

**Universidad Andina Simón Bolívar**

**Sede Ecuador**

**Área de Ambiente y Sustentabilidad**

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

**Crecimiento, producción y captura de carbono aéreo, de *Centrolobium ochroxylum* Rose ex Rudd en sistemas silvopastoriles, Costa baja del Ecuador**

Mayra Elizabeth Ayala Cifuentes

Tutor: Santiago Patricio Bonilla Bedoya

Quito, 2023





## Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Mayra Elizabeth Ayala Cifuentes, autora de la tesis intitulada “Crecimiento, producción y captura de carbono aéreo, de *Centrolobium ochroxylum* Rose ex Rudd en sistemas silvopastoriles, Costa Baja del Ecuador”, mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 36 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

30 de septiembre de 2023

Firma: \_\_\_\_\_



## Resumen

*Centrolobium ochroxylum* Rose ex Rudd, es una especie nativa de buenas características maderables, brinda algunos servicios ambientales y es empleada para formar cercos vivos en sistemas silvopastoriles. Lamentablemente, en el Ecuador se conoce muy poco sobre esta especie. Por tal motivo la presente investigación tiene como objetivos: Identificar el modelo que mejor se ajuste para describir el crecimiento en altura y diámetro. Estimar el aporte de carbono del tronco, ramas y hojas y aplicar modelos alométricos para establecer el potencial en captura de carbono. Se dispone de una base de datos de 415 sitios distribuidos en siete provincias de la costa baja del Ecuador. Se probaron tres funciones de índice de sitio (IS), diámetro y volumen. Además, se dispone de una base de datos de 195 árboles para establecer el volumen total. Se contó con la proporción de follaje, ramas y biomasa del tronco del peso por clase de DAP en sistemas silvopastoriles. Obteniéndose los siguientes resultados: La función Hossfel para altura y diámetro presentó los valores más cercanos a los valores ideales. La variante de las funciones propuestas por Bukard (1977), representada por la Ec. 5 fue la que mejor describe el volumen total del árbol. Para los mejores sitios para el crecimiento del *Centrolobium ochroxylum* se espera una captura de 232 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a los 30 años (7,7 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). A razón de U\$D 40 por Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> se esperaría obtener un total de U\$D 8.320 por hectárea, generando un flujo de dinero anual de U\$D 309 por año. Mientras que en los sitios menos favorables se espera una captura de 118 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a los 30 años (3,9 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), por venta de Carbono se obtendría un total de U\$D 4.720 por hectárea o un flujo de U\$D 157 por año. Se obtuvo un conjunto de ecuaciones alométricas que permiten establecer el potencial en captura de carbono del *Centrolobium ochroxylum*. Al añadir a la altura como un predictor de las ecuaciones alométricas se obtuvo una mejora significativa en los ajustes para estimar la biomasa del *Centrolobium ochroxylum* en siete provincias de la costa baja del Ecuador.

Palabras clave: *Centrolobium ochroxylum*; Cercos vivos; Sistemas silvopastoriles; Índice de sitio; Diámetro; Ecuación alométrica



A mi familia, por su apoyo incondicional y su infinito amor.





## **Agradecimientos**

A Dios por darme sabiduría y fortaleza para cumplir con este sueño, a mis padres por su entero apoyo, y a mi hijo por ser mi mayor motivación en este proceso.

A Álvaro Cañadas López, PhD., docente de la Universidad Central del Ecuador, Carrera en Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, director del proyecto sobre especies nativas dentro del bosque seco de la costa baja del Ecuador y Director de la Estación Experimental Portoviejo del INIAP, quien ha sido guía importante en la ejecución de este proceso. Le estaré eternamente agradecida.



## Tabla de contenidos

Figuras y Tablas.....	13
Abreviaturas.....	16
Introducción.....	18
Capítulo primero: Enfoque y Marco Teórico .....	23
1. Rol de los sistemas silvopastoriles .....	23
1.1. Realidad socioeconómica de los sistemas silvopastoriles.....	25
1.2. Características de <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	27
1.3. Ganadería hacia una neutralidad climática .....	30
2. Dasonometría.....	32
2.1. Índice de sitio .....	32
2.2. Cálculo de volúmenes .....	34
2.3. Ciclo de rotación biológico de corta forestal .....	36
3. Modelación forestal .....	37
3.1. Modelos matemáticos.....	38
3.2. Modelos no lineales.....	39
3.3. Modelos alométricos.....	40
Capítulo segundo: Área de estudio y metodología.....	44
1. Área de estudio .....	44
2. Antecedentes metodológicos .....	45
3. Metodología.....	47
3.1. Selección del modelo que permita describir el crecimiento <i>Centrolobium ochroxylum</i> . .....	47
3.1.1. Función índice de sitio .....	47
3.1.2. Función diámetro a la altura del pecho (DAP).....	48
3.1.3. Función volumen.....	48
3.1.4. Validación de modelos.....	49
3.2. Estimación del aporte de carbono del tronco, ramas y hojas de <i>Centrolobium ochroxylum</i> para determinar la biomasa.....	50
3.3. Aplicación de modelos alométricos para establecer el potencial de captura de carbono de <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	51

Capítulo tercero: Análisis de resultados y discusión .....	53
1. Análisis de resultados .....	53
1.1. Identificación del modelo de <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	53
1.1.1. Índice de Sitio y validación de modelo para <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	53
1.1.2. Diámetro y validación de modelo para <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	54
1.1.3. Volumen y validación de modelo para <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	56
1.2. Estimación del aporte de carbono del tronco, ramas y hoja de <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	56
1.3. Aplicación de modelos alométricos de <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	59
2. Discusión .....	60
2.1. Identificación del modelo para <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	60
2.1.1. Altura .....	60
2.1.2. Diámetro .....	62
2.1.3. Volumen .....	63
2.2. Estimación del aporte de carbono <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	63
2.3. Aplicación de modelos alométricos para <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	65
2.4. Potenciales y limitaciones de la captura de carbono por parte de <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	66
Conclusiones y Recomendaciones .....	69
Conclusiones .....	69
Recomendaciones .....	70
Obras citadas .....	72

## Figuras y Tablas

Figura 1. Diagrama de la anatomía de <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	29
Figura 2. Pagina Web de la UICN para <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	29
Figura 3. Subdivisión de un tronco en secciones para estimar el volumen de un árbol. .	34
Figura 4. Área de estudio.....	44
Figura 5. Relación edad altura total para el <i>Centrolobium ochroxylum</i> (a). Representación de la altura total máxima para la edad de 10 años (b). .....	54
Figura 6. Relación edad diámetro a la altura pecho para el <i>Centrolobium ochroxylum</i> . .	55
Figura 7. Proporción de follaje, ramas y biomasa del tronco del peso fresco por clase de DAP en sistemas silvopastoriles en la costa baja del Ecuador. ....	58
Figura 8. Relación de la captura de Carbón en la biomasa del <i>Centrolobium ochroxylum</i> en Mg CO <sub>2</sub> ha <sup>-1</sup> y el transcurso en edad del sistema silvopastoriles en años, por índice de sitio en siete provincias del Ecuador.....	58
Figura 9. Modelos alométricos y su coeficiente de regresión. ....	59
Tabla 1. Características agroecológicas de las provincias investigadas con relación al <i>Centrolobium ochroxylum</i> .....	45
Tabla 2. Cinco criterios para la evaluación del ajuste de un modelo. MRES mide las BIAS, los cuatro criterios restantes indican la precisión de un modelo ( $y$ = valores observados; $y'$ = valores predichos; $(y - y')$ = sesgo; $p$ = número de parámetros del modelo). ....	50
Tabla 3. Criterios para la evaluación de la función de Índice Sitio para el <i>Centrolobium ochroxylum</i> , en siete provincias de la costa baja del Ecuador. ....	53
Tabla 4. Criterios para la evaluación de la función DAP de <i>Centrolobium ochroxylum</i> , en 5 provincias de la costa baja del Ecuador. ....	55
Tabla 5. Criterios para la evaluación de la función de volumen para el <i>Centrolobium ochroxylum</i> , en 7 provincias de la costa baja del Ecuador. ....	56
Tabla 6. Coeficientes de regresión estimados mediante el modelo alométrico y la incorporación de la altura como variable predictora de la captura de carbón para el índice de sitio 18 m en sistemas silvopastoriles de siete provincias de la costa baja del Ecuador .....	59





## Abreviaturas

C	Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
DAP	Diámetro a la altura del pecho
EETP	Estación Experimental Tropical Pichilingue (INIAP)
EE.UU.	Estados Unidos de Norte América
FAO	Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación
GADA	Enfoque de Diferencia Algebraica Generalizada
GEI	Gases de efecto invernadero
GWP	Potencial de calentamiento global
ht	Altura total del árbol
INIAP	Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias
IS	Índice de sitio
KfW	Banco Alemán de Reconstrucción
MAE	Ministerio Ecuatoriano del Ambiente
MAGAP	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca
Mg ha <sup>-1</sup>	Cantidad de carbono en megagramos (o toneladas métricas) por hectárea.
MCPFE	Conferencia Ministerial sobre la Protección de los Bosques en Europa
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PROFORESTAL	Programa de Incentivos Forestales del Ecuador



SPS	Sistemas Silvopastoriles
REDD	Reducción de emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques
ULEAM	Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí
UTN	Universidad Técnica del Norte
UTM	Unidad Transversal de Mercator

## Introducción

La Asamblea General de las Naciones Unidas estableció los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en el 2015 para alcanzarlos al 2030, el objetivo 17 incluye metas relacionadas con la restauración y la reforestación (por ejemplo, 15,1-15,3) (Naciones Unidas 2019a). Por otro lado, en el Acuerdo de París se estableció durante la COP21 de 2015 la restauración, la reforestación y otras iniciativas para restringir el calentamiento global a 1,5-2,0 °C o menos (CMNUCC 2018). Así mismo, para el 2019, la Asamblea de las Naciones Unidas declaró 2021-2030 Decenio de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas con el fin de fomentar el aumento de la restauración, la reforestación en todo el mundo y acelerar los objetivos mundiales de restauración y reforestación existentes a nivel mundial (Naciones Unidas 2019b).

La bibliografía publicada sobre restauración forestal incluye estudios que demuestran cómo la plantación de especies nativas puede restaurar las funciones del ecosistema, conservar la diversidad biológica y diversificar los productos forestales en paisajes degradados (por ejemplo, McNamara et al. 2006). En ellos se enfatizaron que el paso más crítico en este tipo de plantaciones es seleccionar las especies autóctonas adecuadas. Sin embargo, la información ecológica necesaria para seleccionar especies apropiadas y adaptadas a las condiciones locales es limitada en muchos lugares, sobre todo en los países en desarrollo (Cañadas 2005; Cañadas et al., 2018a; Cañadas et al. 2019; Nunes et al. 2020; Jensen et al. 2021; MacKenzie et al. 2021; Cañadas et al. 2023a; Cañadas et al. 2023b). Esta falta de datos sobre especies nativas ha restringido el éxito de los programas de restauración y reforestación. Para subsanar esta carencia de conocimientos, urge investigar el potencial de diversas especies arbóreas autóctonas. (Lu et al. 2017).

Un reflejo de esta problemática se mostró en el Ecuador, al conducir el Programa de Incentivos Forestales del Ecuador (PROFORESTAL), ejecutado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), donde se registró un total de 48.533 ha de plantaciones forestales con las siguientes especies: Teca (*Tectona grandis* L.), 19.602 ha; Melina (*Gmelina arborea* Roxb.), 10.467 ha; Balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb.), 8.518 ha; Pino (*Pinus radiata*), 4.733 ha; y otras especies, en las 5.213 ha restantes (Cañadas et al. 2016a). Evidenciando lo poco que se sabe de las

especies nativas en el Ecuador, que igualmente influyó en el escaso uso de especies nativas. No obstante, la constitución del Ecuador, en el Art. 409 contempla que “Es de interés público y prioridad nacional la conservación del suelo, en especial su capa fértil. Se establecerá un marco normativo para su protección y uso sustentable que prevenga su degradación, en particular la provocada por la contaminación, la desertificación y la erosión. En áreas afectadas por procesos de degradación y desertificación, el Estado desarrollará y estimulará proyectos de forestación, reforestación y revegetación que eviten el monocultivo y utilicen, de manera preferente, especies nativas y adaptadas a la zona”.

Por otro lado, los sistemas agrosilvopastoriles son una de las opciones más prometedoras para mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono (Chará et al. 2017; Bosi et al. 2020). Sin embargo, el carbono secuestrado en un sistema agroforestal depende de varios factores, como el tipo de árbol, la densidad, la edad, el suelo y el clima (Gupta y Sharma, 2019). La FAO clasifica la agrosilvicultura, incluidos los sistemas silvopastoriles, como una práctica agrícola climáticamente inteligente, que diversifica la económica, protege contra la erosión y además actúa como un sumidero de carbono (Valenzuela et al. 2022). Idealmente, la aplicación de prácticas como sistemas silvopastoriles (mantienen o mejoran la productividad de las tierras agrícolas y de cultivo al tiempo que aumenta su capacidad de mitigación del carbono) constituirá la base de políticas integrales que aborden no sólo el cambio climático, sino también la inseguridad alimentaria y la mitigación de la pobreza (Heyer et al. 2014). Los sistemas agrosilvopastoriles y silvopastoriles pueden aumentar el secuestro de carbono, compensar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y reducir la huella de carbono generada por la producción animal (Magalhães et al. 2019). Ante estos desafíos, de acuerdo con Torres et al. (2023) la producción científica enfocada en sistemas silvopastoriles en Ecuador comprende a 17 artículos publicados durante las últimas tres décadas (1992-2022) en la base de datos Scopus. De estos el único artículo que describe el crecimiento y producción del componente arbóreo del sistema silvopastoriles corresponde a Cañadas et al. (2018) con 20 citaciones (Torres et al. 2023).

Por otro lado, el IS es un concepto básico en las ciencias forestales y se deriva del crecimiento en altura de un árbol en relación con su edad. Reflejando las condiciones clima y suelo, las mismas que se reflejan en la productividad y el potencial del lugar para expresar el crecimiento, estando directamente vinculado con el incremento de la biomasa y captura de carbono (Grass et al. 2020). De tal manera que, la estimación de la dinámica

de crecimiento de la biomasa es un requisito fundamental para evaluar tanto la capacidad como el potencial de secuestro de carbono de los bosques (Tang et al. 2017). Ameztegui et al. (2022) en su estudio en España encontró discrepancia en la estimación del Carbono debido a los patrones geográficos relacionados con a la dominancia de especies que se expresa con el IS, mostrando un menor efecto en relación con la estructura del bosque y un efecto casi nulo del clima. Estudios sobre la crecimiento y producción en relación con IS en el Ecuador de especies forestales se encuentran en Alder y Montenegro (1999) para el Laurel, Cañadas (2005) especie forestal Laurel, Cañadas et al. (2018) para la Teca, Cañadas et al. (2019) para la Balsa, Cañadas et al. (2023a y 2023b) Laurel en la Amazonía ecuatoriana y para *Centrolobium ochroxylum* Rose ex Rudd en la parte baja este del Ecuador, Ayala-Cifuentes et al. (2024). Estos datos son básicos para determinar la rotación biológica óptima de corta de cualquier especie.

Cada vez hay más pruebas de la importancia de elegir especies arbóreas que representan a distintos grupos funcionales en consideración de su capacidad adaptativa (Laughlin 2014). Sin embargo, la selección de especies autóctonas en función del grupo requiere más conocimientos de los que se dispone actualmente sobre los rasgos asociados a su biología reproductiva, fenología, propagación y potencial de crecimiento. Esta carencia de conocimientos puede comprometer a menudo la selección y el uso óptimos de especies autóctonas para la restauración y especies exóticas mejor documentadas, pero menos adecuadas (Ameztegui et al. 2022). Porro et al. (2012) señalaron que los sistemas agroforestales en la región amazónica no han sido suficientemente evaluados, especialmente el componente arbóreo. Por lo tanto, hay una falta de información técnica, como los índices de sitio, las tasas de crecimiento, y la edad de rotación para apoyar la viabilidad económica de los sistemas agroforestales en la Amazonía. Posteriormente, da Silva et al. (2023) destacaron que la información sobre el crecimiento y la producción de los componentes forestales en el sistema agrosilvopastoril amazónico de cualquier especie sigue siendo escaso en la región.

