29: Diagrama de flujo de proceso para evaluar la reserva de carbono de la biomasa para el uso del suelo de referencia. (Fuente: CUE).*

El mapa de uso del suelo actual (zonas únicas de carbono de biomasa) de Colombia se elaboró combinando las tipologías del uso del suelo y las zonas vegetales (zonas de vida o cobertura vegetal). EL mapa de cobertura del suelo del IGAC en Colombia, reconoció 29 clases de cobertura del suelo (Figura 30). Este estudio se enfocó en el periodo de 1990-2000 (IGAC and CORPOICA 2002). Se elaboró un mapa detallado de zonas vegetales del territorio Colombiano tal como lo define FAO para las directrices del IPCC (IPCC 2006) reclasificando las el mapa climático (ecozonas) de Colombia.

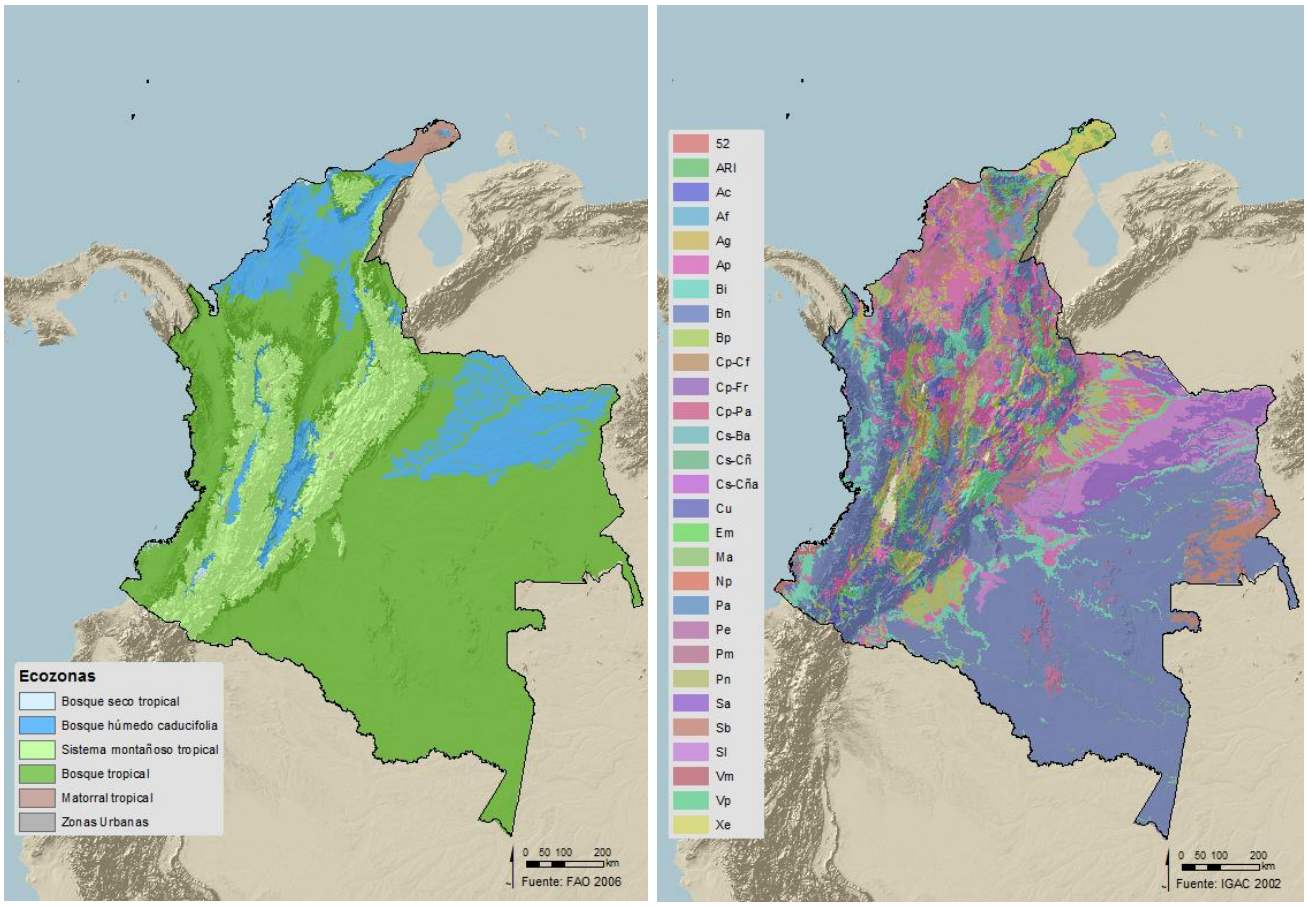



*Figura 30: Reclasificación de las ecozonas en zonas vegetales definidas por la FAO y el IPCC (izquierda) y el mapa de uso del suelo del año 2000 (derecha, la leyenda se presenta en la Tabla 16 del IGAC 2002).*

La mayoria de la tierra en Colombia se clasifica en las categorias de bosque tropical (735,133 $km^2$), bosque húmedo caducifolio (184,771 $km^2$) y sistema montañoso tropical (207,296 $km^2$). Una limitada cantidad de tierra se sitúa en matorral tropical (9,637 $km^2$) y bosque seco tropical (1,978 $km^2$).

La combinación de los usos del suelo y las zonas vegetales resultan en 94 zonas de carbono, cuya extensión superficial ($km^2$) se define en la Tabla 16.

*Tabla 16: Extensión superficial (km2) de las zonas de carbono, tipologías de uso del suelo por zonas vegetales en Colombia. (Fuente: CUE).*

| Domain | Classe Cobertura | SubTipo Cobertura | Tipo Cobertura | Uso Predominante | Tropical rainforest | Tropical shrubland | Tropical dry forest | Tropical moist deciduous forest | Tropical mountain system |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bn | VEGETAL NATURAL Y SEMINATURAL | Bosques | Bosques Naturales | Reservas forestales; parques nacionales naturales; resguardos y territorios indigenas y de comunidad negras | 426'889 | - | - | 861 | 51'355 |
| Bi | | | Bosques Naturales Fragmentados | Extraccion selectiva de flora y fauna; cultivos y pastos en areas de bosques en transicion a potreros | 72'140 | - | 8 | 5'731 | 19'661 |
| Ma | | Matorrales | Arbustos Naturales y/o Inducidos | Extraccion selectiva de productos como lena, fibras y frutos; usos silvopastoriles y tierras en descanso | 2'491 | 1'174 | - | 3'511 | 5'527 |
| Sl | | Otros tipos de vegetacion | Vegetacion de Sabana Herbacea | Pastoreo extensivo y muy extensivo | 28'721 | - | - | 27'298 | 50 |
| Sa | | | Vegetacion de Sabana Arbolada | Pastoreo extensivo y muy extensivo | 15'485 | - | - | 32'392 | 12 |
| Sb | | | Vegetacion de Sabana Arbustiva | Extraccion esporadica de fauna y flora y pastoreo muy extensivo | 18'677 | - | - | - | - |
| Xe | | | Vegetacion Xerofitica | Pastoreo seminomada; extraccion de especies para usos artesanales y ecoturismo | 265 | 6'650 | 158 | 2'775 | 391 |
| Vp | | | Vegetacion de Paramo | Parques Nacionales Naturales, areas protegidas; pastoreo de ganado ovino y bovino y cultivo de papa en sectores | - | - | - | - | 13'016 |
| Vm | | | Vegetacion de Manglar | Aprovechamiento selectivo de fauna y flora; areas protegida | 3'803 | 14 | 202 | 717 | - |
| Pe | | | Vegetacion Herbacea muy rala sobre afloramientos rocosos | Ecoturismo en areas de Parques Nacionales Naturales. | 8'256 | - | - | 1'400 | - |
| Pn | VEGETAL CULTURAL | Pastos | Pastos naturales y/o naturalizados | Pastoreo extensivo | 35'781 | - | 34 | 13'884 | 29'359 |
| Pa | | | Pastos naturales y/o naturalizados con arboles y arbustos | Pastoreo extensivo y semiintensivo | 3'268 | - | 340 | 12'961 | 13'440 |
| Pm | | | Pastos Introducidos manejados | Pastoreo semiintensivo e intensivo | 18'612 | - | 405 | 24'222 | 4'107 |
| Ap | | | Asociacion de pastos, rastrojos, matorrales y relictos de bosques | Pastoreo extensivo y recoleccion de madera, fibras y frutos para uso domestico | 63'603 | 5 | 299 | 38'944 | 34'914 |
| Cu | VEGETAL CULTURAL | Cultivos | Transitorios | Agricultura intensiva con especies anuales como arroz, algodon, sorgo, maíz, frijol, papa | 2'646 | - | 113 | 3'278 | 1'112 |
| Cs-Cña | | | Semipermanentes | Agricultura de la cana para azucar y derivados | 136 | - | - | 2'263 | 316 |
| Cs-Cñ | | | Semipermanentes | Agricultura de la cana panelera | 3 | - | - | 342 | 649 |
| Cs-Ba | | | Semipermanentes | Plantaciones de banano y platano para exportacion principalmente | 452 | - | - | 195 | - |
| Cp-Cf | | | Permanentes | Agricultura del cafe | 535 | - | - | 527 | 10'294 |
| Cp-Pa | | | Permanentes | Plantaciones de palma africana | 1'098 | - | - | 510 | - |
| Cp-Fr | | | Permanentes | Plantaciones de frutales (cacaotales, cítricos, vinedos, caducifolios y otros) | - | - | - | - | 130 |
| Ac | | Cultivos asociados | Asociacion de cultivos con rastrojos, relictos de bosques | Agricultura tradicional con especies como fríjol, maíz, yuca y otros, en mezcla con otras coberturas | 7'497 | - | 47 | 6'279 | 14'351 |
| Af | | | Asociacion de cultivos con rastrojos, relictos de bosques | Agricultura del cafe asociada con platano, cana, frutales, pastos y relictos de bosque | 262 | - | - | 423 | 5'293 |
| Bp | | Bosques | Bosques Plantados | Plantaciones forestales para produccion de madera, proteccion y recuperacion de suelos | 27 | - | - | 188 | 1'457 |
| 52 | CUERPOS DE AGUA | Pantanos y Cienagas | Pantanos y Cienagas | Pantanos y Cienagas | 5'218 | - | - | 30 | 4 |
| ARI | CUERPOS DE AGUA Y ZONAS PANTANOS | Naturales Artificiales Continentales | Lagos, Lagunas, Embalses, Represas, Ríos y Quebradas | Generacion de energia; pesca artesanal y comercial; consumo domestico industrial y agricola; transpo | 14'702 | - | 2 | 39 | 10 |
| Ag | | Naturales Continentales | Pantanos y Cienagas | Extracción selectiva de fauna y flora; pesca artesanal; pastoreo extensivo temporalmente; ecoturismo | 4'435 | 31 | 66 | 5'173 | 43 |
| Em | ERIALES | Rocas Expuestas | Miscelaneo erosionado, afloramientos rocosos, mantos de arena y tierras degradas | Extraccion de materiales para construccion y artesania; turismo y pastoreo muy extensivo | 67 | 1'759 | 109 | 825 | 1'466 |
| Np | NIEVES PERMANENTES | | | Parques Nacionales Naturales, areas protegidas; ecoturismo e investigacion. | - | - | - | - | 333 |

Para cada una de las 94 combinaciones de la biomasa AGB Y BGB se han tomado los valores dados por el IPCC. Si los valores dados por IPCC no estuvieran disponibles, se hubieran utilizado estimaciones regionales de tipologias similares de zonas vegetales y de cobertura del suelo.

La biomasa debajo del suelo (BGB, siglas en ingles) se calcula como AGB por RS_R (Relacion Raiz Tallo). El contenido del carbono de la biomasa se calcula multiplicando el contenido de materia seca por la Fraccion de Carbono (FC). La FC de la materia seca de la biomasa se asume como 0.47, tipica para sistemas tropicales.

La fuente de datos de los valores de carbono usados para las diferentes tipologias de uso del suelo en la respectiva zona vegetal se encuentran en los Anexos de este documento y el mapa AGB y BGB son presentados en la Figura 31.

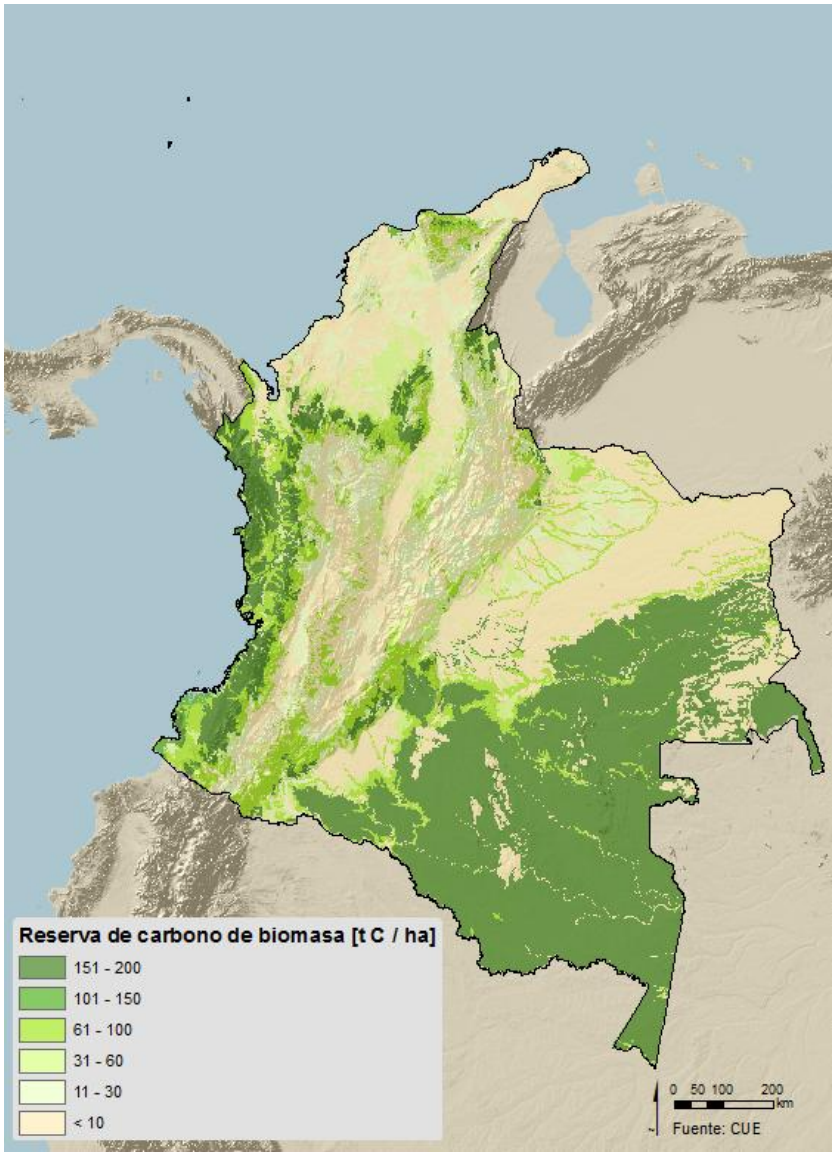



*Figura 31: Carbono total de la biomasa del uso del suelo de referencia en Colombia (en toneladas de carbono por hectárea)*

### 5.1.1.1.2 Reservas de carbono para los cultivos de materias primas de biocombustibles.

El crecimiento típico de la biomasa y la fracción de carbono (kg C/ kg de biomasa) deben ser cuantificados en un periodo de 20 años para la caña de azúcar y la palma de aceite. (Ver. Figura 32)

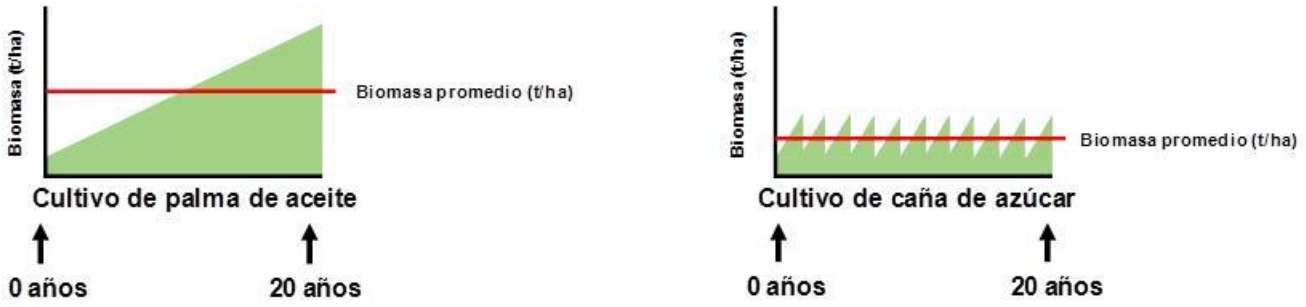



*Figura 32: Acumulación de biomasa de la palma de aceite (izquierda) y de la caña de azúcar (derecha). La línea roja indica el promedio de biomasa acumulado en un periodo de 20 años. (Fuente: CUE).*

Como se ilustra en la Figura 110 los valores para la reserva de biomasa superficial, la relación raíz a tallo y la fracción de carbono se establecieron con base en valores por defecto de la literatura. A continuación, se describen los valores para los cultivos de palma de aceite y caña de azúcar.

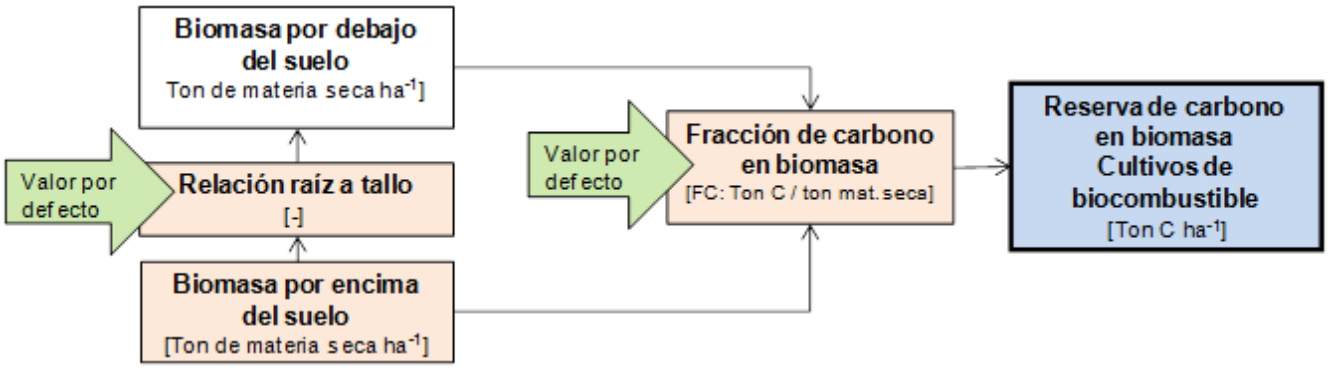



*Figura 33: Diagrama de flujo de proceso para evaluar la reserva de carbono en la biomasa de los cultivos de materias primas para biocombustibles. (Fuente: CUE).*

**Plantación de palma de aceite (Cp-Ca)**

La Tabla 17 describe la AGB y la BGB de las plantaciones de palma en Indonesia a diferentes edades (Syahrinudin 2005).

*Tabla 17: Distribución de las reservas de carbono sobre y debajo de bajo la superficie del suelo para las plantaciones de Palma de aceite en Sumatra, Indonesia. (Fuente: Syahrinudin 2005, Tabla 5.10)*

| System | | Belowground | | Aboveground biomass | Belowground / total (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Soil | Biomass (Mg ha$^{-1}$) | | |
| *Imperata cylindrica* | | 137.6 | 2.9 | 3.0 | 97.9 |
| Oil palm | 3-year-old | 161.2 | 5.4 | 11.2 | 93.3 |
| | 10-year-old | 482.2 | 10.4 | 38.9 | 92.1 |
| | 20-year-old | 155.0 | 16.6 | 48.6 | 71.7 |
| | 30-year-old | 232.4 | 21.7 | 62.8 | 75.3 |

Para verificar si los estimativos de la biomasa del Oriente de Asia, se pudieran aplicar en latino América, se hizo referencia a otro estudio llevado a cabo en las tierras bajas del Caribe en Costa Rica que cuantifico 25 toneladas de C por hectárea en una plantación de palma de aceite de 7 años de edad sobre un pastizal (Cristóbal y Moya 2005). Este último estimativo promedia bien el AGB estimado de Indonesia para plantaciones de 3 y 10 años (11 y 39 toneladas de C por hectárea, Tabla 17). Por lo tanto, se estimó el ABG promedio en 44 toneladas de C por hectárea (es decir, 93 toneladas de materia seca por hectárea y el BGB en 13,5 Ton de C por hectárea (es decir, RS-R = 0.3), asumiendo un periodo de rotación de 25 años.

**Plantación de caña de azúcar (Cs-Cñ, Cs-Cña)**

El desarrollo de planta simulado (modelo CS) para el AGB de la caña de azúcar en Brasil varia de 28.7 toneladas por hectárea (Mayo: empezando la estación de cosecha) a 9.1 toneladas por hectárea (Noviembre fin de la estación) con un promedio de 17.5 toneladas por hectárea (Macedo 2010)).

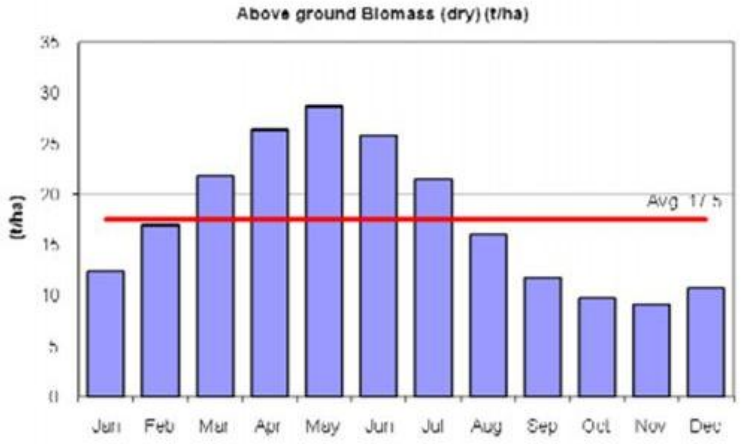



*Figura 34: Desarrollo de planta simulada (modelo CS) para la AGB de la caña de azúcar en Brasil. (Fuente: Macedo 2010)*

Smith (Smith, Lawn et al. 1999 ) midieron las relaciones raíz-tallo para la caña de azúcar sembrada en maceta y encontró que decaían después de llegar a un valor pico de aproximadamente 0.42 kg kg$^{-1}$ a

unos 50 días aproximadamente (Macedo 2010). Por lo tanto, se asume que la AGB promedio es de 17.5 toneladas de materia seca por hectárea, mientras que la relación raíz-tallo promedio se asume como 0.25.

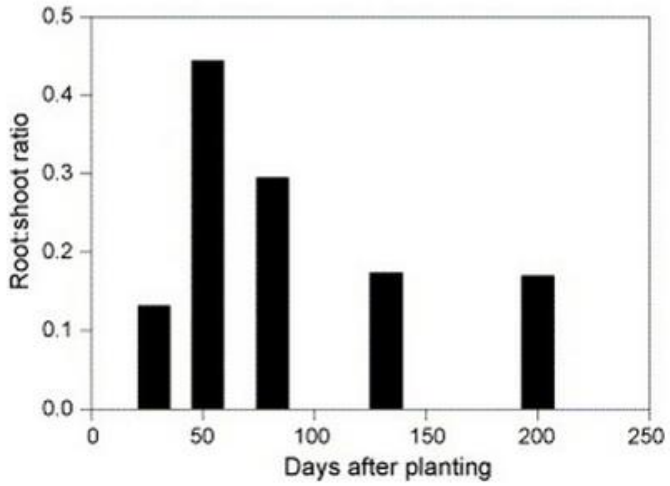



*Figura 35: Relación Raíz-tallo (en base a peso seco) para la caña de azúcar sembrada en maceta (c.v. Q96) (re dibujado de Smith, 1998)" (Macedo 2010).*

#### 5.1.1.1.3 Cambio de las reservas de carbono de la biomasa debido a la trasformación del suelo.

El efecto en los cambios del uso del suelo en AGB y BGB se calcula como la diferencia entre la reserva de carbono de la materia prima del biocombustible (caña de azúcar y palma de aceite) y la reserva de carbono sobre y debajo del suelo del uso del suelo previo (en el 2000).

$$AGB_{t_1} = (AGB + BGB)_{Biocomb} - (AGB + BGB)_{Previo}$$

$AGB_{t_1}$ = *Biomasa sobre el suelo después del cambio del uso de la tierra (tC por hectárea)*

$(AGB + BGB)_{Biocomb}$ = *Biomasa sobre el suelo para la materia prima del biocombustible (tC por hectárea).*

$(AGB + BGB)_{Previo}$ = *Biomasa sobre el suelo para el uso* del suelo *de referencia (tC por ha).*

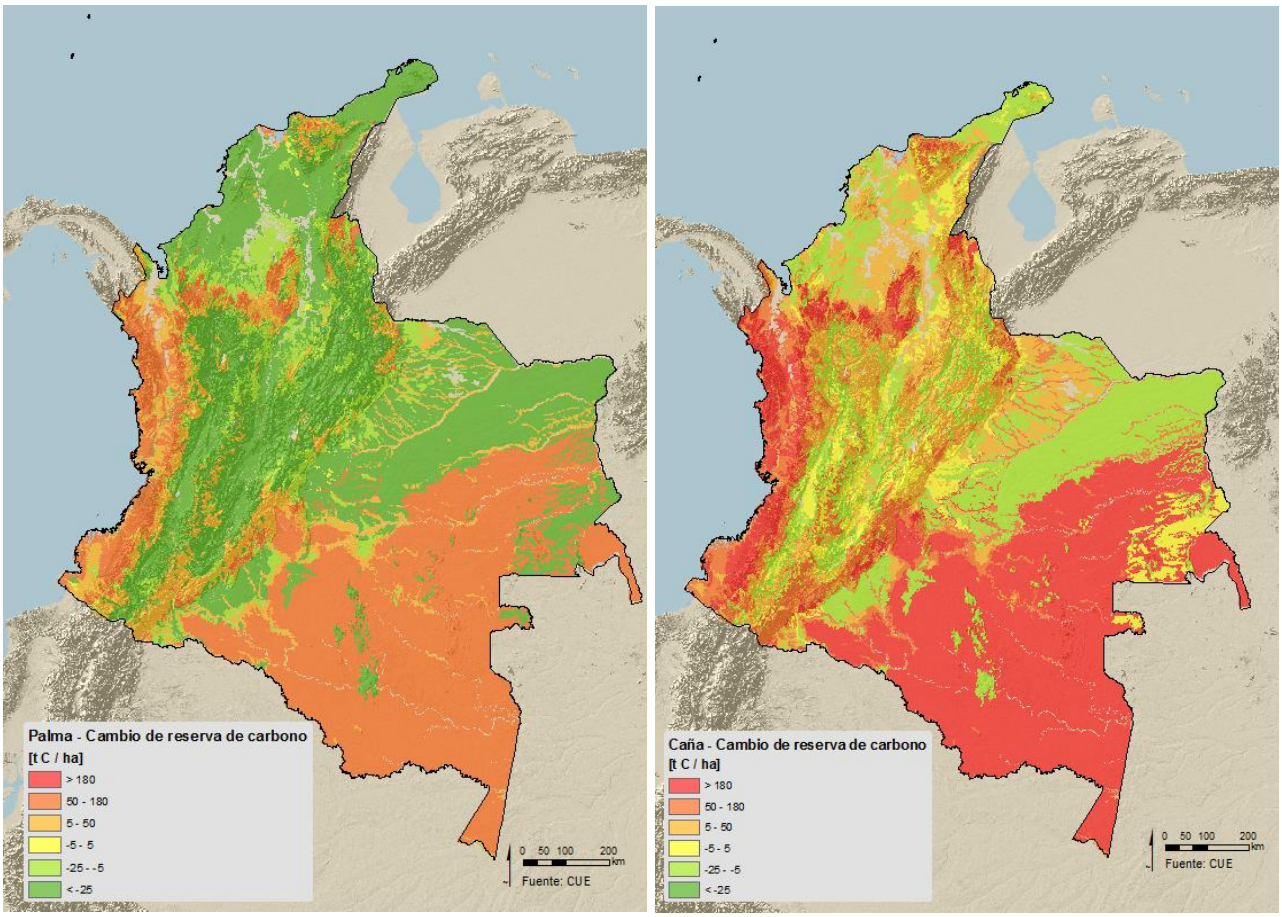



*Figura 36: Cambio potencial en las reservas de biomasa, si el suelo es empleado para cultivos de palma de aceite (derecha) y caña de azúcar (izquierda) en toneladas de carbono por hectárea.*

### 5.1.1.2 Carbono organico del suelo - SOC

A pesar de que ambas formas de carbono, orgánico e inorgánico se encuentran en el suelo, el manejo y uso del suelo, típicamente tienen un gran impacto en las reservas del SOC. Los tipos de suelo mineral, se encuentran bajo condiciones de drenaje moderado a bueno, son predominantes en la mayoría de ecosistemas (excepto en los humedales) y generalmente tienen una cantidad relativamente baja de material orgánico (es decir, 0 -15% de materia orgánica). Los suelos orgánicos (turba y estiércol) tienen un mínimo de 12 a 20% de materia orgánica por unidad de masa y se desarrollan específicamente bajo condiciones de drenaje insuficientes en humedales, donde se acumula cantidades considerables de materia orgánica a través del tiempo. El carbono almacenado en los suelos orgánicos se descompondrá fácilmente cuando las condiciones se vuelvan aeróbicas tras el drenaje del suelo.

Una gran parte de los insumos para SOC provienen de la hojarasca que cae al suelo, por lo tanto la materia orgánica tiende a concentrarse en la parte superior del horizonte de suelo, con casi la mitad del SOC en los primeros 30 cms de la capa superior. El carbono orgánico contenido en este perfil es

generalmente el que presenta mayor descomposición química, erosión física y el que está más directamente expuesto a las perturbaciones naturales y antropogénicas.

La capa superior (0-30cm) incluye las profundidades que están más directamente relacionadas con la interacción de la atmosfera y que son más sensibles a cambios ambientales y del uso del suelo.

La condición de referencia para el SOC es bajo la categoría del uso del suelo nativo (es decir, tierras no degradada, suelos bajo la vegetación nativa sin mejorar) que se utiliza para evaluar el efecto relativo del cambio de uso del suelo y la cantidad de reserva de SOC (p.e. diferencia relativa en el almacenamiento de C entre la condición de referencia y otro uso del suelo como tierras de cultivo). Las derivaciones de las reservas de SOC de referencia fueron realizadas al asociar la clasificación del suelo de la FAO y las clases de suelo por defecto del IPCC, por medio de reglas de pedotranferencia, como se describe en Batjes (Batjes 2010).

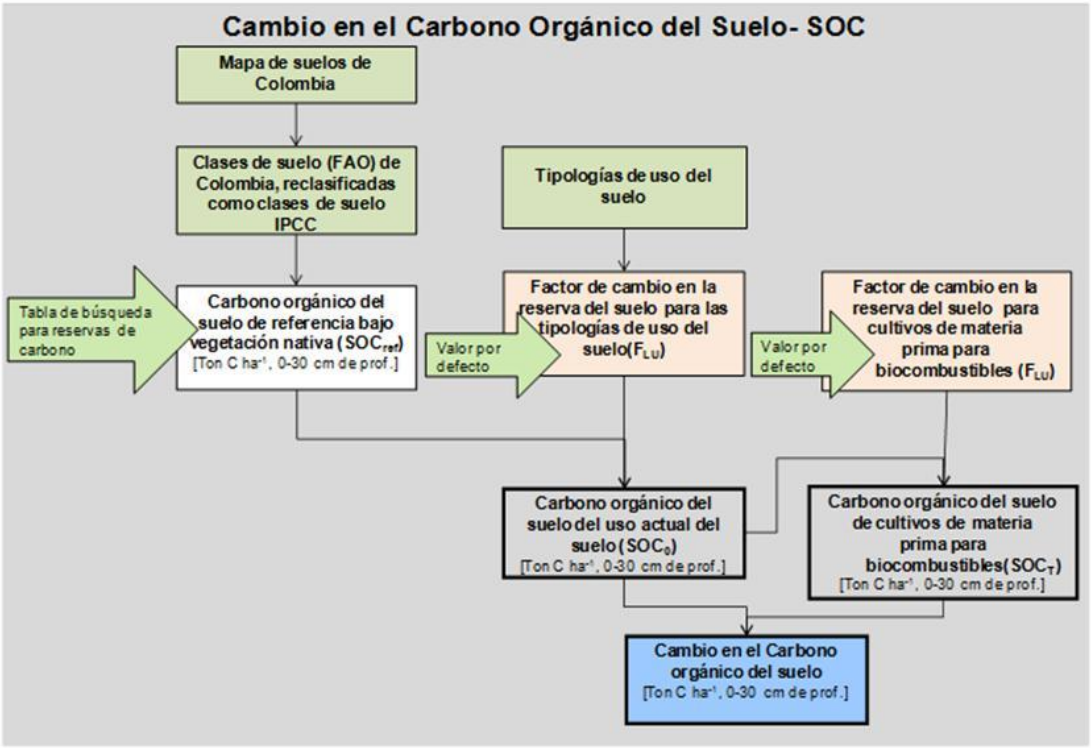



*Figura 37: Evaluación del cambio del carbono orgánico del suelo (Fuente: CUE)*

Para la base de datos geológica de Colombia, se usó como fuente primaria un conjunto de propiedades unificadas para el suelo desarrollado para América Latina, utilizando una base de datos de suelos y terrenos a escala 1:5.000.000 (SOTERLAC, versión 2.0) y los perfiles de suelo auxiliares contenidos en la base de datos WISE. Se describieron y caracterizaron los suelos principales, utilizando 1660 encuestas de perfiles de suelos, seleccionados por expertos en suelo a nivel nacional como representativas para

estas unidades. Las reglas de pedotransferencia usadas (Batjes 2010), reportan a las unidades de suelo del SOTERLAC la proporción de clases de suelo por defecto del IPCC, para las cuales, se reportaron las reservas promedio de carbono en la capa superficial del suelo, para varias zonas vegetales. (Tabla 2.3 IPCC 2006).

El tamaño de la reserva de SOC es influenciado por actividades de cambio en el uso del suelo, tal como la conversión de pastizales y bosques en tierras de cultivo, en donde puede perderse entre el 20-40% del SOC original en suelos minerales. Con respecto al uso del suelo, una variedad de prácticas de gestión también pueden tener un impacto significativo en el almacenamiento de SOC, particularmente en los cultivos y pastizales. El cambio del uso del suelo y las actividades de manejo pueden influenciar el SOC, al cambiar las tasas de erosión de un sitio y una pérdida subsecuente de C; una parte del C erosionado retorna a la atmosfera como CO2, mientras el resto es depositado en otra ubicación.

Así, con el fin de calcular la reserva de SOC actual del suelo colombiano ($SOC_0$), la reserva de carbono de referencia ($SOC_{ref}$) se multiplica por los factores de cambio en la reserva del suelo de acuerdo a las directrices del IPCC (IPCC (2006)). La misma aproximación se empleó para calcular la reserva de carbono del suelo si el suelo es usado para cultivos de materia prima para biocombustibles ($SOC_T$).

#### 5.1.1.2.1 Carbono orgánico del suelo de referencia

La estimación del $SOC_{ref}$ se clasifica en toneladas de carbono por hectárea y se presenta en la Figura 38 como función de la proporción de los tipos de suelo del IPCC y el mapa de zonas vegetales de Colombia (Ver Figura 30).

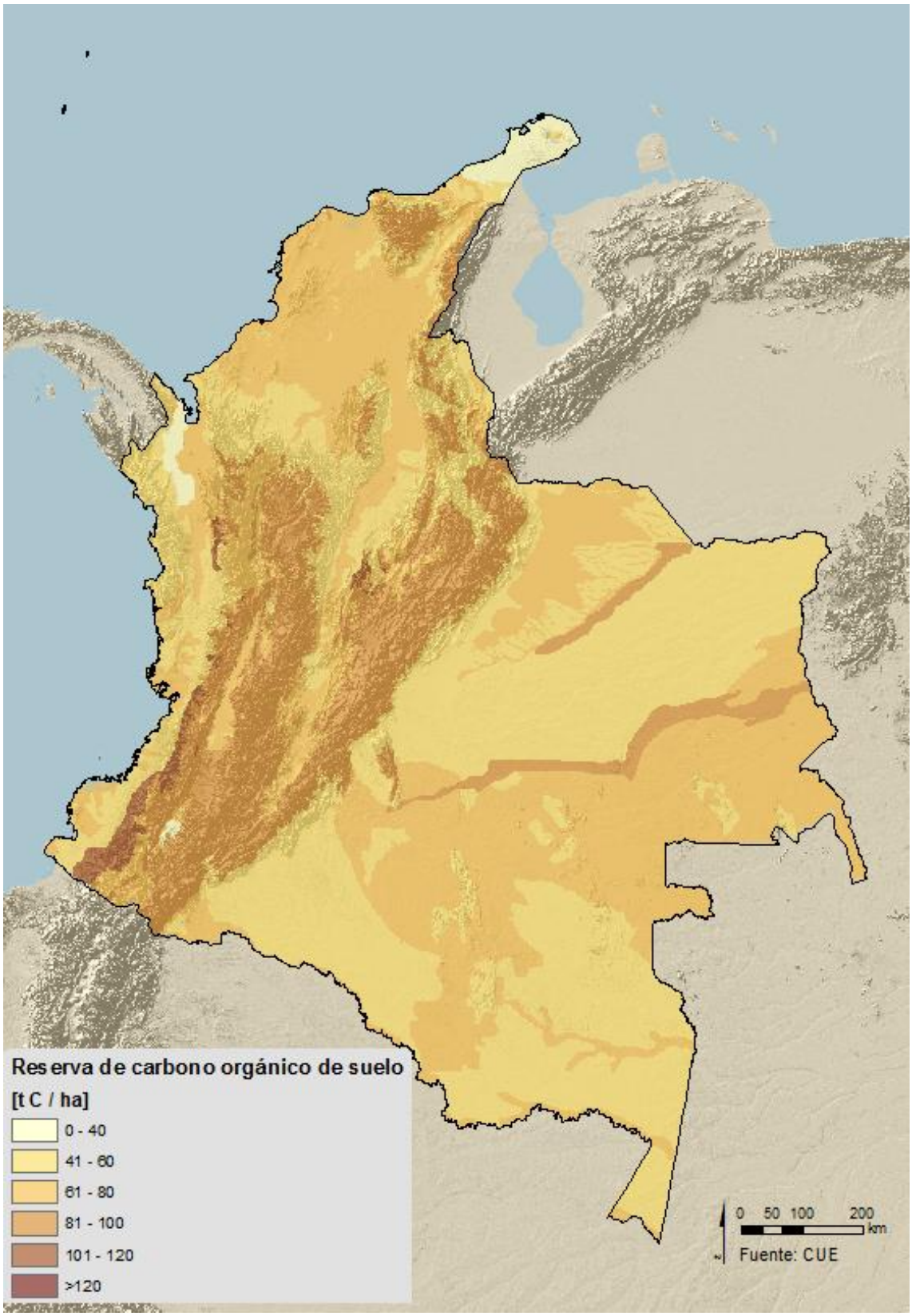



*Figura 38: Mapa de reserva de carbono de un sistema natural de referencia. (Fuente: CUE)*

El contenido de SOC en Colombia varía entre 0 y 130 ton por hectárea aproximadamente, para los primeros 30 cm de suelo. Una pequeña franja de suelos orgánicos se encuentra en áreas de humeda-

les relativamente pequeñas al Norte de Colombia, la cual se clasificó como no aplicable para el cambio de uso del suelo propuesto para este estudio.

#### 5.1.1.2.2 Carbono orgánico del suelo del uso del suelo actual

El SOC depende principalmente en las características naturales del suelo, las características de cultivo y la gestión del cultivo.

En primer lugar, se debe determinar el SOC para el año 2000 ($SOC_0$). Para los ecosistemas naturales el $SOC_0$ es igual que el SOC de referencia ($SOC_{Ref}$), pero para el suelo de cultivo el $SOC_{Ref}$ cambia debido al manejo de la cosecha. El $SOC_0$ para las categorías existentes del uso del suelo se estima multiplicando las reservas $SOC_{Ref}$ por los factores relativos de cambio en las reservas de carbón del suelo. Los cuales están ampliamente definidos e incluyen: 1) un factor de uso del suelo (FLU) que refleja los cambio de las reservas de carbono asociadas con el tipo de uso del suelo, 2) un factor de manejo o gestión, (FMG) representando las practicas especificas principales para un sector específico de uso del suelo (es decir, diferentes prácticas de labranza en los cultivos) y 3) un factor de ingreso (IF) representando los diferentes niveles de ingreso de C en el suelo.

$$SOC_0 = SOC_{REF_{c,s,i}} * F_{LU_{c,s,i}} * F_{MG_{s,s,i}} * F_{I_{c,s,i}}$$

$SOC_0$ = reserva de carbono orgánico en el último año del periodo de tiempo, ton C hectárea$^{-1}$.

$SOC_{REF_{c,s,i}}$ = reserva de carbono orgánico del suelo de referencia, tonelada C hectárea$^{-1}$.

$F_{LU_{c,s,i}}$ = factor de cambio en la reserva debido a sistemas de uso del suelo o subsistemas para un uso del suelo particular, adimensional

$F_{MG_{s,s,i}}$ =factor de cambio en la reserva para el régimen de gestión, adimensional.

$F_{I_{c,s,i}}$ = factor de cambio en la reserva para ingreso de materia orgánica, adimensional.

*c* =representa las zonas climáticas, *s* los tipos de suelo, e *i* el conjunto de sistemas de gestión que están presentes.

Los factores de cambio relativo en la reserva (FLU, FMG y FI) van de 0 a 1 y los valores de cada tipo de uso del suelo son dados en el 9.2 Los valores $SOC_0$. (Ver Figura 39) se calculan con base en los factores de cambio relativo en las reservas y en el valor de $SOC_{ref,}$ (ver Figura 39).

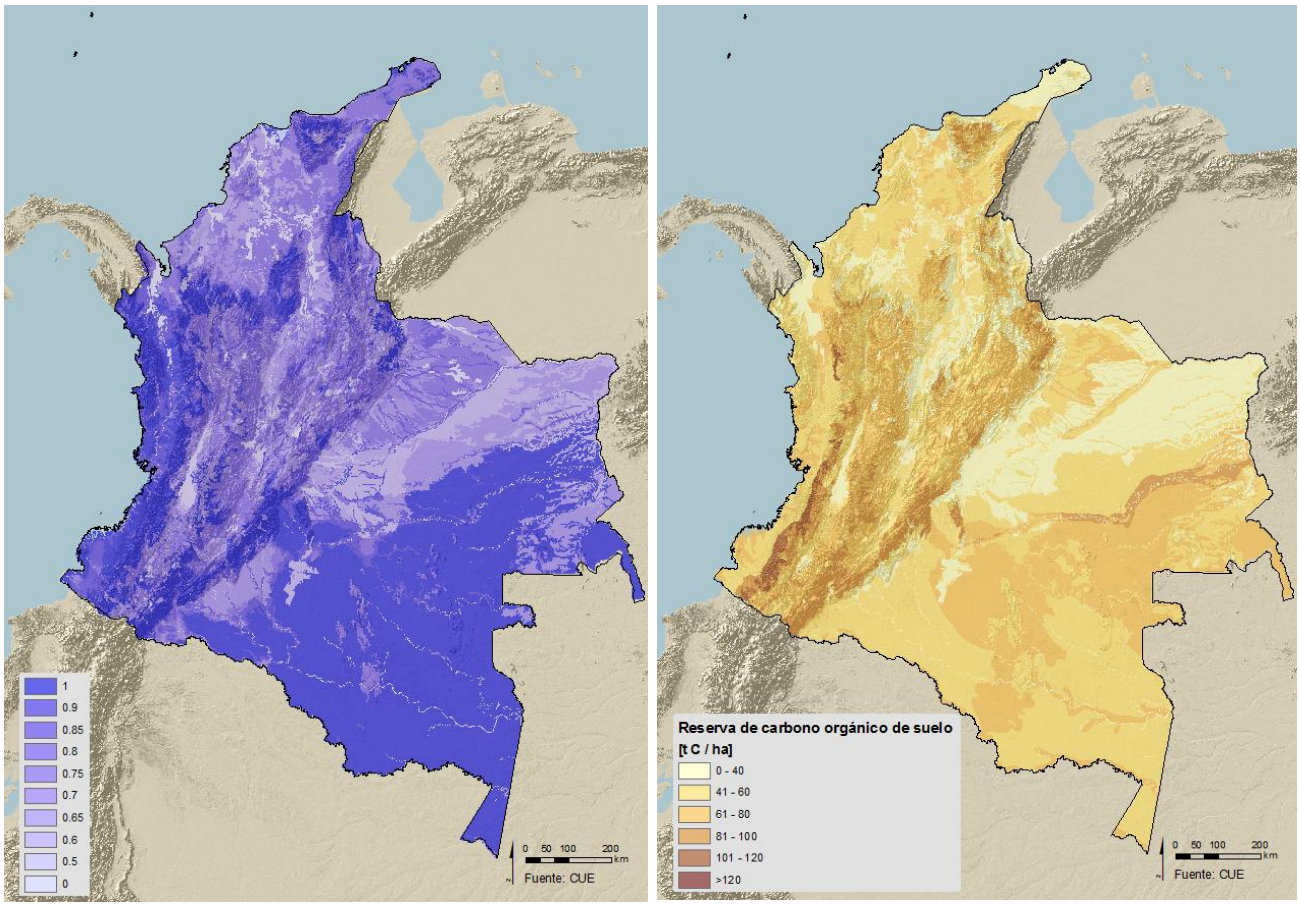



*Figura 39: Factores de cambio relativo de reservas (izquierda) y el $SOC_0$ (derecha) para Colombia. (Fuente: CUE).*

La diferencia entre el mapa de $SOC_{ref}$ y $SOC_0$ es solo para las áreas que están siendo actualmente cultivadas (áreas donde el factor de cambio relativo de reservas no es igual a 1, ver Figura 39)

### 5.1.1.2.3 Reserva de carbono orgánico del suelo de los cultivos para biocombustibles

Con el fin de calcular las emisiones relacionadas con el cambio SOC, se modela la influencia en el SOC de cultivar materias primas para biocombustibles. Por lo tanto, se asume que el cambio de un área natural o praderas a cultivo de biocombustible resulta en una reducción de SOC. Esta pérdida se calcula basada en el SOC antes del cambio de uso del suelo ($SOC_o$ que es el mismo que el $SOC_{ref}$) multiplicado por los factores de cambio relativos en las reservas para la caña de azúcar y la palma de aceite.

Los factores de cambio relativos de las reservas de cosechas cultivadas a largo plazo en climas húmedos (es decir, Caña de azúcar) es aproximadamente igual a 0.5 (IPCC 2006).

Para los cultivos perennes, el factor de cambio relativo en la reserva es igual a 1 de acuerdo con las directrices del IPCC. El factor igual a 1 se basa en el supuesto que la gestión del cultivo no conlleva a la erosión del suelo, al cambiar el uso del suelo de vegetación nativa. Sin embargo, esto no es usualmente el caso para la mayoría de las plantaciones de árboles. En realidad las observaciones de 100 diferen-

tes puntos de estudio muestran una reducción de hasta un 30% en el promedio de contenido de carbono en el suelo cuando los bosques son convertidos a plantaciones de cultivos (Germer y Sauerborm 2009). Por lo tanto un factor 0.8 más realista, es utilizado en este estudio en vez de los valores genéricos propuestos por las directrices del IPCC.

Si tierra de cultivo se convierte a de caña de azúcar y palma de aceite un factor de cultivo 1 es asumido, conllevando a cero cambios en el SOC.

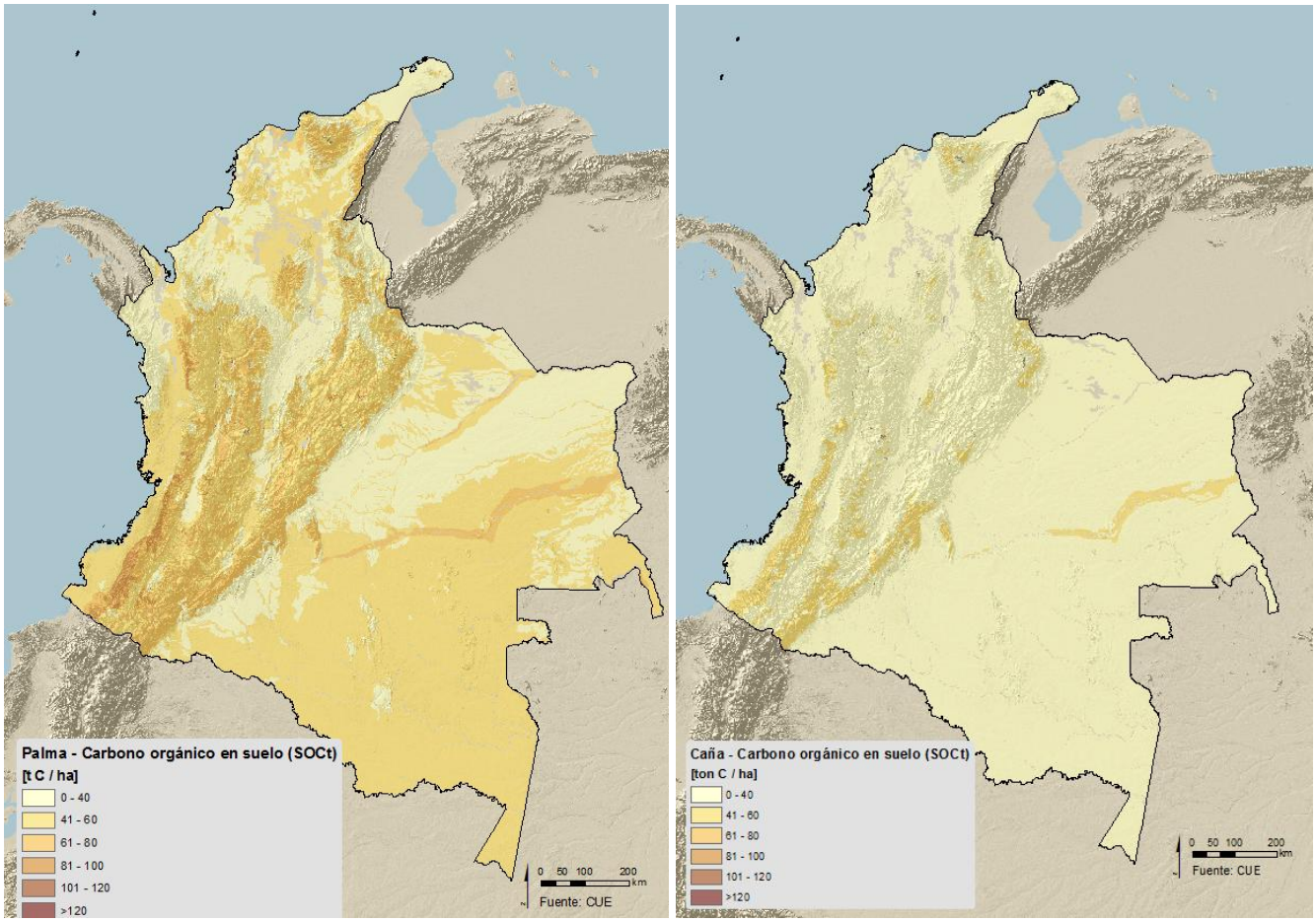



*Figura 40: El $SCO_t$ después de la transformación del suelo a palma de aceite (izquierda) y caña de azúcar (derecha).*

### 5.1.1.2.4 Cambio en la reserva de carbono orgánico del suelo

Las emisiones de GEI relacionadas con el cambio de SOC debido a la introducción de los cultivos de materia prima de biocombustibles, son calculadas como la diferencia del SOC de los usos previos de la tierra ($SOC_{0,i}$) y después de 20 años de cultivos de biocombustibles ($SOC_t$).

$$\Delta C_{soil} = \sum_i \frac{[(SOC_{0,i} - SOC_t)]}{T}$$

$\Delta C_{Soil}$ = cambio anual en las reservas de carbono en suelos minerales y orgánicos, en toneladas de C hectáreas$^{-1}$)

$SOC_t$ = reserva de carbono orgánico en el suelo al comienzo del periodo de tiempo del inventario, en toneladas de C hectárea$^{-1}$.

$SOC_0$ = reserva de carbono orgánico en el suelo en el último año del periodo, en tonelada C hectárea$^{-1}$.

$i$ = diferentes tipos de suelo $i$.

$T$ = Dependencia de tiempo de los factores de cambio en la reserva, el cual es el periodo de tiempo por defecto para la transición entre el equilibrio de los valores de SOC.

En la Figura 41 se ilustra el cambio de SOC para palma de aceite y en la Figura 42 el cambio de SOC para caña de azúcar.

Dependiendo del tipo del suelo, si se establecen las plantaciones de caña de azúcar, hasta 55 toneladas de carbono son emitidas. Estos suelos contienen un alto carbono orgánico, generalmente situados cerca de los ríos y cordilleras. El cultivo de palma de aceite tiene un efecto menor en el cambio SOC, y por lo tanto la cantidad máxima de carbono emitido es de 22 toneladas por hectárea.

*Figura 41: Cambio en el SOC de convertir el uso del suelo de referencia a cultivos de palma de aceite (en ton C por hectárea).*

*Figura 42: Cambio en el SOC de convertir el uso del suelo de referencia a cultivos de caña de azúcar de (en ton C por hectárea).*

### 5.1.1.3 Cambio en la reserva total de carbono debido al cambio en el uso del suelo (LUC)

Las emisiones totales de carbono debido al uso del suelo, se calculan sumando la AGB, BGB y el SOC. Los valores para la caña de azúcar y la palma de aceite se presentan en la Figura 43. Dado a que las plantaciones de palma de aceite tienen una reserva de carbono relativamente alta, solo la conversión de áreas que anteriormente eran altas en carbono, (típicamente bosques naturales) genera emisiones de carbono (áreas rojas). Las áreas verdes indican áreas en donde la reserva de carbono se incrementaría si la palma de cera se cultiva. Esto es típicamente el caso para las tierras orientales no boscosas, la zona norte y como también la tierra que ya fue utilizada en los valles andinos.

Debido a que el promedio de la reserva de carbono para la caña de azúcar es relativamente bajo, solo unas pocas áreas en los valles andinos presentan un incremento en la reserva de carbono.

Generalmente no solo el carbono contenido en la biomasa es dominante. El tipo del suelo también determina las emisiones totales de carbono debido al cambio en el uso del suelo. Este es el caso para suelos altamente orgánicos que almacenan grandes cantidades de carbono.

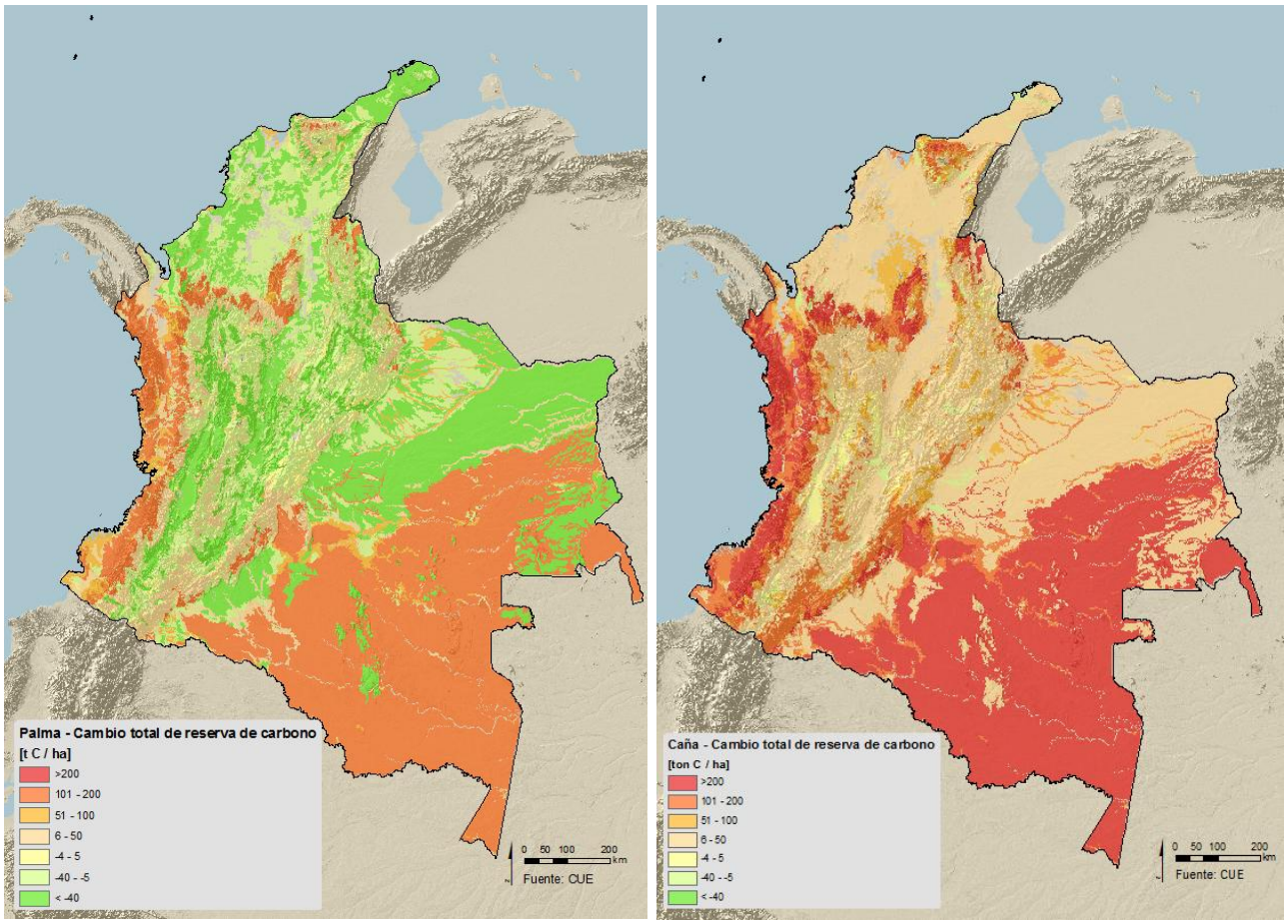



*Figura 43: Cambio en la reserva de carbono debido al cambio del uso del suelo actual por palma de aceite (Izquierda) y Caña de azúcar (derecha) en toneladas de carbono por hectárea. (Fuente: CUE).*

Sin embargo, no toda la tierra es apta para el cultivo. Con el fin de tener en cuenta la aptitud biofísica del suelo para cultivar materia prima para biocombustible, se calcula la cantidad de emisiones GEI por kg de biomasa cosechada (caña de azucar y RFF).

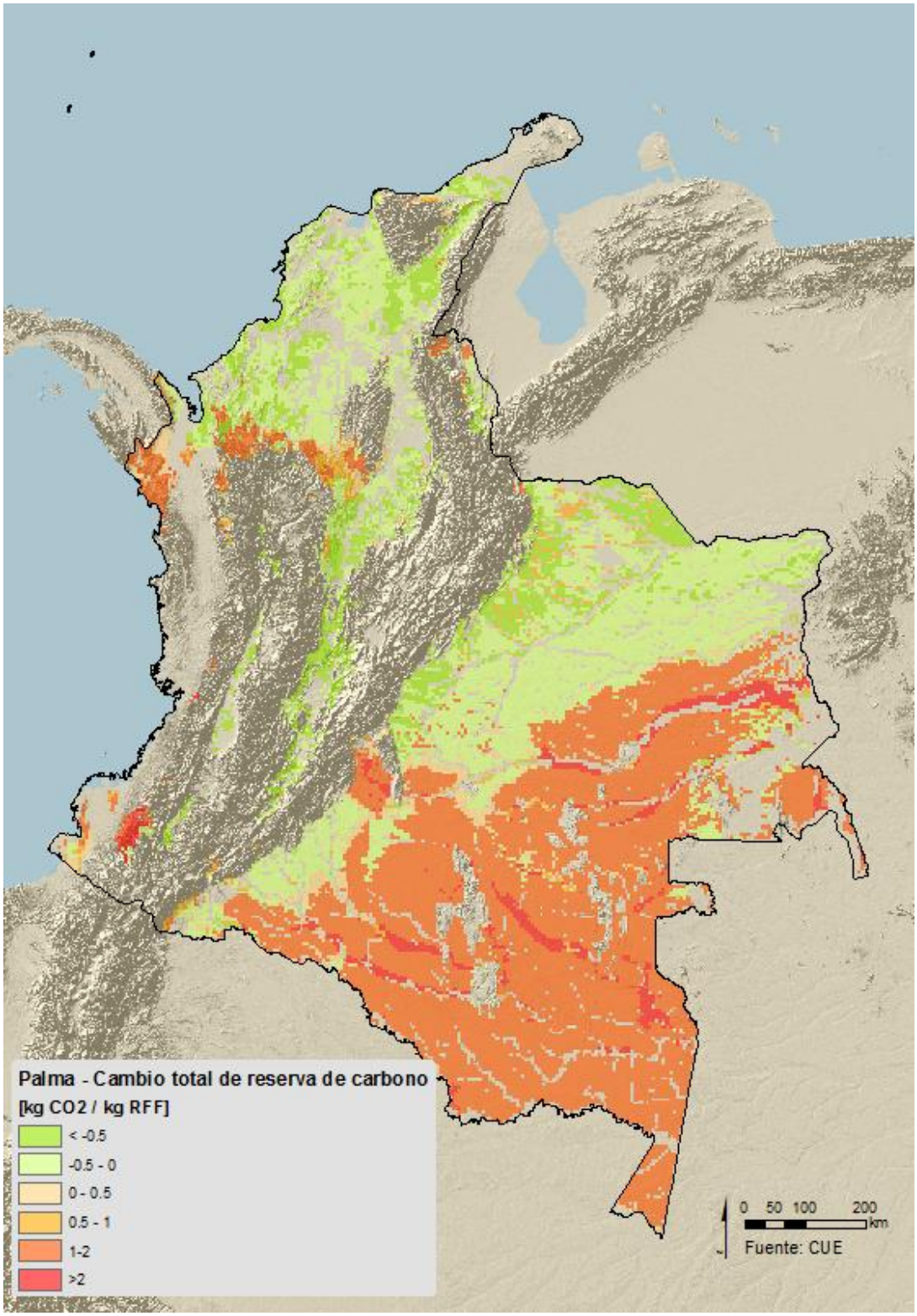



*Figura 44: Cambio en la reserva de carbono debido al cambio de uso del suelo uso actual a palma de aceite en kg CO2 por kg RFF cosechado.*

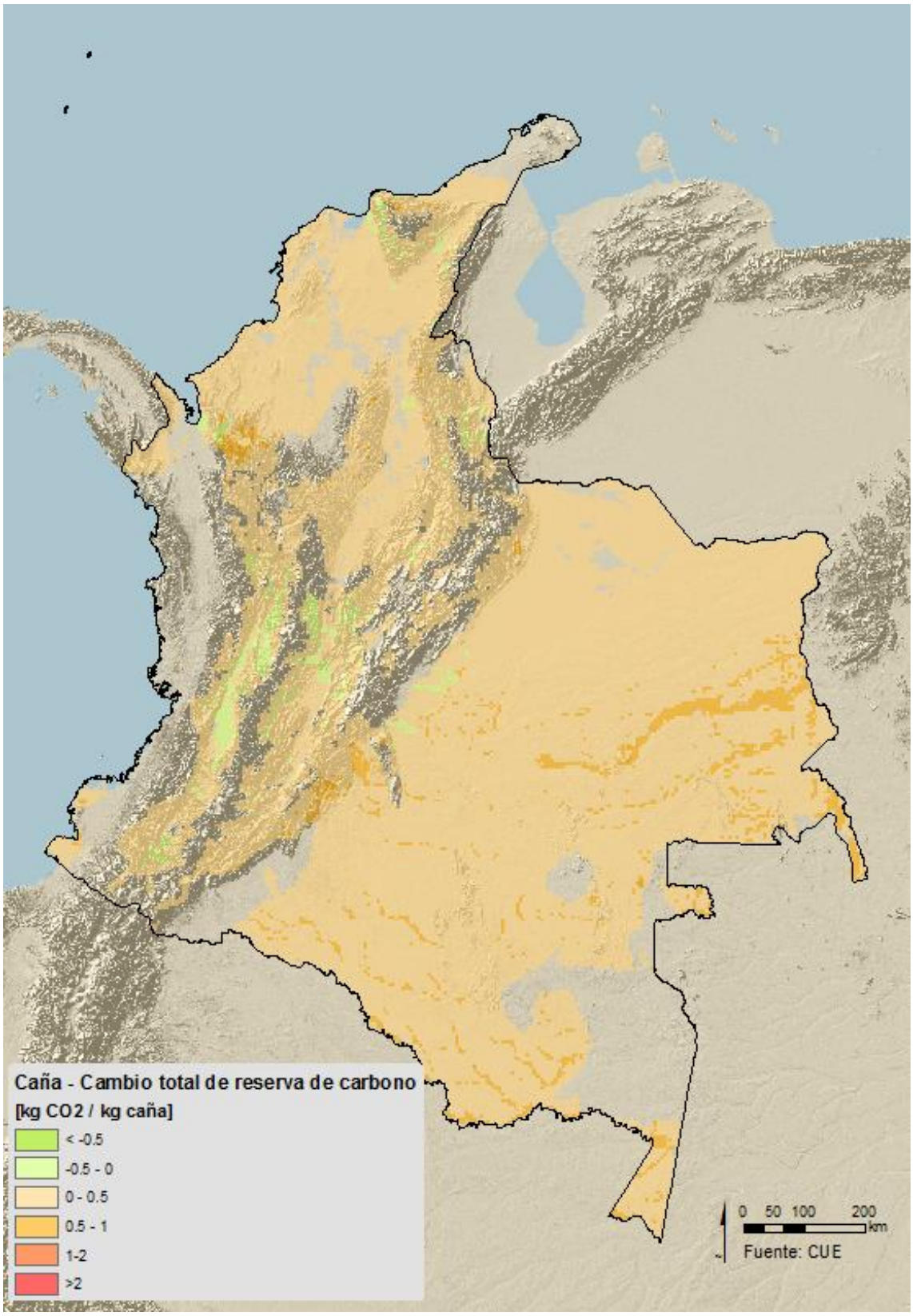



*Figura 45: Cambio en la reserva de carbono debido a la trasformación del uso del suelo actual a cultivos de caña de azúcar en kg $CO_2$ por kilogramo de caña de azúcar cosechada.*

### 5.1.2 Enlazando las emisiones de GEI de ubicaciones especificas a los resultados por defecto de ACV

En el paso siguiente, se enlazan las emisiones de carbono regionalizadas por cambio de uso del suelo son enlazadas con los resultados de ACV, para calcular el beneficio neto o el impacto de utilizar biocombustibles en vez de petróleo fósil. Por lo tanto, se sumaron los valores por defecto (en Kg $CO_2$ por vehículo km.) para el transporte del cultivo (incl. infraestructura), procesamiento y utilización, y la emisión de GEI del combustible fósil de referencia fue restada. (Ver Ecuación)

$$CO2em = \frac{CO2_{cultivo\ _sin\ \Delta C} \times prod_ref}{prod_loc} + CO2_{\Delta C} + CO2_{prod} + CO2_{transp} + CO2_{uso} - CO2_{fos}$$

| | |
|---|---|
| $CO2em$ | *$CO_2$ Emisiones netas* |
| $CO2_{cultivo\ _sin\ \Delta C}$ | *$CO_2$-Emisiones en la fase de cultivo sin LUC* |
| $CO2_{\Delta C}$ | *$CO_2$-Emisiones del cambio de reservas de carbono (Capa SIG)* |
| $CO2_{prod}$ | *$CO_2$-Emisiones en la fase de producción (valor fijado)* |
| $CO2_{transp}$ | *$CO_2$-Emisiones en la fase de transporte (incl. Infraestructura) (valores fijados)* |
| $CO2_{uso}$ | *$CO_2$-Emisiones en la fase de uso (valores fijados)* |
| $CO2_{fos}$ | *$CO_2$-Emisiones de la referencia fósil (valores fijados)* |
| $prod_ref$ | *Productividad de referencia Cálculo ACV (valor fijado)* |
| $prod_loc$ | *Productividad local del cultivo (Valor SIG)* |

**Cambio en el uso del suelo:** Se usaron los mapas presentados en la Figura 44 para la caña de azúcar y en la Figura 45 para la palma de aceite. Los valores (Kg $CO_2$ por de biomasa cosechada) son multiplicados por el factor de conversión listado en la Tabla 18 con el fin de calcular la emisión de gases invernadero para los kilómetros conducidos. El factor de conversión como tal, se basa en los resultados del ACV (tomando en cuenta las eficiencias y las distribuciones).