Una de las especies nativas empleadas en sistemas silvopastoriles de la costa como cerca viva es *Centrolobium ochroxylum* (Cañadas 2013) y pertenece a la familia de las leguminosas que fijan nitrógeno. Sus nombres comunes son Amarillo Guayaquil, Amarillo Lagarto, Amarillo Lagarto Claro (Little, 1969) De acuerdo a Cañadas (1983) su abundante follaje de esta especie nativa es de fundamental importancia para la conservación de especies menores como insectos comedores de hoja, saprófitos, micro fauna del suelo. Su semilla es un recurso alimenticio para la fauna silvestre como ardillas

y otras especies del bosque, principalmente en la época seca. De acuerdo a Little (1969) la madera del Amarillo Guayaquil (*Centrolobium ochroxylum*) es hermosa tiene albura distinta blanquecina y el corazón amarillento o anaranjado con vetas purpúreas cuando recién se corta, tornándose rojizo, amarillento oscuros. Es dura, pesada con un peso de  $0,57 \text{ g/cm}^3$ , tiene grano casi recto a ondulado y textura mediana. Toma un pulimento hermoso, es fácil de trabajar y es durable y resistente al ataque de las termitas, taladradores y podredumbre. Sirve particularmente para ebanistería, muebles, obras interiores, enchapados y también para la construcción naval (Little 1969; Cañadas, 1983).

En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo principal determinar el crecimiento, producción y captura de carbono aéreo del Amarillo Guayaquil (*Centrolobium ochroxylum*) mediante modelos no lineales y alométricos para establecer su potencial en los sistemas silvopastoriles en la costa baja del Ecuador. Para su desarrollo en primer lugar identificó el modelo que mejor se ajuste para describir el crecimiento en altura y diámetro en relación con la edad; se estimó el aporte de carbono del tronco, ramas y hojas para determinar la biomasa; y se aplicó modelos alométricos para establecer su potencial en captura de carbono.

La estructura de la presente investigación se desglosa en tres capítulos, resaltando en el primero se proporciona una revisión actual del papel de los sistemas silvopastoriles en relación con la realidad socioeconómico, el rol económico y su papel en la neutralidad climática de los sistemas silvopastoriles. Se provee conceptos básicos de las ciencias forestales para comprender el desarrollo de esta investigación e igualmente bases para la modelación forestal. En el capítulo segundo describe la metodología aplicada para la identificación del modelo que mejor describa el crecimiento en altura y diámetro con relación a la edad de la especie estudiada, la estimación de captura de carbono de los componentes arbóreos para determinar la biomasa y la aplicación de modelos alométricos para establecer el potencial de captura de carbono; los resultados obtenidos, su discusión, conclusiones y recomendación son esbozados en el capítulo tercero.



## **Capítulo primero: Enfoque y Marco Teórico**

### **1. Rol de los sistemas silvopastoriles**

La interacción entre los sistemas sociales y ecológicos es un territorio nuevo para muchos investigadores. Los proyectos tienden a enfatizar un lado u otro, dependiendo de los intereses, las habilidades y la financiación de los investigadores (Hruska et al. 2017). En ocasiones, las ciencias sociales requieren un enfoque cualitativo, mientras que la investigación ecológica suele recurrir a métodos cuantitativos. La escala espacial y temporal de cada tipo de investigación a menudo difiere. Al igual que los propios sistemas, el estudio de los sistemas silvopastoriles es complejo y rico en posibilidades. Cuatro trabajos se centran en distintas formas de interacción e integración: Dos integran la investigación social y ecológica, mientras que uno es un trabajo de investigación ecológica (centrado en las interacciones del sotobosque), y otros dos proceden de una perspectiva de ciencias sociales o humanidades (uno centrado en las redes sociales locales, otro en las interacciones espaciales entre lugares remotos).

Torralba et al. (2016) adoptan un enfoque integrador, examinando el papel de la gestión en la coproducción de servicios ecosistémicos de los SPS españoles conocidos como dehesa. Exploran la relación entre los factores biofísicos y socioculturales y las prácticas de gestión de la dehesa. Identificaron cuatro tipos principales de dehesa socio-ecológicamente definidos por sus características y su gestión. En su área de estudio, Torralba et al. (2016) enfatizó sobre las interacciones entre las características estudiadas del sistema silvopastoril y así generando paquetes de servicios ecosistémicos asociados a los sistemas.

Surová y Pinto-Correia (2021) examinaron cómo los SPS ibéricos contribuyen al bienestar de la sociedad. Se utiliza una perspectiva socio-ecológica integrada para examinar un estudio de caso en Portugal y otro en España, evaluando su contribución en relación con otros tipos de paisaje en las zonas estudiadas. Los miembros de las comunidades rurales, las autoridades, los gestores del territorio y los investigadores identificaron beneficios y retos similares en los sistemas denominados montado y la dehesa, con numerosos beneficios socioculturales y ambientales, pero también en riesgo económico debido a la baja generación de ingresos, y los autores reclaman políticas que

aborden las cuestiones socioeconómicas que dificultan su potencial contribución al bienestar de la sociedad.

Tölgyesi et al. (2018) abordan los SPS desde una perspectiva ecológica, estudiando un pastizal leñoso a lo largo de un gradiente que va desde el pastizal abierto hasta intercalación de árboles. Descubrieron que los árboles y arbustos dispersos del sistema silvopastoril estudiado tienen efectos facilitadores sobre su sotobosque, probablemente a través de la modificación del microambiente y la presión del pastoreo, lo que condujo a la formación de puntos calientes temporales de diversidad con una vegetación distinta. Los arbustos también pueden servir de refugio para las plántulas de árboles, por lo que los autores sugieren que se permita cierta invasión de arbustos en los SPS rumanos.

Palomo-Campesino et al. (2018) revelan visiones contrapuestas sobre el futuro del silvopastoril e identifican la rentabilidad, la conservación y la modernización como los temas centrales de investigación. En general, los vínculos entre las partes interesadas se caracterizan por altos niveles de cohesión e intercambio de comunicación, y un bajo nivel de conflicto.

En este sentido, el silvopastoreo se ha identificado como un enfoque paisajístico integrador clave que podría potencialmente aumentar los beneficios de los terratenientes mediante la generación de productos madereros y no madereros, al tiempo que se mejoran las condiciones para la producción de forraje y el ganado (Argote et al. 2022). Esto ocurre con mayor probabilidad cuando los componentes del sistema tienen relaciones complementarias, de modo que la producción de árboles y la de forraje para el ganado se benefician mutuamente, como se ha comprobado con densidades bajas de árboles en EE.UU., (McGroddy et al. 2015). Sin embargo, puede que no sea así en ausencia de mercados establecidos y redes de conocimientos técnicos. Dicho de otro modo, sin acceso a los conocimientos y a los mercados, las prácticas silvopastoriles pueden no lograr los beneficios sociales y medioambientales que se ha demostrado que producen (Röhrig, et al. 2020).

Los SPS son uno de los principales usos de la tierra en Sur y América Central que proporcionan una amplia gama de servicios ecosistémicos, incluido el secuestro de carbono (C) del suelo (Dagang y Nair 2003; Pagiola et al. 2007). Este uso de la tierra suele ser el resultado de la conversión de bosques en pastos neotropicales con la conservación de árboles seleccionados (Guevara et al. 1986; Harvey y Haber 1998). Además de pastos para la cría de ganado, los árboles aislados proporcionan sombra al



ganado, leña, madera para la construcción, forraje y frutos que son importantes para el ganado en la estación seca, cuando (Manning et al. 2006; Ospina et al. 2012; Rusch et al. 2014). Además, los SPS pueden ser un componente como sumidero de carbono terrestre mediante la fijación de CO<sub>2</sub> a través de la fotosíntesis en materia orgánica y el posterior secuestro de materia orgánica en el suelo (Andrade et al. 2008; Ballantyne et al. 2012). Además, la presencia de árboles en estos pastos es probable que mejore el secuestro de C no solo en la capa superficial del suelo (Casals et al. 2014), sino también en el subsuelo debido a la bioturbación y al de las raíces de los árboles (Haile et al. 2010).

El contenido en proteínas de las gramíneas SPS fue superior al contenido medio de las gramíneas tropicales, lo que puede deberse a la fijación de N de las leguminosas (*Leucaena*) (Sarabia-Salgado y Solario-Sánchez 2020). La fijación del nitrógeno y la transformación de la energía solar en biomasa vegetal dieron lugar a una mayor producción de carne/leche por hectárea. Además, aumentó el número y la variedad de especies de aves autóctonas lo que mejora los servicios medioambientales relacionados con la polinización la dispersión de semillas y el control biológico de plagas de insectos y reduce el consumo de agua para riego. El número de especies de aves aumentó un 200%, así como el número de mariposas. La producción de carne en los SPS fue entre 7,9 y 10,7 veces mayor que en los sistemas y la productividad de la tierra, medida en litros de leche por hectárea, aumenta entre un 52% y un 112% tras estabilizar el SPS (Lemes et al. 2021).

### **1.1. Realidad socioeconómica de los sistemas silvopastoriles**

Los sistemas agrosilvopastoriles son una forma multifuncional de la agricultura que combina árboles y cultivos y/o ganado en la misma parcela de tierra. Estos sistemas se defienden a menudo como sostenible para reducir la pobreza, mitigar el cambio climático y mejorar la seguridad alimentaria en las regiones tropicales (Leakey 2020). Estos sistemas especialmente los silvopastoriles pueden utilizarse como una forma alternativa para hacerle frente a la crisis ecológica y simultáneamente mantener la producción de las pasturas o cultivos (Dollinger 2018). No obstante, de los beneficios reportados en la literatura, la tasa de adopción de la agrosilvicultura en los países en desarrollo sigue siendo relativamente baja (Iskander et al. 2016). Entre los retos que dificultan el establecimiento de estos sistemas se encuentran barreras de conocimiento entre los agricultores sobre prácticas agroforestales, falta de apoyo político y el acceso

limitado a la financiación (Beyene et al. 2019) y desconocimiento del papel que juegan las especies nativas en el desarrollo de estos sistemas (Cañadas et al. 2016b).

La ausencia de los sistemas agrosilvopastoriles en las políticas públicas provoca un escaso reconocimiento de estos sistemas arbóreos para hacer frente a la crisis climática, así como para mejorar los medios de vida rurales (Beddington et al. 2012). Esto se refleja en la no incorporación de este tipo de sistemas en los proyectos conducido por el Estado en los programas de reforestación con incentivos económicos, denominado PROFORESTAL (Cañadas 2005; Cañadas et al. 2016a). Esta no inclusión, podría deberse entre otros factores como la escasa visibilidad de los sistemas locales, poca investigación exhaustiva socioeconómica y medioambientales de los sistemas silvopastoriles en las comunidades rurales (Lasco et al. 2014). Esto se ve reflejado en el Ecuador de acuerdo con Torres et al. (2023), durante las últimas tres décadas (1992-2022) se han producido un total de 17 artículos de la base de datos Scopus en varios temas de los sistemas silvopastoriles, evidenciando lo poco que se sabe de estos sistemas en el Ecuador.

Los procesos de toma de decisiones que subyacen a la adopción de una nueva tecnología o innovación son objeto de amplio debate y constituyen un área de investigación consolidada para múltiples disciplinas. En los sistemas agrosilvopastoriles, una nueva tecnología o innovación puede referirse a nuevos sistemas o actividades agrícolas alternativos que pretenden mejorar la sostenibilidad y los medios de vida de los agricultores (Zabala 2015). Como consecuencia de los altos costos y riesgo de la experimentación en campo, la modelación matemática de estos sistemas son una herramienta fundamental para evaluar el potencial socioeconómico de los sistemas silvopastoriles (Chebli et al. 2021).

La incorporación de los árboles en sistemas existentes, desde el punto de vista económico favorece la adopción de este tipo de arreglo de los sistemas silvopastoriles, mejorando la resiliencia económica mediante la diversificación de productos (Amare et al. 2019). La utilización de árboles múltiple uso, en particular especies nativas, podría mejorar la rentabilidad de los sistemas silvopastoriles, ya que pueden servir para diversas funciones, como ingresos alternativos, fuentes de forraje o alimentos durante periodos deficitarios entre las comunidades rurales (Gebru et al. 2019). Además, algunas maderas con mayor valor económico pueden proporcionar ingresos adicionales a la comunidad, aparte de las ganancias generadas por la producción pecuaria. Por ejemplo, un estudio sobre los sistemas agroforestales de teca (*Tectona grandis*) en Indonesia puede generar ingresos de hasta un 12% de los ingresos totales de los hogares (Roshetko et al. 2013).

Además, un estudio sobre la agrosilvicultura del damar (*Agathis dammara*) en Pesisir, Sumatra Occidental, demostró que la producción de la especie damar generaba hasta un 50% mayor de los ingresos totales de los hogares (Wollenber y Nawir 2005). Además, la adopción de una agrosilvicultura del café en la cuenca de Wey-Besay, el Lampung, contribuyó a más del 50% de los ingresos familiares, frente a sólo el 12% del sistema de agricultura convencional (sistema no agroforestal) (Suyanto et al. 2007).

No obstante, hay que tener en cuenta que la comparación de los beneficios económicos de las distintas prácticas puede verse influida por diversos aspectos, como el tipo de árboles, el medio ambiente, la calidad de la tierra, etc. Los sistemas silvopastoriles también pueden aumentar la relación beneficio/costo. Algunas prácticas incluyen la plantación de árboles leñosas que requieren pocos insumos (fertilizantes químicos, pesticidas, etc.), por lo que pueden minimizar los costos de producción y mejorar los ingresos obtenidos por los agricultores (Maia et al. 2021). Sin embargo, este resultado podría depender en gran medida de los conocimientos de los agricultores sobre esta práctica, en particular sobre cómo hacer una selección óptima de árboles para su sistema en relación con el crecimiento, ciclo de corta, producción volumétrica de la madera entre otros. Algunos árboles como por ejemplo las leguminosas fijan el nitrógeno y los hacen disponibles para los cultivos y árboles favoreciendo el crecimiento de ambos cultivos (Reynolds et al. 2007).

Los bosques plantados parecen ser los más rentables para los propietarios de tierras con un capital limitado, ya que generan la mayor proporción de beneficios en relación con los gastos totales, según se desprende del radio beneficio costo del sistema. Los métodos de uso de la tierra con bajos insumos pueden resultar atractivos para los interesados en sistemas con rentabilidad moderada y costes limitados. Sin embargo, las plantaciones de árboles obtuvieron rendimientos relativamente bajos en todos los tipos de descuento, en comparación con los sistemas ganaderos o de uso mixto, requirieron periodos de amortización más largos para cubrir los costes de establecimiento y tuvieron mercados menos seguros y establecidos (Leakey 2020).

## **1.2. Características de *Centrolobium ochroxylum***

Es conocido como Amarillo Lagarto o Amarillo de Guayaquil y se halla en la vegetación secundaria o en estado silvestre en la región occidental del Ecuador hacia el sur. Su identificación es sencilla gracias a su fruto extraordinario, un colgante de color

café oscuro, esférico y espinoso, con un diámetro de 3-4 cm, cubierto de púas largas y provistas de un ala inmensa de 13-18 cm de longitud y 6-10 cm de ancho. Entre sus características adicionales se incluyen hojas pinadas grandes de 30-60 cm de longitud, con 7-15 foliolos elípticos u ovados, y un envés con numerosos puntos glandulosos rojizos. Además, presenta flores amarillentas similares a las de guisantes, de 12-17 mm de longitud, dispuestas en racimos ramificados terminales (Cañadas, 1983).

Este árbol puede alcanzar alturas de 10-30 m y un diámetro de 50 cm. Su tronco es recto, con raíces tablares angostas y copa redondeada tendida. La corteza, de color gris claro, es lisa o ligeramente áspera, con pocas fisuras delgadas que se separan en escamas. La corteza interna tiene tonalidades verduscas, y las ramas son de un verde claro y finamente peludas (Little, 1969).

Las hojas, alternas e imparipinadas, poseen estípulas puntiagudas pareadas de 6 mm. Sus láminas, compuestas del eje redondeado de color verde grisáceo o café con tricomas diminutos, miden entre 6-20 cm de largo y 5-14 cm de ancho, presentando bordes puntiagudos en el ápice, redondeados o con forma de corazón en la base. Los racimos florales, ubicados en panículas de 15 cm de longitud, constan de ramas café peludas y varias o muchas flores con una estructura similar a la de las arvejas (Cañadas, 1983).