**Cultivo:** Fuera del cambio de uso del suelo, el impacto en el cultivo depende ampliamente de características climáticas y del suelo, material genético y el manejo del cultivo de biocombustibles. El impacto actual de cultivar biocombustibles se basa en los valores definidos en el estudio del ACV. Dentro de este estudio el impacto del cultivo, es as su vez regionalizado, con base en el rendimiento del cultivo del sitio especifico (los valores de rendimiento del ACV de la Tabla 18 y los valores de rendimientos regionalizados están listados en el capítulo 3.5).

**Procesamiento:** Para el procesamiento, se usaron valores definidos en el ACV, teniendo en cuenta que el procesamiento de biocombustibles es relativamente sencillo y son pocas las diferencias en las tecnologías.

**Transporte:** para el transporte de la biomasa y el biocombustibles se estimaron los tipos de vehículos y distancias de transporte predefinidas. Estas estimaciones están basadas en los datos de campo le-

vantados para el estudio de ACV. Sin embargo, en el capítulo 5.1.4 se muestra la sensibilidad de los procesos de transporte.

**Uso y combustible fósil de referencia:** Para el uso del biocombustible y el combustible fósil de referencia (substitución) se emplean los valores definidos por el ACV.

*Tabla 18: Valores por defecto para el cálculo SIG (Fuente: CUE)*

| Fase del ciclo de vida | Unidad | Palma de aceite | Caña de azúcar |
|---|---|---|---|
| Infraestructura | Kg CO2eq / vehiculo.km | 0.026 | 0.025 |
| Cultivo | Kg CO2eq / vehiculo.km | 0.02 | 0.02 |
| Productividad | ton/ha | 18.78 | 113.53 |
| Factor de conversión | kg biomasa/vehiculo.km | 0.21 | 1.05 |
| Procesamiento | Kg CO2eq / vehiculo.km | 0.06 | 0.01 |
| Transporte | Kg CO2eq / vehiculo.km | 0.001 | 0.006 |
| Uso | Kg CO2eq / vehiculo.km | 0.0017 | 0.0056 |
| **Total** | Kg **CO2eq / vehiculo.km** | **0.11** | **0.06** |
| Sustitución Diesel | Kg CO2eq / vehiculo.km | 0.19 | |
| Sustitución Gasolina | Kg CO2eq / vehiculo.km | | 0.23 |

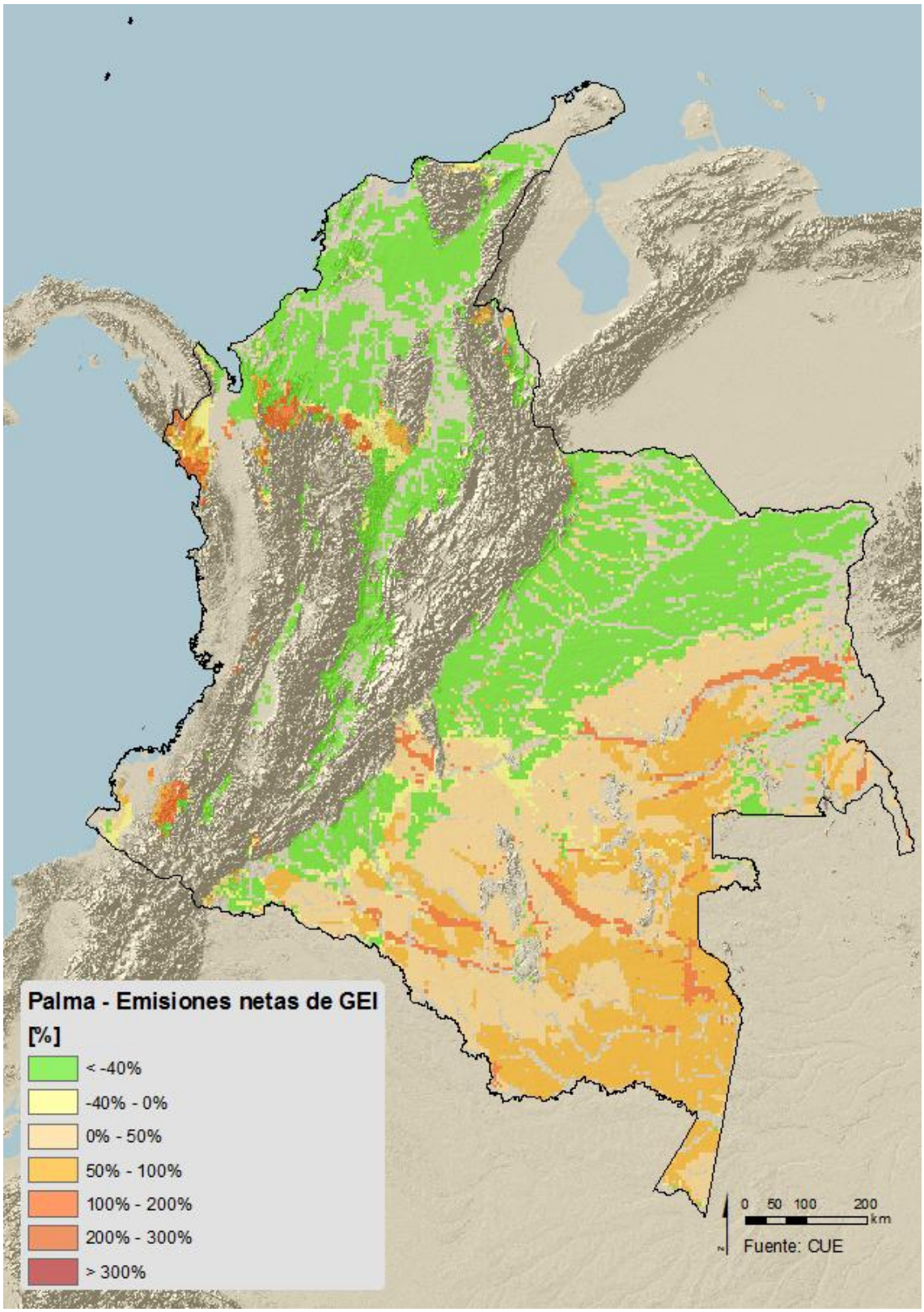



*Figura 46: Emisiones relativas de GEI para etanol de caña de azúcar regionalizada para Colombia. El ahorro (verde) y las emisiones (rojo) de GEI son relativos a las emisiones de GEI.*

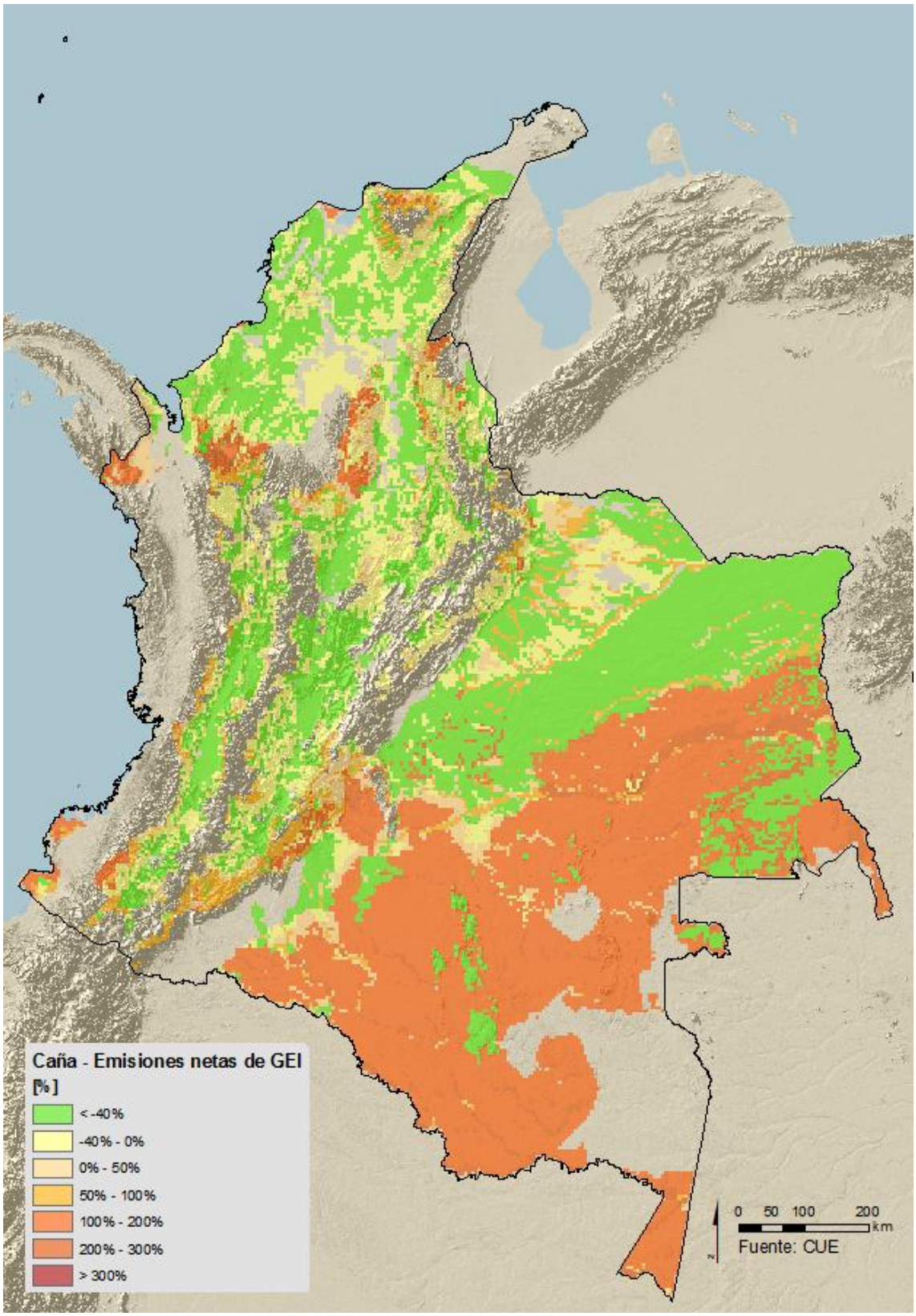



*Figura 47: E Emisiones de GEI relativas al etanol de caña de azúcar regionalizado para Colombia. Los ahorros (verde) y emisiones de GEI (rojo) son relativos a las emisiones de GEI.*

Como se muestra en la Figura 46 y en la Figura 47, solo se logran ahorros de GEI, si las cosechas para biocombustibles son cultivadas en el norte, valles interandinos o en los llanos orientales. Tan pronto las áreas naturales sean convertidas en cultivos, el balance de GEI se vuelve negativo.

### 5.1.3 Deuda de carbono regionalizada para los biocombustibles en Colombia.

El cambio del uso del suelo genera en la mayoría de los casos, emisiones de carbono (ver. Capitulo 5.1.1). La cantidad de CO2 liberada durante los primeros 20 años de este proceso se llama "deuda de carbono" de la conversión del suelo (Fargione, Hill et al. 2008). Con el correr del tiempo, los biocombustibles a partir de suelos convertidos, pueden subsanar esta deuda de carbono, si su producción y combustion tienen unas emisiones de GEI netas menores a las emisiones del ciclo de vida de los combustibles fosiles que se estan reemplazando. A continuacion se calcula la duración de restituir la deuda de carbono, expresada en años.

$$CD = \frac{CO2_{\Delta Cusotierra}}{\left(\left(CO2_{cultivo_\text{sin }_\Delta C} + CO2_{prod} + CO2_{transp} + CO2_{uso}\right) - CO2_{fos}\right) \times \alpha \times productividad}$$

| | |
|---|---|
| $CD$ | *Deuda de carbono [años]* |
| $CO2_{\Delta Cusotierra}$ | *CO2-Emisiones del cambio de reservas de carbono debidas a LUC (capa SIG) [kgCO2/ha]* |
| $CO2_{cultivo_\text{sin }_\Delta C}$ | *CO2-Emisiones en la fase de cultivo sin LUC [kgCO2/v.km]* |
| $CO2_{prod}$ | *CO2-Emisiones en la fase de producción (valor fijado) [kgCO2/v.km]* |
| $CO2_{trasnp}$ | *CO2-Emisiones en la fase de transporte incl. infrastrucutra (valor fijado) [kgCO2/v.km]* |
| $CO2_{uso}$ | *CO2-Emisiones en la fase de uso (valor fijado) [kgCO2/v.km]* |
| $CO2_{fos}$ | *CO2-Emisiones de la referencia fósil (valor fijado) [kgCO2/v.km]* |
| $\alpha$ | *Factor de conversión [v.km/t materia prima]* |
| $productividad$ | |

Como se muestra en la Figura 48, la expansion de la caña de azucar hacia casi todas las areas de colombia, cuasa una deuda de carbono. Especialmente en la region Amazónica, los riveras de los rios y el piedemonte de la cordillera de los Andes se aprecian deudas de carbono mayores, que van entre los 60 y 130 años. Debido a las grandes reservas de carbono de las plantaciones de palma de aceite, la deuda de carbono tiene una tendencia menor que la caña de azucar, que va hasta los 70 años (en la region Amazónica y el norte del piedemonte de la cordillera de los Andes, (Ver. Figura 49).

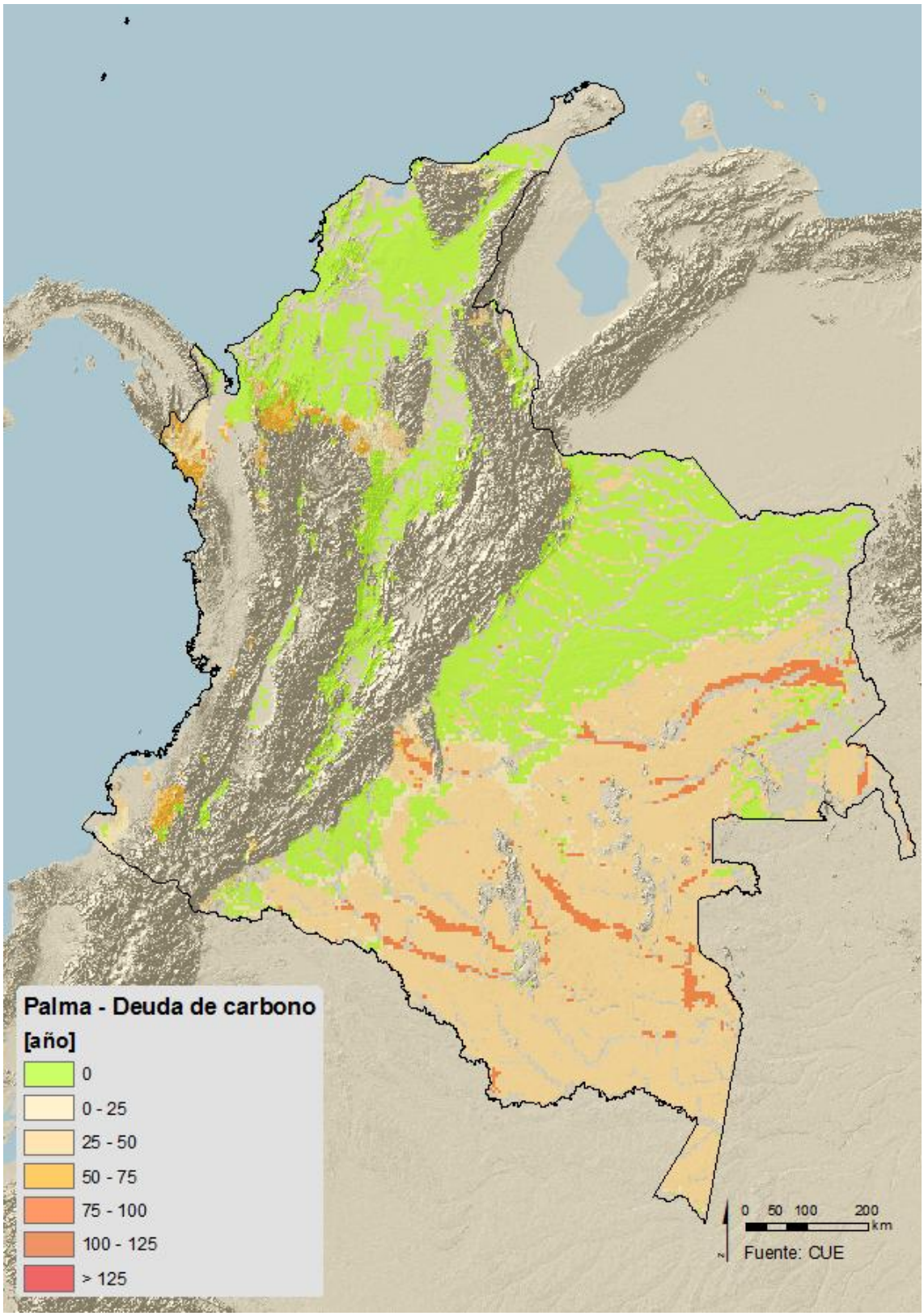



*Figura 48: Deuda de carbono del biodiesel producido de la palma de aceite en Colombia (en años). Fuente CUE.*

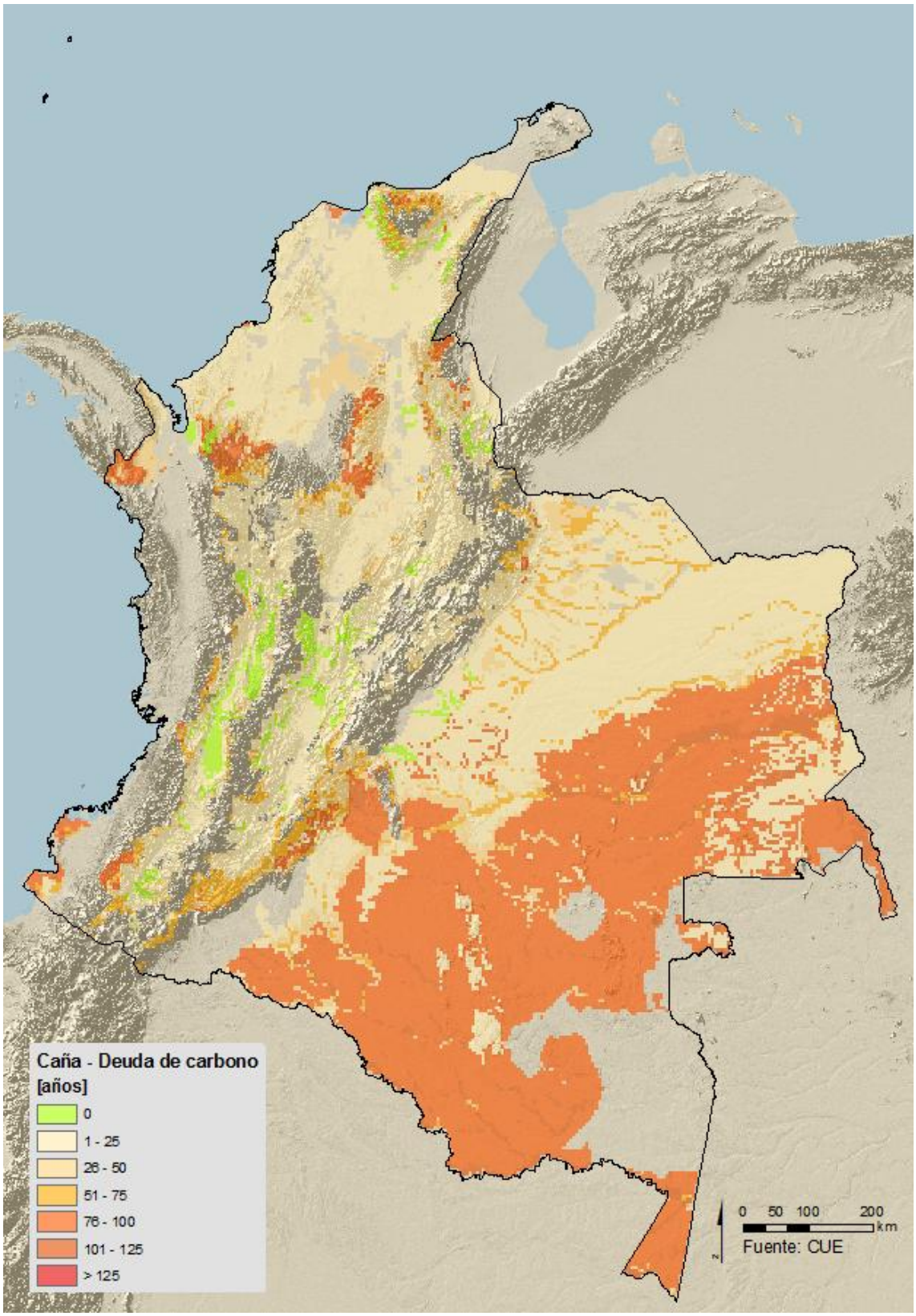



*Figura 49: Deuda de carbono del etanol producido de la caña de azúcar en Colombia (en años). Fuente: CUE.*

### 5.1.4 Sensibilidad para las distancias de transporte

Los cálculos citados anteriormente, fueron realizados con base en las distancias de transporte promedio. Por razones económicas, las distancias recorridas para la materia prima del biocombustible hasta las plantas de procesamiento son de máximo 100 km. Por lo tanto si se monta una nueva plantación, también se debe instalar una planta de procesamiento, si ninguna planta de procesamiento se encuentra a una distancia razonable. Con base en dicha estimación, se definieron las distancias de transporte consideradas en los cálculos citados anteriormente (usando las distancias de transporte reales).

Sin embargo, para mostrar la sensibilidad del transporte, se calcularon las distancias desde el campo a las plantas existentes de biocombustibles y a las estaciones de servicio en Bogotá.

En primera instancia, se mapearon todas las fábricas de azúcar y aceite de palma existentes y planeadas. Posteriormente, se sobrepuso una cuadricula de 5km x 5km sobre el mapa de Colombia y se calcula la distancia aérea para cada celda de la cuadricula hasta la fábrica más cercana. Para poder corregir la distancia aérea a distancia terrestre se asumió un factor de corrección 1.3.

La distancia de transporte de la planta de producción de biocombustibles a la estación de mezcla en Bogotá, se evaluó con base en distancias de transporte reales. Las distancias se calcularon con base en la herramienta de análisis de redes de ArcGis. Como vehículo de transporte se asumió un camión de 32 toneladas, el cual emite 0,185 kg CO2 por tonelada-km (tkm).

La distancia de transporte se multiplica por la cantidad de biocombustible que se requiere para operar un vehículo durante un kilómetro (ton biocombustible / vehículo.kilometro). Los valores son obtenidos del estudio de ACV y se usan las unidades tkm (tonelada.kilometro) por v.km (vehículo.kilometro)

En la Figura 50 se relacionan las emisiones de GEI (kg CO2 eq) con el transporte de materia prima y biocombustible para el etanol de caña de azúcar y metil éster de palma. La cantidad de emisiones de GEI, son calculadas por vehiculo.kilometro (unidad funcional del estudio ACV). Para la caña de azúcar, por ejemplo, el transporte de materia prima por largas distancias está relacionado a grandes emisiones de GEI (más de 0,4 kg CO2 por vehículo .kilometro, conduciendo un Renault Logan en Bogotá), mucho mayor que las emisiones de GEI de usar combustibles fósiles (0,23 kg CO2eq por vehículo .kilometro). Por lo tanto, solo el proceso de transporte – sin las emisiones de GEI debido al cultivo, procesamiento y uso de biocombustibles- genera más emisiones de GEI que los combustibles fósiles, si la distancia de transporte es larga.

Para el metil éster de palma, el efecto del transporte es menos dominante. Esto se debe a una menor cantidad de materia prima que debe ser transportada (0,2 kg RFF por v.km) en comparación con el etanol de caña de azúcar (1.6 kg de caña por v.km).

En términos generales, se puede concluir que las distancias de transporte de materias primas a las plantas de procesamiento son cruciales en los ahorros netos de GEI, especialmente para el etanol de caña de azúcar. Por lo tanto, si se establecen nuevas plantaciones, también se deben establecer plan-

tas de procesamiento que estén al alcance, no solo para optimizar los costos, sino también para reducir el impacto ambiental.

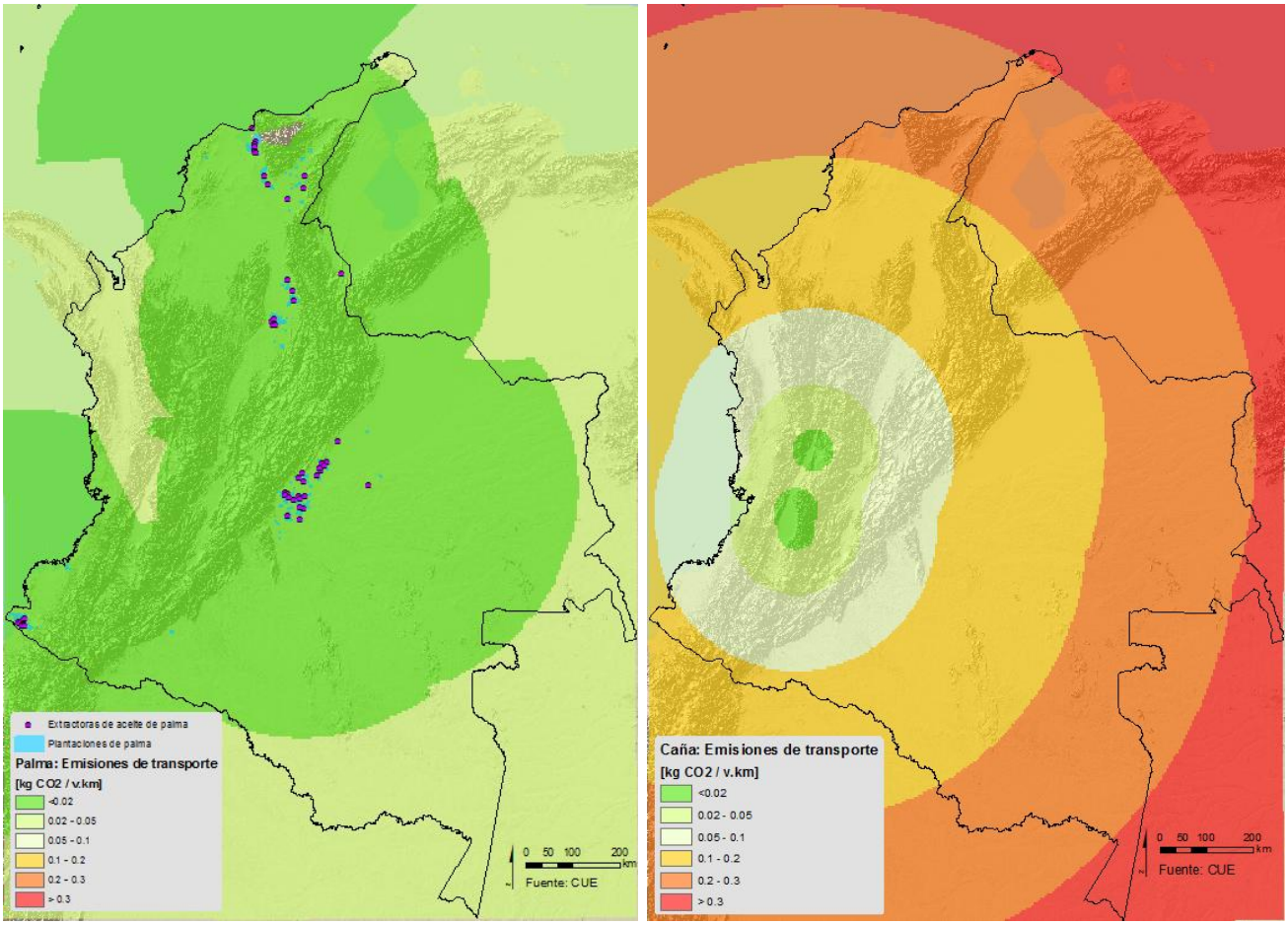



*Figura 50: Kg CO2 emitidos por vehículo-km para la palma de aceite (izquierda) y caña de azúcar (derecha) si solo se pudieran usar las plantas de producción existentes.*

## 5.2 Escasez de agua

Cada año se extraen cerca de 3.8 billones de toneladas de agua fresca para el consumo humano. Cerca del 70 de toda el agua extraída, están relacionadas con el sector de la agricultura. En Colombia también es significativa la sed de este sector (IDEAM 2010) y a pesar de la riqueza hídrica del país, la escasez de agua en ciertas regiones presenta problemas cada vez mayores. La escasez de agua se puede expresar como la relación entre la oferta y la demanda de agua requerida para el desarrollo humano y para las diferentes actividades ecológicas que lo soportan. Esta se expresa como un porcentaje usando el índice de escasez.

El IDEAM realizo un estudio nacional de aguas en el cual se muestran las relaciones entre suministro y demanda de agua en Colombia. El estudio incluye un mapa de Estrés Hídrico en Colombia con una escala de 1: 500,000.

*Tabla 19: Clasificación de Estrés Hídrico adaptada de (Mora, Arcila-Burgos et al. 2009).*

| Grado de Restricción | Valor | Descripción |
|---|---|---|
| Restricción Total | > 40% | Municipios con altos niveles de estrés hídrico. |
| Restricciones Severas | 10 a 40% | Municipios con niveles de estrés hídrico medios a bajos, los cuales pueden tener severas limitaciones para el desarrollo socio-económico. |
| Sin Restricciones | < 10% | Municipios con bajos niveles de estrés hídrico. No se espera escasez de agua disponible que pueda limitar el desarrollo agrícola. |

Como se ilustra en la Figura 51, en su mayoría, las áreas de la costa caribe cerca de Cartagena de Indias, así como, las grandes ciudades de la región Andina como Bogotá presentan un alto porcentaje de estrés hídrico. Esto es causado especialmente por la relativa alta demanda de agua en áreas urbanas.

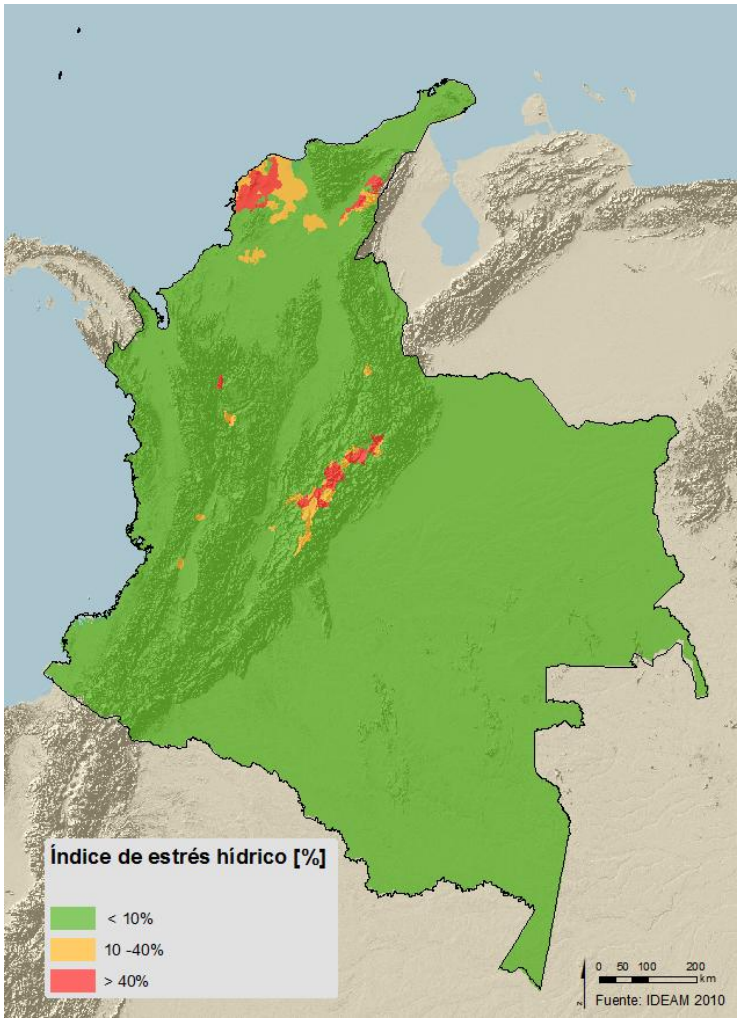



*Figura 51: Índice de estrés hídrico de Colombia (IDEAM 2009b).*

Los resultados son relativamente consistentes con mapa de estrés hídrico, menos detallado, presentado por (Pfister, Hoehler et al. 2009), que indica también la alta escasez de agua cerca de Cartagena de Indias.

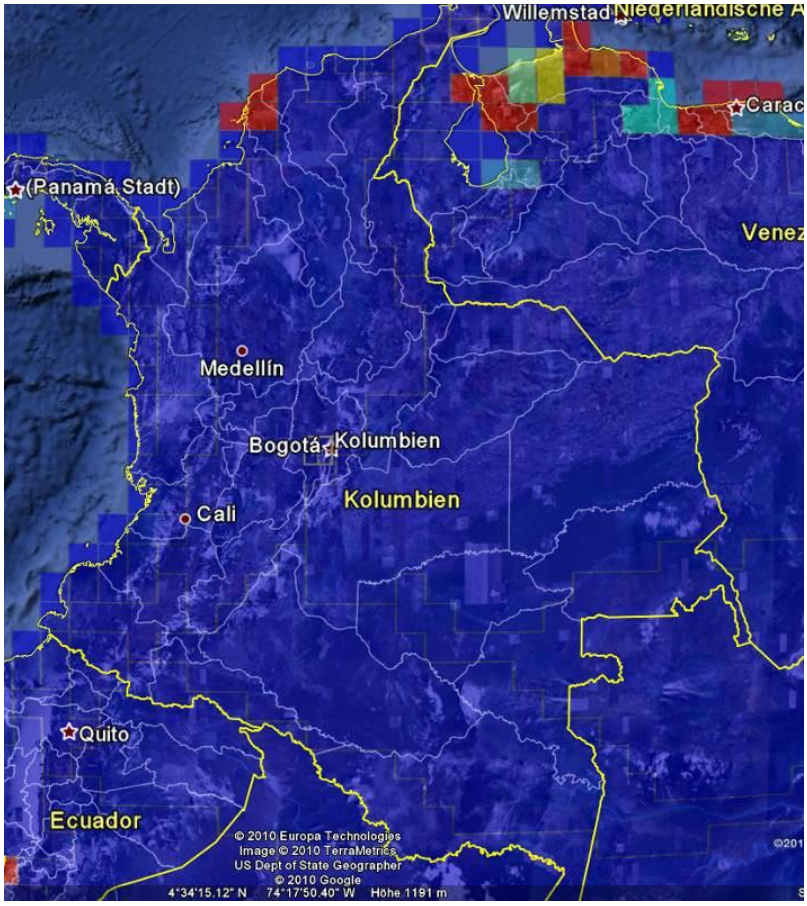



*Figura 52: Índice de estrés hídrico de Pfister et al.2009*

En general el estrés hídrico está influenciado por el tamaño y estilo de vida de la población, variaciones climáticas, contaminación, manejo insostenible, entre otros. Por esto, el estrés hídrico puede ser un fenómeno regional y cambia a través del tiempo. El IDEAM publicó recientemente el estudio nacional de aguas de Colombia, en el que se especifica el estrés hídrico en años secos. El suministro reducido de agua en los años secos aumenta el estrés hídrico. En estos años y especialmente en la región norte del país y las áreas con actividad agrícola –como la región que produce caña de azúcar alrededor de Cali- pueden presentar un estrés hídrico significativo.