El fruto es una sámara con tricomas, con un tallo corto y espinas rectas delgadas de 1-3 cm sobre el cuerpo ensanchado en forma de bola, junto con un ala grande y membranosa, curva y con muchas nervaduras no ramificadas. La madera, de albura blanquecina y corazón amarillento o anaranjado, es hermosa y se caracteriza por su resistencia y durabilidad. Se utiliza especialmente en ebanistería, muebles, obras interiores, enchapados y construcción naval (Little, 1969).

En cuanto a su distribución, se encuentra en los bosques tropicales y montañosos del oeste del Ecuador, desde el sur de Esmeraldas y Los Ríos hasta Guayas y El Oro. Una representación del *Centrolobium ochroxylum* es presentado en la Figura

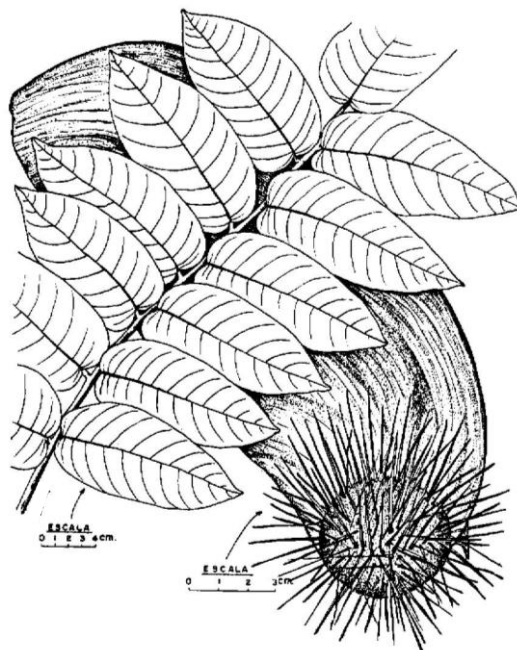


Figura 1. Diagrama de la anatomía de *Centrolobium ochroxylum*  
Fuente: Little (1969).

De acuerdo a la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, 2020) el Amarillo Guayaquil (*Centrolobium ochroxylum*) es clasificada como una especie amenazada y está críticamente amenazada (Figura 2).

2022-2 Login / Register \* What's New Contact Terms of Use English

Names - common, scientific, regions etc... Advanced About Assessment process Resources & Publications Support us

Jump to *Centrolobium ochroxylum*: In detail Translate page Seleccionar idioma

# *Centrolobium ochroxylum*

ABSTRACT

*Centrolobium ochroxylum* has most recently been assessed for *The IUCN Red List of Threatened Species* in 2020. *Centrolobium ochroxylum* is listed as Critically Endangered under criteria A2cd.

Download Text Overview

THE RED LIST ASSESSMENT

Oldfield, S. 2021. *Centrolobium ochroxylum*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2021: e.T62021606A62021609. ...

LAST ASSESSED  
15 September 2020

SCOPE OF ASSESSMENT  
Global

Assessment in detail

NOT EVALUATED DATA DEFICIENT LEAST CONCERN NEAR THREATENED VULNERABLE ENDANGERED CRITICALLY ENDANGERED EXTINCT IN THE WILD EXTINCT

NE DD LC NT VU EN CR EW EX

Figura 2. Página Web de la UICN para *Centrolobium ochroxylum*  
Fuente: UICN (2020).

### 1.3. Ganadería hacia una neutralidad climática

La mayoría de los planes climáticos nacionales se basan en la agregación de los principales GEI: CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>, utilizando los GWP a 100 años recomendados para los informes de los inventarios nacionales (CMNUCC 2014). La modelización reciente ha demostrado que los GEI de vida corta, como el CH<sub>4</sub> (vida media atmosférica de unos 20 años) se comportan más como contaminantes de flujo mientras que los GEI de vida larga, como el CO<sub>2</sub> y el N<sub>2</sub>O, se comportan más como contaminantes de almacenamiento en lo que respecta a sus efectos sobre el clima (Allen et al. 2018). A diferencia del CH<sub>4</sub> fósil emitido, por ejemplo, por las operaciones de fracturación hidráulica de combustibles fósiles, el CH<sub>4</sub> biogénico procedente de procesos biológicos no contribuye a aumentar las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>. Debido a que, al oxidarse finalmente en la atmósfera, ya que, en la mayoría de los casos, el carbono ha sido asimilado recientemente por la vegetación desde la atmósfera. Así pues, la modelización del clima mundial indica que unas reducciones del CH<sub>4</sub> biogénico del 24-47% con respecto a 2010 son suficientes para lograr la estabilización del clima a una temperatura media global en superficie 1.5°C por encima de la época preindustrial (Allen et al. 2020).

Más de la mitad de las emisiones mundiales de CH<sub>4</sub> proceden de la producción de alimentos (Saunio et al. 2020), concretamente de la cría de ganado y el cultivo de arroz. De tal manera que existe un gran interés en la aplicación de objetivos biogénicos de CH<sub>4</sub> por separado, para determinar las vías de emisión para la neutralidad climática nacional en los planes climáticos nacionales, donde la ganadería contribuye sustancialmente a las emisiones nacionales, como Nueva Zelanda e Irlanda (Reisinger y Leahy 2019). La política de neutralidad climática de Nueva Zelanda, por ejemplo, se centra como objetivo central reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> biogénico en un 24-47% entre 2017 y 2050. No obstante, este planteamiento de Nueva Zelanda implicaría un mensaje de "abuelos" a escala nacional, lo que podría privar a los países en desarrollo de la oportunidad de ampliar la producción ganadera. Por lo tanto, es probable que se cuestione esta postura a nivel internacional por motivo de equidad (Rogelj y Schleussner 2019).

De hecho, la repoblación forestal de tierras puede tener una mayor influencia en el balance de GEI que el cambio en la emisión de CH<sub>4</sub> directamente. Esto sugiere que la contribución directa del ganado al cambio climático a través de las emisiones de CH<sub>4</sub> puede verse superada por su contribución indirecta al cambio climático a través del "costo de oportunidad del carbono" de las grandes extensiones de tierra necesarias para alimentar

al ganado (Searchinger et al. 2018). En otras palabras, la neutralidad climática territorial puede no ser un objetivo adecuado para muchos países. Para algunos es demasiado ambicioso, para otros no lo suficiente. Esto subraya la necesidad de entablar negociaciones internacionales sobre el reparto de la carga de la reducción de las emisiones de CH<sub>4</sub> con el fin de "poner carne en los huesos" del Acuerdo de París. Es posible que en el futuro algún tipo de régimen de comercio de derechos de emisión de CH<sub>4</sub> tenga un papel que desempeñar para asignar de forma eficiente las emisiones de CH<sub>4</sub> (Dlugokencky et al. 2011), aunque esto se enfrentaría a obstáculos considerables en términos de medición, notificación y verificación de las emisiones de CH<sub>4</sub> (Storm et al. 2012), que son mucho más difíciles de estimar que las emisiones de CO<sub>2</sub> para las que existen actualmente regímenes de comercio. Mientras tanto, dado lo lejos que estamos de la estabilización climática, los objetivos territoriales de neutralidad climática ("carbono neto cero") son importantes marcadores de posición para impulsar las medidas de mitigación climática urgentemente necesarias.

La seguridad de las proteínas animales sólo parece compatible con la neutralidad climática territorial en el caso de Irlanda y Brasil. De hecho, debido a sus densidades de población comparativamente bajas, estos países podrían seguir siendo exportadores netos (aunque a menor escala que en la actualidad) de leche y carne de vacuno al tiempo que alcanzan la neutralidad climática. Esto es una simple función de la tierra agrícola disponible en relación con el tamaño de la población y pone de relieve que los distintos países tienen potenciales biofísicos muy diferentes para alcanzar la neutralidad climática manteniendo al mismo tiempo la seguridad alimentaria básica de las poblaciones autóctonas. Para lograr la estabilización climática, los países con baja densidad de población pueden tener que lograr emisiones netas negativas (sumideros netos), mientras que los países con alta densidad de población pueden seguir siendo emisores netos, como implican los patrones de uso de la tierra explorados en el reciente informe especial del IPCC sobre el uso de la tierra (Shykla et al. 2019).

El metano es un GEI de vida corta que se modela de forma distinta a los GEI de vida larga, como el dióxido de carbono y el óxido nitroso para establecer presupuestos globales de emisiones para la estabilización del clima. El Acuerdo de París exige una reducción del 24-47% de las emisiones mundiales de metano biogénico de aquí a 2050. De tal manera que el tratamiento separado del metano en las políticas climáticas nacionales requerirá considerar cómo los presupuestos de emisiones globales compatibles con la estabilización climática pueden reducirse a objetivos nacionales, pero las

implicaciones de las diferentes reglas de reducción para la producción nacional de alimentos y los objetivos de neutralidad climática son poco conocidos (Prudhomme et al. 2021).

Durante los últimos 20 años, la producción ganadera comercial aumentó significativamente. Ecuador tenía alrededor de 3.7 millones de cabezas ganadas para 1985. Para el año 2005, el número había aumentado a casi 5 millones (Vera 2006). Actualmente, la ganadería representa una parte importante de la producción agrícola, representando alrededor del 40% del valor agregado agrícola de Ecuador y alrededor del 8% del PIB. Ecuador pasó de 2 para el 2000 a 2.5 millones de toneladas métricas de leche para el 2004 (Vera 2006). Es probable que el crecimiento esperado en la población y el ingreso per cápita cambie las preferencias dietéticas y, por lo tanto, aumente la demanda de productos animales (Cornejo y Wilkie 2010). Las regiones de la Costa y la Amazonía producen principalmente ganado de carne y doble propósito, mientras que los lácteos se encuentran principalmente en los Andes. De acuerdo con Cornejo y Wilkie (2010) indicaron que dos de las provincias costeras, Guayas y Manabí, se encuentran entre las mayores emisoras de CH<sub>4</sub> por estiércol bovino y es un resultado de la combinación de altas temperaturas medias y el número de animales (Cornejo y Wilkie 2010; Álvarez-Zambrano y Cañadas-López, et al. 2024; Álvarez-Zambrano y Cañadas-López, et al. 2023).

## **2. Dasonometría**

Para establecer el crecimiento, las ciencias forestales se basan en la Dasonometría forestal que permite comprender el crecimiento de los árboles y sienta las bases de las ciencias forestales en relación con crecimiento de estos. En este capítulo se pretender dar los fundamentos de tres parámetros forestales fundamentales para entender la captura de Carbono en los árboles.

### **2.1. Índice de sitio**

La medida más ampliamente aceptada para establecer la productividad forestal se denomina IS y se define como la altura dominante ( $H_{dom}$ ) a una edad determinada para una especie establecida (Hägglund y Lundmark 1981; Monserud 1984; Ralston 1964; Skovsgaard y Vanclay 2008).  $H_{dom}$  se define como la altura promedio de los 100 árboles más grandes por hectárea según el diámetro del tallo a la altura del pecho (DAP) (Rennolls



1978). A través de este parámetro forestal se puede establecer la productividad forestal, indicando la magnitud de la producción de madera que se puede esperar en un sitio determinado y proporciona información crucial para planificación del manejo forestal. El IS agrega todos los factores abióticos que influyen en la tasa de crecimiento de un bosque y es fundamental para determinar la edad de rotación económicamente óptima, el régimen de raleo, la forma de tala final, el rendimiento sostenible y otras decisiones de gestión en la silvicultura (Bontemps y Bouriaud 2013). Además de sus implicaciones operativas, la productividad forestal es también una variable clave de las tablas de rendimiento, simuladores de crecimiento y evaluación económica del proceso productivo forestal (Noordermeer et al. 2020).

La productividad forestal a través del IS sigue siendo una preocupación fundamental de la silvicultura. Por lo tanto, este concepto ha sido reconocido como un concepto base de "Principios Forestales" para el manejo sostenible de los bosques en la Conferencia de Río (ONU 1992), confirmada en los criterios e indicadores de gestión forestal, en el marco del proceso de Montreal (1994) y en la conferencia de la MCPFE (2002). En la práctica, se necesita esta medida o predicción operativa de bajo costo para establecer la productividad de los terrenos forestales para la selección de especies arbóreas, el diseño de directrices silvícolas óptimas y las previsiones de rendimiento maderero en la planificación forestal, desde escalas locales a regionales (Pretzsch et al. 2008). Los cambios medioambientales en curso y su impacto en el crecimiento forestal (Boisvenue y Running 2006) exigen además que se preste atención a cómo evaluar y predecir la productividad de las plantaciones forestales a largo plazo (Fontès et al. 2010).

Por otro lado, los factores climáticos, edáficos y fisiográficos (factores biofísicos) son la base y factores impulsores de la productividad forestal. Cambios adversos en algunos de estos factores puede causar una disminución de la productividad forestal con la posibilidad de impactos significativos en ecología, economía y las funciones de los bosques. Actualmente, existe preocupación por el cambio climático y las proyecciones de temperaturas más cálidas, mayores concentraciones de dióxido de carbono y prolongación de los periodos de crecimiento (Peters et al. 2013). En el Ecuador, investigaciones sobre índices de sitio de especies forestales son limitadas. Así, para el Amarillo Guayaquil estableció el IS en la costa bajo por Cañadas (2013). El IS para el Laurel (*Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken 1841) en la costa baja ecuatoriana fue realizado por Alder y Montenegro (1999), mientras para la misma especie en la Amazonía Ecuatoriana fue conducido por Cañadas et al. (2023). El IS para la Balsa (*Ochroma*

*pyramidale*, fue establecido por Cañadas et al. (2019) y para la Teca (*Tectona grandis* (L.f.) Lam.

## 2.2. Cálculo de volúmenes

Para determinar el volumen de un árbol siempre se relaciona con la medición del diámetro con el largo de la sección. Cuando se hace una estimación por secciones, entonces el tronco del árbol es subdividido en secciones de igual largo  $l$  y el área basal  $g$  medida. El área basal puede ser estimada en la mitad de la sección  $gm$  o en los dos extremos en la parte baja  $gm$  y la parte alta  $gu$ . En la Figura 3, se representa la forma de estimar el volumen total de un árbol en campo.

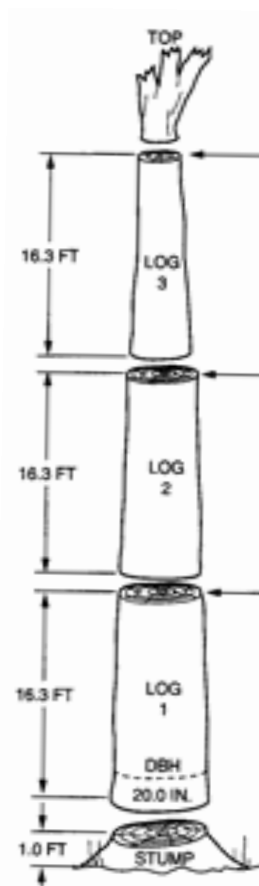


Figura 3. Subdivisión de un tronco en secciones para estimar el volumen de un árbol. Fuente: Kleinn (2007).

La necesidad de cuantificar las reservas de carbono para diferentes tipos de bosques también es relevante para el mercado del carbono emergente y para el mecanismo de crédito como la REDD. Esto requiere que los modelos alométricos apropiados específicos para cada especie y tipo de bosque en un lugar determinado (Chave et al. 2014). Los modelos alométricos emplean variables que son sencillas para medir árboles

individuales como es el DAP y ht, así mismo para estimar el volumen o la biomasa aérea. Otra importante variable explicativa del modelo alométrico de estimación de biomasa es la densidad básica de la madera que se determina a partir de muestras de madera en laboratorio como una relación de masa seca y húmeda (verde) (Chave et al. 2005). De acuerdo con la literatura se menciona a las variables de acuerdo con su importancia primero al DAP, segundo la densidad y tercero la ht para la explicación de las variaciones de la biomasa y tanto el DAP y la ht para el volumen del árbol. Entre las tres variables explicativas, el DAP y la altura del árbol se han empleado a menudo como únicas variables explicativas para desarrollar modelos alométricos de biomasa porque están fácilmente disponibles en comparación con la densidad, lo que da como resultado una mala estimación general de la densidad (Henry et al. 2010) especialmente para bosques donde la densidad de árboles varía considerablemente. Esto plantea la necesidad de desarrollar modelos alométricos de biomasa que integran la densidad en la estimación biomasa de árboles (Mugasha et al. 2016).