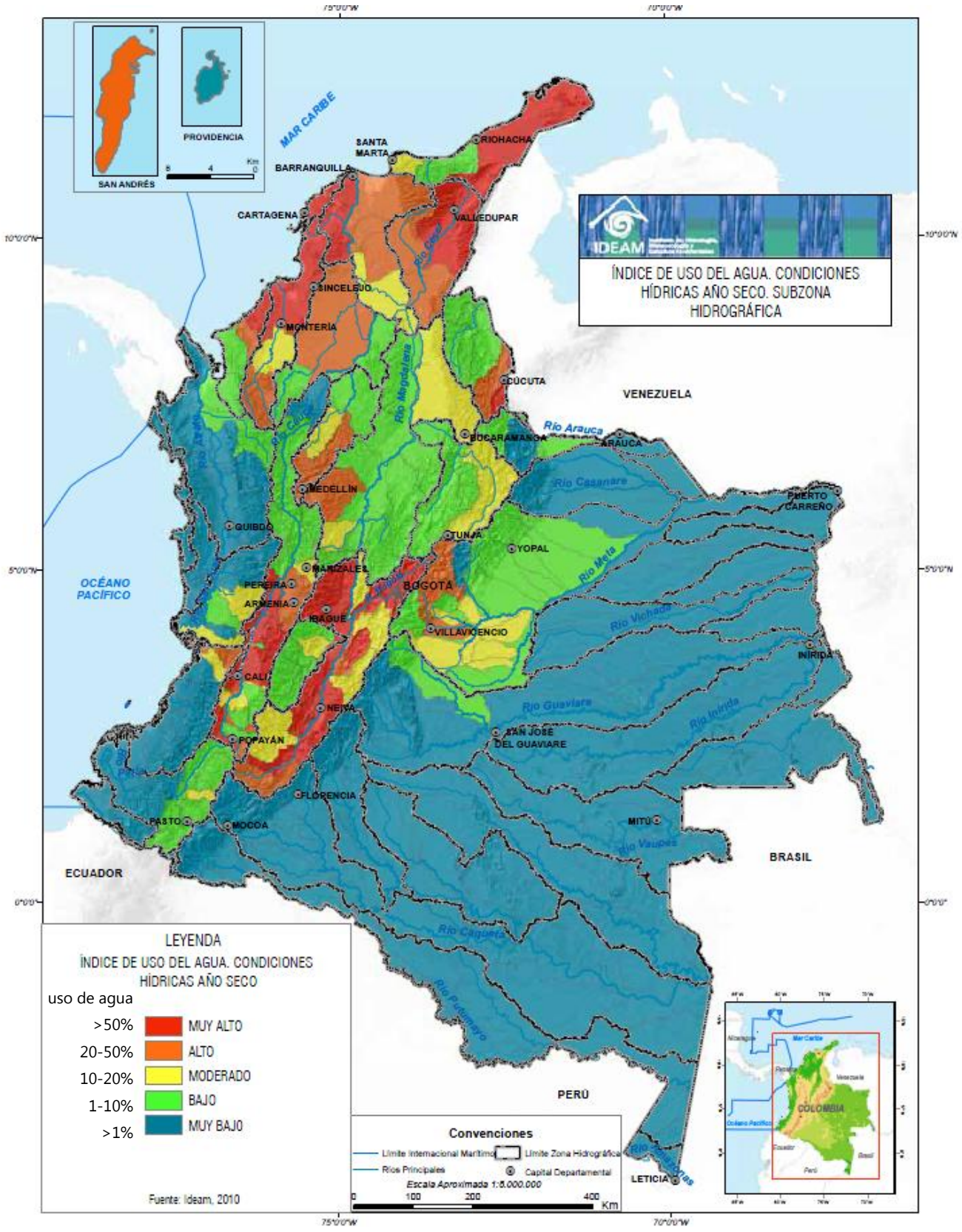



*Figura 53: Índice de uso de Aguas en Colombia en año seco (IDEAM 2010).*

## 5.3 Biodiversidad

Existen diferentes indicadores de biodiversidad para Colombia, como los presentados en el Estudio de Palmas de Mora et al. (2009). Algunos indicadores como el de singularidad de ecosistemas o de fragmentación de hábitats son bastante teóricos y no pueden ser usados directamente para evaluar el impacto de la expansión de cultivos energéticos, ya que el impacto depende completamente del patrón de expansión (lotes dispersos o monocultivos de gran escala)

Por esto decidimos usar el mapa de áreas de conservación prioritaria del SINAP (Corzo 2008). Este mapa es una buena base para discutir los efectos de la expansión de cultivos energéticos, porque integra una variedad de información sobre los ecosistemas y las clases indicando la cantidad de áreas ya perturbadas, las cuales podrían estar relacionadas con el área potencial de expansión para las respectivas regiones.

*Tabla 20: Niveles de restricción para áreas de conservación prioritaria de acuerdo al SINAP (Sistema Nacional de Áreas Protegidas).*

| Nivel de Restricción | Cantidad de áreas no-conservadas | Descripción |
|---|---|---|
| Restricción Total | 0% | Áreas de conservación prioritaria de acuerdo al SINAP |
| Restricciones severas | 0 al 10% | Ecosistemas de Alto Valor con menos de 10% tierra perturbada. |
| Restricciones moderadas | 10 al 30% | De acuerdo con los ecologistas, 30% del área sin conservación, es el máximo para preservar las características naturales únicas del ecosistema. |
| Sin restricciones conocidas | 30 al 100% | Áreas con ecosistemas de Bajo Valor dada la predominancia de perturbaciones |

La Figura 54, muestra la distribución espacial de las áreas de conservación en Colombia. Las áreas de conservación prioritarias están ampliamente distribuidas a través del territorio colombiano. Existen fuertes restricciones sobre las áreas de selva húmeda sobre la costa pacífica, la región central cerca del rio magdalena, en la península de la Guajira y la cuenca del Orinoco.

Especialmente el estatus de área de alta conservación que ha adquirido La Guajira y partes de la cuenca del Orinoco es un tema crítico en la expansión de cultivos energéticos ya que ambas regiones tienen bajas reservas de carbono y serían áreas preferenciales desde la perspectiva de GEI.

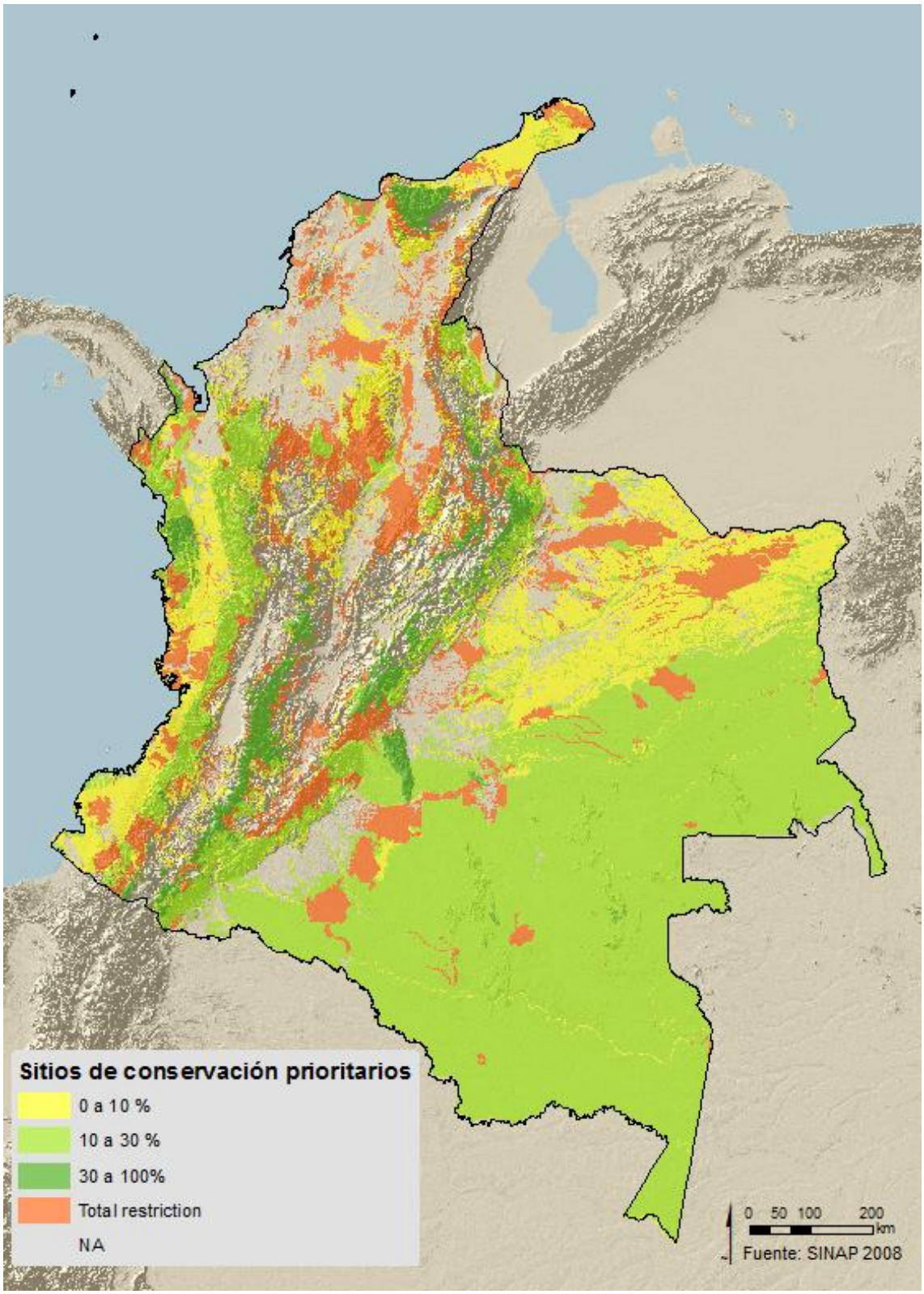



*Figura 54: Áreas de conservación prioritaria de acuerdo a SINAP. (Corzo 2008).*

Además de las áreas prioritarias de conservación definidas por el SINAP, otros factores influencian el impacto en la biodiversidad. La biodiversidad es especialmente alta en bosques naturales y por ello se excluyen también estás áreas. Otra justificación adicional para excluir las áreas de bosques es el hecho

de que los suelos de bosques están protegidos por la ley y las regulaciones ambientales de cualquier intervención no sostenible, incluyendo el establecimiento de cultivos agroindustriales. Adicionalmente, las áreas de suelos deforestados son frágiles y podrían sufrir riesgos de erosión.

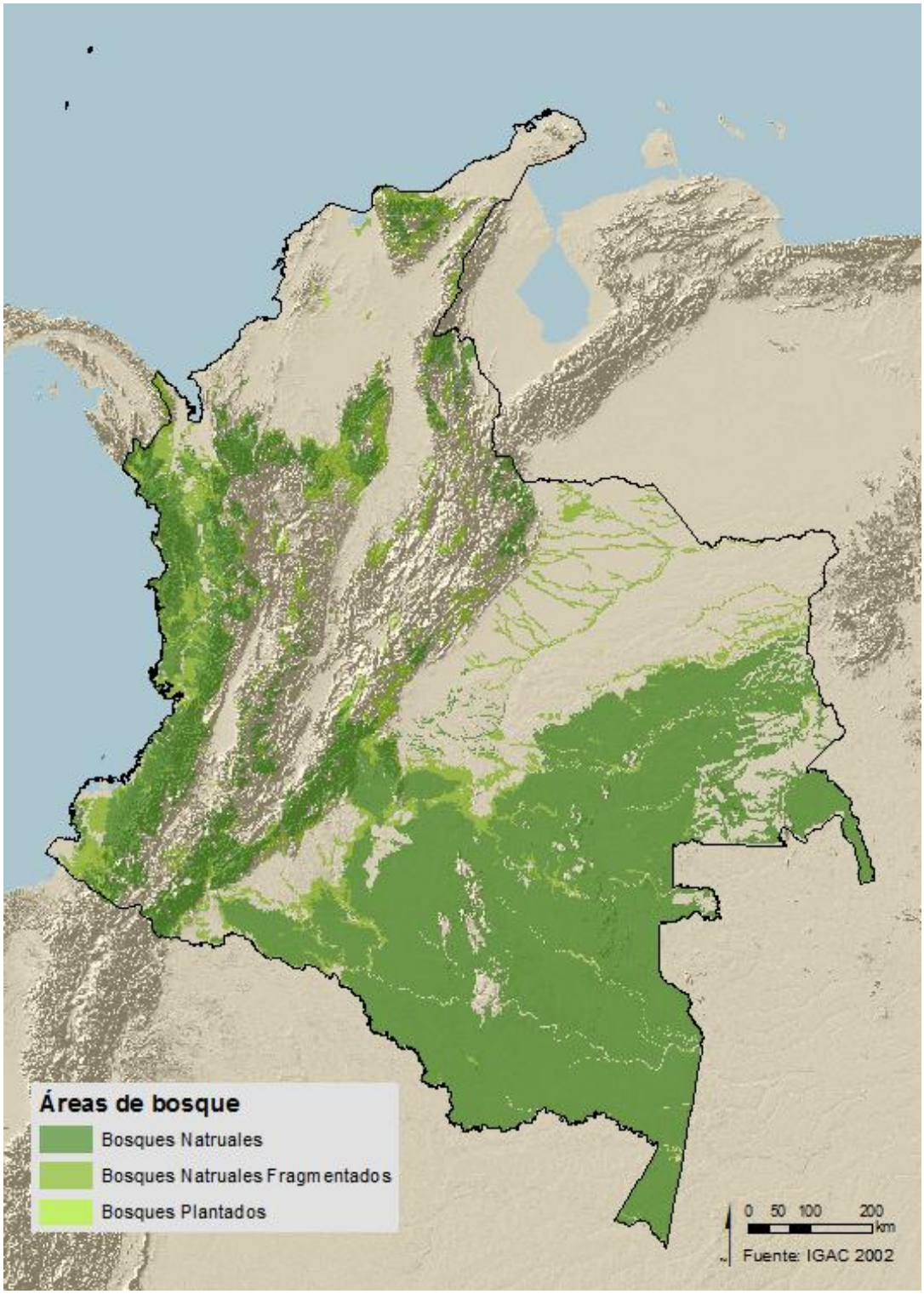



*Figura 55: Áreas de bosques de Colombia (IGAC 2002).*

# 6 Criterios Socio-económicos

Los aspectos socio-económicos de la producción de biocombustibles son muy importantes para asegurar la factibilidad de la expansión de la bioenergía. Sin embargo los impactos sociales directos e indirectos son específicos de cada área y no son fáciles de evaluar. Por esto la evaluación de áreas potenciales de expansión debería incluir siempre un estudio socio-económico local.

En este estudio, se discute, solo una cantidad limitada de factores socio-económicos que afectan la aptitud de las cadenas de valor del biocombustible. La información usada se basa en literatura existente e incluye el acceso a infraestructura existente, carreteras y mercados, seguridad y aspectos de seguridad alimentaria.

*Figura 56: Resumen esquemático de los factores socio-económicos considerados.*

Cabe anotar que los indicadores empleados en este estudio son tomados principalmente del estudio (IDEAM 2009c) y simplifican de manera general la realidad socio económica local. Adicionalmente, los indicadores podrían cambiar rápidamente en el tiempo, lo que sugiere una evaluación frecuente de los mismos.

## 6.1 Acceso a instalaciones de procesamiento

Idealmente, las materias primas para biocombustibles son cultivadas cerca de una planta de procesamiento ya existente, para hacer uso de esta, y ya que los cultivos tendrán mayor posibilidad de ser aceptados dentro de la comunidad afectada. En la Figura 57, se presentan las áreas que están a 30 km de distancia de una fábrica de azúcar o aceite de palma. Sin embargo, no se consideró la calidad del acceso (esto es, pendiente, red vial, etc.).

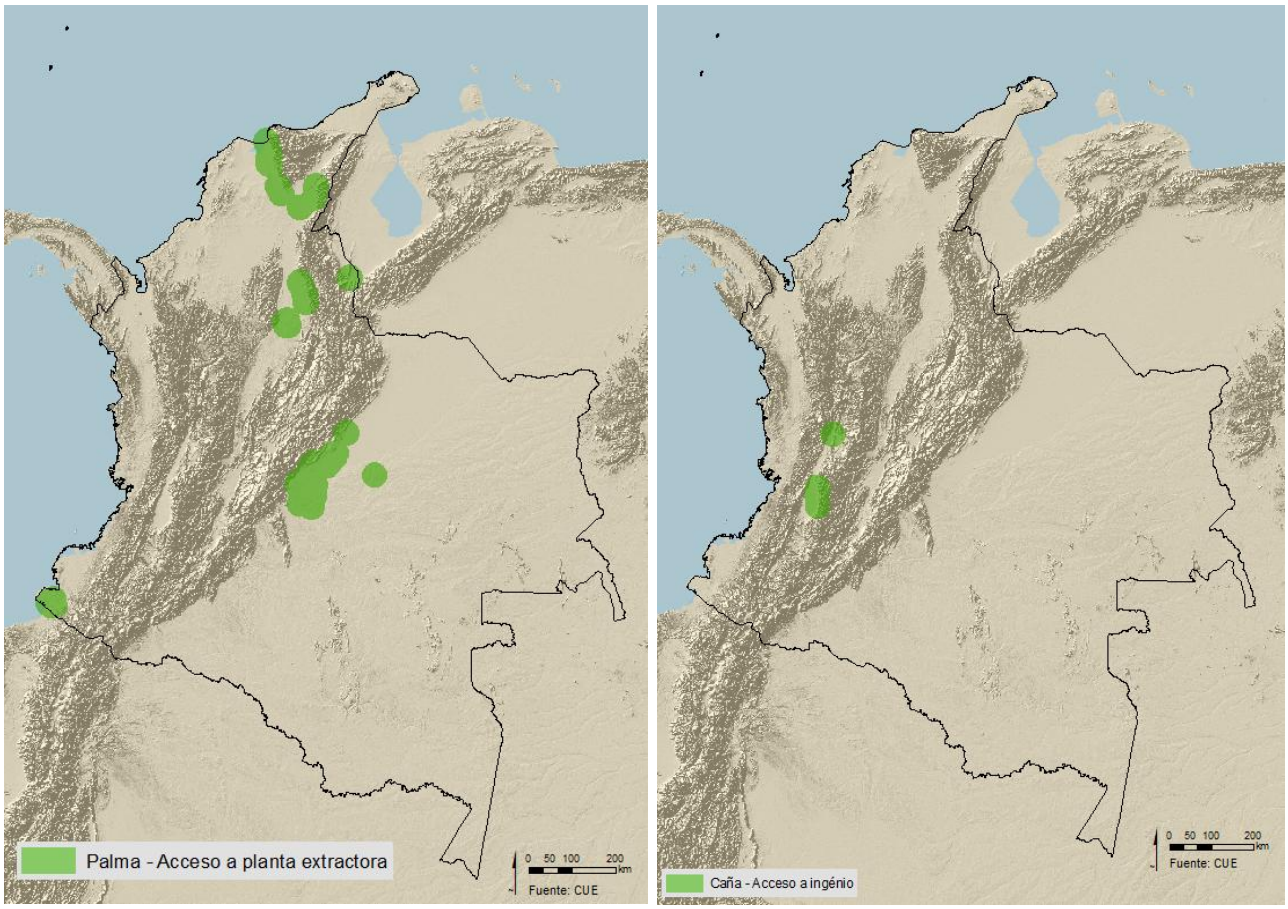



*Figura 57: Acceso a fábricas de palma existentes (izquierda) y fábricas de caña de azúcar (derecha). La distancia de amortiguación es de 30 km.*

## 6.2 Acceso a mercados

Cultivar materias primas para la producción de biocombustible es en general más competitivo si las instalaciones de producción están localizadas cerca a los mercados principales. Localizaciones con distancias de transporte baja (<154 km) a media (entre 154 km y 337 km) hasta los principales mercados o puertos para exportación, son preferibles económicamente comparadas con las localizaciones a distancias más largas.

La evaluación está basada en la distancia aérea y el costo del transporte desde las celdas de la cuadricula hasta los mercados. Aunque se tomaron en cuenta distancias aéreas - en vez de distancias/costos reales de transporte – se pueden crear indicaciones aproximados acerca de regiones más aptas en términos económicos.

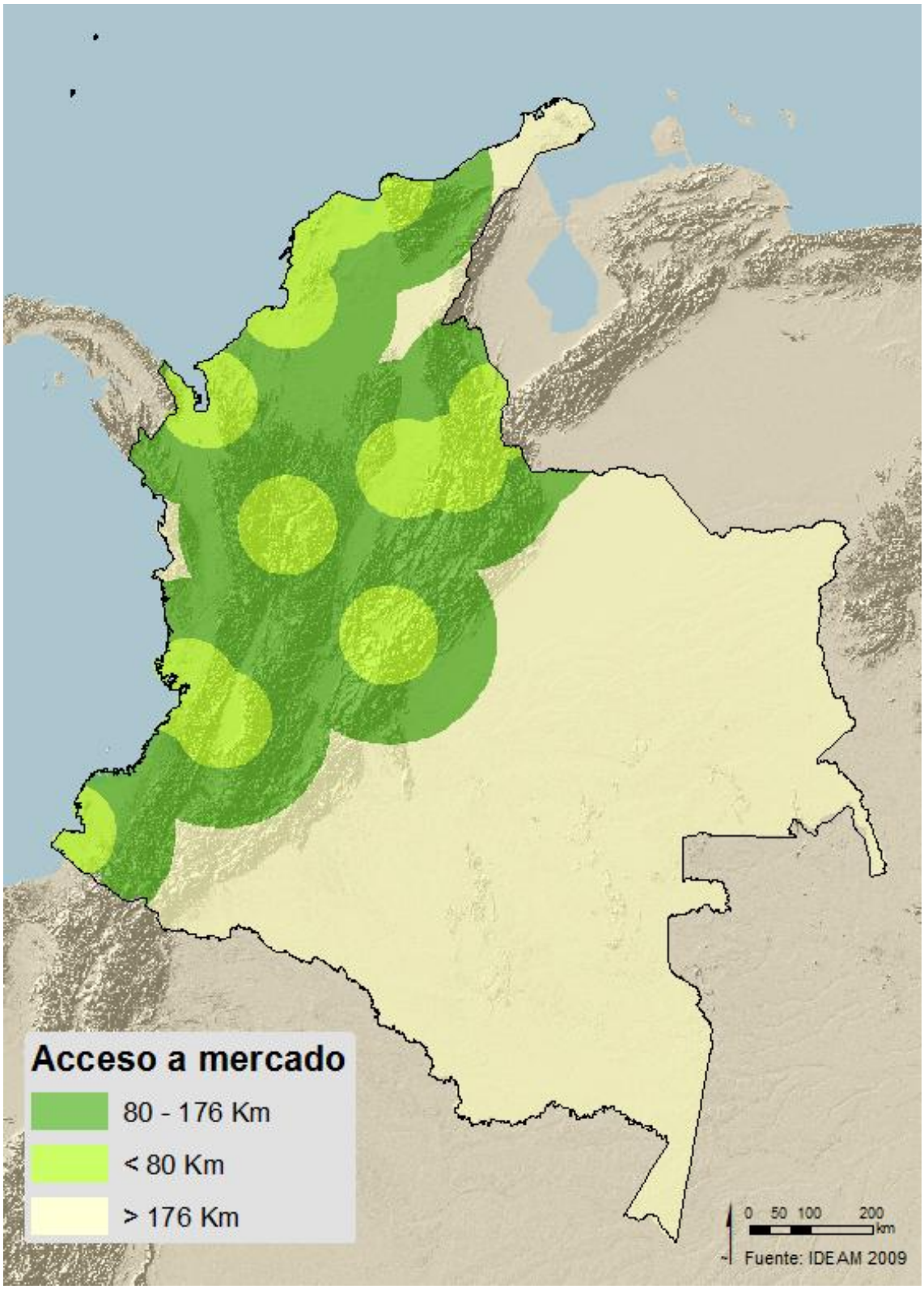



*Figura 58: Acceso a mercados. (IDEAM 2009c).*

Distancias por debajo de 80 km se indican en verde claro; distancias medidas (80 km a 176 km) se marcan en verde.

## 6.3 Acceso a la red vial

Las áreas con acceso cercano a vías y ríos (aptas por transporte) tienen beneficios económicos debido a mejores oportunidades de trasporte. Se emplearon como mapas base, el mapa de red vial del IGAC y el mapa de ríos del Ministerio de Transporte (MT 2000, IGAC 2005). La clasificación se realizó de acuerdo al IDEAM 2009a. Se seleccionó una distancia de amortiguación de 15 km para las principales vías (pavimentadas y sin pavimentar con 2 o más carriles, los cuales están disponibles para tráfico todo el año (Terrestre 1 y 2) y los principales ríos (navegación permanente/Fluvial 1). Para los ríos estacionales y las calles pavimentadas estrechas, las cuales están abiertas para tráfico todo el año, se seleccionó una distancia de amortiguación de 10 km (Terrestre 3 y 4, Fluvial 2). Para vías sin pavimentar que solo son accesibles en temporada seca se seleccionó una distancia buffer de 5 km (Terrestre 5). Para información más detallada ver IDEAM (2009c).

El siguiente mapa proporciona una aproximación gruesa de la accesibilidad a la infraestructura de transporte, mientras que en estudios posteriores se puede actualizar la capa de la red de vías y deberían considerar en más detalle la calidad y estado estacional de las vías (cierre de vías temporal).

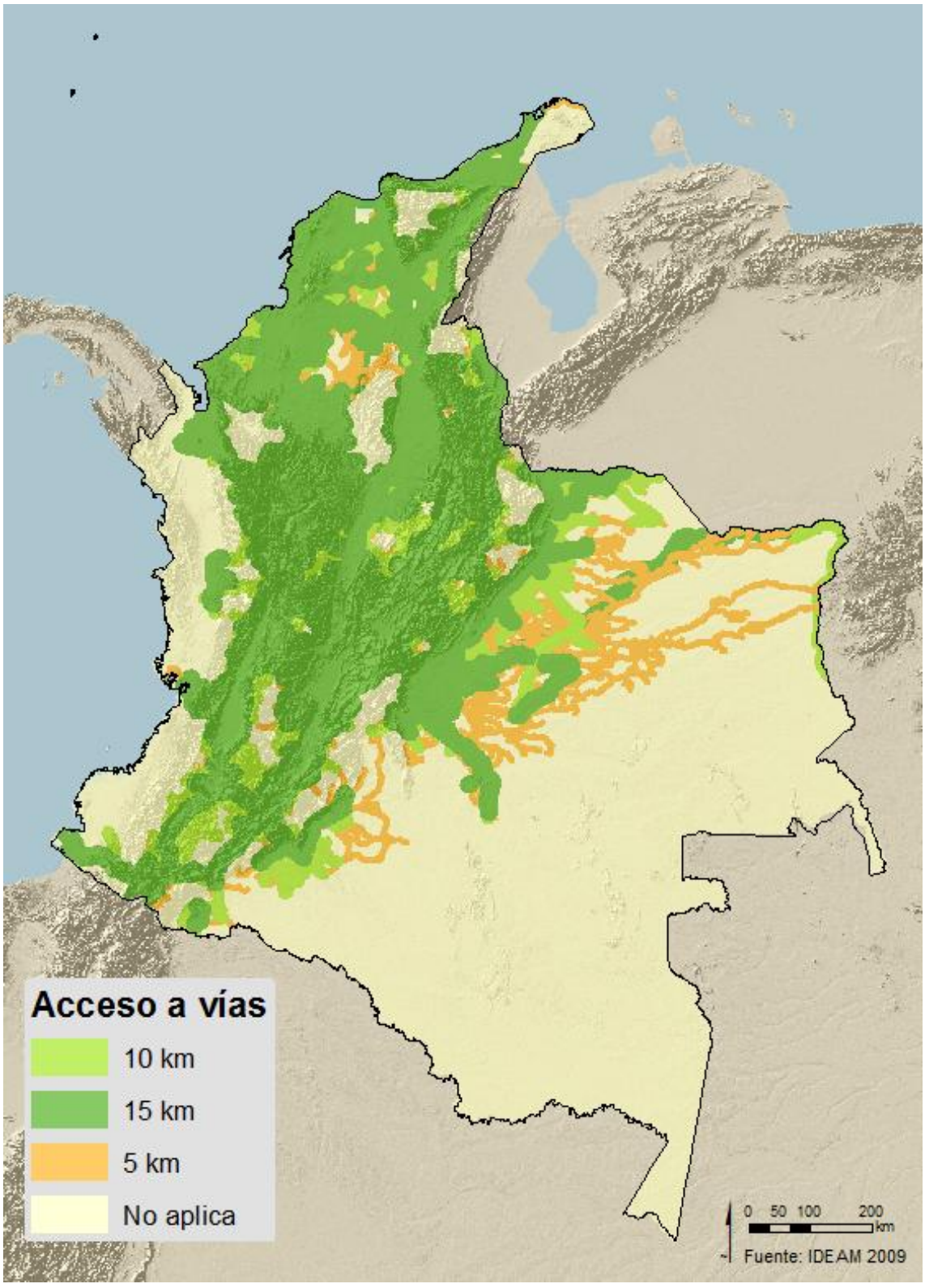



*Figura 59: Acceso a las principales vías y ríos (<15 km, marcadas en verde) y otras vías (<10 km, marcadas en verde claro y < 5 km en naranjado) (Fuente: IDEAM 2009c).*

Los cultivos existentes para la producción de palma y caña de azúcar están localizados en áreas con buen acceso, las cuales se encuentran relativamente cerca al mercado (ver Figura 58). Las distancias de

transporte en áreas al oriente de Colombia son largas o la infraestructura vial es completamente deficiente. Este aspecto reduce significativamente la competitividad de las áreas remotas para la producción de biocombustibles. No obstante, a mediano o largo plazo el transporte por tuberías, el establecimiento de mercados alternativos o una red vial mejorada podría cambiar la situación actual.

## 6.4 Seguridad

También se debe tomar en cuenta la seguridad del área al momento de seleccionar sitios potenciales para establecer plantaciones de las materias primas del biocombustible. El mapa de seguridad toma en cuenta el número de personas asesinadas, robos armados y el desplazamiento de personas. Estos datos provienen de la Observatorio de Derechos Humanos y la el Derecho Internacional Humanitario de la Vicepresidencia. Para más información, descripción de la metodología y el mapa en si, se pueden consultar en IDEAM (2009b).

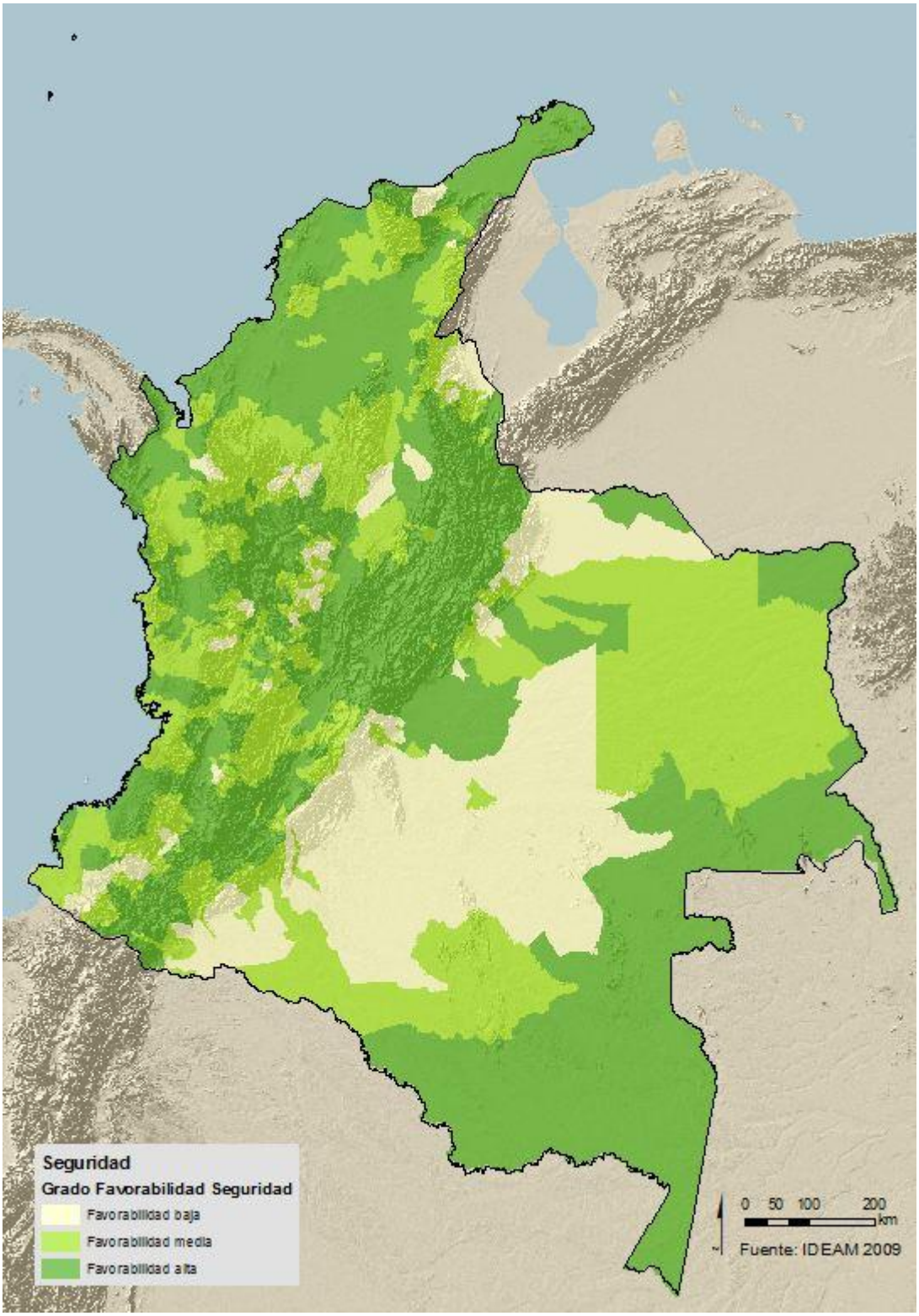



*Figura 60: Mapa de riesgo de seguridad de Colombia, bajo (verde), medio (verde claro) y alto (amarillo) (Fuente: IDEAM 2009c).*

Las áreas con complicaciones históricas en términos de seguridad están localizadas en las áreas de Orinoco, principalmente en los departamentos de Meta, Arauca y Vichada. Los territorios de las municipalidades de Norte de Santander, la parte norte de Antioquia y el Putumayo están también categori-

zados como áreas con seguridad limitada. Sin embargo, los indicadores solo ofrecen una visión aproximada acerca de los incidentes históricos, y si se planea establecer un sitio nuevo de producción debe evaluarse específicamente la seguridad de dicha área.