Modelos de volumen son capaces de cuantificar tanto el volumen comercial y total de un árbol, para la comercialización de los árboles, basados en la estimación directa y posteriormente emplear variables que permiten la estimación del volumen indirectamente (Cañadas et al. 2016a), el empleo de modelos ayuda a obtener resultados cuantitativos precisos. Debido a la alta tasa de utilización de especies conocidas de árboles y la gran demanda de madera, especies menos conocidas entran en el mercado y se desconoce de su dasonometría (Milledge y Elibariki 2005). Por lo tanto, esta transición hacia nuevas especies requiere necesariamente del desarrollo de modelos de volumen de estas especies múltiples (Mauya et al. 2014). Aunque no es común en la literatura científica, muchas multi especies no se encuentran en las bases de datos internacional de ecuaciones alométricas Glob Allome Tree (Henry et al. 2013).

Convencionalmente, los inventarios forestales miden el DAP de todos árboles en cada parcela, pero a menudo se seleccionan pocos al azar y medido para ht para el desarrollo de la relación ht-DAP simple y local modelos que se utilizan para estimar ht de árboles no medidos en el campo (Mpanda et al. 2011; Cañadas et al., 2016b). Esto implica que el modelo alométrico de biomasa, en la práctica, requiere modelos ht-DAP locales para la estimación de ht. Mugasha et al. (2013) desarrolló modelos ht- DAP para cuatro tipos principales de bosques, incluidos los bosques de tierras bajas, pero ninguno de los sitios seleccionados empleó la altura como una variable del cálculo de biomasa. Además, debido a las grandes variaciones en ht de un bosque a otro en función del clima

y otros factores ambientales, es imperativo que una relación ht-DAP se desarrolle regionalmente para mejorar la estimación del volumen o biomasa de los árboles (Feldpausch et al. 2012).

Por otro lado, los resultados de la simulación en este estudio muestran un aumento de la productividad con el tamaño del árbol, se da en árboles de tamaño pequeño a mediano, mientras que la productividad de los árboles grandes (>60 cm) disminuye. La relación de crecimiento es unimodal (Caspersen et al. 2011) y existe una disminución relacionada con la edad y con la productividad forestal después de la madurez (Tang et al. 2014). La disminución de la productividad relacionada con la edad podría ser el resultado de una disminución de la conductividad hidráulica en relación con la altura del árbol (Magnani et al. 2000). Por lo tanto, los árboles grandes responden con un cierre estomático más temprano para evitar una ruptura del sistema hidráulico, lo que reduce la fotosíntesis neta diaria (Ryan y Yoder 1997). Este fenómeno se informa para varias especies de árboles (Delzon et al. 2004). Para compensar la mayor resistencia hidráulica, los árboles grandes asignan más carbono para incrementar las raíces y el crecimiento del tallo que en las hojas, lo que resulta en una menor eficiencia de crecimiento con edad (Zaehle 2005).

### **2.3.Ciclo de rotación biológico de corta forestal**

En la práctica de gestión forestal, el período de rotación de cultivos se considera como uno de los elementos de la planificación de la gestión forestal. La edad de corte significa la edad a la cual un único árbol o masa forestal se considera maduro para la tala, y la tala de madurez es la condición más deseable desde el punto de vista del objetivo de manejo forestal (Cañadas et al. 2016a). Esto significa que la edad de rotación debe ser considerada como uno de los factores que aseguran el máximo logro del objetivo de la práctica silvícola. Este objetivo es aceptado en el plan de manejo forestal, en general, para una unidad de manejo forestal dada (1–3 por una unidad de manejo forestal) y, en particular, para una masa forestal o un grupo de masas forestales (Cañadas et al. 2023a). Además, se sugirió que la edad de rotación al servicio de la gerencia objetivo debe resultar de la experiencia, teniendo en cuenta las condiciones específicas y utilizando un método de cuenta de optimización fiable.

La edad de rotación de las principales especies arbóreas aceptadas para una unidad de gestión forestal se considera como:

- a) óptimo para regiones de bosques naturales,
- b) promedio para las especies de árboles dominantes,
- c) a largo plazo, es decir por períodos superiores a 10 años.

Sin embargo, de lo anterior no queda claro que la edad de rotación establecida hasta el momento asegure la máxima consecución de los objetivos de gestión fijados. En la práctica, se recomienda que la edad de rotación de un solo rodal se especificará en la descripción de ese rodal, que puede diferir en el tiempo de rotación por las condiciones específicas de otro rodal en dependencia de las condiciones reinantes. En este sentido, se introduce el concepto de aprovechamiento forestal, fundamentado en el ciclo de rotación biológica de explotación. Este hace referencia a la edad mínima en la que una especie arbórea dominante alcanza su máximo crecimiento marginal (Cañadas et al. 2023b). Aunque la edad real de corta no está especificada en el plan de manejo forestal, debe tenerse en cuenta en todos los cortes finales, asegurando que:

- a) la edad media de corte de las principales especies de árboles en una determinada unidad de manejo forestal es mayor que la edad real
- b) la edad de tala de esta especie arbórea en al menos 10 años,
- c) la edad de madurez de tala no es inferior a la edad real de tala del rodal,
- d) la edad de las especies de árboles dominantes en el bosque es no inferior a la edad real de tala del bosque en el año de la cosecha final.

### **3. Modelación forestal**

La modelización forestal emplea diversas técnicas, como los modelos estadísticos, los modelos basados en procesos y las simulaciones por computador. Estos modelos se utilizan a menudo para diversos fines, como la predicción del rendimiento de la madera, la evaluación del impacto del cambio climático en los bosques, la optimización de las estrategias del manejo forestal captura de carbono y la evaluación del valor de conservación de distintas zonas forestales. En general, la modelización forestal desempeña un papel vital en el avance de nuestra comprensión de los bosques, orientando las prácticas de manejo sostenible y ayudándonos a tomar decisiones informadas para

equilibrar los objetivos económicos, medioambientales y sociales en las regiones boscosas (Gadow et al., 2006; Cañadas et al., 2016b).

### 3.1. Modelos matemáticos

De acuerdo con Gadow et al. (2006) y Kleinn (2007) los bosques son ecosistemas complejos en los que interactúan numerosos factores que afectan al crecimiento de los árboles, como el clima, la calidad del suelo, la competencia y las prácticas de gestión. Los modelos matemáticos proporcionan una forma estructurada de representar y analizar estas complejas interacciones, facilitando el estudio y la predicción del crecimiento de los árboles en diversas condiciones. Pueden ayudar a optimizar las estrategias de manejo forestal, estimar el rendimiento de la madera, la captura de carbono, evaluar el impacto de los cambios medioambientales (por ejemplo, el cambio climático) y tomar decisiones informadas sobre prácticas forestales sostenibles (Cañadas et al. 2016a).

Gadow et al. (2006) y Kleinn (2007) clasifican en la modelación forestal a los modelos empíricos: Estos modelos se basan en datos observados y en las relaciones entre el crecimiento de los árboles y las variables medioambientales. Suelen utilizar técnicas estadísticas para ajustar ecuaciones a los datos, proporcionando predicciones basadas en información histórica. Modelos basados en procesos: Estos modelos simulan los procesos biológicos subyacentes que rigen el crecimiento de los árboles, como la fotosíntesis, la respiración y la absorción de nutrientes. Son más mecanicistas y pueden utilizarse para proyectar el crecimiento en diferentes escenarios.

Muchas investigaciones en las ciencias forestales emplean modelos matemáticos empíricos y teóricos. Tradicionalmente, se quiere predecir el valor de una variable aleatoria en el tiempo  $t$ , en función de algunas variables que pueden afectar el valor de  $y$ . El enfoque usual es construir un modelo matemático y su resultado se denomina un modelo "empírico". Por otro lado, se han desarrollado ecuaciones a partir de la teoría biológica sobre el proceso de crecimiento, por ejemplo, que emplean parámetros que tienen (a veces) un significado biológico. Algunas de las llamadas ecuaciones teóricas de crecimiento tienen bases empíricas. Sin embargo, se prefiere llamarlas así porque los parámetros tienen alguna interpretación biológica (Salas-Eljatib et al. 2021).

Se han desarrollado ecuaciones de crecimiento teórico para muchas disciplinas biológicas. Las ecuaciones se basan en construcciones teóricas, debido a que muchas curvas de crecimiento no son lineales en términos de sus parámetros. De tal manera que

los modelos de crecimiento son una familia importante de modelos no lineales (Schabenverger y Pierce 2002). Hay un gran número de ecuaciones de crecimiento en la literatura. Sin embargo, es difícil creer que un modelo con tres o cuatro parámetros podría describir tan complicado proceso como crecimiento desde el nacimiento hasta la muerte de un organismo (Landsberg y Sands 2011). El origen de muchos modelos no lineales en uso hoy en día pretende incluir leyes de la naturaleza, para revelar la amplitud de crecimiento y así entender las fuerzas de la vida (Salas-Eljatib 2020).

### **3.2. Modelos no lineales**

Los modelos no lineales ofrecen valiosas ventajas en el campo forestal y silvicultura, ya que captan relaciones complejas, proporcionan flexibilidad, mejoran la precisión predictiva, esgrimen datos no normales, ofrecen información sobre la importancia de las características, aprovechan las técnicas de ensamblaje y se adaptan a condiciones ambientales cambiantes. Estas ventajas los convierten en potentes herramientas de gestión, conservación e investigación forestal (Cañadas et al. 2004). Los modelos empíricos tienen una finalidad distinta de los Modelos basados en procesos (modelos teóricos). Se han desarrollado ecuaciones teóricas de crecimiento en el campo forestal. Varias ecuaciones matemáticas se basan en construcciones teóricas. Dado que muchas curvas de crecimiento no son lineales en cuanto a sus parámetros, los modelos de crecimiento son una familia importante de modelos no lineales (Schabenberger y Pierce 2002). Existe un gran número de ecuaciones de crecimiento en la literatura y resulta desafiante aceptar que un modelo con solo tres o cuatro parámetros pueda capturar la complejidad de un proceso tan intrincado como el crecimiento desde el nacimiento hasta la muerte (Landsber y Sands 2011). El origen muchos de los modelos no lineales que se utilizan hoy en día los esfuerzos de los eruditos por descubrir las leyes de la naturaleza, revelar las escalas del ser y comprender las fuerzas de la vida (Koops 1986). Existen varias ecuaciones de crecimiento con bases teóricas o teórico-empíricas. Aquí nos centramos en algunas que ampliamente se han utilizadas en la investigación forestal.

Hay muchas parametrizaciones diferentes de un determinado modelo de crecimiento forestal, debido a que estos modelos parten de ecuaciones diferenciales. De tal manera que se pueden obtener muchas trayectorias como resultado. Se han propuesto numerosos modelos basados en formas diferenciales. Además de varias ecuaciones diferenciales es posible obtener la misma solución o trayectoria (García 2005). Varios

autores han informado diferente parametrización de los modelos de crecimiento para la silvicultura y otras disciplinas científicas (Salas-Eljatib et al. 2020).

En adelante, todos los parámetros son positivos, así como el tiempo ( $t$ ) es positiva, la variable de estado y también proporcionamos expresiones de la asíntota (es decir, el nivel máximo para la variable de estado), los puntos de inflexión (es decir, donde la curva cambia de curvatura) de todos los modelos. Deberíamos usar letras griegas para referirse a los parámetros y fuente en cursiva estilo para referirse a las variables. El uso de los mismos símbolos que representan parámetros en ecuaciones a través del documento no representa la equivalencia matemática, a menos que está claramente especificado. Por ejemplo,  $\beta$  o  $\gamma$  se puede utilizar en ecuaciones diferentes, pero no implican el mismo número (Gadow et al., 2006).

### 3.3. Modelos alométricos

Los bosques brindan importantes servicios a las sociedades en todo el mundo, ya que secuestran grandes cantidades de carbono, limitan la erosión y regulan el ciclo del agua y proporcionando un hábitat para muchas especies. Las relaciones funcionales entre árboles o alometrías, juegan un papel clave en la comprensión de estos servicios. Tales relaciones encapsulan restricciones ontogenéticas, ecológicas y evolutivas (Niklas 1994) y han sido ampliamente utilizados como herramientas cuantitativas para ayudar al manejo de los bosques. ¿Cuánto carbono se almacena en los bosques del mundo, por ejemplo, se estima a partir de inventarios forestales utilizando modelos y luego ampliados a escalas regionales y globales, basados en datos y modelos de observación de la Tierra? (Pan et al. 2011).

Las alometrías también describen las funciones metabólicas, como las tasas de respiración y la producción primaria neta. Se ha desarrollado una teoría para inferir escalas alométricas a partir de principios de optimización evolutiva (Enquist y Niklas 2002), pero esta teoría no tiene en cuenta los avances recientes en la fisiología de las plantas o árboles (Rogers et al. 2017) y sus predicciones no coinciden bien con los datos empíricos (Poorter et al. 2012). Cuando el tamaño, la forma y la función del árbol están interrelacionados a través de diversas escalas y condiciones ambientales, la medición de una sola dimensión puede ofrecer una estimación aproximada de la totalidad del árbol. Este aspecto adquiere especial relevancia cuando una variable es más fácil de medir, como el diámetro del tronco, en comparación con otras, como la tasa metabólica o la



biomasa. Los estudios empíricos proporcionan un fuerte apoyo para las relaciones alométricas generalizadas (Mori et al. 2010) y existe patrones generales de la asignación de carbono en órganos de plantas por encima del suelo vs por debajo del suelo a nivel individual y de rodal a nivel mundial (Chen et al. 2019). De manera similar, las alometrías que relacionan el diámetro del tronco con la altura del árbol se puede encontrar en todos los tipos de bosque y se ha utilizado para complementar las mediciones de altura que son propensas a errores y requiere mucho tiempo sin protocolos optimizados (Sullivan et al. 2018).

La noción de que un modelo desarrollado en un sitio puede ser válido en otros lugares se denomina transferibilidad (Wenger y Olden 2012). Una aplicación importante se ejemplifica por el cálculo de carbono existencias de los inventarios forestales. La predicción de la biomasa de un árbol a partir de la estimación destructiva se facilita mediante un indicador que combina la densidad de la madera, el diámetro del tronco, el área de la sección transversal y la altura del árbol, según lo señalado por et al. 2014. Esta predicción se mantiene precisa en una amplia variedad de condiciones, abarcando diferentes valores para las variables predictoras y gradientes bioclimáticos, desde bosques secos hasta selvas tropicales. Investigaciones recientes, basadas en un extenso experimento de estimación destructiva en bosques tropicales de África, indican que modelos de biomasa relativamente simples son aplicables en diferentes contextos (Fayollet al. 2018), sugiriendo así su utilidad en las evaluaciones de biomasa en regiones tropicales.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, las alometrías están influenciadas por factores ambientales, tanto abióticos como bióticos y no son fácilmente transferible. La escala de la altura del árbol con el diámetro del tronco, por ejemplo, depende de las limitaciones bioclimáticas (Olson et al. 2018) y el crecimiento de los árboles está determinado por la competencia e interacciones con otros árboles (Jucker et al. 2017). Además, las alometrías suelen tener una estructura de error multiplicativa. Lo cual se traducen en valores absolutos grandes en errores estimados para los individuos más grandes y dan como resultado una incertidumbre en las variables previstas.

La introducción de créditos de Carbono bajo REDD tiene implicaciones financieras para las reservas en ecosistemas forestales subtropicales de zonas tropicales y tropicales (Canadell y Raupach 2008). Por lo tanto, la estimación precisa de la pérdida y el secuestro de C es fundamental para las iniciativas de manejo de ecosistemas forestales para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> (Pelletier et al. 2011) y las aplicaciones de modelos

dentro del contexto del cambio climático (Poulter et al. 2010). La precisión de las estimaciones de las existencias de Carbono en los bosques es limitada como consecuencia del desafío de desarrollar modelos más robustos para estimar la biomasa de los árboles (Goodman et al. 2014). Se emplea métodos directos e indirectos para la estimación de la biomasa. Dentro de los métodos directos, una muestra de árboles se cosecha y se mide para estimar el peso seco en diferentes componentes del árbol (p. ej., tronco, ramas y hojas). Los métodos directos pueden ser costosos, especialmente cuando se trata de áreas grandes e involucra a varias especies (Xiao et al. 2013). En el método indirecto, la biomasa generalmente se estima utilizando modelo de estimación de biomasa, que relacionan variables medibles como la altura total del árbol, el diámetro a la altura del pecho y la densidad a la biomasa total del árbol (Sileshi 2014). Por lo tanto, a menudo se prefiere el uso de métodos indirectos a métodos directos (Vashum y Jayakumar 2012).



## Capítulo segundo: Área de estudio y metodología

### 1. Área de estudio

El presente estudio se realizó en la región Costa en la parte baja del Ecuador, conformado por las siguientes provincias Esmeraldas, Manabí, Santa Elena, Guayas, Los Ríos, El Oro y Loja (Figura 4).