## 6.5 Seguridad alimentaria

Si se expanden los cultivos energéticos en áreas agrícolas, se incurre en efectos de desplazamiento. Estos efectos de los desplazamientos son significativos, si cultivos intensivos como el maíz son desplazados.

Los efectos son menores, si se desplaza actividades extensivas, como el pastoreo de ganando. Los efectos pueden ser compensados totalmente, si se pueden rescatar suelos agrícolas mediante la intensificación (es decir, de suelos de pastoreo) en el mismo lugar, mientras la expansión tiene lugar.

La Figura 61, muestra la producción agrícola actual en Colombia. Esta difiere entre formas de agricultura altamente intensiva y extensiva. La Figura da una idea de donde la expansión sería posible con efectos limitados o sin efectos indirectos.

El mapa no toma en cuenta la calidad de la agricultura (podrían existir algunas áreas con producción agrícola relativamente baja). Sin embargo, se requiere un plan de manejo detallado para el uso del suelo con el fin de evitar mecanismos de desplazamiento desfavorables. Esto requiere un estudio profundo y específico sobre el posible impacto en la seguridad alimentaria o los efectos indirectos. Más aún, solo excluimos el suelo agrícola y por lo tanto para uso del suelo de pastoreo podrían ocurrir los mismos efectos y por lo tanto estos suelos también deberían ser analizados en detalle.

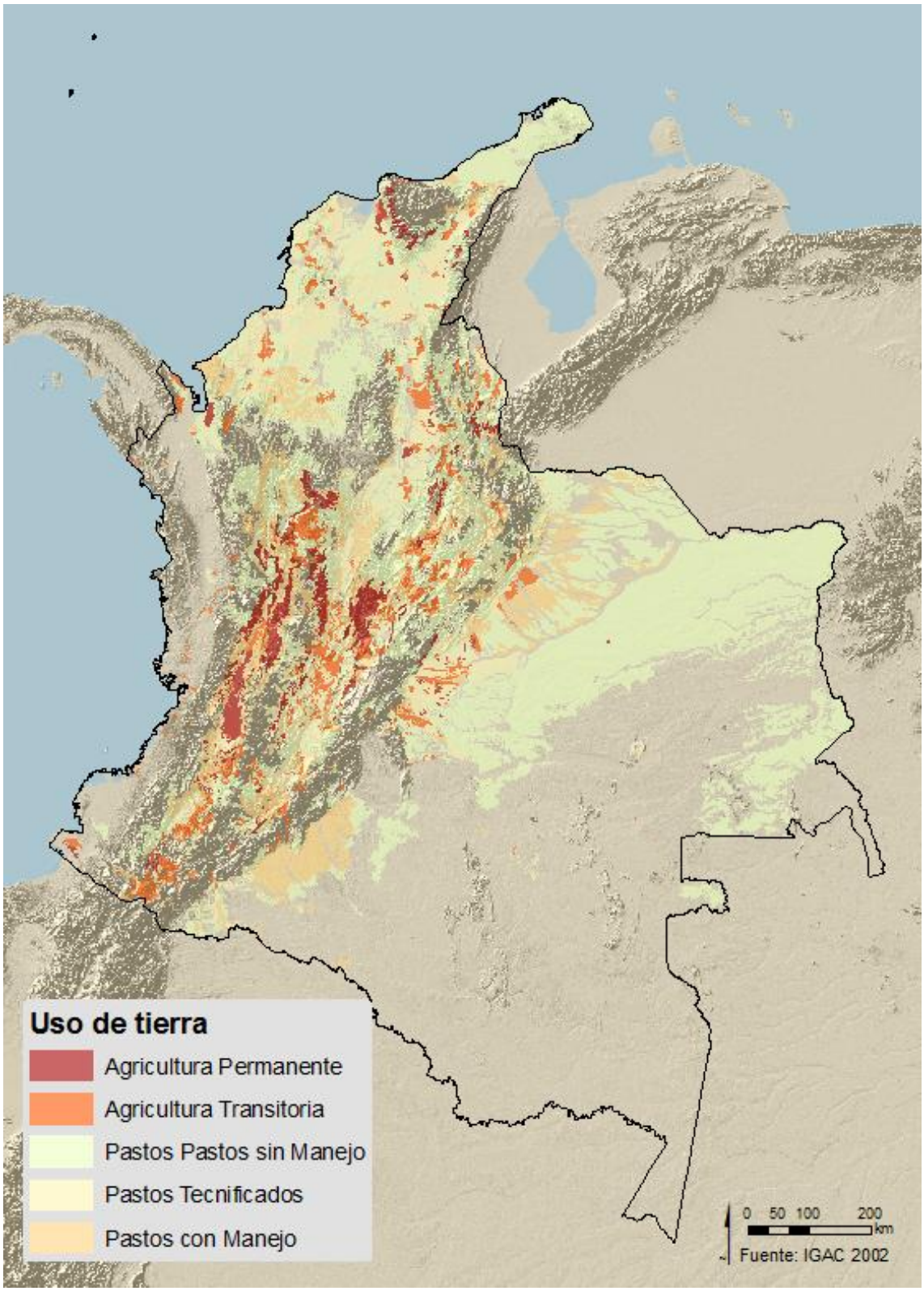



*Figura 61: Mapa de la producción agrícola actual. (Fuente:* IGAC 2002*).*

# 7 Discusión y conclusiones

El objetivo de esta evaluación es indicar las áreas con potencial de expansión para cultivos de palma de aceite y caña de azúcar, tomando en cuenta los factores biofísicos, legales, ambientales y socio económicos. El principal enfoque científico de este estudio es establecer los mapas de carbono y GEI, los cuales no están disponibles anteriormente.

El conocimiento obtenido sobre las áreas de expansión potencial y sostenible es relevante para la toma de decisiones estratégicas a nivel nacional e indica las áreas de interés donde se requiere una investigación específica más profunda.

La escala de trabajo es 1:500.000 y para los cálculos de la matriz se usaron celdas con una resolución de 5 km x 5 km. La resolución es suficiente para identificar patrones generales a nivel nacional. Sin embargo, los resultados no sugieren que sean empleados para la planeación de proyectos locales e individuales de biocombustibles.

A continuación se discute la adaptación biofísica en combinación con aspectos de sostenibilidad medioambientales y económicos para la expansión potencial de caña de azúcar y palma de aceite. Inicialmente, se excluyen los parques nacionales donde el cultivo es completamente restringido. Los territorios de comunidades negras y las reservas indígenas están considerados actualmente no aptos para la cultivación de biocombustibles comerciales.

Con el fin de cumplir con el criterio de adaptación de la directiva de la energía renovable (EC 2008), los biocombustibles producidos deben ahorrar al menos el 40% de las emisiones de GEI en comparación con la referencia fósil (ahorros netos de GEI, ver sección 5.1.3). Posteriormente, se excluyeron del mapa de aptitud potencial, los puntos críticos de biodiversidad (áreas de conservación prioritaria definidas en la sección 5.3, así como áreas de bosque natural). Los bosques naturales presentan generalmente gran biodiversidad, son importantes para los ciclos de agua y el suelo de las áreas deforestadas es frágil, así, los bosques se excluyeron de las áreas aptas de expansión. Además, el suelo empleado en la agricultura se excluyó del potencial de cultivo con el fin de evitar interferencias con la producción de alimentos y efectos indirectos en el cambio de uso del suelo. Por último, se excluyeron las áreas no conectadas la red vial, principalmente en las regiones del Amazonas y Vichada, dado que la competitividad de económica de producción en áreas remotas es un asunto complejo. Sin embargo, el establecimiento de nueva infraestructura en estas zonas podría apoyar al desarrollo de estas regiones y así la clasificación cambiaría.

Existen otros factores que influencian las aptitud y sostenibilidad de los cultivos para materia prima de biocombustibles (esto es, factores económicos, aspecto temporales, etc.). Algunos de estos factores se mencionaron durante la discusión de los mapas de aptitud.

## 7.1 Palma de aceite

Por condiciones climáticas y agronómicas grandes áreas del país son aptas para el cultivo de palma de aceite Sin embargo, en aquellas regiones donde se hay altas precipitaciones como la costa Pacífica y bajas precipitaciones como La Guajira se consideran como no aptas. Además, estas y otras áreas son parte del territorio protegido (resguardos indígenas y título colectivos de comunidades negras), lo que restringe la expansión de los cultivos de palma de aceite. Adicionalmente, los suelos poco profundos en el piedemonte de la cordillera de los Andes (principalmente en Casanare) limita la aptitud para el cultivo de palma de aceite. Sin embargo, algunas de estas áreas podrían excluirse por efecto de la resolución (5km x 5km) requiriendo una evaluación local más detallada para mejorar la estimación de las áreas aptas.

El mapa de la derecha en la Figura 62 muestra las áreas edafo-climaticamente aptas, sobrepuesta con los parques naturales protegidos (rojo) y las tierras de comunidades negras e indígenas oficiales (consideradas actualmente como no aptas).

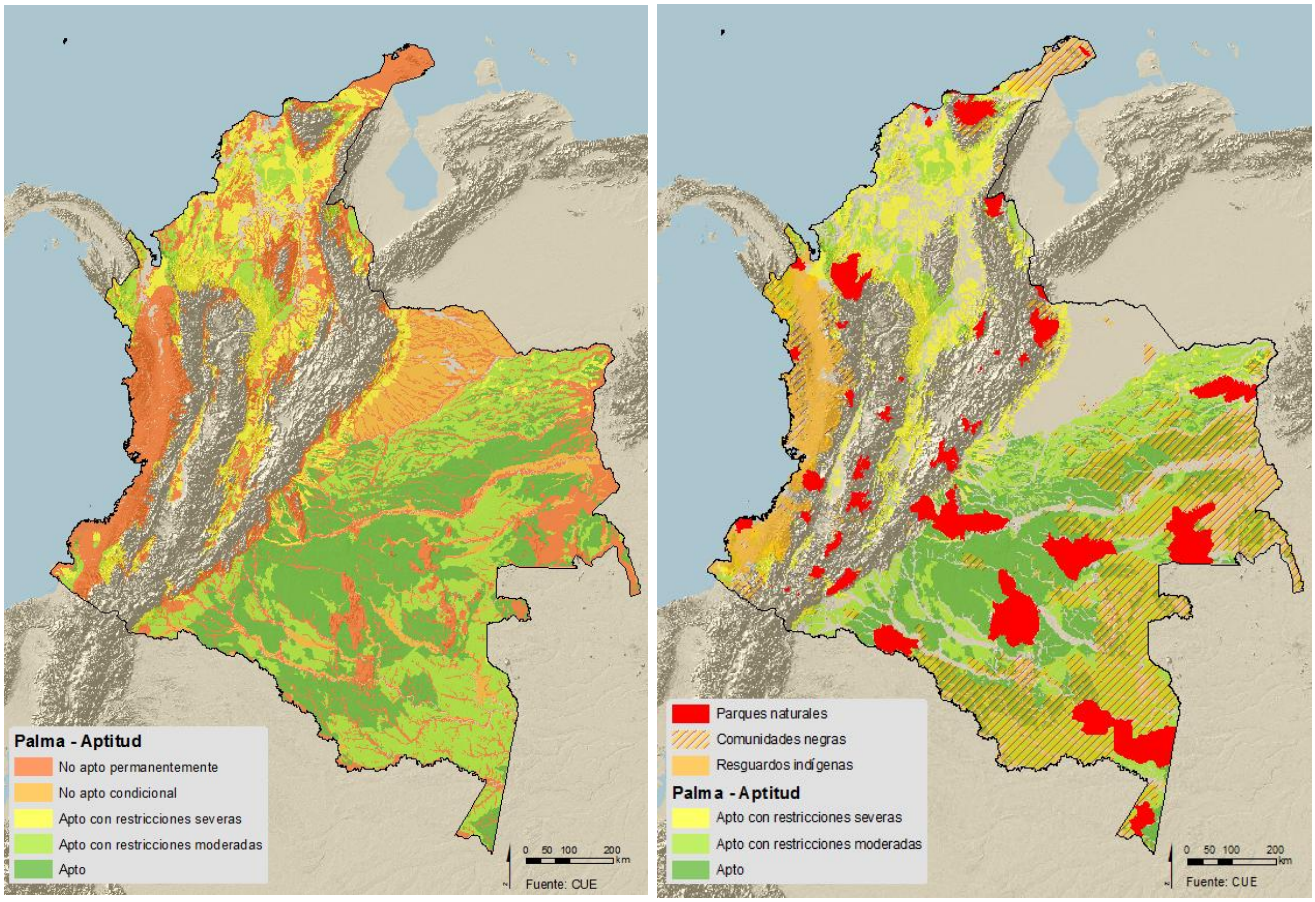



*Figura 62: Palma de aceite; aptitud biofísica (izquierda) sobrepuesta con las áreas protegidas (derecha).*

Asimismo, se excluyen las áreas donde el cultivo de palma de aceite no reduce significativamente el calentamiento global comparado con la utilización de los combustibles fósiles (ahorro neto de emisio-

nes de GEI > 40%). Esto significa, que básicamente todas las áreas con una cantidad de reservas de carbono en biomasa relativamente alta y/o reservas de carbono orgánico del suelo son excluidas (cubriendo áreas extensas de los bosques húmedos naturales del territorio sur oriental y la costa Pacífica Colombiana). Las áreas aptas para el cultivo de palma de aceite en términos de ahorros netos GEI, están localizadas en los valles Andinos, en el área oriental no boscosa y en la zona norte de Colombia.

La Tierra apta para el cultivo de la palma de aceite sin afectar áreas vulnerables y con alta biodiversidad se determina por la exclusión de los parques naturales protegidos (Figura 62, izquierda) y puntos críticos de biodiversidad incluyendo áreas forestales (Figura 63, derecha). Extensas áreas de Colombia se excluyen en términos de la biodiversidad, especialmente ecosistemas naturales y poco usados.

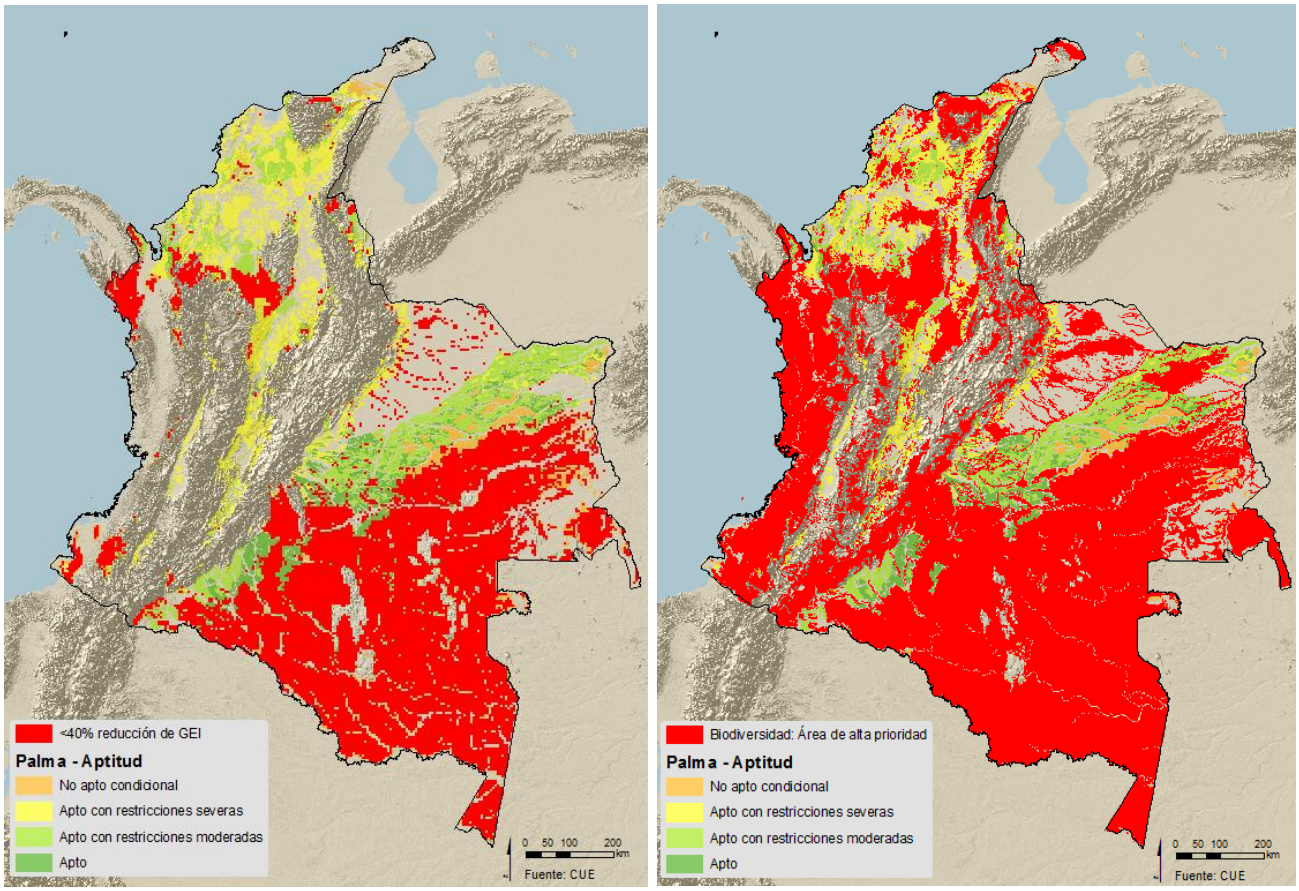



*Figura 63: Aptitud de la palma de aceite excluyendo las áreas edafo-climáticas no aptas y las áreas protegidas, sobrepuesto con áreas con menos de 40% de ahorros de GEI (Izquierda) y áreas de biodiversidad de alta prioridad (derecha). Fuente: CUE*

En el mapa de la izquierda de la Figura 64 se excluyó el suelo usado actualmente para agricultura intensiva, la cual se establece principalmente en los valles de las montañas. En este paso también se excluyeron los cultivos de palma de aceite establecidos recientemente en el Suroccidente (Nariño), Este (Meta), Norte (Magdalena, Cesar) y Centro (Santander), lo cual tiene sentido si se determinan las áreas de expansión potencial. Además, convertir pastizales podría causar una presión indirecta en el sistema

natural (Ver Capitulo ACV) y antes de establecer cultivos debe evaluarse localmente el efecto indirecto potencial.

La competitividad de los cultivos de palma de aceite localizados lejos de la red vial, instalaciones de proceso y mercados existentes es limitada, y de este modo estas áreas se clasificaron "No apto condicional" en el mapa de aptitud (Figura 64 derecha). Las áreas a lo largo de la Costa Pacífica, la región Amazonas y las áreas del oriente de Colombia son remotas.

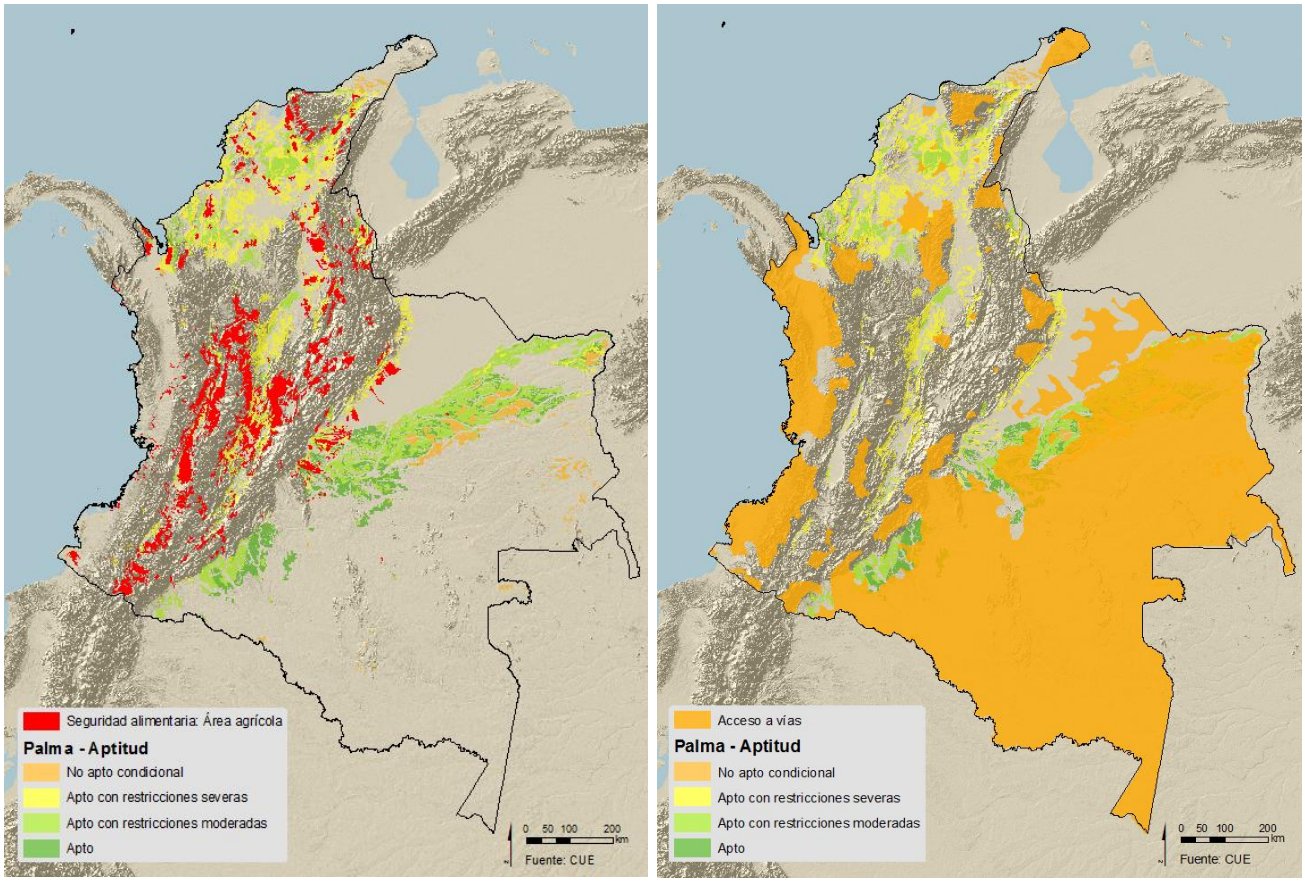



*Figura 64: Aptitud de palma de aceite. Excluye las áreas protegidas y biofísicamente no aptas, áreas con menos de 40% en ahorros de GEI, puntos críticos de biodiversidad, sobrepuesto con un mapa de las áreas agrícolas (izquierda) y áreas con acceso a vías (derecha).*

Finalmente, el área de expansión sostenible para la palma de aceite, se reduce a las llanuras del Norte, áreas centrales en los valles andinos, áreas en la zona no boscosa oriental y pequeñas áreas del Suroccidente de Colombia.

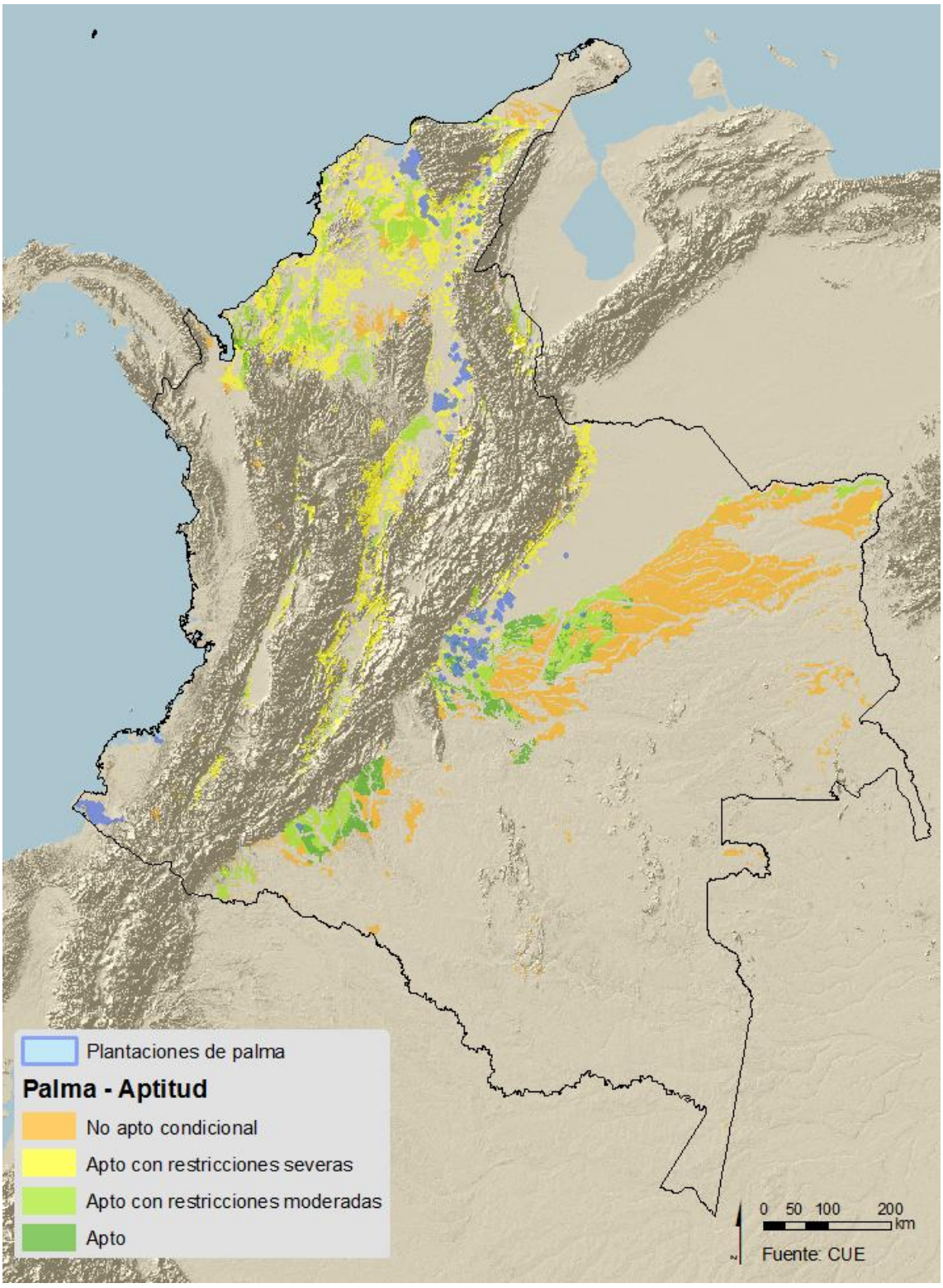



*Figura 65: Aptitud de la palma de aceite, excluyendo las áreas protegidas y no aptas biofísicamente, áreas con menos de 40% en ahorro de GEI, puntos críticos de biodiversidad, áreas agrícolas y áreas de acceso limitado (áreas naranja). Fuente: CUE*

En total cerca de 1.000.000 hectáreas se identificaron como áreas altamente aptas para el cultivo de palma y cerca de 2.900.000 hectáreas como moderadamente aptas. La parte más grande de las áreas

altamente aptas y moderadamente aptas está localizada en el piedemonte de la cordillera Oriental, en Caquetá y Meta (Figura 66, derecha).

Ambas regiones ya probaron ser aptas para los cultivos de palma y especialmente en el Meta extensas parcelas de tierras están siendo empleadas para el cultivo de palma de aceite. Sin embargo, el riesgo en Caquetá es que el incremento de los cultivos de palma generará presión en las áreas de bosques húmedos. Con el fin de prevenir efectos indirectos en el uso del suelo por la expansión de la producción de materias primas para biocombustibles debe analizarse críticamente la aptitud. Adicionalmente, deben llevarse a cabo investigaciones en la planificación y manejo del suelo, a fin de evaluar dichos efectos potenciales.

Otra área altamente apta está localizada a lo largo del Rio Magdalena (Antioquia, Santander y Bolívar) y especialmente cerca de la desembocadura del rio en el departamento de Magdalena (en el lado occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. Además, partes del Cesar localizadas a lo largo del Rio Cesar, son aptas para el cultivo de palma.

Córdoba y el norte de Antioquia son moderadamente aptos y aptos con restricciones severas para el cultivo de palma. Sin embargo, en esta área debe evaluarse de igual manera, la planificación y manejo del uso del suelo, con el fin de evitar cambios desfavorables en el mismo.

Las áreas aptas para los cultivos de palma en Colombia evaluadas por el IDEAM son aproximadamente 6.000.000 ha, menores a la encontradas en este estudio (9.354.000 ha). La diferencia puede explicarse por los diferentes de parámetros que se consideraron (especialmente la diferencia de criterios socio económicos). Sin embargo, el IDEAM también categorizó como áreas con el más alto potencial para el cultivo de palma a los departamentos de Meta, Caquetá, Antioquia, Córdoba y Magdalena, lo cual coincide con lo evaluado en este estudio. Considerando las áreas altamente aptas y moderadamente aptas, 4.001.000 ha en total, corresponden de igual manera con las 3.500.000 ha aptas que indica el MADR (MADR 2009). En comparación con este estudio, el estudio realizado por el MADR indica el más alto potencial para el cultivo de palma en el oriente de Colombia, principalmente en el departamento del Meta.

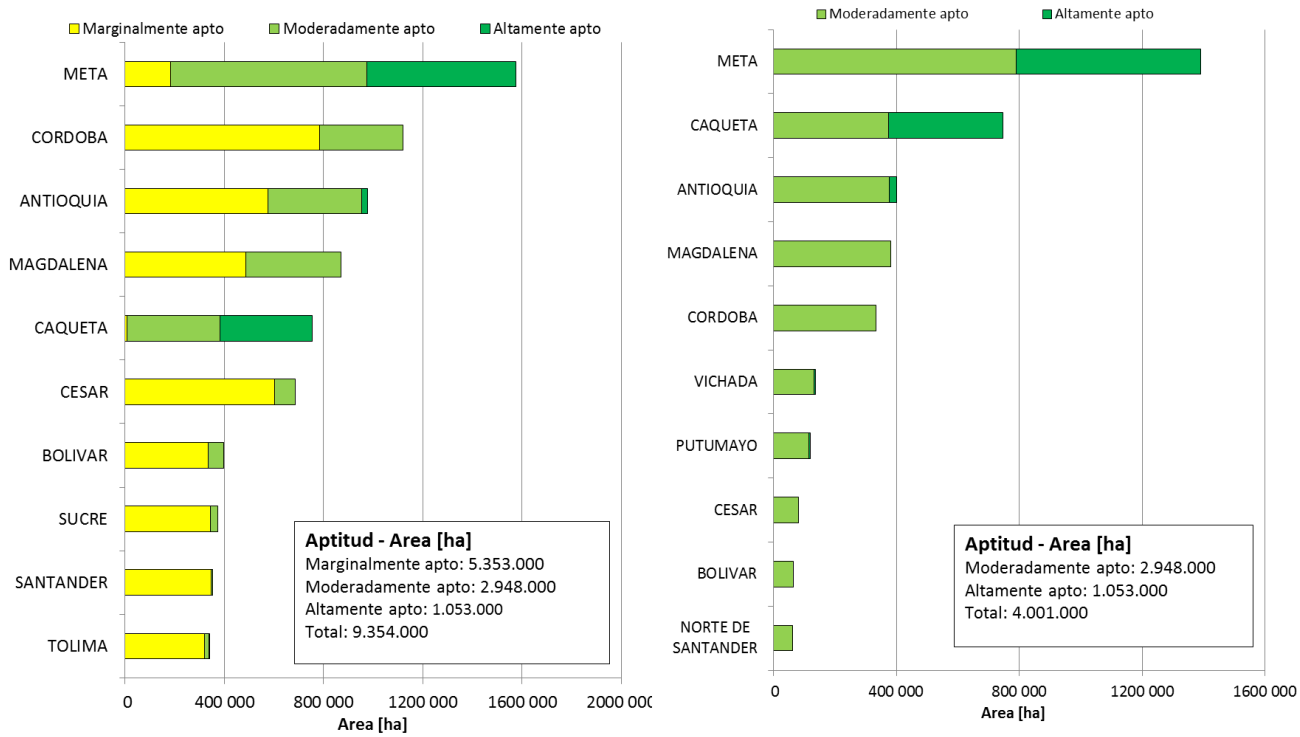



*Figura 66: Área apta para el cultivo de palma de aceite en Colombia para 10 departamentos. (Fuente: CUE). Áreas aptas, aptas con restricciones moderadas y aptas con restricciones severas (izquierda), áreas aptas y aptas con restricciones moderadas (derecha).*

La Franja de la costa Pacífica se identificó como un área no apta para el cultivo de palma por varias razones. En primer lugar, la tierra está asignada comunidades indígenas y negras, y así la disponibilidad de la tierra es restringida. Además, las áreas están cubiertas principalmente por bosques y una conversión podría conducir a una pérdida de biodiversidad, disminución en los depósitos de agua y emisiones de GEI. Los patrones de alta precipitación y el acceso limitado a las vías hacen que esta área no sea apta para el cultivo de palma de aceite. Por otro lado la distancia a los puertos (para exportación) sería significativamente menor.

La disponibilidad limitada de infraestructura (vías y electricidad) y la relevante conservación de la biodiversidad que tienen las áreas en el departamento de Amazonas, Vaupés y Guainía llevan a una clasificación no favorable para cultivos de palma. Además, extensas partes de dichas áreas están localizadas en tierras de comunidades indígenas.

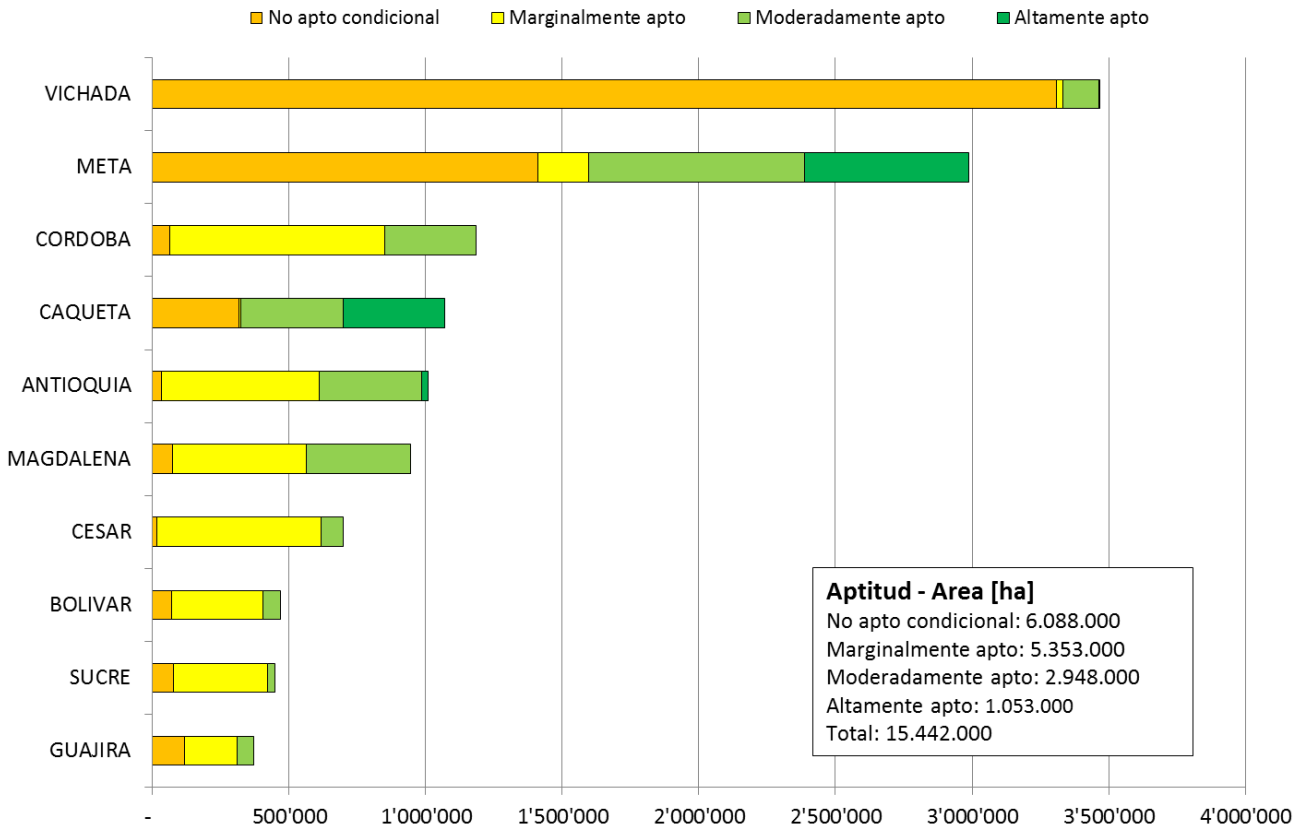



*Figura 67: Área apta para la plantación de palma de aceite en Colombia para 10 departamentos Fuente: CUE. Aptitud Alta, Moderada, marginal y actualmente no aptas.*

Como se muestra en la Figura 67 especialmente las tierras de baja biomasa del Vichada y Meta presentan áreas con potencial de expansión. Sin embargo, estas áreas son actualmente de difícil accesibilidad y por lo tanto son consideradas actualmente como no aptas. No obstante, mediante la inversión en nueva infraestructura de transporte, las áreas podrían potencialmente ser usadas para cultivo de palma de aceite.

## 7.2 Caña de azúcar

Por condiciones climáticas y agronómicas, grandes áreas del país son aptas para el cultivo de la caña de azúcar (Ver Figura 68, izquierda). Sin embargo, estas y otras áreas son parte del territorio protegido (resguardos indígenas y títulos colectivos de comunidades negras), lo que limita o prohíbe (en el caso de parques naturales) la expansión de los cultivos de caña de azúcar (Ver Figura 68, derecha)

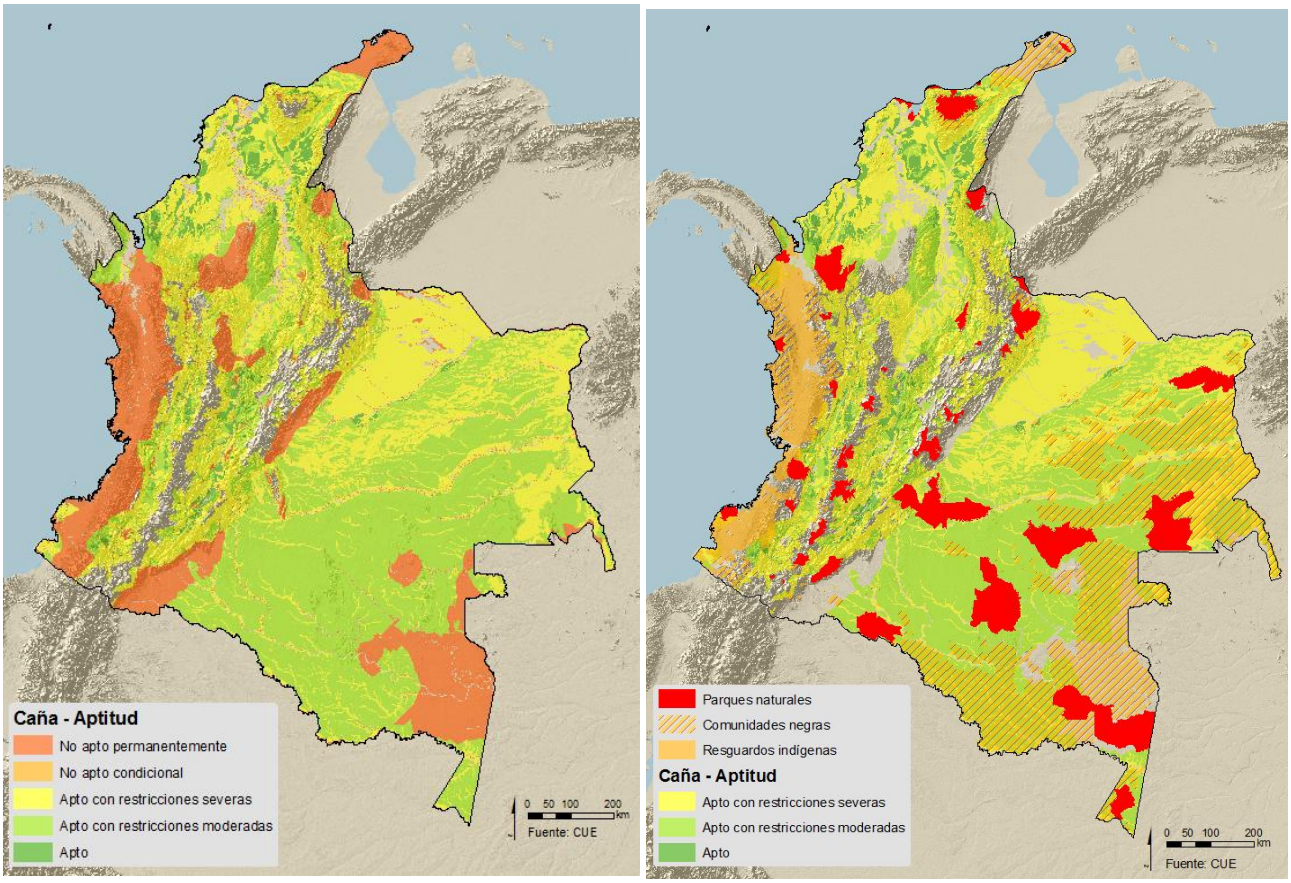



*Figura 68: Caña de azúcar: adaptación biofísica (izquierda) sobrepuesta con las áreas protegidas (derecha). Fuente: CUE.*

Se excluyeron aquellas áreas en donde el cultivo de caña de azúcar no reduce de manera significativa el calentamiento global (ahorros netos > 40%, Figura 69, izquierda). Comparado con el uso de combustibles fósiles. Esto significa, que básicamente se excluyen todas las áreas con una reserva relativamente alta de carbono en biomasa  y/o una alta reserva de carbono orgánico del suelo. Solo los ecosistemas relativamente bajos en biomasa como la tierra agrícola, praderas, tierras degradas o deforestadas permanecen como áreas aptas.

El área apta para el cultivo de caña de azúcar sin afectar las áreas vulnerables y de gran biodiversidad se determina excluyendo los parques naturales protegidos. (Figura 68, derecha) y los puntos críticos de biodiversidad (Figura 69, derecha). En el mismo paso se excluyeron las áreas de bosques dada su gran biodiversidad y su relevancia en los ciclos de agua. Por otro lado, los suelos de bosques son muy frágiles si se establecen cultivos para biocombustibles.

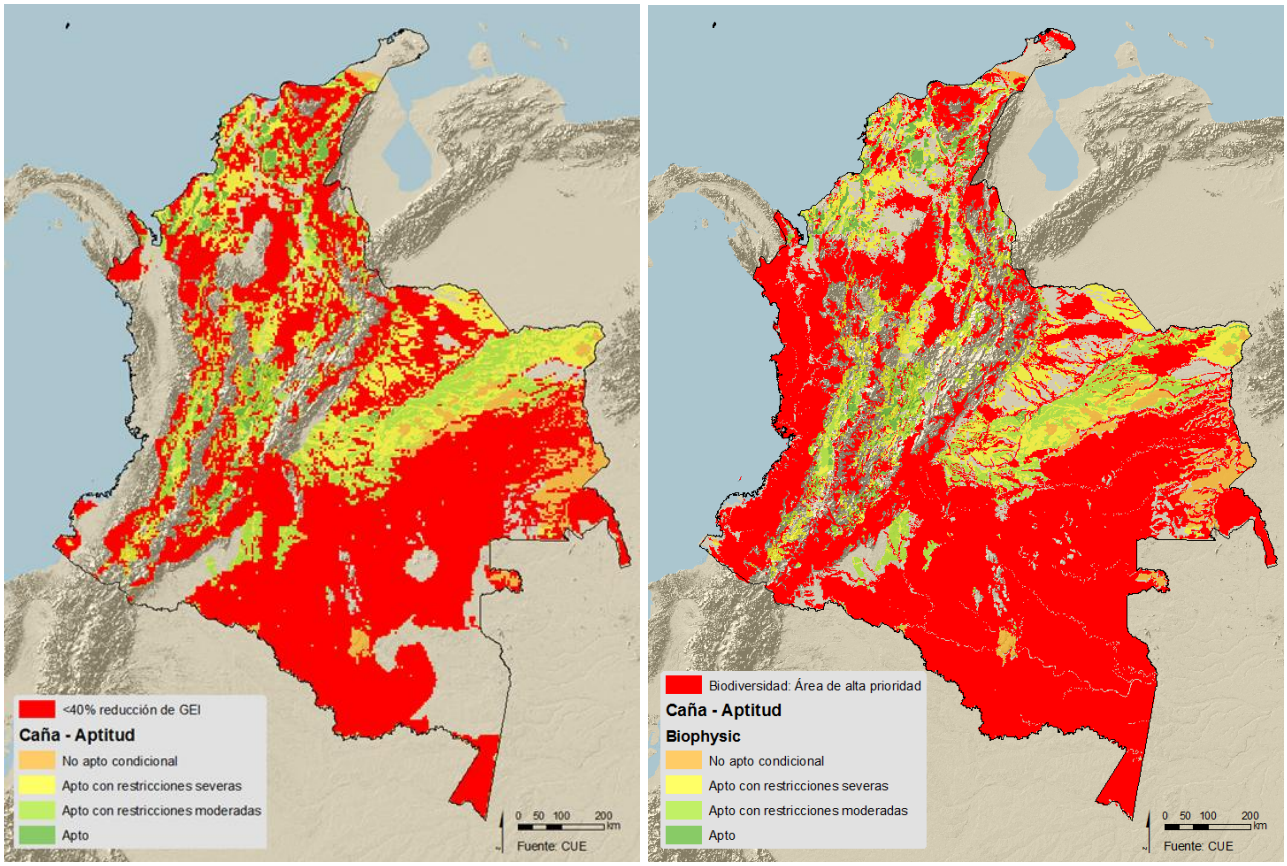



*Figura 69: Aptitud de la caña de azúcar. Excluye las áreas protegidas y biofísicamente no aptas, sobrepuesto con áreas con ahorros menores de 40% en GEI (izquierda).y áreas prioritarias de biodiversidad (derecha).*

Finalmente, se excluyen las áreas actualmente utilizadas para la agricultura intensiva que están principalmente establecidas en los planos de los valles montañosos (Ver Figura 70, izquierda). En este paso, se excluyen también los cultivos de caña de azúcar actuales ubicados en el Valle Geográfico del Rio Cauca lo cual es coherente si se determinan las áreas con potencial de expansión.

La competitividad de los cultivos de caña de azúcar localizados lejos de la infraestructura existente y los mercados es limitada y así, estas áreas se excluyeron del mapa de aptitud (Ver Figura 70, derecha). Especialmente a lo largo de la costa pacífica, la región del Amazonas y el este de Colombia son altamente remotas.

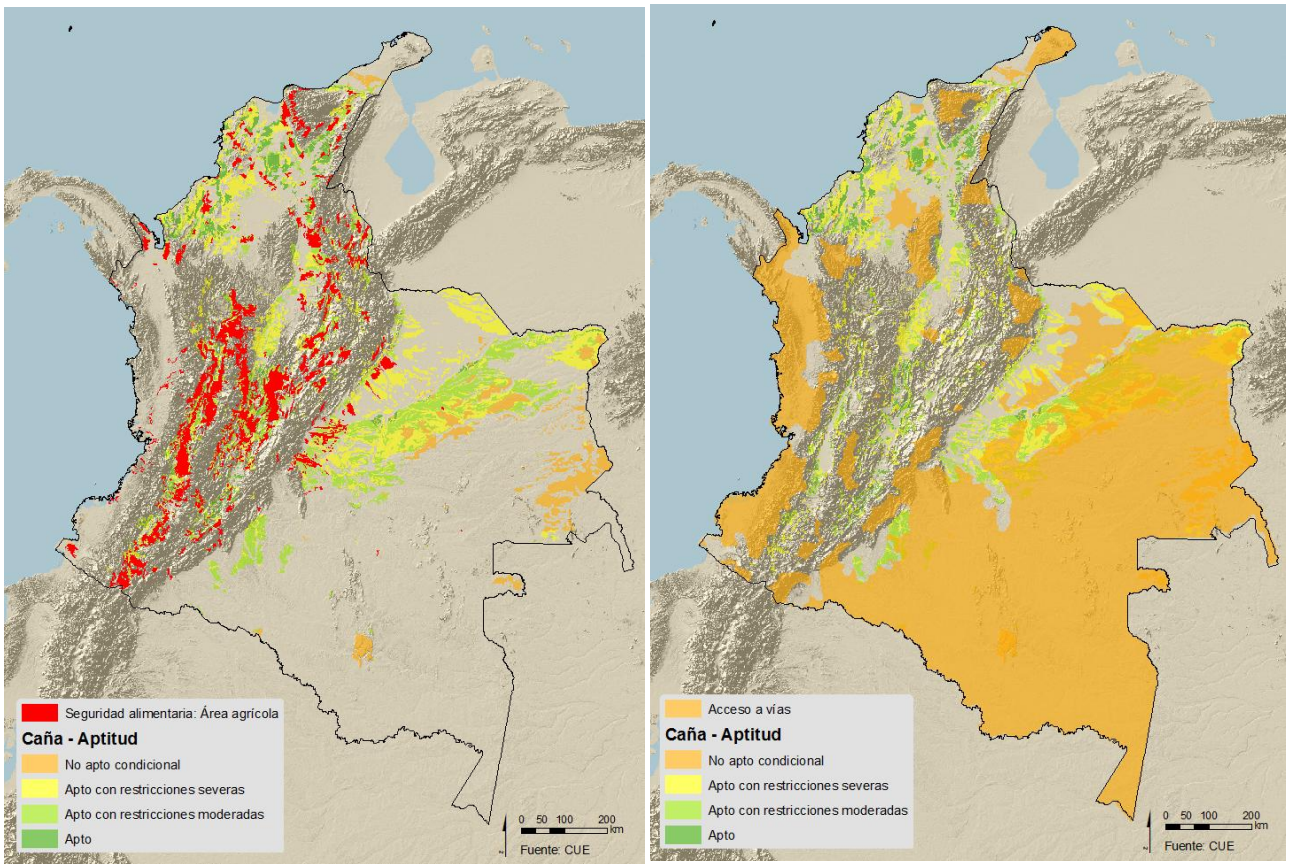



*Figura 70: Aptitud de caña de azúcar. La aptitud excluye las áreas protegidas y biofísicamente no aptas, con menos de 40% en ahorros de GEI, áreas prioritarias de biodiversidad, sobrepuesto con las áreas utilizadas para la agricultura (izquierda) y áreas con acceso a vías (derecha).*

Finalmente, el área de expansión sostenible se reduce a las planicies del norte, algunas áreas en los valles Andinos y en la zona no forestal oriental.

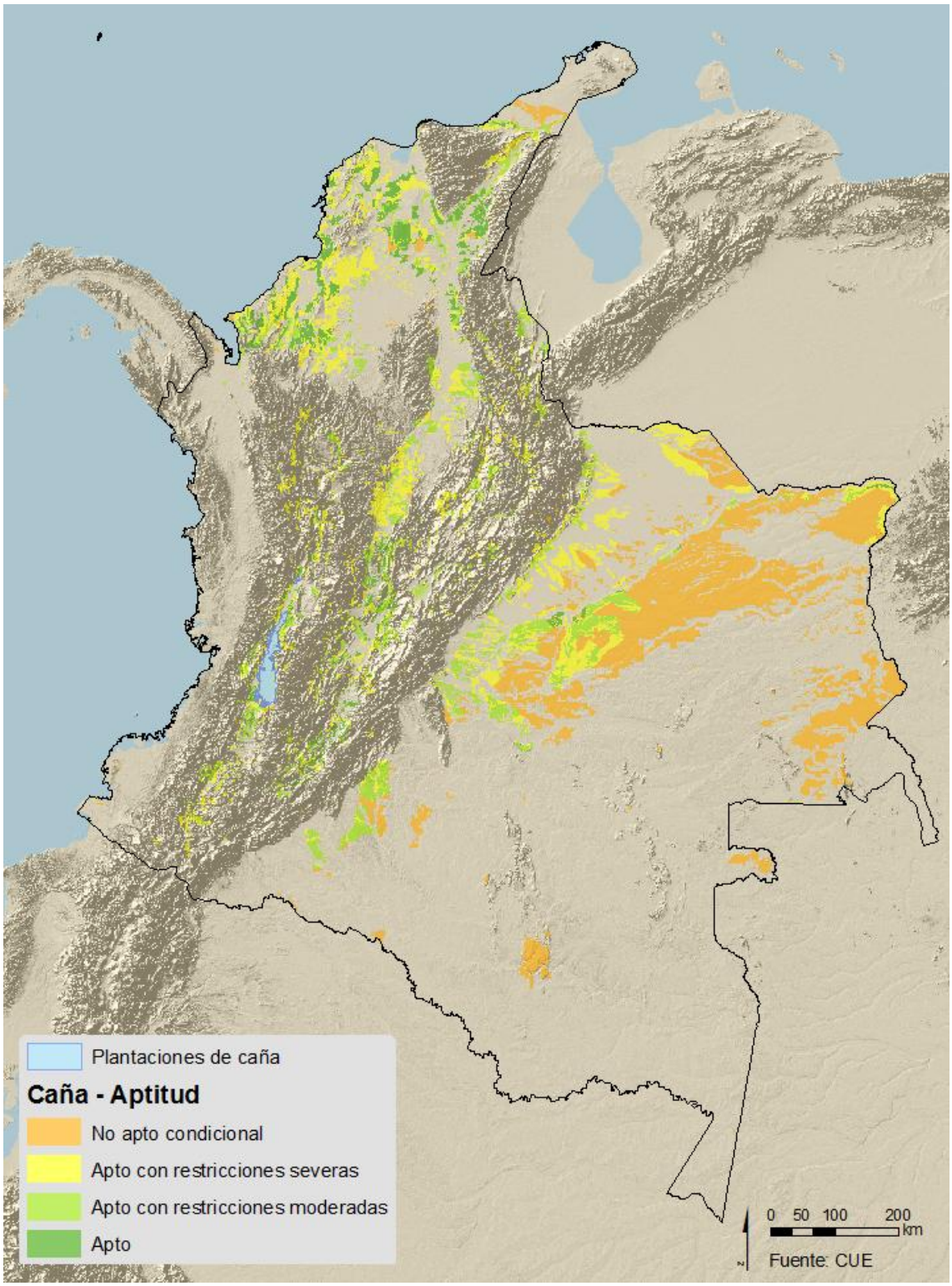



*Figura 71: Aptitud de la caña de azúcar. La aptitud de la caña de azúcar de la figura anterior excluye las áreas protegidas y no aptas biofísicamente, áreas con menos de 40% en ahorros de GEI, áreas de alta prioridad para la biodiversidad, áreas utilizadas actualmente para la agricultura y áreas de acceso limitado (áreas naranja). Fuente: CUE.*

Actualmente cerca de 40.000 hectáreas de cultivos de caña de azúcar están dedicadas a la producción de etanol a partir de caña de azúcar, y existe un potencial de expansión alto de hasta 1.518.000 hectáreas altamente aptas y 3.400.000 hectáreas moderadamente aptas.

La parte más grande de las áreas moderadamente aptas está localizada en el piedemonte oriental de La cordillera de los Andes en Meta y parcialmente en Caquetá (Figura 72 derecha). Sin embargo, establecer cultivos de caña de azúcar en Caquetá tiene el riesgo de incrementar la presión en las áreas de bosques húmedos. Adicionalmente, es necesario llevar a cabo una investigación acerca del uso potencial indirecto del suelo para la planeación y manejo del uso local del suelo con el fin de evaluar el potencial de sostenibilidad para el cultivo de caña de azúcar.

Los departamentos de Cesar, Córdoba y Magdalena se identificaron como áreas con alto potencial para el cultivo de caña de azúcar. En general, los cultivos de caña de azúcar en el Norte deben ser establecidos de modo que se asegure la disponibilidad de agua.

Adicionalmente, los valles interandinos en Tolima, Huila, Antioquia y el área del Río Cauca son aptos con un potencial de expansión limitado.

Las áreas aptas para los cultivos de caña de azúcar en Colombia evaluadas por el MADR son aproximadamente 3.892.000 hectáreas (MADR 2009) y en este estudio se encontraron 10.973.000 hectáreas aptas. No obstante, si solo se consideran las áreas altamente aptas y moderadamente aptas, que debería ser el caso, dado que los cultivos en áreas aptas con restricciones severas no son prometedores en términos económicos, los resultados son similares (en este estudio 4.919.000 ha).

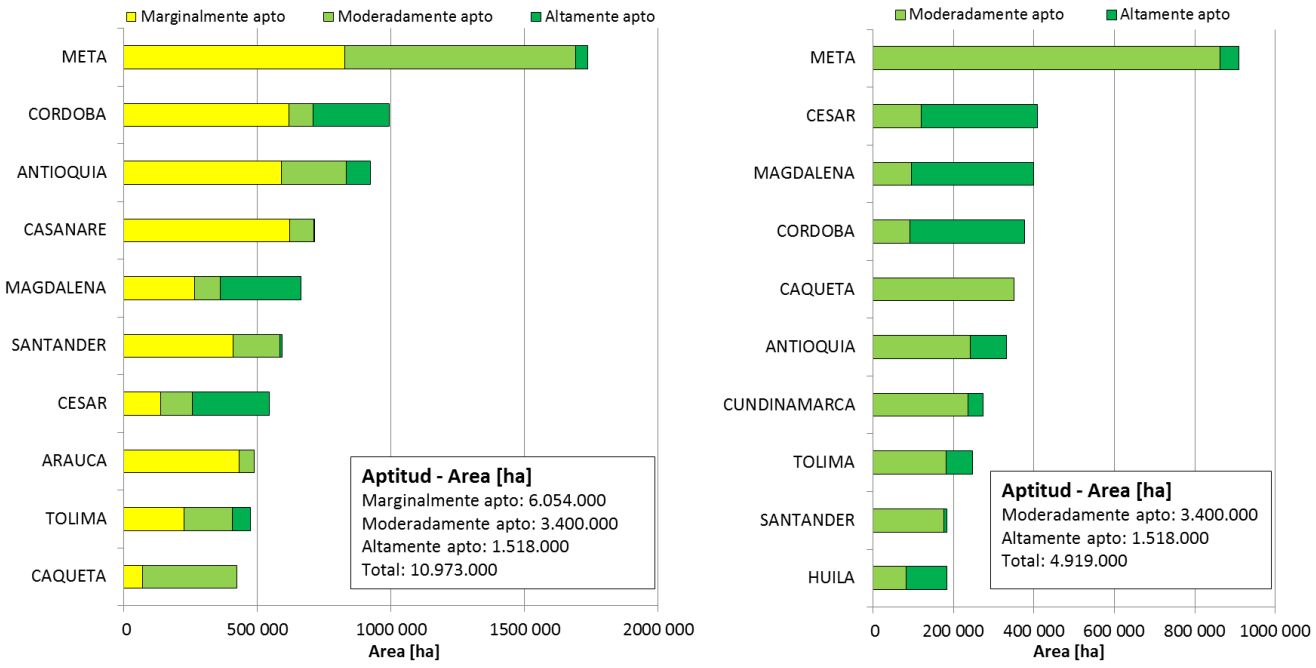



*Figura 72: Área apta para el cultivo de caña de azúcar en Colombia para 10 departamentos. Áreas aptas, aptas con restricciones moderadas y aptas con restricciones severas (izquierda), áreas aptas y aptas con restricciones moderadas (derecha). (Fuente: CUE).*

La franja de costa Pacífica se identificó como un área no apta para el cultivo de caña de azúcar por varias razones En primer lugar, la alta precipitación no es apta para el cultivo de caña de azúcar y las áreas están cubiertas principalmente por bosques y una conversión podría conducir a una pérdida de biodiversidad, disminución en los depósitos de agua y emisiones de GEI. Además la tierra está asignada a comunidades indígenas y negras, y así la disponibilidad de la tierra es restringida y el acceso a las vías en estas regiones es limitado. Por otro lado la distancia a los puertos (para exportación) sería significativamente menor.

La disponibilidad limitada de infraestructura (vías y electricidad) y la relevancia en la conservación de la biodiversidad hace que las áreas en el departamento de Amazonas, Vaupés, y Guainía no están aptas para cultivos de caña de azúcar. Además, extensas partes de dichas áreas están localizadas en tierras de comunidades indígenas.

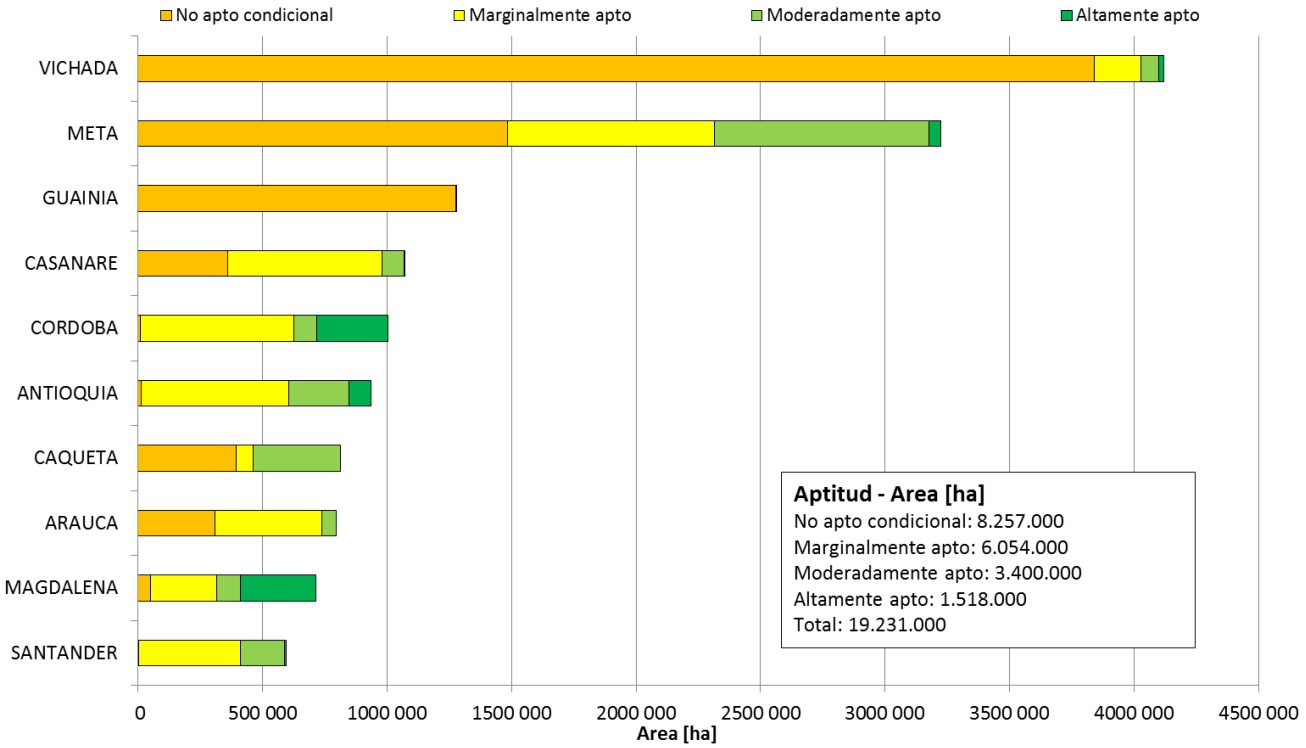



*Figura 73: Área apta para el cultivo de gaña de azúcar para 10 departamentos en Colombia. Áreas de aptitud Alta, moderada, marginal y actualmente no aptas. Fuente: CUE.*

Como se muestra en la Figura 73, especialmente las tierras de baja biomasa del Vichada y Meta presentan áreas con potencial de expansión. Sin embargo, estas áreas son actualmente de difícil accesibilidad y por lo tanto son consideradas actualmente como no aptas. No obstante, mediante la inversión en nueva infraestructura de transporte, las áreas podrían potencialmente ser usadas para cultivo de caña azúcar.

## 7.3 Conclusión

Este estudio demuestra que hay un potencial de expansión considerable tanto para el cultivo de palma de aceite (4.001.000 ha) como de caña de azúcar (4.919.000 ha). Por lo general, las áreas aptas para palma de aceite y caña de azúcar se sobreponen, dado que muchos criterios de exclusión son válidos para ambas materias primas (p.e áreas protegidas o bosques). Sin embargo, las áreas altamente aptas son muy distintas, con una preferencia para la palma de aceite en Caquetá y Meta y una preferencia para la caña de azúcar en Magdalena, Cesár y Córdoba. Asimismo, las áreas en Vichada probaron ser moderadamente aptas para el cultivo de materias primas para biocombustibles, si se mejora significativamente la infraestructura de transporte.

El estudio demostró que las emisiones de GEI causadas por el cambio en el uso de la tierra es un factor clave que determina la aptitud de la tierra para el cultivo de materias primas para biocombustibles. Dependiendo del uso de la tierra que existía previamente, el periodo de compensación de la deudad de carbono debido al cambio en el uso de la tierra cubre hasta varios cientos de años (si se aclaran áreas de bosque húmedo). Esto indica que solo áreas con una reserva de carbono baja, como matorrales de montaña o pastizales son aptas para para el cultivo de materias primas para biocombustibles. El suelo agrícola generalmente no es apto para el cultivo de materias primas para biocombustibles debido a posibles cambios indirectos en el uso de la tierra (o por afectar la seguridad alimentaria). Sin embargo, usar antigüos pastizales también corre el riesgo de causar una presión en ecosistemas naturales por el cambio indirecto en el uso de la tierra (p.e en Caquetá los pastizales están ubicados cerca a los bosques). Tiene que implementarse una sofisticada planeación del uso del suelo y medidas específicas (es decir intensificación del suelo) o evitar la tierra ya usada con el fin de mitigar dichos efectos indirectos.

En su conjunto, este idéntica áreas de enfoque aptas para la potencial expansión de materias primas para biocombustibles a nivel nacional. Los resultados proporcionan una base de conocimiento científico para la planeación estratégica (es decir, planeación del uso de la tierra sostenible) y podrían llamar la atención de la inversión sostenible hacia los biocombustibles. No obstante, se requiere de análisis más detallados basados en mapas con mayor resolución los cuales son actualizados frecuentemente y refinar el conjunto de criterios, con el fin de planear proyectos específicos de biocombustibles.

# 8 Referencias

Amézquita, M., M. Ibrahim, et al. (2004). Carbon Sequestration in Pasture, Agro-pastoral and Silvopastoral Systems in the American Tropical Forest Ecosystem. The importance of Silvopatoral Systems in Rural Livelihoods to Provide Ecosystem Services L. Mannetje, L. Ramírez, M. Ibrahim, N. Sandoval and J. Ojeda. Memoria. Mérida, Yucatán, México.: 303-309.

Anaya, J. A., E. Chuvieco, et al. (2009). Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. Forest Ecology and Management 257(4): 1237-1246.

BAI (1978). Papua New Guinea sugar study. Appendix 1: Land re-sources of the Gusap-Dumpu area. London.

Balasundram, S. K., P. C. Robert, et al. (2006). Relationship between oil palm yield and soil fertility as affected by topography in an Indonesian plantation. Communications in Soil Science and Plant Analysis 37(9-10): 1321-1337.

Batjes, N. H. (2010). IPCC defaul soil classes derived from the Harmonized World Soil Data Base. World Soil Information. Isric.

Benitez, P. A. and J. C. Serna (2004). Deforestación y flujos de carbono en los bosques asociados con ciénagas del Magdalena Medio, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

BIRD (2007). Potencial Agroindustrial Antioqueño - Una mirada general.

Cadavid, B. C., P. Bautista, et al. (2009). Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe

Castillo, A. (1998). Aspectos a tener en cuenta para el desarrollo de un cultivo de palma africana. Revista Palmas.

Cenicaña (2011). personal communication. Florida.

Congreso de Colombia (1959).Ley 2 - Sobre economía forestal de Nación y conservación de recursos naturales renovables.

Chartres, C. J. (1981). Land resources assessment for sugar-cane cultivation in Papua New Guinea. Applied Geography: 259-271.

Corley, R. H. V. and P. B. Tinker (2003). The Oil Palm. Fourth Edition. Blackwell. Oxford.

Corzo, German (2008). Áreas Prioritarias para la Conservación "In Situ" de la Biodiversidad Continental en Colombia. Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales. Obtenido de:
http://www.siac.gov.co/documentos/DOC_Portal/DOC_Siac/310510_Areas_prioritarias_conservacion.pdf.