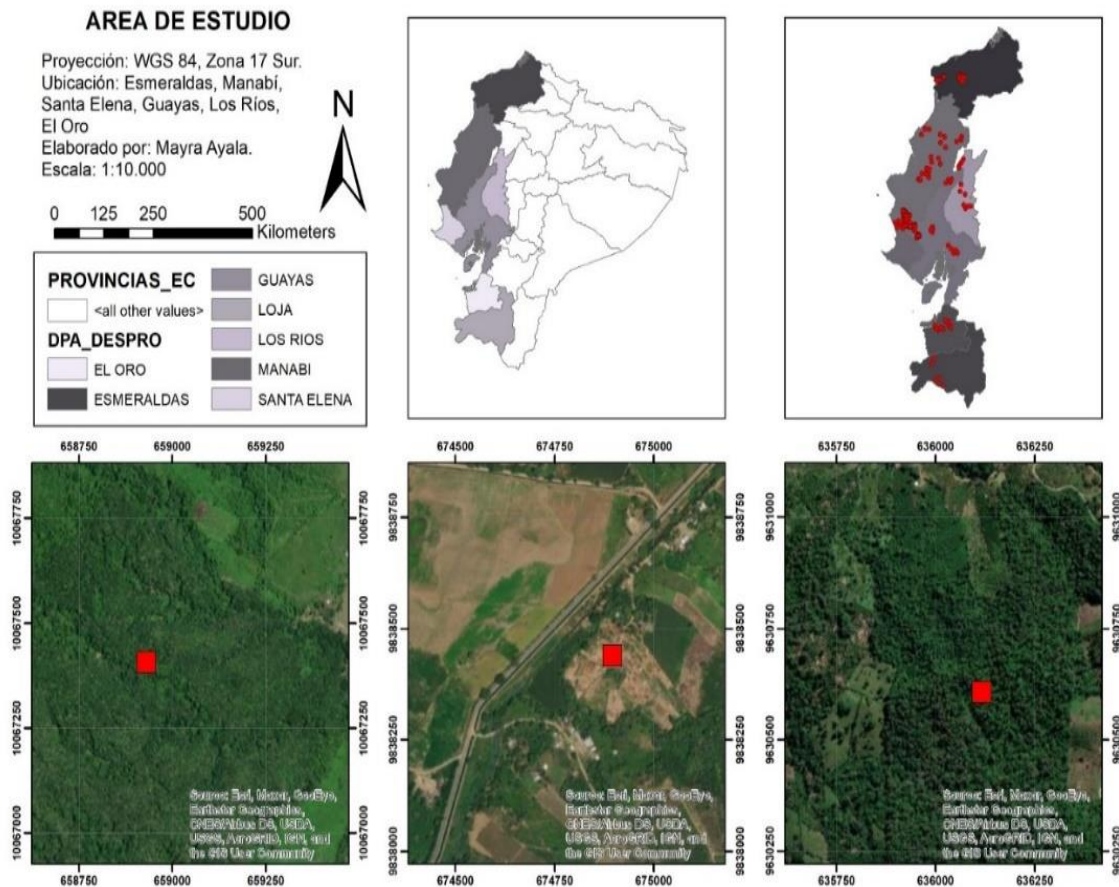


Figura 4. Área de estudio  
Fuente: Elaboración propia.

Las características agroclimáticas de las provincias en estudio se resumen a continuación.

Tabla 1.  
**Características agroecológicas de las provincias investigadas con relación al *Centrolobium ochroxylum***

Provincia	Precipitación promedio anual (mm)	Temperatura promedio anual (°C)	Tipo de suelos
Esmeraldas	2646	25.6	Entisoles
Manabí	798	24.6	Inceptisoles
Santa Elena	750	24.1	Molisoles
Guayas	1198	25.7	Vertisoles
Los Ríos	2000	25.2	Inceptisoles
El Oro	1788	22.9	Inceptisoles
Loja	1453	15.0	Ultisoles

Fuente: Cañadas et al. (2017); Cañadas et al. (2018a); Cañadas et al. (2020a); Cañadas et al. (2020b); Cañadas et al. (2018d); Cañadas et al. (2016b); Cañadas et al. (2013b); Inamhi (2000-2010) Anuarios meteorológicos; SIGtierras (2023) Mapa de órdenes de Suelos del Ecuador.

## 2. Antecedentes metodológicos

De acuerdo con Cañadas y Roca (2011) señalaron que el proyecto de "Reforestación y Conservación de la Cordillera Chongón-Colonche" financiado por el KfW, la Fundación Natura (ONG local) y el MAE tuvo como objetivo principal de este el establecer plantaciones forestales para compensar la extracción de madera del Bosque de Protección Chongón-Colonche. Como meta se establecieron un total de 13.000 ha de reforestación con especies nativas, después de diez años se plantaron un total de 2.231 ha. La promoción de las plantaciones forestales se basó en la forma de pago de incentivos (US \$359,83 por hectárea). El 75% de ese dinero era invertido para el establecimiento de los sistemas silvopastoriles, mientras el último 25% era pagado a los tres años con el fin de garantizar consecuentemente el establecimiento de la plantación. El INIAP estableció parcelas de investigación en las provincias de Esmeraldas, El Oro y Loja (Limongi Andrade et al. 2011). Estas plantaciones fueron medidas igualmente.

Así, un total de 415 sitios fueron establecidos con el *Centrolobium ochroxylum* en sistemas silvopastoriles, abarcando un rango amplio de condiciones de precipitación y temperatura. Los sitios se distribuyeron en 25 cantones distribuidos en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Los Ríos, Guayas, Santa Elena, El Oro, Loja (Figura 4). Dentro del proyecto de investigación "Sostenibilidad de 45 especies nativas maderables en los programas de reforestación y conservación de la biodiversidad auspiciados por los GADs,

Bosque seco tropical” financiado por el INIAP, UTN, ULEAM estos sitios han sido vueltos a medir para el 2011-2013, 2015-2016 y 2017-2020. Los datos fueron facilitados por Álvaro Cañadas López, Ph.D. quién ha sido el director del proyecto sobre especies nativas dentro del bosque seco de la costa baja del Ecuador y como Director de la Estación Experimental Portoviejo del INIAP se logró realizar los estudios de captura del carbono del Amarillo Guayaquil en coordinación con la Dirección de la Estación Experimental Tropical Pichilingue del INIAP, para emplear los laboratorios de dicha Estación.

En cada punto investigado se obtuvo sus coordenadas UTM y se levantaron información sobre la altura total de 160 árboles por hectárea con el *Centrolobium ochroxylum*, utilizando la pistola “HAGA” y su respectiva regla graduada a escala 1:15. Igualmente se empleó la cinta diamétrica para obtener el diámetro a la altura del pecho (1.30 cm medidos desde el suelo) de los 160 árboles

De igual manera se tiene información de un total de 195 árboles de la especie en estudio, los cuales se dispone de datos de DAP y altura antes del aprovechamiento y se cubicó los árboles de acuerdo con la Figura 1 después del aprovechamiento. Para ello se utilizó una cinta diamétrica para medir el diámetro ( $d_i$ ) sobre la corteza en el suelo y a diferentes alturas: 0.3 m, 2.3 m y cada 2.0 m a lo largo del tronco hasta el ápice del árbol (Cañadas et al. 2018a,b). El volumen total de cada árbol ( $V$ ,  $m^3$ ) se calculó midiendo el diámetro en cada extremo de la sección ( $d_i$  y  $d_{i+1}$ ) y la longitud de las secciones ( $l$ ) de los ejemplares talados mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{l\pi}{3} \left[ \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 + \frac{(d_i d_{i+1})}{4} + \left(\frac{d_{i+1}}{2}\right)^2 \right]$$

Donde

$V$  = Volumen

$l$  = largo de la troza

$d_i$  = diámetro al inicio de la sección de la troza

$d_{i+1}$  = diámetro en cada extremo de la sección de la troza

Además, se dispone de información relacionada a captura de carbono de fuste, ramas, y hojas en relación con el diámetro a la altura del pecho de 50 árboles de diferentes clases diamétrica (Cañadas 2018a). Con todos los antecedentes expuestos anteriormente es preciso mencionar que a partir de estos datos se desarrollará la presente investigación.

### 3. Metodología

Para determinar el crecimiento, producción y captura de carbono aéreo del *Centrolobium ochroxylum* mediante modelos no lineales y alométricos y de esta forma establecer su potencial en los sistemas silvopastoriles de la costa baja del Ecuador; se procedió en primer lugar a identificar el modelo que mejor se ajuste para describir el crecimiento en altura y diámetro en relación con la edad de la especie forestal. Posteriormente estimamos el aporte de carbono del tronco, ramas y hojas de la misma especie. Finalmente, se aplicaron modelos alométricos para establecer el potencial en captura de carbono.

#### 3.1. Selección del modelo que permita describir el crecimiento *Centrolobium ochroxylum*.

##### 3.1.1. Función índice de sitio

Para identificar el modelo que mejor se ajuste para describir el crecimiento en altura en relación con la edad del *Centrolobium ochroxylum*, fue necesario en primer lugar organizar la base de datos que consistió en ordenar de menor a mayor las variables altura, diámetro y edad promedio observados en todos los sitios de estudio. Una vez organizado la base de datos; la información fue ingresada al programa Statistica, versión 14; se empleó en análisis de modelos no lineales y se seleccionó el método de Gauss Newton para encontrar los parámetros que optimicen y proporcionen los parámetros que encuentren el menor cuadrado de la función no lineal (Bortz y Shuster, 2011). Del programa se obtuvo el análisis de los datos observados, predichos y sesgo; misma información se utilizó para realizar la validación del modelo mediante el análisis de los cinco criterios de evaluación para identificar el modelo con los valores óptimos de selección.

La función que se probó para mostrar la bondad de ajuste de Índice de Sitio fue la siguiente:

Autor	Función de Índice de Sitio	Ec.
Polinómica 2 <sup>do</sup> grado	$H = a + b * t + c * t^2$	(1)
Hossfel	$H = \frac{t}{a + b * t + c * t^2}$	(2)

$$\text{Levakovic} \quad H = a * \left( \frac{t}{b + t} \right)^c \quad (3)$$

H = altura total del árbol; t = edad del árbol; a, b, c los parámetros de las funciones a determinar.

### 3.1.2. Función diámetro a la altura del pecho (DAP)

Para encontrar el modelo más adecuado que describa el crecimiento en diámetro en relación con la edad de *Centrolobium ochroxylum*, se llevó a cabo un proceso que comenzó con la organización de la base de datos. Esta organización consistió en ordenar de menor a mayor las variables de altura, diámetro y edad promedio observadas en todos los sitios de estudio. Una vez que la base de datos estuvo organizada, se introdujo la información en el programa Statistica, versión 14. Se utilizaron análisis de modelos no lineales, y se optó por el método de Gauss-Newton para determinar los parámetros que optimizan y proporcionan el menor cuadrado de la función no lineal (Bortz y Shuster 2011). Del programa se obtuvo el análisis de los datos observados, predichos y sesgo; misma información se utilizó para calcular los cinco criterios de evaluación para identificar el modelo con los valores óptimos de selección

La función que se probó para mostrar la bondad de ajuste de Índice de Sitio fue la siguiente:

<b>Autor</b>	<b>Función de DAP</b>	<b>Ec.</b>
Polinómica 2 <sup>do</sup> grado	$DAP = a + bt * ct$	(1)
Hossfel	$DAP = \frac{t}{a + b * t + c * t^2}$	(2)
Levakovic	$DAP = a * \left( \frac{t}{b + t} \right)^c$	(3)

DAP = diámetro a la altura del pecho; t = edad del árbol; a, b, c los parámetros de las funciones a determinar.

### 3.1.3. Función volumen

Para la parametrización de la función de volumen, se dispone de los datos de campo obtenidos sobre el volumen total en relación con el DAP y ht de 195 árboles de la especie forestal *Centrolobium ochroxylum*. Para ello, en primer lugar, se organizó la base de datos de DAP, altura y volumen de mayor a menor mediante la función ordenar y filtrar



en el programa Excel. Una vez ordenados los datos y a través del programa Estadística se seleccionó las ecuaciones no lineales, se escribió las funciones propuestas y mediante el método Gauss Newton el programa reportó los parámetros obtenidos y la información necesaria para la evaluación de las funciones de volumen probadas. Se ensayaron tres funciones para estimar el volumen del *Centrolobium ochroxylum* propuesto por Burkhart (1977) con la finalidad de determinar se ajusta mejor para describir el volumen del *Centrolobium ochroxylum*, siendo estas las siguientes:

<b>Autor</b>	<b>Función</b>	<b>Ec.</b>
	$V = a + b * DAP^2 * H$	(4)
Burkhart, (1977)	$V = a + b * DAP^a * H^c$	(5)
	$V = DAP^c / (a + \frac{b}{H})$	(6)

V = volumen del árbol; DAP = diámetro a la altura del pecho; a, b, c los parámetros de las funciones a determinar.

#### **3.1.4. Validación de modelos**

Para la validación de los modelos desarrollados, primero se utilizó el reporte de datos observados, predichos y sesgo para realizar los cálculos en el programa Excel de los cinco criterios de evaluación propuestos para el *Centrolobium ochroxylum*. En la Tabla 2 se detallan los criterios de evaluación utilizados, mismos que fueron presentados por Cañadas et al. (2014).

Tabla 2.

**Cinco criterios para la evaluación del ajuste de un modelo. MRES mide las BIAS, los cuatro criterios restantes indican la precisión de un modelo ( $y$  = valores observados;  $y'$  = valores predichos;  $(y - y')$  = sesgo;  $p$  = número de parámetros del modelo).**

Criterio	Fórmula	Valor ideal
Residuo promedio	$MRES = \frac{\sum (y_i - \gamma_i)}{n}$	0
Promedio absoluto de residuos	$AMRES = \left  \frac{y_i - \gamma_i}{n} \right $	0
Raíz cuadrada del error promedio medio cuadrático	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \gamma_i)^2}{n - 1 - p}}$	0
Eficiencia del modelo	$MEF = \frac{\sum (y_i - \gamma_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$	0
Radio de varianza	$RV = \frac{\sum (\gamma_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$	1

$y_i$  = valor observado;  $\gamma_i$  = valor predicho;  $n$  = número de observaciones,  $p$  = número de parámetros de la función;  $a, b, c$  los parámetros de las funciones a determinar.

Fuente: Cañadas et al. 2014.

### 3.2. Estimación del aporte de carbono del tronco, ramas y hojas de *Centrolobium ochroxylum* para determinar la biomasa.

El segundo objetivo de la presente investigación se estimó el aporte de carbono del tronco, ramas y hojas para determinar la biomasa. La base de datos Cañadas (2018a) cuenta con la información sobre el contenido de carbono del fuste, ramas y hojas. Así como la densidad de estos componentes de la biomasa del Amarillo Guayaquil en sistemas silvopastoriles, los análisis fueron realizados en la Estación Experimental Tropical Pichilingue del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (EETP-INIAP). Los datos provienen de los alrededores de la EETP-INIAP del cantón Quevedo, provincia de Los Ríos y son de 50 árboles con diferentes clases diamétricas.

Para estimar el carbono: 1) Se dispone del volumen de los componentes de la biomasa de *Centrolobium ochroxylum* 2) Se multiplicó por el contenido de humedad de cada

componente para tener el peso seco, de cada uno de los componentes de la biomasa aérea. 3) Se multiplicó por la densidad de cada componente y se obtiene el peso en kg. 4) El peso en kg se multiplicó por el contenido de Carbono de cada componente. 5) Finalmente se multiplica por 3,66 que es el factor de conversión molar para obtener  $\text{Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$  y tenemos como resultado en unidades de carbono (Derwisch et al 2009). Como se tiene diferentes rendimientos expresados en el crecimiento de Altura (índice de sitio), entonces se puede calcular, siguiendo los pasos descritos para la captación de carbono por índice de sitio.

No obstante, en la presente investigación no se determinó la biomasa de las raíces debido a que los costos de su investigación que implican la contratación de una retro excavadora. Pero más allá de los costos, existe la teoría denominada “source–sink theory” teoría fuente-sumidero que se refiere a la asignación de recursos, basada en el teorema tres de Bloom et al. (1985), en la que los árboles que crecen en zonas infértiles deberían destinar una mayor proporción de sus recursos a la producción de raíces finas que los que crecen en zonas fértiles, ya que esta "inversión" en la adquisición de nutrientes debería aumentar el crecimiento y/o la reproducción de las raíces. Así, la variación de sitio observada, requeriría de un ingente número de raíces de árboles por sitio que variarían por la fertilidad del suelo.

### **3.3. Aplicación de modelos alométricos para establecer el potencial de captura de carbono de *Centrolobium ochroxylum***

El tercer objetivo planteado fue aplicar modelos alométricos para establecer el potencial en captura de carbono de *Centrolobium ochroxylum*. En primer lugar, se repiten los pasos 1, 2 y 3 para estimar la biomasa, luego se generó una base de datos en Excel de biomasa y DAP. Para la obtención de los modelos alométricos se procedió a linearizar las funciones no lineales siguiendo los subsiguientes pasos: 1) Se extrae el Logaritmo Natural del diámetro. 2) Se realizó el ajuste de los modelos alométricos y se extrajo el Logaritmo Natural del diámetro. 3) Se pasa al programa Statistica la base de datos obtenida. 4) Finalmente se aplicó modelos lineales y se obtuvo los parámetros de los modelos alométricos. Debido a que la altura es una parte fundamental de la biomasa se procedió a incorporar en los modelos alométricos para notar si mejora la predicción de la biomasa de *Centrolobium ochroxylum*.



## Capítulo tercero: Análisis de resultados y discusión

### 1. Análisis de resultados

#### 1.1. Identificación del modelo de *Centrolobium ochroxylum*

##### 1.1.1. Índice de Sitio y validación de modelo para *Centrolobium ochroxylum*

Se detalla en la Tabla 3 el resultado del análisis de los cinco criterios de evaluación de la función de Índice de Sitio para el *Centrolobium ochroxylum*, identificando que la función Hossfel presentó los valores más cercanos al valor ideal en comparación con las otras dos funciones evaluadas Polinómica 2do grado y Levakovic. La función Hossfel mostró ser precisa y no distorsionada.

Tabla 3.  
Criterios para la evaluación de la función de Índice Sitio para el *Centrolobium ochroxylum*, en siete provincias de la costa baja del Ecuador.

Parámetro de evaluación	Funciones de Índice de Sitio		
	Polinómica 2do grado	Hossfel	Levakovic
Residuo promedio	0,14	-0,03	8,26
Promedio absoluto de residuos	0,14	0,03	8,26
Raíz cuadrada del error promedio cuadrático	0,38	0,17	2,78
Eficiencia del modelo	0,1	0,004	329,00
Radio de varianza	1,05	1,00	1,32

Fuente: Elaboración propia a partir de la evaluación de la función índice sitio, 2023

Los parámetros de la función Hossfel para la estimación del índice de sitio del *Centrolobium ochroxylum* es la siguiente:

$$H = \frac{t}{0,8412 - 0,0236 * t + 0,0010 * t^2}$$

En la Figura 5a se presenta el IS para el *Centrolobium ochroxylum* promedio de la zona de estudio. Mientras que en la Figura 5b se muestra la altura máxima posible a la edad de 10 años para el *Centrolobium ochroxylum*. En los mejores sitios de calidad de suelos y precipitación para el crecimiento del *Centrolobium ochroxylum* se puede esperar una altura de 18 m., mientras que en los peores sitios se puede esperar un crecimiento de 10 m a la edad de 10 años en una disposición de cercos vivos dentro de los sistemas silvopastoriles estudiados.

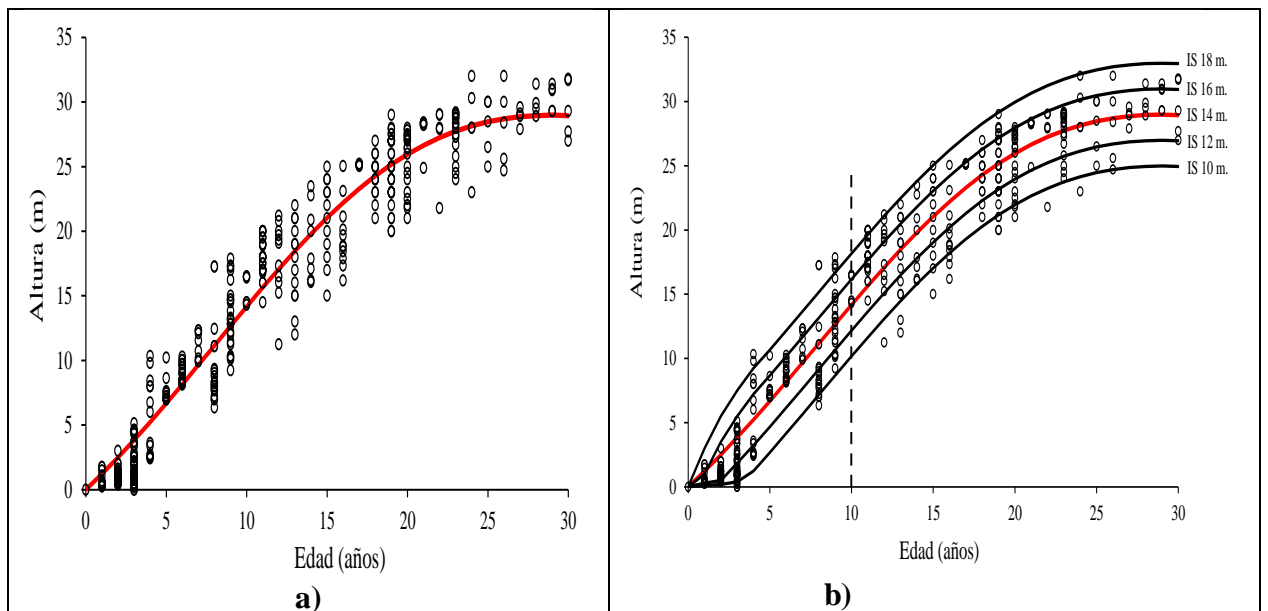


Figura 5. Relación edad altura total para el *Centrolobium ochroxylum* (a). Representación de la altura total máxima para la edad de 10 años (b).

Fuente: Elaboración propia.

### 1.1.2. Diámetro y validación de modelo para *Centrolobium ochroxylum*

Los valores ideales de selección para el DAP es la función Hossfel, acercándose a los valores óptimos de selección, seguidos por la función Polinómica 2do grado y en tercer lugar la función Levakovic (Tabla 4).

Tabla 4.  
**Criterios para la evaluación de la función DAP de *Centrolobium ochroxylum*, en 5 provincias de la costa baja del Ecuador.**

Parámetro de evaluación	Funciones de IS		
	Polinómica 1	Hosffel	Levakovic
Residuo promedio	-0,03	-0,02	4399,8606
Promedio absoluto de residuos	0,03	0,02	146,6620
Raíz cuadrada del error promedio medio cuadrático	0,11	0,0082	10,6020
Eficiencia del modelo	0,006	0,0003	509,1064
Radio de varianza	0,99	1,0248	0,0344

Fuente: Elaboración propia, basados en los datos de Cañadas 2013.

Los parámetros de la función Hosffel para establecer la relación DAP/edad es la siguiente función:

$$DAP = \frac{t}{0,8412 - 0,0236 * t + 0,0010 * t^2}$$

En la figura 6 demuestra influencia de la calidad del sitio en relación con las condiciones ecológicas. Existiendo lugares de alto crecimiento y de bajo crecimiento, lo cual está en relación con la captura de carbono dentro del área de estudio.

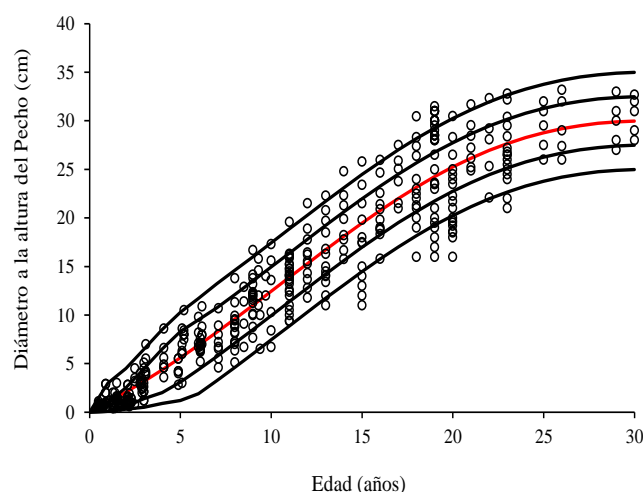


Figura 6. Relación edad diámetro a la altura pecho para el *Centrolobium ochroxylum*.  
Fuente: elaboración propia

### 1.1.3. Volumen y validación de modelo para *Centrolobium ochroxylum*

Se resume los cinco criterios de evaluación de la función volumen del *Centrolobium ochroxylum* (Tabla 5). Las tres variantes de las funciones propuestas por Bukard (1977), representada por la Ec. 5 es la que se acerca al valor de selección óptimo, por lo tanto, es la ecuación que mejor describe el volumen total del árbol y puede fácilmente predecir el volumen del árbol en m<sup>3</sup>, conociendo el diámetro y la altura del árbol.

Tabla 5.  
Criterios para la evaluación de la función de volumen para el *Centrolobium ochroxylum*, en 7 provincias de la costa baja del Ecuador.

Criterios de evaluación	Bukard (1977)		
	Ec. 4	Ec. 5	Ec. 6
Residuo promedio	0,0001	0,00047	-0,07119
Promedio absoluto de residuos	0,0001	0,00047	0,07119
Raíz cuadrada del error promedio medio cuadrático	0,000001	0,000002	0,0175
Eficiencia del modelo	0,0000001	0,0000001	0,00029
Radio de varianza	1,375	1,1107	1,5130

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de la Ec. 5 resultante después de la parametrización son:

$$V = -0,0580 + 0,00107 * DAP^{-0,0871} * H^{1,9974}$$

### 1.2. Estimación del aporte de carbono del tronco, ramas y hoja de *Centrolobium ochroxylum*

A partir de la función de la Ec 5, obtenemos el volumen; por ejemplo, si tenemos un árbol de 16,01 cm de DAP y una altura de 16,68 m, se tendría un volumen de 0,17 m<sup>3</sup> de acuerdo con el modelo obtenido. Este volumen se multiplicó por el 75 % de contenido de humedad para obtener el peso seco del árbol obteniendo como resultado 0,12 m<sup>3</sup>. La densidad del *Centrolobium ochroxylum* es de 570 kg m<sup>-3</sup>; entonces para obtener el peso del árbol en kg, se suprimió las unidades de medida igual y se obtuvo el peso del árbol,



siendo éste de 6,80 kg. Este peso se multiplica por el contenido promedio de carbono que es de 50% y se obtiene un total de 3,4 kg.

En segundo lugar, se calculó el peso del dióxido de carbono secuestrado por árbol, como el CO<sub>2</sub> está compuesto de una molécula de Carbono y 2 de Oxígeno, se considera lo siguiente:

El peso atómico del Carbono es 12,0011 g/mol

El peso atómico del Oxígeno es 15,9994 g/mol

El peso del CO<sub>2</sub> es  $C+2*O = 43,9999$

La relación CO<sub>2</sub> a C es  $43,9999 \text{ g/mol} / 12,0011 \text{ g/mol} = 3,6663$

Por lo tanto, para determinar el peso de dióxido de carbono secuestrado por árbol, se multiplica por el peso de carbono en el árbol de 3,6663. Entonces producto de esta operación de 3,4 kg x 3,6662 g/mol se obtiene un total de 12,46 kg de CO<sub>2</sub> secuestrado en un árbol de *Centrolobium ochroxylum* con dimensiones 16,01cm de DAP y una altura de 16,68 m.

La proporción de tronco, ramas y follaje de la biomasa arbórea total está en función del DAP se demuestra en la Figura 5. En las clases de menor diámetro (DAP), el follaje representaba hasta el 45% de la biomasa total, mientras que en las clases superiores de DAP la proporción de follaje estuvo alrededor del 10%. La concentración media de Carbono osciló entre el 44 y el 47% y no varió significativamente entre clases de DAP y tipos de tejido de acuerdo con los datos facilitados en Cañadas (2013). Las proporciones de los componentes aéreos del árbol en relación a su DAP, fueron tomados de Cañadas (2013) para la estimación del aporte de carbono de ramas y hojas (Figura 7). Esta información es necesaria para calcular el porcentaje de biomasa de los diferentes componentes del árbol.

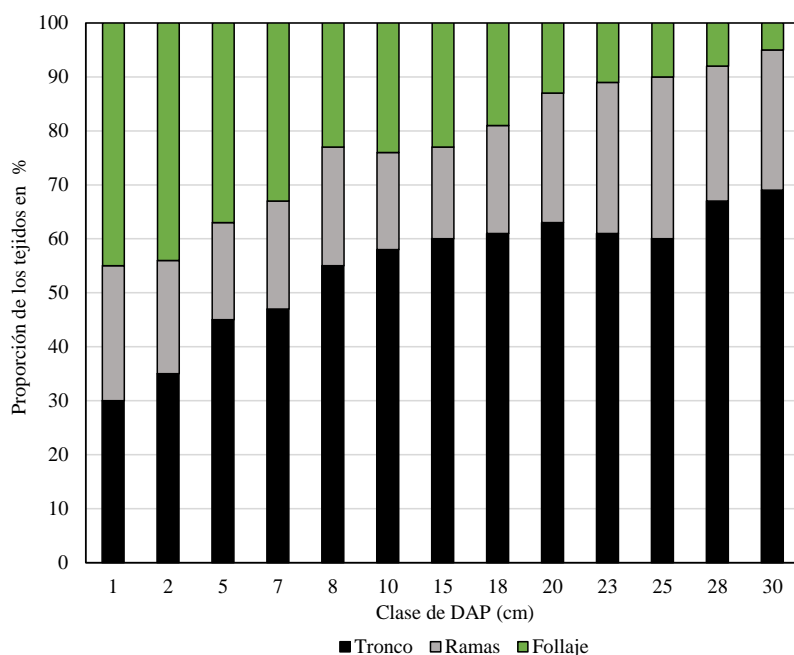


Figura 7. Proporción de follaje, ramas y biomasa del tronco del peso fresco por clase de DAP en sistemas silvopastoriles en la costa baja del Ecuador.

Fuente: Cañadas (2013)

Esta información fue empleada para el cálculo de biomasa total del árbol y en la Figura 8 se presenta la fijación de carbono aéreo para los sistemas silvopastoriles en relación con el transcurso de los años para una cantidad de 160 árboles de *Centrolobium ochroxylum*.

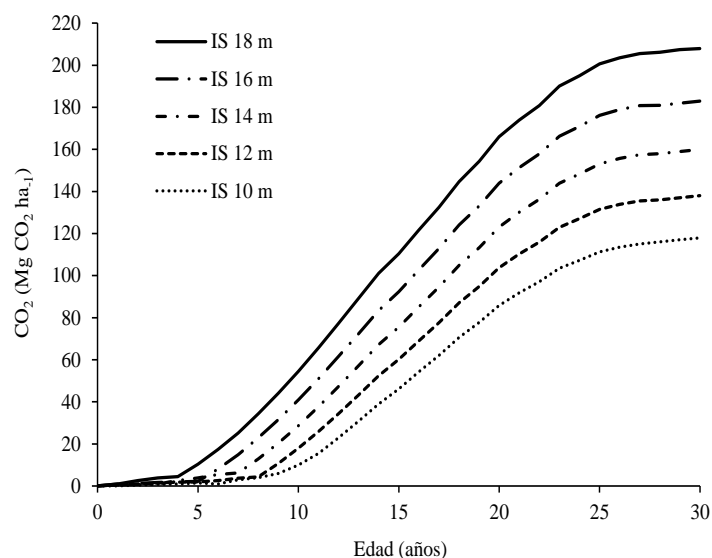


Figura 8. Relación de la captura de Carbón en la biomasa del *Centrolobium ochroxylum* en Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> y el transcurso en edad del sistema silvopastoriles en años, por índice de sitio en siete provincias del Ecuador.