Cristobal, E. S. L. and J. J. C. Moya (2005). Fijacion de carbono en dos sistemas agricolas del tropico humedo de Costa Rica. Thesis. Universidad EARTH, Costa Rica.

DEL VALLE ARANGO, J. I. and S. A. ORREGO SUAZA (2001). Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa en bosques tropicales de Colombia

Chile, Evento: Simposio Internacional sobre captura de carbono en ecosistemas forestales Ponencia.

DLD (1992). Land Evaluation for Economic Crops Manual. D. o. L. Development.

Dossa, E., E. Fernandes, et al. (2008). Above- and belowground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. Agroforestry Systems 72(2): 103-115.

EC (2008). Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources. Brussels, Commission of the European Communities.

EMBRAPA (2005-2007). Cana-de-açúcar, Pré-produção, Características, Clima. E. B. d. P. A. A. d. Informação.

Fadul, M. I. and E. Bohorquez (2009). Componente Socioeconomico y Cultural en el marco de la construccion del mapa de aptitud de areas para el cultivo de palma de aceite en Colombia. P. d. a. d. S. II. Bogota.

FAO (1981). A framework for land evaluation. Soils bulletin 32. S. printing. Rome.

FAO and IIASA (2006). Mapping biophysical factors that influence agricultural production and rural vulnerability. Environment and Natural Resources Series. No. 11. . Rome.

FAOSTAT (2010). Agriculture Data, Food and Agriculture Organsiation of the United Nations.

Fargione, J., J. Hill, et al. (2008). Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. Science 319(5867): 1235 - 1238.

Fernandez, A. P., L. I. Gomez-Fernandez, et al. (2009). Incorporación de criterios ambientales en la identificación y caracterización de zonas aptas para el cultivo de palma de aceite programa de apoyo al SINA II. IDEAM.

Fromard, F., H. Puig, et al. (1998). Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. Oecologia 115: 39-53.

Germer, J. and J. Sauerborn (2009). Estimation of the impact of oil palm plantation establishment on greenhouse gas balance. Environ Dev Sustain.

Goh, K. J. (2000). Managing Oil Palm for High Yields: Agronomic Principles. M. S. o. S. S. M. P. A. S. Surveys. Malaysia: 1-153.

Hartley, C. W. S. (1988). The Oil Palm (Elaeis guineensis Jacq.), 3rd edition.

Hofstede, R. G. M. and A. J. G. A. Rossenaar (1995). Biomass of grazed, burned and undistributed paramo grasslands Colombia. 2. Root mass and aboveground/belowground ratio. Arctic Alpine Res. 27, 13–18.

Houghton, R. A., K. T. Lawrence, et al. (2001). The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. Global Change Biology 7(7): 731-746.

IDEAM (2005a). Atlas climatológico de Combia. Bogotá.

IDEAM (2005b). Atlas de Radiación Solar de Colombia.

IDEAM (2006). Atlas de Viento y Energia Eólica de Colombia.

IDEAM (2007) Ecosistemas de bosque en las Zonas reserva Forestal de Ley 2 de 1959 con base de datos de IGAC.

IDEAM (2009a). Documento final del Componente ecologico en el marco de la construcción del mapa de aptitud de areas aptas para cultivo de palma de aceite en Colombia. German Arturo Corzo Mora, Katherine Arcila-Burgos, Carlos Sarmiento Pinzon. IDEAM. Bogota, Colombia.

IDEAM (2009b). Incorporación de criterios ambientales en la identificación y caracterización de zonas aptas para el cultivo de palma de aceite programa de apoyo al SINA II. A.P. Fernandez, L.I. Gomez-Fernandez, J.Y.B. Escobar. IDEAM.

IDEAM (2009c). Componente Socioeconomico y Cultural en el marco de la construccion del mapa de aptitud de areas para el cultivo de palma de aceite en Colombia. P. d. a. d. S. II. BogotaIDEAM (2010). Estudio nacional del agua. Bogotá.

IDEAM (2010). Estudio Nacional del agua. Bogotá.

IGAC (2003). Estudio general de suelo de Colombia escala 1:500.000. Codazzi.

IGAC (2005). Vías terrestres.

IGAC. (2010). "Resguardos indigenas y titulos colectivos de comunidades negras."

IGAC and CORPOICA (2002). Cobertura y Uso Actual de las Tierras de Colombia. Subdirección de Agrología, IGAC. Subdirección de Investigación en Sistemas de Producción, CORPOICA. Bogotá, D. C. Volumen 2. 87 p, Subdirección de Investigación en Sistemas de Producción, CORPOICA.

IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Agriculture, Forestry and Other Land Use. Volume 4.

IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 Agriculture Forestry and Other Land Uses. Available from http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html.

Kuppatawuttinan, P. (1998). A model of Land Suitability Evaluation for Economic Crops in Song Kram Watershed: An Application using Satellite Data and Geographic Information System., Khon Kaen University. Master of Science Thesis in Soil Science.

Lubis, A. and R. Adiwiganda (1996). Agronomic management practices of oil palm plantation in Indonesia based on land conditions. ISOPA/IOPRI Seminar on Agronomic Update in Oil Palm Management., Indonesia, International Society for Oil Palm Agronomist (ISOPA) and Indonesian Oil Palm Research Institute (IOPRI).

Macedo, I. C. (2010). Sustainable Biofuels: recent studies on land use and climate change. Sugarcane expansion and sustainability: land use, GHG emissions and technology. Tokyo, Nov 19 2010.

MARD (2009). Política Nacional de Biocombustibles.

Monreal, C. M., J. D. Etchevers, et al. (2005). A method for measuring above- and below-ground C stocks in hillside landscapes. Canadian Journal of Soil Science 85(Special Issue): 523-530.

Mora, G. G. C., K. Arcila-Burgos, et al. (2009). Incorporación de criterios ambientales en la identificación y caracterización de zonas aptas para el cultivo de palma de aceite programa de apoyo al SINA II - Componente ecologico. IDEAM.

MT (2000). Vias fluviales.

Mutert, E. (1999). Suitability of Soils for Oil Palm in Southeast Asia. Better Crops International 13(1).

Netafim (2008). Clima favorável à produção de cana-de-açúcar.

NETAFIM (2011). Agriculture - Sugar cane.

Ogunkunle, A. O. (1993). Soil in land suitability evaluation: an example with oil palm in Nigeria. Soil use and management 9(1).

Paiboonsak, S., U. Chanket, et al. (2004). Land suitability evaluation for sugarcane: GIS application. Khon Kaen University. C. o. Geo-informatics. Thailand.

Pedroni, L. and B. Locatelli (2010). Non-permanence, carbon accounting and project scale. First Brazilian Symposium on Carbon Sequestration in Agricultural and Forest Systems. Londrina (PR, Brazil) 21-24 October, 2003.

Pfister, S., A. Koehler, et al. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. Environmental science and technology 43(11).

Quiñones, M. (2002). Polarimetric Data for Tropical Forest Monitoring. Studies at the Colombian Amazon, Wageningen University, Wageningen.

Ramsay, P. and E. Oxley (2001). An assessment of aboveground net primary productivity in Andean grasslands of Central Ecuador. Mt Res Dev 21:161–7.

Rios Alvarado, J., J. Bastos da Veiga, et al. (2008). Quantificação do carbono em sistemas de uso-da-terra no distrito de José Crespo e Castillo, Peru. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal.

Rippstein, G., E. G., et al. (2001). Agroecología y Biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia, CIAT no. 322, 302 pp.

San José, J. J. and R. A. Montes (2007). Resource apportionment and net primary production across the Orinoco savanna-woodland continuum, Venezuela. Acta Oecologica 32(2): 243-253.

Sánchez, B., H. Luis, et al. (2005). Masa total y contenido de nutrientes en raices finas de ecosistemas forestales (Pinus patula Schltdl y Cham Cupressus lusitanica Mill y Quercus humboldtii Bonpl.) de Piedras Blancas, Antioquia-Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín, vol. 58, núm. 2, julio-diciembre, pp. 2907-2929, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

Santos, B. F. and C. M. Ruiz (1999). Los matorrales: formaciones de gran interés ecológico y para la economía humana. Cuestiones de biología : aportaciones riojanas / coord. por Emilio Cervantes, ISBN 84-89362-50-5 , págs. 213-22.

Sierra, C. A., J. I. del Valle, et al. (2007). Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia,.

Simard, M., V. H. Rivera-Monroy, et al. (2008). A systematic method for 3D mapping of mangrove forests based on Shuttle Radar Topography Mission elevation data, ICEsat/GLAS waveforms and field data: Application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. Remote Sensing of Environment 112(5): 2131-2144.

Smith, J. M. B. and L. F. Klinger (1985). Aboveground : belowground phytomass ratios in Venezuelan páramo vegetation and their significance. Arctic and Alpine Research 17:189–198.

Smith, J. P., R. J. Lawn, et al. (1999 ). Investigations into the root:shoot relationship of sugarcane, and some implications for crop productivity in the presence of sub-optimal soil conditions. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol. 21 (1999), pp. 108–113.

Syahrinudin (2005). The potential of oil palm and forest plantations for carbon sequestration on degraded land in Indonesia. Ecology and Development Series No. 28. Obtenido de: http://www.zef.de/fileadmin/webfiles/downloads/zefc_ecology_development/ecol_dev_28_text.pdf.

Sys, C. (1985). Land mahation. International Training Centre for Postgraduate Soil Scientists. State University of Ghent-Parts 1. Ghent.

UAESPNN. (2008). "Parques Nacionales Naturales de Colombia " Bogota, from http://www.parquesnacionales.gov.co.

USGS. (1996). "GTOPO 30 Arc Second Elevation data." from http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info.

Vaast, P. (2005). Sustainability of Coffee Agroforestry Systems in Central America; coffee quality and environmental impacts (CASCA) CIRAD.

Zemek, O. J. (2009). Biomass and carbon stocks inventory of perennial vegetation in the Chieng Khoi watershed, NW Vietnam. M.Sc. Thesis, University of Hohenheim, Department for Agroecology and Plant Production in the Tropics and Subtropics.

# 9 Anexos

## 9.1 Tipologías de uso del suelo y sus reservas de carbono de la biomasa

### Bosques naturales (Bn)

**Definición:** *Corresponde a la cobertura de bosque natural donde se ha realizado aprovechamiento selectivo de las especies y que, en su interior, se han establecido pastos y/ o agricultura de subsistencia, evidenciadas como áreas regulares inmersas en la delineación.*

Los suelos clasificados como bosque natural hacen referencia a tierras altamente dominadas por cobertura de árboles natural. Esta incluye un agregado de bosque primario y secundario. Para la contabilidad de carbono forestal (como de costumbre), los bosques secundarios se convierten en bosques maduros, si no son interrumpidos por perturbaciones frecuentes o talas (por ejemplo plantaciones). Las directrices del IPCC proyectan el siguiente esquema de reservas de carbono para bosques desarrollados sujetos a algún manejo (por ejemplo tala selectiva).

*Tabla 21: Inventarios de biomasa y suelos forestales del IPCC, por zonas vegetales. Los valores en paréntesis representan rangos.*

| Tipo de Vegetación: BOSQUE (América) | Selva húmeda tropical | Bosque Húmedo Caducifolia | Sistemas montañosos tropicales | Referencia |
|---|---|---|---|---|
| Biomasa sobre el suelo (Toneladas Materia Seca / ha) | 300 (120 – 400) | 220 (210 – 280) | 145 (60 – 230) | IPCC (2006) Tabla 4.7 |
| Relación Tallo/Raíz | 0.37 | 0.24 (0.22 – 0.33) | 0.27 (0.27 – 0.28) | IPCC (2006) Tabla 4.4 |
| Biomasa bajo suelo (Toneladas Materia Seca / ha) | 111 (44 – 148) | 53 (46 – 92.4) | 39 (16 – 64) | Calculado como AGB dividido por RS_R |

Estudios de bosques tropicales maduras completamente desarrolladas en Colombia Central (Houghton, Lawrence et al. 2001; Benitez and Serna 2004) reportan un Valor AGB de 250 toneladas de materia seca (m.s.) por ha. Valores más altos de biomasa, en el rango entre 290 a 340 toneladas de AGB (Biomasa superficial) de m.s. por ha, han sido reportados en la selva humeda tropical del Amazo-

nas de Colombia (Houghton, Lawrence et al. 2001; Quiñones 2002). En promedio estas observaciones concuerdan con los valores sugeridos por las directrices del IPCC para selvas húmedas Tropicales (300 toneladas de AGB de m.s. por ha). Se supone una RS_R (relación raíz-tallo) de 0.37, como está definido en las directrices del IPCC.

Los sistemas tropicales de montaña, como han sido definidos de manera simplista por las zonas vegetales de la FAO, cubren áreas de un poco más de 1000 msnm. Sierra et al. (Sierra, del Valle et al. 2007) reporta 248 toneladas de ABG m.s. (incluyendo 20 toneladas de liana y palmas) y 83 toneladas de BGB (Biomasa debajo del suelo) m.s. para bosques maduros en el rango de elevación de 900 – 1500 msnm. Este es el rango más alto de los valores AGB por defecto del IPCC en sistemas montañosos tropicales (60 – 230 toneladas de m.s. por ha). La RS_R medida en este estudio es de 0.33, lo que corresponde con un valor RS_R intermedio entre bosque tropical (0.37) y sistema tropical montañoso (0.27), como se supone en las indicaciones del IPCC. Una AGB igual a 145 toneladas de m.s. por ha y una RS_R 9 igual a 0.27 (valores por defecto del IPCC) son aceptables. Los autores sugieren que la reducción en la productividad y acumulación de biomasa en sistemas tropicales montañosos deberían estar por encima de 1500 msnm.

Los Bosques húmedos tropicales caducifolias en Colombia tienen pocas mediciones de biomasa. Houghton (Houghton, Lawrence et al. 2001) observó valores de AGB entre 140 (en regiones secas, cerca de la costa Caribe y Venezuela) a 290 toneladas m.s. por ha (en la cuenca del amazonas). Una AGB de 220 toneladas de m.s. por ha y una RS_R igual as 0.24 son aceptables para estos bosques húmedos tropicales caducifolios de Colombia como lo sugiere el IPCC.

Al parecer, en el momento de contabilizar todos los componentes AGB y BGB (incluyendo liana, palmas, pero también raíces finas), las directrices del IPCC subestiman el 10-20% de la biomasa real de Colombia.

### Bosque natural fragmentado (Bi)

**Definición:** *Corresponde a la cobertura de bosque natural donde se ha realizado aprovechamiento selectivo de las especies y que, en su interior, se han establecido pastos y/ o agricultura de subsistencia, evidenciadas como áreas regulares inmersas en la delineación.*

El Valor de biomasa en este campo varía considerablemente de acuerdo a la intensidad de despeje del bosque. Si suponemos un promedio de despeje de 40% de biomasa de bosque para abrir espacio para pastoreo o tierra de cultivo, la biomasa se puede evaluar como 0.4 veces la biomasa de un bosque

completamente desarrollado (BN – Bosque natural) y de acuerdo a las zonas vegetales. El Bosque natural fragmentado en bosques secos tropicales tiene una extensión muy limitada (8km$^2$) y son considerados marginales (y similares en biomasa) al bosque natural fragmentado de sistemas de bosque húmedo tropical caducifolio.

## Bosque plantado (Bp)

**Definición:** *Comprende coberturas que han sido plantadas especialmente con especies exóticas, como pino, ciprés y eucalipto, entre otras, las cuales pueden tener un uso de tipo comercial o de reforestación con fines proteccionistas.*

Las plantaciones de árboles (principalmente *pinus patula* y *cupressus lusitanica* en Colombia) están localizadas en su mayoría en el sistema tropical montañoso. Se ha calculado su AGB en madurez (40 años) como 300 toneladas de m.s. por ha para *pinus patula* y 200 toneladas para *cupressus lusitanica* (Sánchez, Luis et al. 2005). La AGB promedio de una plantación se supone como la mitad del valor máximo de AGB, alcanzado al final del período de rotación (es decir, considerando un incremento linear en biomasa). Por esto, la AGB estimada para este estudio es de 125 toneladas m.s. por ha.

La RS_R de plantaciones de *pinus* se estima comunmente como 0.25.

## Matorrales / Arbustos naturales y /o inducidos (Ma)

**Definición:** *Cobertura con vegetación arbustiva y herbácea que puede ser natural o resultado de tala de bosques y abandono de campos de cultivo o pastos. En esta denominación se incluyen principalmente los matorrales naturales y, en menor proporción, los rastrojos o barbechos altos.*

Los *Matorrales* pueden contener hasta 20-30 toneladas de m.s. por ha en AGB (Santos y Ruiz 1999). Estos valores son similares en bosques secundarios en las etapas jóvenes y poco desarrolladas en Colombia (11 – 30 toneladas de AGB m.s. por ha (Anaya, Chuvieco et al. 2009)), a los que los *matorrales* pueden corresponder. En este estudio suponemos un promedio de AGB de 20 toneladas m.s. por ha para zonas vegetales de baja producción (tropical y sistemas montañosos) y 30 toneladas para zonas vegetales de alta producción (Selva húmeda tropical and bosque húmedo caducifolio).

La RS_R se asume como 0.33, similar a la evaluada para bosques secundarios de Colombia (DEL VALLE ARANGO y ORREGO SUAZA 2001).

## Vegetación de sabana herbácea (Sl)

**Definición:** *Cobertura de vegetación natural compuesta principalmente por gramíneas, ciperáceas y otras herbáceas localizadas principalmente en la parte centro occidental de la Orinoquia.*

La productividad de los sistemas de sabana ha sido estudiada en los Llanos Orientales de Colombia, por Rippstein et al. (Rippstein, G. et al. 2001), donde es más importante la presencia de *sabana herbácea (Sl)* y *sabana harbolada (Sa)*. Rippstein et al. Reportan las siguientes conclusiones:

- Producción herbácea varía entre 2 y 4 toneladas de material seca por año.
- Estos valores varían de acuerdo a las condiciones geo-morfológicas y del suelo (2.3 en suelos arenosos y 3.7 en suelos arcillosos, 3.8 en llanos, 2.6 en laderas y 2.2 en cimas de montaña
- La BGB se puede cuantificar en un promedio de 1.5 veces la AGB.

En sistemas herbáceos en bosques húmedos caducifolios bajo el manejo extensivo de pastos para consumo animal, la AGB promedio se puede asumir como igual a la productividad anual de pasto.

El valor AGB de 3 toneladas de m.s. por ha y BGB de 4.5 toneladas de m.s. por ha (es decir, RS_R= 1.5) para este uso del suelo.

## Vegetación de sabana arbolada (Sa)

**Definición:** *Cobertura de vegetación natural compuesta principalmente por gramíneas y otras herbáceas con árboles y arbustos en forma diseminada o en rodales y con bosques de galería. Se localiza especialmente hacia el sur de la Orinoquia.*

En la *sabana arbolada* en su mayoría ubicada en los Llanos Orientales de Colombia que continúan hacia los Llanos de Venezuela, la rara presencia arbustiva se ve influenciada y limitada por los pastizales y regímenes de incendios. El trabajo de San José et al. (San José y Montes) en las zonas de pastizales de los Llanos ha medido la cubierta de AGB y BGB de pastos y arboles luego de excluir el pastoreo y los incendios. Una sabana quemada con cubierta dominantemente de pastos y unos cuantos árboles esparcidos contiene una AGB de 2.3 toneladas de m.s. y una BGB de 1.7 toneladas m.s. Ocho años luego de quemada, los sistemas de sabana contienen 7.8% cubierta leñosa; AGB de 3.2 toneladas de m.s. y BGB de 2 toneladas m.s. 16 años luego de quemada, los sistemas de sabana contienen 15,5% cubierta leñosa; AGB de 5.2 toneladas de m.s. y BGB de 2.3 toneladas m.s. La vegetación observada y tendencia de la biomasa indican que, luego de 25 años de protección de incendios y pastoreo, la sabana cambia a vegetación leñosa que es similar a las zonas de bosque semi

caducifolia que se encuentran en las sabanas. Los sistemas de sabana luego de 25 años de incendios, contienen una cubierta leñosa del 22.3%, AGB de 7.8 toneladas de m.s. y BGB de 2.7 toneladas m.s.

La biomasa en *sabana arbolada* se asume como un promedio de lo medido luego de 8 a 16 años de protección a incendios (~11% cubierta leñosa). Una AGB promedio de 5 toneladas m.s. por ha y la BGB puede suponerse como 3 toneladas m.s. por ha (RS_R = 0.6).

### Vegetación de sabana arbustiva (Sb)

**Definición:** *Cobertura de vegetación natural con características similares al Sabana, pero con mayor densidad de especies arbustivas en toda el área delimitada. Se localiza particularmente al nororiente de la Amazonia (departamento de Guainía) y suroriente de la Orinoquia.*

La mayoría de estos suelos están ubicados en las selvas humedas tropicales, donde el bosque maduro contiene 20% más biomasa que en el bosque caducifolio. La sabana, recuperándose de incendios luego de 25 años, alcanza una cubierta leñosa de 22.3% (parches de árboles semi_caducifolia), cerca de 98 toneladas de m.s. de AGB y 3 toneladas de m.s. de BGB (San José y Montes).

Estas observaciones en bosques húmedos caducifolios se pueden adaptar a sistemas de selva húmeda tropical, incrementando el valor de biomasa en un 35%. La AGB se asume como 11 toneladas de m.s. por ha y la BGB como 4 (RS_R = 0.36).

### Vegetación xerofítica (Xe)

**Definición:** *Cobertura cuya vegetación presenta una fisonomía predominantemente arbustiva, con vegetación de cactáceas, leguminosas caducifolias y otras especies adaptadas a zonas muy secas, secas y áridas.*

No existe literatura disponible sobre la biomasa de estos sistemas. Sin embargo, podemos asumir que en estos terrenos existe una estructura de vegetación arbustiva similar a la de *sabana arbustiva) (Sb),* que se recupera luego de 25 años de un evento de incendio que crea una vegetación arbustiva uniforme. La *vegetación xerofítica* presente en un bosque tropical seco y en un matorral tropical es demasiado seca para permitir una consistente presencia herbácea. Por esto, la AGB en esta región es equivalente a la AGB de la *sabana arbustiva* (esto es 8 toneladas m.s. por ha en sistemas de selva húmeda tropical/caducifolia/montañosos y 5 toneladas en matorrales/sistemas secos) excluyendo el AGB del componente herbáceo (esto es 3 toneladas de m.s. por ha).

La RS_R se conserva como en la *sabana arbustiva (esto es 0.36).* Las plantas más suculentas en los matorrales secos tropicales pueden tener pequeñas biomasas de raíces, lo cual es compensado por bio-

masas más altos de raíces para alcanzar aguas subterráneas más profundas de los matorrales no-suculentos.

## Vegetación de páramo (Vp)

**Definición:** *Cobertura cuya vegetación natural es propia de pisos térmicos muy fríos y extremadamente fríos, en donde abundan los frailejones, pajonales, gramíneas y otras herbáceas y arbustivas.*

Este tipo de vegetación es conocida por tener una biomasa muy limitada, tanto por estar a grandes altitudes (3200-4000 msnm) como por haber sufrido gran degradación antropogénica. Sin embargo, los *páramos* colombianos son reconocidos entre los páramos de los Andes por tener una productividad y biomasa alta. Colombia tiene grandes extensiones de *páramos húmedos* bajo cierta cantidad de pastoreo y agricultura subsistente de papás. Los *Páramos secos* y *superáramos* asociados son marginales en extensión y existen en áreas más secas y altas.

La biomasa total de vegetación de tierra de pastos viva y muerta de un páramo en la cordillera central Colombiana mostró una disminución en la AGB de 28 toneladas de m.s. por ha (en sitios no perturbados) a 8 toneladas de m.s. por ha (en sitios altamente pastoreados y quemados) (Hofstede and Rossenaar 1995). En este estudio, ochenta por ciento del total de la biomasa fija de vegetación no perturbada consistía en material muerto y residuos. La biomasa fija en los *páramos* en Ecuador Central se estima en 7.94 toneladas por ha a 4000 m y 8.37 toneladas por ha a 3750m (Ramsay and Oxley 2001). Las evaluaciones de campo de un *páramo* bajo pastoreo en la cordillera central de Colombia muestran una BGB de 12 toneladas m.s. por ha (Hofstede and Rossenaar 1995). La RS_R de los *páramos* en Venezuela va de 1 a 1.4 dependiendo de la intensidad del pastoreo (Smith and Klinger 1985).

Para la vegetación de páramo, asumiendo la presencia de pastoreo y agricultura subsistente (por ejemplo papa), estimamos una AGB promedio de 8 toneladas por ha y una RS_R igual a 1.

## Vegetación de manglar (Vm)

**Definición:** *Se refiere a las áreas ocupadas por comunidades vegetales con características fisonómicas y florísticas homogéneas, localizadas en zonas costeras en donde se combinan factores como suelos salinos, mezcla de aguas continentales con aguas marinas especialmente en el litoral Pacífico y algunos sectores del Atlántico.*

Mediciones hechas en manglares de la Guyana Francesa muestran alta variabilidad de AGB: 30-70 toneladas de m.s. por ha en etapas pionera y joven, 180-300 en manglares maduros costeros, 120-190 en manglares rivereños y 140 en manglares senescentes/ muertos (Fromard, Puig et al. 1998).

Estimaciones en manglares del Caribe Colombiano revelan AGB moderados (Simard, Rivera-Monroy et al. 2008), ya sea por no estar completamente desarrollados pero también menos aptos para almacenamiento de biomasa que en otros lugares (ejemplo Guyana Francesa). Para una estimación conservadora, asumamos que los manglares tienen 180 toneladas de m.s. por ha, en casos normales en los cuales los manglares se desarrollan hasta ser sistemas maduros.

Considerando las 3 especies de árbol de manglar principales en el Caribe Colombiano, (avicennia germinans, laguncularia racemosa, rhizophora mangle), se estimó una biomasa promedio de 40% en los troncos, 33% en las raíces, 15% en las ramas y 13% en las hojas (Cadavid, Bautista et al. 2009). Esta estimación es equivalente a una RS_R de 0.5 en manglar.

### Vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe)

**Definición:** *Cobertura compuesta por especias rupícolas y arbustivas desarrolladas en forma dispersa sobre afloramientos rocosos de diversa petrografía.*

Esta requiere una estimación muy subjetiva por lo cual no existe literatura disponible. Sin embargo, esta unidad de tierra presenta una presencia escasa de vegetación arbustiva y no herbácea. Esta se puede asumir como un promedio de AGB de 1 tonelada de m.s. por ha, la cual es equivalente a la presencia de 30 árboles o arbustos pequeños por ha, cada uno con un AGB individual de 30kg de m.s. El contenido de BGB es también extremadamente limitado por suelos superficiales y rocosos. La RS_R se asume como de 0.1.

### Pastos naturales y/o naturalizados (Pn)

**Definición:** *Cobertura que presenta vegetación natural o introducida compuesta por gramíneas y leguminosas en la que se observa algún tipo de manejo agronómico, especialmente la división de potreros y cercas. Los pastos naturalizados son especies de gramíneas foráneas que se adaptaron plenamente a una región determinada y su comportamiento es parecido al de los pastos naturales.*

Un estudio muy informativo (Amézquita, Ibrahim et al. 2004) describe las AGB y BGB de pastos colombianos naturales y mejorados en un gradiente de elevación y precipitación ubicado en bosques y sistemas montañosos tropicales.

Las observaciones sobre el carbono estratificado de pastizales en este estudio se indican:

- La regeneración natural de pastizales semi-degradados en bosques tropicales (elevaciones de más de 1000 msnm y precipitación anual de 3000mm) tienen un promedio de AGB de 2.6 – 3.8 toneladas m.s. por ha y BGB de 6.8 – 7.2 toneladas de m.s. por ha.

- La regeneración natural de pastizales semi-degradados en sistemas montañosos (elevaciones de más de 1000 msnm y precipitación anual de 2000mm) tienen un promedio de AGB de 1.5 toneladas m.s. por ha y BGB de 6 – 8 toneladas de m.s. por ha.

Por lo tanto, los *pastos naturales y/o naturalizados*, se asumen como semi-degradados y con manejo agronómico limitado se clasifican con una AGB de 3.2 toneladas de m.s. por ha en bosque tropical y 1.5 en sistemas montañosos y 3 en bosques húmedos caducifolios (similares a los sistemas de *sabana herbácea*). Pastizales en bosques secos tropicales tienen una extensión muy limitada y son considerados como marginales (y similares en biomasa) comparados con los sistemas de bosque húmedo caducifolia. La BGB se considera como 7 toneladas de m.s. por ha en selvas húmedos tropicales (esto es RS_R = 2.2), 6 en sistemas montañosos (esto es RS_R = 4) y 4.5 en sistemas de bosque húmedo caducifolio (esto es RS_R = 1.5).

### Pastos naturales y /o naturalizados con árboles y arbustos (Pa)

**Definición:** *Cobertura similar a la anterior pero con árboles y /o arbustos diseminados en la superficie analizada, que no pueden ser separados cartográficamente a niveles o en estudios detallados.*

El supuesto más probable en esta tipología del uso del suelo, es que una cobertura leñosa adicional del 10% es añadida a los pastos naturales mono estratificado (Pn). La cobertura leñosa se tomaría como bosque secundario de 30 -50 años con una biomasa equivalente a un tercio de bosque maduro en la misma zona vegetal. Por lo tanto, *pastos naturales y/o naturalizados con árboles y arbustos* son clasificados con una AGB de 13.2 toneladas de m.s. por ha en sistemas de bosques tropicales, 6.4 en sistemas montañosos y 10 en sistemas húmedos caducifolios. La tierra de pastoreo en las bosque secos tiene un alcance muy limitado (y similar) a los sistemas de bosques húmedos caducifolios. BGB se toma como 11 toneladas de m.s. por ha en selvas húmedas tropicales (ej RS_R = 0.8) 7.5 en sistemas montañosos (ej. RS_R = 1.1) y 6.5 en sistemas caducifolios (RS_R = 0.6)

### Pastos introducidos manejados (Pm)

**Definición:** *Cobertura densa de pastos, en donde se evidencian prácticas agronómicas más intensivas de manejo que en los pastos naturales.*

Las siguientes mediciones de biomasa en pastizales colombianos manejados y mejorados (Amézquita, Ibrahim et al. 2004):

- Regeneración con pastizales de tierras de pastoreo favorecidos agrícolamente en sistemas de selvas húmedas tropicales (en elevaciones menores a 1000 msnm y una precipitación mayor a 3000 mm) contiene un promedio de AGB de 2.6 – 6 toneladas m.s. por ha y BGB de 13 – 15 toneladas de m.s. por ha.
- Regeneración con pastizales de tierras de pastoreo favorecidos agrícolamente en sistemas montañosos (en elevaciones mayores a 1000 msnm y una precipitación menor a 2000 mm) contiene un promedio de AGB de 1.5 – 2 toneladas m.s. por ha y BGB de 12 toneladas de m.s. por ha.

Por lo tanto, los *pastos introducidos manejados* (teniendo un manejo agrícola intensivo) se clasifican con una AGB de 4.4 toneladas de m.s. por ha en sistemas de selvas húmedas tropicales, 1.8 en sistemas montañosos y 3 en sistemas húmedos caducifolia (similar a los sistemas de sabana herbácea) Las tierras de pastoreo en los bosques secos tienen un alcance muy limitado y se considera como marginal (y similar) a pastales de sistemas húmedos caducifolios. La BGB se toma como 14 toneladas de m.s. por ha en sistemas de selva tropical (ej. RS_R) y 4.5 en sistemas húmedos caducifolios (RS_R = 1.5)

## Asociación de pastos, rastrojos, relictos de bosque y cultivos (Ap)

**Definición:** *Asociación de coberturas donde se presenta la mezcla de vegetación de diferentes tipos biológicos, predominantemente de pastos con relictos de bosque y rastrojos que no pueden ser separados a la escala del estudio, pero que a escalas más detalladas con mayor reconocimiento de campo pueden ser diferenciadas. Esta categoría incluye cultivos de subsistencia en muy baja proporción.*

El supuesto más probable para esta tipología de uso del suelo, es que una cobertura leñosa adicional de 50% es añadida para pastos naturales mono estratificados y semi degradados. La cobertura leñosa se puede asumir como bosques secundarios de 30 a 50 años con una biomasa equivalente a un tercio de bosque maduro un el misma zona vegetal.

Por lo tanto la *asociación de pastos, rastrojos, relictos de bosque y cultivos* se clasifica con una AGB de 50 toneladas de m.s. por ha en sistemas de selvas húmedas tropicales, 25 en sistemas montañosos y 40 en sistemas húmedos caducifolios. La *Asociación de pastos, rastrojos, relictos de bosque y cultivos* en bosques secos y los matorrales tienen un alcance muy limitado y se consideran como marginales (y similares en biomasa) a los sistemas de bosques húmedos caducifolios. La BGB se considera como tener 25 ton de m.s. por ha en sistemas de selva húmeda tropical y 13.3 en el sistema húmedo caducifolio (RS_R +0.33)

## Cultivos transitorios (Cu)

**Definición:** *Bajo esta denominación se considera la cobertura vegetal compuesta principalmente por cultivos con especies de plantas que completan su ciclo de vida en los 12 meses después de la germinación y que requieren ser sembrados nuevamente, pudiéndose obtener una o dos cosechas al año.*

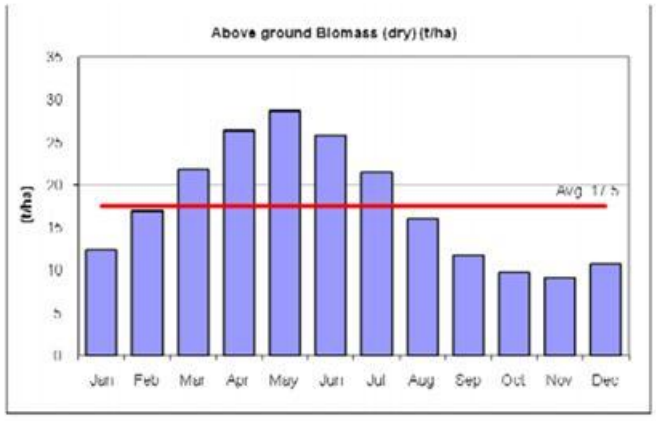
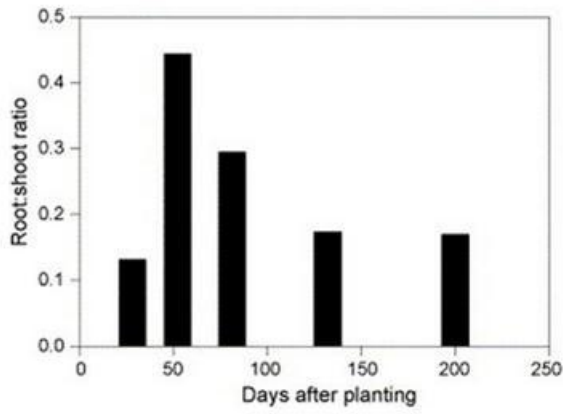
La mayoría de los cultivos transitorios están localizados dentro del área húmeda caducifolia. Las mediciones de campo de las parcelas agrícolas (Monreal, Etchevers et al. 2005) reportan una AGB de 3 - 5 toneladas de m.s. por ha. Esto incluye la biomasa de los residuos de cultivos anuales (maíz y frijoles) y biomasa de hierba que se desarrollaron después que el cultivo anual ha sido cosechado. La mayoría del rendimiento se presenta en un periodo muy corto de tiempo en la tierra antes de ser cultivada y por la tanto no se incluye. Monreal también reporto (Monreal, Etchevers et al. 2005) una BGB que varía de 0.5 a 2 toneladas por m.s. por ha. Por lo tanto los cultivos transitorios se asumen con una AGB de 4 toneladas m.s. por ha y una RS_R de 0.25.