Fuente: Elaboración propia

### 1.3. Aplicación de modelos alométricos de *Centrolobium ochroxylum*

Se exponen los modelos alométricos con su respectivo coeficiente de regresión para la estimación de la biomasa para los sistemas silvopastoriles en 7 provincias de la costa baja del Ecuador

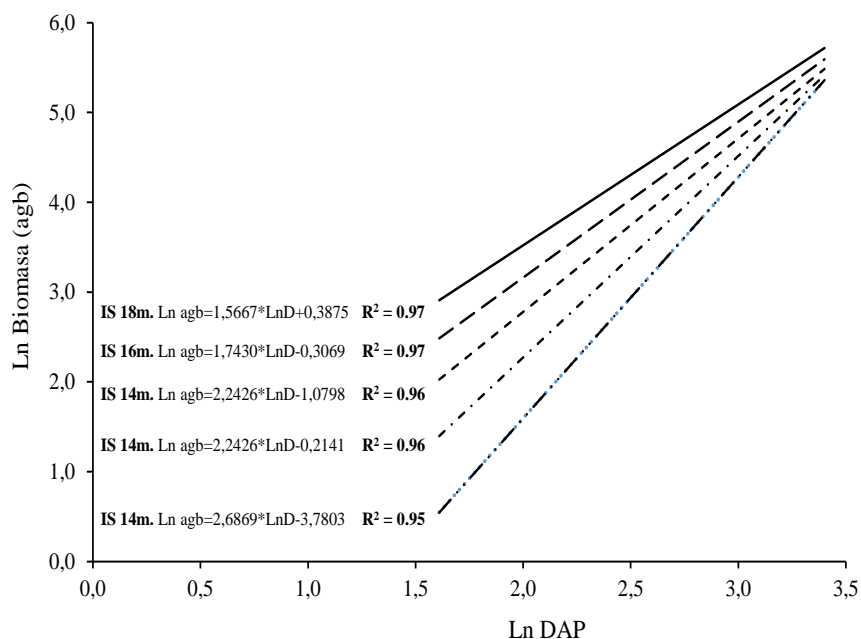


Figura 9. Modelos alométricos y su coeficiente de regresión.

Fuente: Elaboración propia

La formulación alométrica resultante para el índice de sitio 18 m expuesta en la Figura 9, puede ser mejorada en relación con el coeficiente de regresión obtenido de 0,9773, al incorporar la altura como una variable predictora de la captura de Carbono se puede observar el incremento del coeficiente de regresión (Tabla 6).

Tabla 6.

**Coefficientes de regresión estimados mediante el modelo alométrico y la incorporación de la altura como variable predictora de la captura de carbón para el índice de sitio 18 m en sistemas silvopastoriles de siete provincias de la costa baja del Ecuador**

Forma del modelo	a	b	c	d	SEE	R <sup>2</sup>
$\text{Ln abg} = a * \text{D} + b$	1,57	0,39			0,22	0,97
$\ln \text{ agb} = \ln a + b \ln D + c \ln H$	0,95	1,25	-0,29		0,12	0,98
$\ln \text{ agb} = \ln a + b \ln D + c \ln H + d \ln D * \ln H$	1,85	1,78	-1,00	0,0451	0,23	0,99

Fuente: Elaboración propia

## 2. Discusión

### 2.1. Identificación del modelo para *Centrolobium ochroxylum*

Para la identificación del modelo para *Centrolobium ochroxylum* se detallan a continuación las funciones de crecimiento de índice de sitio, diámetro y volumen.

#### 2.1.1. Altura

La altura representada por el índice de sitio se incrementa con el aumento de las precipitaciones y disminución de la aridez. Por tal motivo se probaron tres modelos para establecer el índice de sitio del *Centrolobium ochroxylum* en la costa baja del Ecuador. La función que mejor se ajustó para predecir el crecimiento en ht conocido como índice de sitio fue el modelo de Hossfel, después de mostrar los valores más cercanos a los valores ideales de: residuo promedio, promedio absoluto, raíz cuadrada del error promedio medio cuadrático, eficiencia del modelo y el radio de varianza (Cañadas et al. 2014). EL modelo de Hossfeld es un modelo que proporciona ajustes más realistas en el en la predicción de variables forestales como la altura y el diámetro (Hernández-Cueva et al. 2018). Las curvas de crecimiento teórico pueden ser empleadas para estimar el índice de sitio o predecir el crecimiento diamétrico en el campo forestal (Hossfeld 1822). Las curvas de crecimiento predicen diferentes variables forestales en función de la edad, representando tres etapas de crecimiento a lo largo de la vida del árbol: exponencial, lineal y asintótico. Las funciones de crecimiento teórico pueden aparecer en forma de diferencial, integral o algebraica (Arias-Rodil et al. 2014; Cañadas et al, 2012).

En el área de estudio se obtuvo un crecimiento de 18 m en altura a la edad de 10 años para el *Centrolobium ochroxylum* en los mejores sitios de crecimiento para esta especie. Cañadas (2013) estableció un crecimiento de 20 m a la edad de 10 años empleando la función Chapman Richards. Para comparar con otras especies de la costa baja del Ecuador, Alder y Montenegro (1999) obtuvieron una altura de 28 m a la edad de 10 años para el Laurel (*Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken). Para la misma especie, pero en la región Amazónica se observó una altura de 20 metros a la edad de 10 años (Cañadas et al. 2023b). Cañadas et al. (2019) reportó crecimientos de 30 metros a la edad de 5 años de para la Balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) una especie nativa. Mientras que, para una especie exótica como la Teca (*Tectona grandis* L.) Cañadas et al. (2018) observaron crecimientos de 23 m a la edad de 10 años. Estos datos demuestran que el *Centrolobium ochroxylum* es una especie de lento crecimiento.

En relación con el rendimiento del *Centrolobium ochroxylum* bajo condiciones limitantes de clima y suelo, se obtuvo una altura del 10 m a los 10 años. Siendo estos superiores a los reportados por Cañadas (2013) para la misma especie obteniéndose una altura de 8 m a la edad de 10 años. El Laurel en condiciones no favorables alcanza una altura de 18 m a la edad de 10 años (Alder y Montenegro 1999). La Balsa en lugares poco favorables para el crecimiento de esta especie nativa es de 5 m a los 10 años (Cañadas et al. 2019) y para una especie exótica como la Teca la altura fue de 8,7 m a la misma edad (Cañadas et al. 2018). Estos datos demuestran que, bajo condiciones desfavorables bioclimáticas tanto especies nativas como exóticas tienen serias limitaciones en su crecimiento y podría dar un indicio del rendimiento de los proyectos de forestación en este tipo de condiciones bioclimáticas. Estos resultados serían una respuesta a lo que enfatizaron Clewell y Aronson (2013) que está ampliamente aceptado que, para reforestar ecosistemas degradados, debe centrarse en las especies nativas.

Por otro lado, la absorción neta de carbono de la atmósfera por parte de los árboles se ve reflejada en su producción neta. Esta depende del clima, el historial de perturbaciones de los árboles, las prácticas de manejo, la edad de los árboles y el tipo de distribución espacial de los árboles (Hudiburg et al. 2009). Como consecuencia de esta diversidad de zonas climáticas, condiciones de suelo y especies arbóreas, los distintos modelos alométricos generan grandes discrepancias en las estimaciones de biomasa (Neumann et al. 2016). Por lo tanto, en la actualidad se alienta a la generación de modelos alométricos localizados y específicos para cada especie y desarrollar modelos específicos para esta especie en relación con la biomasa aérea y captura de carbono (Tang et al. 2017). De tal manera que se han desarrollado modelos como BIOME BGC (Pietsch et al. 2005), CLM (Lawrence et al. 2011) y C-FIX (Veroustraete et al. 2002), que son herramientas eficaces para estimar la biomasa regional o incluso mundial.

Es necesario enfatizar que el índice de sitio es un parámetro forestal que se debe tomar en cuenta para la producción forestal o para el cálculo de la captura de carbón, debido principalmente a que es una de las variables que no se ve influenciada por los cambios en la densidad y los tratamientos de raleo que se apliquen a los rodales (Hernández-Cuevas et al., 2018). Adicionalmente, la altura está relacionado con el volumen total, el cual es fácil de evaluar, siendo un indicador de la productividad forestal (Cañadas et al. 2018). El índice de sitio permite estimar la productividad de un sitio forestal de manera práctica. El concepto de índice de sitio se basa en la idea de que los sitios más fértiles para una especie determinada producirán árboles de mayores

dimensiones a una determinada edad establecida, mientras que en sitios pobres sería todo lo contrario (Ivancich et al. 2011).

### **2.1.2. Diámetro**

El crecimiento en diámetro del Amarrillo Guayaquil a la edad de 10 años fue de 13,5 cm en los mejores sitios y de 7,5 cm en los peores sitios. Estos valores estuvieron por debajo a los mostrados por la Teca en sistemas silvopastoriles en lugares limitantes en la costa baja del Ecuador fue de 10,0 cm (Cañadas et al. 2018a,b,c). Es necesario resaltar que la disposición de árboles en hileras como en los sistemas silvopastoriles estudiados, de acuerdo Shorohova et al. (2009) la distribución diamétrica es similar a la de bosques de edad uniforme, homogénea y que carece de individuos suprimidos. Las tasas de crecimiento de los árboles y por lo tanto, las tasas de ganancia de carbono, para árboles dispuestos en hileras aumentaron continuamente con el diámetro del árbol (van Den Berge et al. 2021). Es decir que los incrementos diamétricos tendrían un crecimiento de acuerdo con los observados en la Figura 4 para las siete provincias estudiadas en la costa baja ecuatoriana.

El crecimiento del diámetro del árbol se usa comúnmente para estimar el secuestro de carbono en la biomasa aérea en los bosques, a partir de establecer el crecimiento en parcelas de intervalo del diámetro y la altura (Hiura 2005) o anillos de crecimiento de los árboles (Hogg y Wein 2005). Al revelar cómo el crecimiento del diámetro del árbol responde a las condiciones climáticas nos ayudaría a entender los mecanismos biológicos de los bosques en el almacenamiento de carbono (Ohtsuka et al. 2009). Sin embargo, el crecimiento del diámetro depende simultáneamente de las características del árbol (p. ej., edad, tamaño, estado de la competencia, disposición dentro de un sistema), microambiente y especies. Todas estas variaciones hacen que sea difícil dilucidar los efectos del clima en el crecimiento del diámetro de los árboles, especialmente en bosque naturales que tiene árboles de varios tamaños, diversas especies, crecimiento y captación de carbono (Nabeshima et al. 2010).

El aumento de la superficie foliar total de un árbol es suficiente para superar la disminución de la eficiencia del crecimiento con el aumento del tamaño del árbol, lo que hace que incremente la tasa de acumulación de carbono de todo el árbol (Stephenson et al. 2014). En setos e hileras de árboles las alturas y las copas de los árboles son, respectivamente menores, mientras que en los bosques son mayores (Van Den Berge et

al. 2021; Vanneste et al. 2020), lo que probablemente se traduce en un aumento aún mayor de la superficie foliar con el incremento del tamaño del árbol y, por tanto, un incremento mayor de la superficie foliar con la edad (Vanneste et al. 2020).

### **2.1.3. Volumen**

La biomasa del tronco del *Centrolobium ochroxylum* se estimó a partir del volumen mediante una constante de densidad de la madera y el carbono se estimó a partir de la biomasa mediante una constante de contenido de carbono, describiendo la variación en las estimaciones de la densidad y el contenido de carbono, respectivamente, procedimiento que se puede encontrar en Ilic et al. (2000) y Gifford (2000a, 2000b). La función que más se ajustó al volumen del *Centrolobium ochroxylum* fue la Ec. 5 (Burkhart 1977).

El incremento de volumen es un indicador útil del incremento de biomasa, ya que muchos estudios demuestran que el volumen de madera está linealmente relacionado con la biomasa. También es una medida del estado de crecimiento influida por factores ambientales, como el contenido de agua, el estado de los nutrientes, la radiación y la temperatura. Entre los distintos tipos de rodales, existe una gran diferencia en el incremento de volumen (Walker et al. 2021). Adicionalmente, las ecuaciones de conicidad del tallo y volumen del árbol son herramientas valiosas que mejoran la eficiencia en la toma de decisiones del manejo forestal, maximización de beneficios de una empresa forestal y captura de carbono (Burkhart y Tomé 2012; Cañadas et al. 2007a; Cañadas et al. 2007b). La estimación del volumen del fuste y la biomasa de los árboles es necesaria tanto para la planificación sostenible de los bosques y para estudios sobre los flujos de energía y nutrientes en los ecosistemas. De tal manera que, la planificación estratégica y los niveles operativos han enfatizado fuertemente la necesidad de la estimación precisa del volumen del fuste (Stephenson et al. 2014).

## **2.2. Estimación del aporte de carbono *Centrolobium ochroxylum***

La biomasa área registrada en esta investigación fue de 232 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> en los mejores sitios y de 118 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> en los sitios menos favorables para el crecimiento del *Centrolobium ochroxylum* a la edad de 30 años. Estos resultados están por debajo a los reportados en la costa baja del Ecuador bajo condiciones de plantaciones de Laurel por

Olschewski y Benítez (2005) determinando el potencial total de secuestro de carbono en la biomasa para de 460 tCO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> después de 15 años. Esta comparación de fijación de carbono se puede tomar como referencia, debido a que las condiciones de competencia por densidad no son iguales entre plantaciones y sistemas silvopastoriles de cercos vivos, así como la disposición de ramas, hojas y sobre todo la forma de fuste (Cañadas et al., 2018b; Cañadas et al., 2023<sup>a</sup>). Bajo condiciones de la Amazonía ecuatoriana Torres et al. (2019) reportaron para un gradiente altitudinal entre 600 a 1000 msnm de bosque nativo entre un rango de 200-300 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, al tratarse de bosque nativo, no se determinó su edad. De acuerdo con Baker et al. (2004), Unger et al. (2012) y Keeling y Phillips (2007) los bosques tropicales del mundo no suelen tener valores de AGB superiores a 350 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, con edad indeterminada. Sin embargo, Nascimento y Laurance (2002) informan de valores de casi 400 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> en selvas amazónicas centrales inalteradas (sin determinación de edad). Otra excepción notable son los bosques de dipterocarpaceas del sudeste asiático con valores de AGB (biomasa sobre el nivel del suelo) superiores a 450 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> (Slik et al. 2009, 2010). Es importante tener en cuenta que estos valores siguen siendo conservadores, ya que la mayoría de los estudios sólo se centran en árboles superiores a 10 cm de DAP (Nascimento y Laurance 2002). A pesar de que los resultados, al igual que los de Nascimento y Laurance (2002) sugieren un elevado potencial de almacenamiento de carbono.

La fijación por año de carbono del *Centrolobium ochroxylum* en plantaciones en hileras formando sistemas silvopastoriles fue de 7,7 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en el mejor sitio de crecimiento, mientras 3,9 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en los peores. Comparándolos con plantaciones puras de teca y que muestra un de crecimiento de moderado a lento (Cañadas et al., 2018b), la captura de carbono de *Centrolobium ochroxylum* están por debajo de los encontrados en la India, Murphy y Lugo (1986) reportaron producciones de biomasa de madera del tronco de la Teca oscilaba entre 4 y 18 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en regiones tropicales secas en comparación con 10-30 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en regiones tropicales húmedas. En varias plantaciones jóvenes de árboles para leña (*Prosopis*, *Eucalyptus*, *Leucaena*, *Cassia*, *Casuarina* y *Albizia*) en trópicos secos, la producción total de biomasa puede superar las 20 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, pero no está claro si estos rendimientos pueden mantenerse durante muchas rotaciones (Murphy y Lugo 1986).

Los ingresos generados para un periodo de 30 años de los sistemas silvopastoriles del *Centrolobium ochroxylum* dependen de las condiciones favorables para el crecimiento de esta especie y generaría ingresos de USD 309 ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en los mejores sitios y USD



157 ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en los peores (cálculos propios). Estos valores están por debajo de los calculados por Olschewski y Benítez (2005) calculado los valores actuales netos para un periodo de 30 años reportaron valores de 378 USD/ha, 599 USD/ha y 1528 USD/ha para los diferentes sitios de la costa baja del Ecuador.

### **2.3. Aplicación de modelos alométricos para *Centrolobium ochroxylum*.**

Se generó en la Figura 9 un grupo de ecuaciones alométricas para describir la producción de biomasa en relación con la calidad de las condiciones ambientales en las siete provincias investigadas resaltando el potencial de almacenamiento del Carbono. Los modelos empíricos intentan estimar la biomasa a partir de correlaciones observadas, pero también hay diferentes intentos de establecer teorías universales biológicamente plausibles sobre los patrones de biomasa en los árboles. Estas últimas utilizan relaciones de escala teóricas que pretenden explicar la biomasa de los árboles para una amplia gama de especies (Bertalanffy 1957; Enquist 2002; Niklas y Enquist 2002). Debido a las diferentes perspectivas y motivaciones de los desarrolladores de modelos, las posibles implicaciones biológicas de la alometría de las plantas no suelen tomarse en cuenta en la de regresión empírica y, por lo general, no se intenta examinar o explicar teóricamente la estructura de los modelos.