## Cultivos semipermanentes (Cs-Cñ, Cs-Cña y Cs-Ba)

**Definición:** *Cobertura con cultivos de especies que no requieren ser sembradas semestral o anualmente y cuyo ciclo de vida, desde la germinación hasta la fructificación, se completa en dos años. El tiempo de permanencia en el campo supera generalmente los 2 años.*

## Agricultura de la caña para azúcar y derivados; Agricultura de la caña panelera (Cs-Cñ, Cs-Cña)

El desarrollo de planta AGB, simulado (Modelo CS) para la caña de azúcar en Brasil varia de 28.7 toneladas por ha (Mayo: comienzo de la estación de cosecha) a 9.1 toneladas por ha (Noviembre: final de la cosecha) con un promedio de 17.5 toneladas por ha (Macedo 2010). "Smith (Smith, Lawn et al. 1999 ) midieron las relaciones raíz-tallo para la caña de azúcar sembrada en maceta y se encontró que las plantas decayeron después de llegar a un valor pico de 0.42 kg $kg^{-1}$ a ~50 días de edad". (Macedo 2010). Luego la AGB promedio se asume como 17.5 toneladas de m.s. por ha mientras que el promedio de la RS_R es asumido como 0.25

| | |
|---|---|
|  |  |
| *Figura: Desarrollos de planta de Biomasa encima del suelo simulados (modelo CS) de caña de azúcar en Brasil.* | *Figura: "RS_R (en una base de peso seco) de Caña de azúcar sembrada en maceta (c.v. Q96) (re-drawn from Smith, 1998)" (Macedo 2010)* |

## Plantaciones de banano y plátano para exportación principalmente (Cs-Ba)

Extrañamente, no encontramos mucha literatura útil describiendo la biomasa de las plantaciones de banano o plátano. Las plantas de banano son plantas herbáceas húmedas, conteniendo una biomasa inferior que la de los cultivos leñosos. Algunas medidas directas para las plantaciones de banano ((Musa ssp.: basjoo y paradisiaca) está disponible para Vietnam (Zemek), el cual describe una biomasa total de 10 toneladas de m.s. por ha, con un 10% adicional que es subterráneo. Algunas otras observaciones de Costa Rica reportan un total de AGB y de BGB de 6 toneladas de C por ha (Cristobal y Moya 2005). En este sistema de uso de la tierra, AGB se define como 10 toneladas de m.s. por ha, mientas que la relación raíz-tallo es igual a 0.1.

## Cultivos permanentes (Cp-Cf, Cp-Ca and Cp-Fr)

**Definición:** *Se incluye en esta cobertura, cultivos de especies con ciclo de vida generalmente mayor de dos años, pudiendo fructificar anualmente y con tiempo de permanencia en el campo que puede llegar a los 30 años.*

## Agricultura del café (Cp-Cf)

Resultados del proyecto CASCA en América Central muestran que la biomasa en los sistemas de café puro varían de 5-16 t C $ha^{-1,}$ donde el café que está asociado a arboles de sombra varia de 5-100 t C $ha^{-1}$ dependiendo en las especies y la edad (Vaast 2005). Pedroni y Locatelli (Peroni y Locatelli 2010) resumieron los resultados del proyecto CASCA y evaluaron unos valores promedio de la biomasa de

los sistemas cafeteros en Latino América: La AGB del café es 5.9 toneladas de C por ha; AGB del cafe sombreado es de 20.7 toneladas de C por ha.

Por lo tanto se definió la AGB como 12.5 toneladas por m.s. por hectárea en plantaciones de café mono estratificado y de 45 toneladas de ms.s. por ha en café sombreado. El ultimo valor es representativo de *agricultura del café asociada con plátano, cana, frutales, pastos y relictos de bosque*. Dossa et al. (Dossa, Fernandes et al. 2008) Con una relación raíz-tallo de 0.6 para la utilización de la agricultura de café.

### Plantaciones de frutales - cacaotales, cítricos, viñedos, caducifolios y otros (Cp-Fr)

Esta tipología de uso del suelo, es muy limitada en extensión en Colombia (130 $km^2$) y está mayormente concentrada en sistemas montañosos tropicales. Alvarado et al. (Rios Alvarado, Bastos da Veiga et al. 2008) Identificó en *floresta muito úmida pré-montanha tropical* de Perú la AGB de *cítricos* (14-15 tonelada de m.s. por ha) y *cacaotero* (10 toneladas de m.s. por ha). La BGB de estas plantaciones tiene una RS_R equivalente a 0.2. Para este sistema de uso del suelo, se asumió un AGB de 12.5 toneladas de m.s. por hectáreas.

### Asociaciones de cultivos con pastos, rastrojos, matorrales y relictos de bosque (Ac and Af)

**Definición:** Se refiere a coberturas que contienen una mezcla de diferentes tipos de vegetación donde los cultivos se asocian con pastos, rastrojos y relictos de bosques. Cartográficamente no separables individualmente aunque a escalas mayores es posible que puedan ser diferenciados. Esta cobertura es típica de los sectores minifundistas del país.

Comparado con el mosaico de sistemas de pastizales naturales (Ap), el mosaico de sistemas agrícolas tiende a limitar más incisivamente la vegetación leñosa para facilitar la agricultura. De otro lado, reduce la biomasa de sistemas herbáceos, dejando el mosaico de pastizales más enriquecidos que el mosaico agrícola de biomasa de vegetación leñosa. La biomasa leñosa se reduce a medida que los ecosistemas pasan de selvas húmedas tropicales a bosques húmedos caducifolia y más allá en bosques secos. Sin embargo, la tierra de cultivo y sus mosaicos reciben cuidado agrícola que afecta menos su biomasa debido a las limitaciones del eco clima. La AGB mas la BGB de la tierra de pastoreo fue previamente simulada variando de 75 toneladas de m.s. por hectárea (selva humeda tropical) a 53 (bosque húmedo caducifolio y seco) y 37.5 (sistemas montañosos). Por el contrario, los mosaicos de tierra de cultivo se consideran como más homogénea del cambio de las condiciones vegetales.

Biomasa en pastizales puros (ABG + BGB≈ 10) es definitivamente más pequeño que los cultivos semi-permanentes. (ABG + BGB ≈ 11 para banano y 20 para café) pero más alto en los cultivos anuales (ABG + BGB≈ 5).

### Agricultura tradicional con especies como fríjol, maíz, yuca y otros, en mezcla con otras coberturas (Ac)

El ABG más la BGB de este mosaico de tierra de cultivo se estima homogéneamente a través de las condiciones climaticas como 4 toneladas menos (diferencia de biomasa entre pastizales y sistemas de cultivos anuales) que la biomasa promedio del mosaico de las tierras de pastoreo. (p.e 53-4=49 toneladas de m.s. por ha)

### Agricultura del café asociada con plátano, cana, frutales, pastos y relictos de bosque (Af)

El ABG más la BGB de este mosaico de tierras de cultivo semipermanente se estima de manera homogénea a través de las condiciones climáticas de hasta 4 toneladas mas (diferencia de biomasa entre cultivos leñosos y pastizales) que la biomasa promedio del mosaico de pastoreo (p.e. 53+4=57 toneladas de m.s. por hectárea) AGB se asume como 40.5 toneladas de m.s. por hectárea y RS_R de 0.4 (AGB mas BGB es igual a 57 toneladas de m.s. por ha)

### Cuerpos de agua y zonas pantanosas (Ari, Ag and 52)

**Definición:** *Esta unidad incluye las zonas cubiertas por agua continental, bien sea de origen natural o inducidas por el hombre, representadas por lagos, lagunas, embalses, represas y aguas corrientes o ríos, como también áreas con vegetación herbácea y arbustiva propia de pantanos y ciénagas.*

Estas áreas no fueron conclusas y su biomasa no se pudo clasificar de manera adecuada debido a que son sistemas acuíferos. La mayoría del agua abierta y riachuelos no contienen biomasa, algunos niveles significativos pueden ser observados marginalmente pero con una alta dependencia en la variabilidad micro topográfica. Los sistemas de humedales pueden ser considerados como no significativos para el propósito de este proyecto y se le dio la clasificación de No Aplicable, N.A. (código numérico = 9999)

## Eriales (Em)

**Definición:** *Bajo esta denominación se incluyen las zonas que se caracterizan por tener escasa cobertura vegetal o no poseerla; se destacan los misceláneos erosionados, afloramientos rocosos, mantos de arena (playas y dunas) y suelos degradadas por diferentes causas.*

El supuesto más conservador que se puede hacer de este uso del suelo, es que tienen una estructura de biomasa similar como *vegetación herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos (Pe)*. Por lo tanto AGB es igual a 1 tonelada de m.s. por ha y la RS_R a 0.1.

## Nieves permanentes (Np)

**Definición:** *Cobertura de nieve permanente localizada a altitudes superiores de 4.600 msnm asociada a las zonas de glaciales de los Andes colombianos.*

*Nieves permanentes*, o glaciares con una cobertura nevosa permanente que contienen generalmente bajos contenidos de biomasa y se puede considerar como no significativo para el propósito de este proyecto y se le dio la clasificación de No Aplicable, N.A. (código numérico = 9999)

## Construcciones (Zu)

**Definición:** *Cobertura que incluye las construcciones de las grandes y medianas ciudades, separables a la escala de estudio.*

*Construcciones* o infraestructuras que contienen generalmente bajos contenidos de biomasa y se puede considerar como no significativo para el propósito de este proyecto y se le dio la clasificación de No Aplicable, N.A. (código numérico = 9999

## Tabla de carbono de la biomasa para uso de la tierra actuales

Una tabla de Excel asociada (result.xls) integra para cada Zona de Carbono (única combinación existente de uso del suelo y zona vegetal) estima la biomasa de materia seca del suelo (Figura 31) y una relación raíz-tallo para calcular el carbono en biomasa total.

Estos estimativos están asociados por una tabla de búsqueda para la red de zonas de carbono de Colombia, reportando espacialmente biomasa de materia seca de la tierra, RS_R y el carbono en biomasa como diferentes atributos de la red.

*Tabla 22: Biomasa superficial (AGB) diferente para cada zona de carbono medida como toneladas de material seca por hectárea que fue clasificado como no significativo para el propósito de este proyecto y se le dio la clasificación de No Aplicable, N.A. (código numérico = 9999)*

| Domain | Classe Cobertura | SubTipo Cobertura | Tipo Cobertura | Uso Predominante | Tropical rainforest | Tropical shrubland | Tropical dry forest | Tropical moist deciduous forest | Tropical mountain system |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bn | VEGETAL NATURAL Y SEMINATURAL | Bosques | Bosques Naturales | Reservas forestales; parques nacionales naturales; resguardos y territorios indigenas y de comunidad negras | 300.0 | - | - | 220.0 | 145.0 |
| Bi | | | Bosques Naturales Fragmentados | Extraccion selectiva de flora y fauna; cultivos y pastos en areas de bosques en transicion a potreros | 150.0 | - | 110.0 | 110.0 | 72.5 |
| Ma | | Matorrales | Arbustos Naturales y/o Inducidos | Extraccion selectiva de productos como lena, fibras y frutos; usos silvopastoriles y tierras en descanso | 30.0 | 20.0 | - | 30.0 | 20.0 |
| Sl | | Otros tipos de vegetacion | Vegetacion de Sabana Herbacea | Pastoreo extensivo y muy extensivo | 3.0 | - | - | 3.0 | 3.0 |
| Sa | | | Vegetacion de Sabana Arbolada | Pastoreo extensivo y muy extensivo | 5.0 | - | - | 5.0 | 5.0 |
| Sb | | | Vegetacion de Sabana Arbustiva | Extraccion esporadica de fauna y flora y pastoreo muy extensivo | 11.0 | - | - | - | - |
| Xe | | | Vegetacion Xerofitica | Pastoreo seminomada; extraccion de especies para usos artesanales y ecoturismo | 8.0 | 5.0 | 5.0 | 8.0 | 8.0 |
| Vp | | | Vegetacion de Paramo | Parques Nacionales Naturales, areas protegidas; pastoreo de ganado ovino y bovino y cultivo de papa en sectores | - | - | - | - | 8.0 |
| Vm | | | Vegetacion de Manglar | Aprovechamiento selectivo de fauna y flora; areas protegida | 180.0 | 180.0 | 180.0 | 180.0 | - |
| Pe | | | Vegetacion Herbacea muy rala sobre afloramientos rocosos | Ecoturismo en areas de Parques Nacionales Naturales. | 1.0 | - | - | 1.0 | - |
| Pn | VEGETAL CULTURAL | Pastos | Pastos naturales y/o naturalizados | Pastoreo extensivo | 3.2 | - | 3.0 | 3.0 | 1.5 |
| Pa | | | Pastos naturales y/o naturalizados con arboles y arbustos | Pastoreo extensivo y semiintensivo | 13.2 | - | 10.0 | 10.0 | 6.5 |
| Pm | | | Pastos Introducidos manejados | Pastoreo semiintensivo e intensivo | 4.4 | - | 3.0 | 3.0 | 1.8 |
| Ap | | | Asociacion de pastos, rastrojos, matorrales y relictos de bosques | Pastoreo extensivo y recoleccion de madera, fibras y frutos para uso domestico | 50.0 | 40.0 | 40.0 | 40.0 | 25.0 |

| Domain | Classe Cobertura | SubTipo Cobertura | Tipo Cobertura | Uso Predominante | Tropical rainforest | Tropical shrubland | Tropical dry forest | Tropical moist deciduous forest | Tropical mountain system |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cu | VEGETAL CULTURAL | Cultivos | Transitorios | Agricultura intensiva con especies anuales como arroz, algodon, sorgo, maíz, frijol, papa | 4.0 | - | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| Cs-Cña | | | Semipermanentes | Agricultura de la cana para azucar y derivados | 17.5 | - | - | 17.5 | 17.5 |
| Cs-Cñ | | | Semipermanentes | Agricultura de la cana panelera | 17.5 | - | - | 17.5 | 17.5 |
| Cs-Ba | | | Semipermanentes | Plantaciones de banano y platano para exportacion principalmente | 10.0 | - | - | 10.0 | - |
| Cp-Cf | | | Permanentes | Agricultura del cafe | 12.5 | - | - | 12.5 | 12.5 |
| Cp-Pa | | | Permanentes | Plantaciones de palma africana | 93.0 | - | - | 93.0 | - |
| Cp-Fr | | | Permanentes | Plantaciones de frutales (cacaotales, citricos, vinedos, caducifolios y otros) | - | - | - | - | 12.5 |
| Ac | | Cultivos asociados | Asociacion de cultivos con rastrojos, relictos de bosques | Agricultura tradicional con especies como frijol, maíz, yuca y otros, en mezcla con otras coberturas | 35.0 | - | 35.0 | 35.0 | 35.0 |
| Af | | | Asociacion de cultivos con rastrojos, relictos de bosques | Agricultura del cafe asociada con platano, cana, frutales, pastos y relictos de bosque | 40.5 | - | - | 40.5 | 40.5 |
| Bp | | Bosques | Bosques Plantados | Plantaciones forestales para produccion de madera, proteccion y recuperacion de suelos | 125.0 | - | - | 125.0 | 125.0 |
| 52 | CUERPOS DE AGUA | Pantanos y Cienagas | Pantanos y Cienagas | Pantanos y Cienagas | -9,999 | - | - | -9,999 | -9,999 |
| ARI | CUERPOS DE AGUA Y ZONAS PANTANOS | Naturales Artificiales Continentales | Lagos, Lagunas, Embalses, Represas, Rios y Quebradas | Generacion de energia; pesca artesanal y comercial; consumo domestico industrial y agricola; transpo | -9,999 | - | -9,999 | -9,999 | -9,999 |
| Ag | | Naturales Continentales | Pantanos y Cienagas | Extracción selectiva de fauna y flora; pesca artesanal; pastoreo extensivo temporalmente; ecoturismo | -9,999 | -9,999 | -9,999 | -9,999 | -9,999 |
| Em | ERIALES | Rocas Expuestas | Miscelaneo erosionado, afloramientos rocosos, mantos de arena y tierras degradas | Extraccion de materiales para construccion y artesania; turismo y pastoreo muy extensivo | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Np | NIEVES PERMANENTES | | | Parques Nacionales Naturales, areas protegidas; ecoturismo e investigacion. | - | - | - | - | -9,999 |

*Tabla 23: Tallo / raíz definida para cada Zona de Carbono. No Aplica (NA, código numérico = -9999) Los valores son definidos cuando los estimativos no son relevantes para los propósitos del proyecto.*

| Domain | Classe Cobertura | SubTipo Cobertura | Tipo Cobertura | Uso Predominante | Tropical rainforest | Tropical shrubland | Tropical dry forest | Tropical moist deciduous forest | Tropical mountain system |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bn | VEGETAL NATURAL Y SEMINATURAL | Bosques | Bosques Naturales | Reservas forestales; parques nacionales naturales; resguardos y territorios indigenas y de comunidad negras | 0.37 | - | - | 0.24 | 0.27 |
| Bi | | | Bosques Naturales Fragmentados | Extraccion selectiva de flora y fauna; cultivos y pastos en areas de bosques en transicion a potreros | 0.37 | - | 0.28 | 0.24 | 0.27 |
| Ma | | Matorrales | Arbustos Naturales y/o Inducidos | Extraccion selectiva de productos como lena, fibras y frutos; usos silvopastoriles y tierras en descanso | 0.33 | 0.33 | - | 0.33 | 0.33 |
| Sl | | Otros tipos de vegetacion | Vegetacion de Sabana Herbacea | Pastoreo extensivo y muy extensivo | 1.50 | - | - | 1.50 | 1.50 |
| Sa | | | Vegetacion de Sabana Arbolada | Pastoreo extensivo y muy extensivo | 0.60 | - | - | 0.60 | 0.60 |
| Sb | | | Vegetacion de Sabana Arbustiva | Extraccion esporadica de fauna y flora y pastoreo muy extensivo | 0.36 | - | - | - | - |
| Xe | | | Vegetacion Xerofitica | Pastoreo seminomada; extraccion de especies para usos artesanales y ecoturismo | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.36 |
| Vp | | | Vegetacion de Paramo | Parques Nacionales Naturales, areas protegidas; pastoreo de ganado ovino y bovino y cultivo de papa en sectores | - | - | - | - | 1.00 |
| Vm | | | Vegetacion de Manglar | Aprovechamiento selectivo de fauna y flora; areas protegida | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | - |
| Pe | | | Vegetacion Herbacea muy rala sobre afloramientos rocosos | Ecoturismo en areas de Parques Nacionales Naturales. | 0.10 | - | - | 0.10 | - |
| Pn | VEGETAL CULTURAL | Pastos | Pastos naturales y/o naturalizados | Pastoreo extensivo | 2.20 | - | 1.50 | 1.50 | 4.00 |
| Pa | | | Pastos naturales y/o naturalizados con arboles y arbustos | Pastoreo extensivo y semiintensivo | 0.80 | - | 0.60 | 0.60 | 1.10 |
| Pm | | | Pastos Introducidos manejados | Pastoreo semiintensivo e intensivo | 3.00 | - | 1.50 | 1.50 | 6.00 |
| Ap | | | Asociacion de pastos, rastrojos, matorrales y relictos de bosques | Pastoreo extensivo y recoleccion de madera, fibras y frutos para uso domestico | 0.50 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.50 |

| Domain | Classe Cobertura | SubTipo Cobertura | Tipo Cobertura | Uso Predominante | Tropical rainforest | Tropical shrubland | Tropical dry forest | Tropical moist deciduous forest | Tropical mountain system |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cu | VEGETAL CULTURAL | Cultivos | Transitorios | Agricultura intensiva con especies anuales como arroz, algodon, sorgo, maiz, frijol, papa | 0.25 | - | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Cs-Cña | | | Semipermanentes | Agricultura de la cana para azucar y derivados | 0.25 | - | - | 0.25 | 0.25 |
| Cs-Cñ | | | Semipermanentes | Agricultura de la cana panelera | 0.25 | - | - | 0.25 | 0.25 |
| Cs-Ba | | | Semipermanentes | Plantaciones de banano y platano para exportacion principalmente | 0.10 | - | - | 0.10 | - |
| Cp-Cf | | | Permanentes | Agricultura del cafe | 0.60 | - | - | 0.60 | 0.60 |
| Cp-Pa | | | Permanentes | Plantaciones de palma africana | 0.30 | - | - | 0.30 | - |
| Cp-Fr | | | Permanentes | Plantaciones de frutales (cacaotales, citricos, vinedos, caducifolios y otros) | - | - | - | - | 0.20 |
| Ac | | Cultivos asociados | Asociacion de cultivos con rastrojos, relictos de bosques | Agricultura tradicional con especies como frijol, maiz, yuca y otros, en mezcla con otras coberturas | 0.40 | - | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| Af | | | Asociacion de cultivos con rastrojos, relictos de bosques | Agricultura del cafe asociada con platano, cana, frutales, pastos y relictos de bosque | 0.40 | - | - | 0.40 | 0.40 |
| Bp | | Bosques | Bosques Plantados | Plantaciones forestales para produccion de madera, proteccion y recuperacion de suelos | 0.25 | - | - | 0.25 | 0.25 |
| S2 | CUERPOS DE AGUA | Pantanos y Cienagas | Pantanos y Cienagas | Pantanos y Cienagas | -9,999 | - | - | -9,999 | -9,999 |
| ARI | CUERPOS DE AGUA Y ZONAS PANTANOS | Naturales Artificiales Continentales | Lagos, Lagunas, Embalses, Represas, Rios y Quebradas | Generacion de energia; pesca artesanal y comercial; consumo domestico industrial y agricola; transpo | -9,999 | - | -9,999 | -9,999 | -9,999 |
| Ag | | Naturales Continentales | Pantanos y Cienagas | Extracción selectiva de fauna y flora; pesca artesanal; pastoreo extensivo temporalmente; ecoturismo | -9,999 | -9,999 | -9,999 | -9,999 | -9,999 |
| Em | ERIALES | Rocas Expuestas | Miscelaneo erosionado, afloramientos rocosos, mantos de arena y tierras degradas | Extraccion de materiales para construccion y artesania; turismo y pastoreo muy extensivo | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Np | NIEVES PERMANENTES | | | Parques Nacionales Naturales, areas protegidas; ecoturismo e investigacion. | - | - | - | - | -9,999 |

*Tabla 24: Biomasa encima del suelo (AGB) más Biomasa debajo del suelo (BGB), medida como Toneladas de Carbono por ha, es calculada para cada zona de carbono. No Aplica (NA, código numérico = -9999) Los valores son definidos cuando los estimativos no son relevantes para los propósitos del proyecto.*

| Domain | Classe Cobertura | SubTipo Cobertura | Tipo Cobertura | Uso Predominante | Tropical rainforest | Tropical shrubland | Tropical dry forest | Tropical moist deciduous forest | Tropical mountain system |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bn | VEGETAL NATURAL Y SEMINATURAL | Bosques | Bosques Naturales | Reservas forestales; parques nacionales naturales; resguardos y territorios indigenas y de comunidad negras | 193.2 | - | - | 128.2 | 86.6 |
| Bi | | | Bosques Naturales Fragmentados | Extraccion selectiva de flora y fauna; cultivos y pastos en areas de bosques en transicion a potreros | 96.6 | - | 66.2 | 64.1 | 43.3 |
| Ma | | Matorrales | Arbustos Naturales y/o Inducidos | Extraccion selectiva de productos como lena, fibras y frutos; usos silvopastoriles y tierras en descanso | 18.8 | 12.5 | - | 18.8 | 12.5 |
| Sl | | Otros tipos de vegetacion | Vegetacion de Sabana Herbacea | Pastoreo extensivo y muy extensivo | 3.5 | - | - | 3.5 | 3.5 |
| Sa | | | Vegetacion de Sabana Arbolada | Pastoreo extensivo y muy extensivo | 3.8 | - | - | 3.8 | 3.8 |
| Sb | | | Vegetacion de Sabana Arbustiva | Extraccion esporadica de fauna y flora y pastoreo muy extensivo | 7.0 | - | - | - | - |
| Xe | | | Vegetacion Xerofitica | Pastoreo seminomada; extraccion de especies para usos artesanales y ecoturismo | 5.1 | 3.2 | 3.2 | 5.1 | 5.1 |
| Vp | | | Vegetacion de Paramo | Parques Nacionales Naturales, areas protegidas; pastoreo de ganado ovino y bovino y cultivo de papa en sectores | - | - | - | - | 7.5 |
| Vm | | | Vegetacion de Manglar | Aprovechamiento selectivo de fauna y flora; areas protegida | 126.9 | 126.9 | 126.9 | 126.9 | - |
| Pe | | | Vegetacion Herbacea muy rala sobre afloramientos rocosos | Ecoturismo en areas de Parques Nacionales Naturales. | 0.5 | - | - | 0.5 | - |
| Pn | VEGETAL CULTURAL | Pastos | Pastos naturales y/o naturalizados | Pastoreo extensivo | 4.8 | - | 3.5 | 3.5 | 3.5 |
| Pa | | | Pastos naturales y/o naturalizados con arboles y arbustos | Pastoreo extensivo y semiintensivo | 11.2 | - | 7.5 | 7.5 | 6.4 |
| Pm | | | Pastos Introducidos manejados | Pastoreo semiintensivo e intensivo | 8.3 | - | 3.5 | 3.5 | 5.9 |
| Ap | | | Asociacion de pastos, rastrojos, matorrales y relictos de bosques | Pastoreo extensivo y recoleccion de madera, fibras y frutos para uso domestico | 35.3 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 17.6 |

| Domain | Classe Cobertura | SubTipo Cobertura | Tipo Cobertura | Uso Predominante | Tropical rainforest | Tropical shrubland | Tropical dry forest | Tropical moist deciduous forest | Tropical mountain system |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cu | VEGETAL CULTURAL | Cultivos | Transitorios | Agricultura intensiva con especies anuales como arroz, algodon, sorgo, maíz, frijol, papa | 2.4 | - | 2.4 | 2.4 | 2.4 |
| Cs-CÑa | | | Semipermanentes | Agricultura de la cana para azucar y derivados | 10.3 | - | - | 10.3 | 10.3 |
| Cs-CÑ | | | Semipermanentes | Agricultura de la cana panelera | 10.3 | - | - | 10.3 | 10.3 |
| Cs-Ba | | | Semipermanentes | Plantaciones de banano y platano para exportacion principalmente | 5.2 | - | - | 5.2 | - |
| Cp-Cf | | | Permanentes | Agricultura del cafe | 9.4 | - | - | 9.4 | 9.4 |
| Cp-Pa | | | Permanentes | Plantaciones de palma africana | 56.8 | - | - | 56.8 | - |
| Cp-Fr | | | Permanentes | Plantaciones de frutales (cacaotales, citricos, vinedos, caducifolios y otros) | - | - | - | - | 7.1 |
| Ac | | Cultivos asociados | Asociacion de cultivos con rastrojos, relictos de bosques | Agricultura tradicional con especies como frijol, maíz, yuca y otros, en mezcla con otras coberturas | 23.0 | - | 23.0 | 23.0 | 23.0 |
| Af | | | Asociacion de cultivos con rastrojos, relictos de bosques | Agricultura del cafe asociada con platano, cana, frutales, pastos y relictos de bosque | 26.6 | - | - | 26.6 | 26.6 |
| Bp | | Bosques | Bosques Plantados | Plantaciones forestales para produccion de madera, proteccion y recuperacion de suelos | 73.4 | - | - | 73.4 | 73.4 |
| 52 | CUERPOS DE AGUA | Pantanos y Cienagas | Pantanos y Cienagas | Pantanos y Cienagas | -9,999 | - | - | -9,999 | -9,999 |
| ARI | CUERPOS DE AGUA Y ZONAS PANTANOS | Naturales Artificiales Continentales | Lagos, Lagunas, Embalses, Represas, Rios y Quebradas | Generacion de energia; pesca artesanal y comercial; consumo domestico industrial y agricola; transpo | -9,999 | - | -9,999 | -9,999 | -9,999 |
| Ag | | Naturales Continentales | Pantanos y Cienagas | Extracción selectiva de fauna y flora; pesca artesanal; pastoreo extensivo temporalmente; ecoturismo | -9,999 | -9,999 | -9,999 | -9,999 | -9,999 |
| Em | ERIALES | Rocas Expuestas | Miscelaneo erosionado, afloramientos rocosos, mantos de arena y tierras degradas | Extraccion de materiales para construccion y artesania; turismo y pastoreo muy extensivo | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Np | NIEVES PERMANENTES | | | Parques Nacionales Naturales, areas protegidas; ecoturismo e investigacion. | - | - | - | - | -9,999 |

## 9.2 Mapa de vegetación potencial natural

La mayoría de los usos del suelo en Colombia están o pueden potencialmente evolucionar a bosques naturales, donde su carbono de la biomasa simplemente reflejaría las condiciones de las zonas vegetales.

*Tabla 25: Características de la biomasa de vegetación potencial conocida como bosques naturales.*

| Zona vegetales | Biomasa encima del suelo (Toneladas de dm $ha^{-1}$) | Tallo / raíz tasa | Biomasa Total (Toneladas de C $ha^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| **Bosque Tropical** | **300.0** | **0.37** | **193.2** |
| **Bosque húmedo caducifolia** | **220.0** | **0.24** | **128.2** |
| **Bosque tropical seco** | **210.0** | **0.28** | **126.3** |
| **Matorral tropical** | **80.0** | **0.40** | **52.6** |
| **Sistema montañoso tropical** | **145.0** | **0.27** | **86.6** |

Otros usos del suelo en Colombia incluyen limitaciones antropogénicas que restringen la vegetación potencial a la cobertura del suelo en vez de evolucionar a bosques naturales.

La distribución espacial de la biomasa potencial del ecosistema se asocia con las zonas vegetales y tipologías del usos del suelo pueden 1) potencialmente evolucionar a bosques naturales o ya son bosques naturales o, 2) Mantener las características de biomasa existente debido a las limitaciones antropogénicas y medioambientales.

*Tabla 26: Características de la biomasa de vegetación potencial fuera de bosques naturales. Los valores No Aplica (NA, código numérico = -9999) se definen cuando los estimativos no son factibles y no son relevantes para el proyecto.*

| Tipo Cobertura | Zona Vegetal | Biomasa encima del suelo (Toneladas of dm $ha^{-1}$) | Tallo / raíz tasa | Biomasa total (Toneladas de C $ha^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| **Vegetación Xerofítica** | **Matorral tropical y bosques secos** | **5.0** | **0.36** | **3.2** |
| **Vegetación Xerofítica** | **Bosque húmedo caducifolia** | **8.0** | **0.36** | **5.1** |
| **Vegetación de Matorral** | **Sistema montañoso tropical** | **8.0** | **1.00** | **7.5** |
| **Vegetación de Manglar** | **Todos** | **180.0** | **0.50** | **126.9** |
| **Eriales y Vegetación Herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos** | **Bosque Tropical y Pluvial** | **1.0** | **0.10** | **0.5** |
| **Cuerpos de Agua, Pantanos, Nieves permanentes y Construcciones** | **Todos** | **-9999** | **-9999** | **-9999** |

Del total de la superficie total de Colombia 1,140,000 km$^2$:

- ~ 480,000 km$^2$ (42% de la superficie total) están ocupados actualmente por *bosques naturales*
- ~ 590,000 km$^2$ (52% de la superficie total) están ocupados actualmente por tierras que tienen el potencial de volverse *bosques naturales*-

  ~ 72,000 km$^2$ (6% la superficie total) están ocupadas actualmente tipologías de uso del suelo (Vegetación Xerofítica, Matorral, Manglar, Eriales y Vegetación Herbácea muy rala sobre afloramientos rocosos) que incurren en las limitaciones medioambientales manteniendo la biomasa del ecosistema a sus niveles existentes.

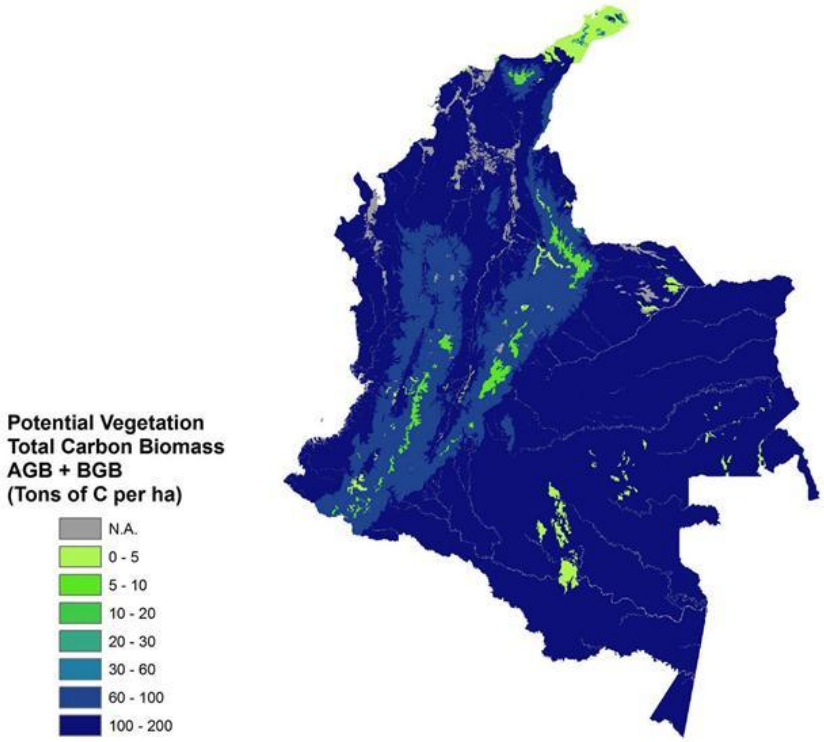



*Figura 74: Total de Carbono en la Biomasa (Toneladas de C per hectárea) de zonas potenciales de acuerdo a zonas vegetales.*