Un modelo de reservas de carbono es una ecuación o sistema de ecuaciones que describe la relación entre las reservas de carbono de un árbol o rodal individual y otros factores del estudio. Este modelo se utiliza para deducir las reservas de carbono a partir de variables de sondeo fáciles de obtener. Si las variables independientes del modelo incluyen la edad del árbol, entonces se convierte en un modelo de crecimiento de las reservas de carbono que se utiliza para comprender, explicar y predecir el proceso de crecimiento de las reservas de carbono. La construcción de este tipo de modelos suele basarse en datos de inventario forestal o en datos de panel extraídos de los anillos de los árboles. El análisis de los patrones de crecimiento de las especies arbóreas basado en determinar el crecimiento de diámetro/altura o las series de anillos de los árboles proporciona información de suma importancia sobre su ecología, dinámica de crecimiento, tasas de crecimiento y los cambios en el almacenamiento de Carbono a largo plazo (Baker et al. 2005; Baker y Bunyavejchewin 2006; Brienen et al. 2010; Schöngart et al. 2015; Zheng et al. 2023).

Es necesario conocer mejor las reservas y los flujos de carbono para comprender el estado actual del ciclo del carbono y su posible evolución en función de los cambios en el uso de la tierra y las condiciones climáticas (Hollinger 2008). Esto ha llevado a un mayor interés en la estimación de la biomasa forestal con fines prácticos y científicos. El diámetro a la altura del pecho fue la principal variable explicativa empleada para estimar los componentes de la biomasa arbórea para todas las especies (Tang et al. 2017). Varios autores han señalado que la inclusión de la ht no suele aumentar sustancialmente la capacidad de predicción de las regresiones de biomasa basadas en el diámetro y asumen que el DAP es suficiente para obtener una predicción fiable de la biomasa arbórea (Johanso et al. 1999; Porte et al. 2002; Jenkins et al. 2003; Fehrmann y Kleinn 2006).

Sin embargo, otros autores han encontrado una mejora significativa en los ajustes del modelo de biomasa (Reed y Tomé 1998; Bartelink 1996) o un aumento en la precisión de las estimaciones de biomasa (Menéndez-Miguélez et al. 2013) cuando se añade la altura como un predictor de los modelos alométricos. En la presente investigación, el DAP por sí solo fue un buen predictor de la biomasa, pero la adición de la altura como segunda variable mejoró las predicciones para varias especies (Tabla 5). Se encontró una fuerte relación entre los componentes de la biomasa y la ht de la biomasa arbórea y de la biomasa total bruta del Amarrillo Guayaquil. Lambert et al. (2005), Bi et al. (2004) y Zhao et al. (2015) también encontraron que la inclusión de la altura del árbol mejoraba la precisión de la predicción de la biomasa del tronco. Estos resultados son coherentes con los resultados presentados en la Tabla 5.

#### **2.4. Potenciales y limitaciones de la captura de carbono por parte de *Centrolobium ochroxylum*.**

Los resultados de crecimiento en altura de *Centrolobium ochroxylum* son de 18 m en los mejores sitios y de 10 m bajo condiciones de crecimiento adversas. Alder y Montenegro (1999) establecieron para una especie nativa como el Laurel, IS de 28 m y 18 m en los peores sitios a la edad de 10 años. Cañadas et al. (2018b) estableció para la Balsa IS de 20 m y 12 m a la edad de 10 años. Mientras que para la Teca Cañadas et al. (2018b) determinó un IS de 22,7 m y 8,7 m. Estas diferencias en el crecimiento en altura, la misma que esta correlacionada con el DAP, entonces *Centrolobium ochroxylum* será la especie que menor captura de carbono muestre. Es decir, la que menos costo de

oportunidad ofrece a los productores interesados en el establecimiento de sistemas silvopastoriles. No obstante, los beneficios a largo plazo de preservar especies nativas pueden incluir, la resiliencia del ecosistema, debido a que las especies nativas suelen estar mejor adaptadas a las condiciones climáticas y ecológicas locales, lo que contribuye a la resiliencia del ecosistema frente a perturbaciones como cambios climáticos o eventos extremos (Chazdon et al., 2020). Las especies nativas a menudo son únicas y pueden albergar una diversidad genética importante. Conservar estas especies ayuda a mantener la biodiversidad global y contribuye a la adaptación evolutiva a largo plazo (Ortiz-Olivas et al., 2017; Hernández-Velasco et al., 2017). Las plantas nativas a menudo desempeñan funciones cruciales en la prestación de servicios ecosistémicos, como la polinización, la prevención de la erosión del suelo y la purificación del agua (Alem et al., 2017).

Estos beneficios a largo plazo deberían ser valorados para equilibrar sus costos de oportunidad frente a especies de mejores crecimientos y valor de la madera. Así, poder bajar sus niveles de amenaza para el manejo y la conservación del *Centrolobium ochroxylum*.



## Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

Este estudio subraya el potencial del *Centrolobium ochroxylum* como especie autóctona en SPS, ofreciendo una sinergia armoniosa entre ganadería, agricultura y conservación del medio ambiente. Aprovechando los conocimientos obtenidos a partir de la modelización no lineal y alométrica, podemos optimizar la integración de esta especie en prácticas sostenibles de uso de la tierra, beneficiando tanto al sector ganadero como al medio ambiente, mediante la captura de carbono. La investigación y aplicación ulteriores de estos resultados pueden contribuir al avance de los SPS y a los objetivos más amplios de sostenibilidad ecológica y agrícola.

El índice de sitio es una medida utilizada en silvicultura para evaluar la productividad de un sitio de los árboles. Este índice indica la altura potencial que determinadas especies de árboles pueden alcanzar en un número determinado de años en condiciones óptimas de crecimiento. El índice de sitio permitió clasificar el crecimiento del *Centrolobium ochroxylum* en siete provincias de la costa baja del Ecuador. Tanto el Índice de Sitio como el crecimiento del diámetro pueden ser modelados con la función de Hossfeld. Permitiendo clasificar el crecimiento del Amarrillo Guayaquil, yendo del mejor sitio al peor de 18 m en altura (13,5 cm de DAP) y a 10 m (7,5 cm de DAP) respectivamente a la edad de 10 años de los árboles. Es decir que la capacidad de crecimiento de esta especie nativa está limitada por las condiciones ecológicas y por ende existe una gradiente en la captura de carbono y el Amarrillo Guayaquil es una especie de lento crecimiento.

La función desarrollada por Burkhardt (1977) Ec. 5 para determinar el volumen total del *Centrolobium ochroxylum* fue el modelo que mejor describe el crecimiento del tronco bajo sistemas silvopastoriles y es la base para la cuantificación de la biomasa del *Centrolobium ochroxylum* dentro de sistemas silvopastoriles añadiendo al volumen total la proporción de follaje, ramas y biomasa del tronco expresado en peso fresco por clase de DAP.

Para los mejores sitios para el crecimiento del *Centrolobium ochroxylum* se espera una captura de 232 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a los 30 años (7,7 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). A razón de USD

40 por Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> se esperaría obtener un total de USD 8.320 por hectárea, generando un flujo de dinero anual de USD 309 por año. Mientras que en los sitios menos favorables se espera una captura de 118 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a los 30 años (3,9 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), por venta de Carbono se obtendría un total de USD 4.720 por hectárea o un flujo de USD 157 por año.

Se obtuvo un conjunto de ecuaciones alométricas que permite establecer el potencial en captura de carbono del *Centropium ochroxylum* para las siete provincias estudiadas. No obstante, se toma al diámetro a la altura del pecho (DAP) como la principal variable explicativa para estimar la biomasa. No obstante, esta variable es susceptible a cambios en su crecimiento por la edad, densidades, tamaño, estado de la competencia, disposición dentro de un sistema y cambian su relación con los otros componentes del árbol. Al añadir a la altura como un predictor de las ecuaciones alométricas se obtuvo una mejora significativa en los ajustes del modelo de biomasa para estimar la biomasa del *Centropium ochroxylum* en siete provincias de la costa baja del Ecuador.

## **Recomendaciones**

Dentro de los Objetivos del Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas contempla en el Objetivo 15: Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad. Lamentablemente en el Ecuador la información forestal es escasa y se encuentra poca literatura indexada, lo que refleja la falta de investigación en el campo y resalta la poca capacidad que tendría el Ecuador para cumplir con los ODS. Por tal motivo se recomienda realizar investigación en el campo forestal que permita obtener información básica de cualquier especie forestal.

Se ha desarrollado diferentes modelos preliminares de índice de sitio y diámetro, los mismos que pueden ser comparadas con otros métodos más precisos para la predicción del crecimiento en altura y diámetro como son los métodos de GADA.

Los sistemas silvopastoriles con el *Centropium ochroxylum* en áreas con condiciones poco favorables para el crecimiento de esta especie nativa deben llamar la atención para poder subvencionar la reforestación con esta especie, debido principalmente a que las especies exóticas muestran mejores rendimientos y precios en el mercado.

¿Es fundamental realizar el análisis económico de este tipo de sistemas silvopastoriles con el *Centrolobium ochroxylum*, que permita contestar a la siguiente pregunta Qué tan rentable sería la generalización del uso de *Centrolobium ochroxylum* en sistemas silvopastoriles desde el punto de vista de la captación de carbono y económico de su uso en comparación con las especies exóticas?

Obtener datos sobre la altura, diámetro y volumen de una especie nativa en 7 provincias y 451 sitios en Ecuador es una contribución única para su manejo y conservación del Amarillo Guayaquil. La diversidad de los lugares investigados ofrece un amplio abanico de condiciones agroclimáticas, permitiendo evaluar el potencial real para un programa de reforestación con esta especie críticamente amenazada. Existen diversas funciones que podrían mejorar la estimación de la relación entre la edad, altura, diámetro y volúmenes, lo que, sin duda, enriquecería la evaluación de la captura de carbono por esta especie. No obstante, es importante señalar que las limitaciones radican en que las muestras de biomasa provienen de 50 árboles, de un solo sitio y abarcan clases diamétricas de 1 a 30 cm DAP.

## Obras citadas

- Alam, H., Khattak, J. Z. K., Ppoyil, S. B. T., Kurup, S. S., & Ksiksi, T. S. (2017). Landscaping with native plants in the UAE: A review. *Emirates Journal of food and agriculture*, 729-741. doi.org/10.9755/ejfa.2017.v29.i10.319
- Alder, Denis y Fernando Montenegro. 1999. "A yield model for *Cordia alliodora* plantations in Ecuador". *The International Forestry Review* 242-250. <https://www.jstor.org/stable/42609212>
- Allen, Robert, Steven Turnock, Pierre Nabat, David Neubauer, Ulrike Lohmann, Dirk Olivié, Naga Oshima, Martine Michou, Tongwen Wu, Jie Zhang, Toshihiko Takemura, Michael Schulz, Kostas Tsigaridis, Susanne E. Bauer, Louisa Emmons, Larry Horowitz, Vaishali Naik, Twan van Noije, Tommi Bergman, Jean-Francois Lamarque, Prodromos Zanis, Ina Tegen, Daniel M. Westervelt, Philippe Le Sager, Peter Good, Sungbo Shim, Fiona O'Connor, Dimitris Akritidis, Aristeidis K. Georgoulas, Makoto Deushi, Lori T. Sentman, Jasmin G. John, Shinichiro Fujimori, y William J. Collins. 2020. "Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers". *Atmospheric Chemistry and Physics* 20(16): 9641-9663. doi:10.5194/acp-20-9641-2020.
- Allen, Myles, Keith P. Shine, Jan S. Fuglestedt, Richard J. Millar, Michelle Cain, David J. Frame y Adrian H. Macey. 2018. "A solution to the misrepresentations of CO<sub>2</sub>-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation". *Npj Climate and Atmospheric Science* 1(1): 16. doi:10.1038/s41612-018-0026-8.
- Álvarez-Zambrano, Gyna y Cañadas-López, Álvaro. 2024. Explorando el aprendizaje significativo en profesores de educación básica general, Distrito 13D07, provincia de Manabí. *Revista Ecos de la Academia*, 10(19), 9-27. doi. 10.53358/ecosacademia.v10i19.965
- Álvarez-Zambrano, Gyna y Cañadas-López, Álvaro. 2023. Estatus socioeconómico y rendimiento matemático en la Unidad Educativa "Mercedes Aveiga de Zambrano", período 2022/2023, Manabí. *Revista Ecos de la Academia*, 9(17), 9-33. doi. 10.53358/ecosacademia.v9i17.890



- Amare, Dagninet, Menale Wondie, Wolde Mekuria y Dietrich Darr. 2019. “Agroforestry of smallholder farmers in Ethiopia: practices and benefits”. *Small-scale Forestry* 18: 39-56. doi 10.1007/s11842-018-9405-6
- Ameztegui, Aitor, Marcos Rodrigues y Víctor Granda. 2022. “Uncertainty of biomass stocks in Spanish forests: a comprehensive comparison of allometric equations”. *European Journal of Forest Research* 141(3): 395-407. doi:10.1007/s10342-022-01444-w
- Arias-Rodil, Manuel, Felipe Crecente-Campo, Marcos Barrio-Anta y Ulises Diéguez-Aranda. 2015. “Evaluation of age-independent methods of estimating site index and predicting height growth: a case study for maritime pine in Asturias (NW Spain)”. *European Journal of Forest Research* 134: 223-233. doi.10.1007/s10342-014-0845-z
- Ayala-Cifuentes, Mayra, Gamboa-Trujillo, Paul y Cañadas-López, A. 2024. Growth, Yield and production of *Centrolobium ochroxylum* Rose ex Rudd (Leguminosae), in silvopastoral systems, west lowland Ecuador. *Revista Nacional de la Facultad de Agronomía Medellín* (en revisión).
- Baker, Patrick, Sarayudh Bunyavejchewin, Chadwick D. Oliver, y Peter S, Ashton. 2005. “Disturbance history and historical stand dynamics of a seasonal tropical forest in western Thailand”. *Ecological Monographs* 75(3): 317-343. doi. 10.1890/04-0488
- Baker, P. J., Bunyavejchewin, S. 2006. “Suppression, release and canopy recruitment in five tree species from a seasonal tropical forest in western Thailand”. *Journal of Tropical Ecology* 22(5): 521-529. doi. 10.1017/S0266467406003312
- Baker Timothy, Oliver L. Phillips, Yadvinder Malhi, Samuel Almeida, Luzmila Arroyo, Anthony Di Fiore, Terry Erwin, Timothy J. Killeen, Susan G. Laurance, William F. Laurance, Simon L. Lewis, Jon Lloyd, Abel Monteagudo, David A. Neill, Sandra Patiño, Nigel C. A. Pitman, J. Natalino M. Silva y Rodolfo Vásquez Martínez 2004. “Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass”. *Global Change Biology* 10(5): 545-562. 10.1111/j.1365-2486.2004.00751.x
- Bertalanffy von Ludvig. 1957 “Quantitative laws in metabolism and growth”. *Q Rev Biol* 32: 217-231. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/401873>

- Bartelink, Hans. 1996. "Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir". *Forest Ecology and Management* 86(1-3): 193-203. doi. 10.1016/S0378-1127(96)03783-8
- Beddington, J, Asaduzzaman, Clark, Fernández Bremauntz, M. D. Guillou, D. J. B. Howlett, M. M. Jahn , E. Lin, T. Mamo, C. Negra, C. A. Nobre, R. J. Scholes, N. Van Bo, And J. Wakhungu. "Achieving food security in the face of climate change: Summary for policy makers from the Commission on Sustainable Agriculture and Climate Change". 2011. [https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/10701/Climate\\_food\\_commission-SPM-Nov2011.pdf?sequence=6&isAllowed=y](https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/10701/Climate_food_commission-SPM-Nov2011.pdf?sequence=6&isAllowed=y)
- Beddington, J. R., Asaduzzaman, M., Clark, M. E., Fernández Bremauntz, A., Guillou, M. D., Howlett, D.J.B., Jahn, M., Lin, E., Mano, T., Negra, C., Nobre, C.A., Scholes, R.J., Van Bo, N. Wakhungu, J. 2012. "What next for agriculture after Durban?". *Science* 335(6066): 289-290. doi. 10.1126/science.1217941
- Beyene Abebe, Alemu Mekonnen, Bluffstone Randall y Rahel Deribe 2019. "Household level determinants of agroforestry practices adoption in rural Ethiopia". *Forests, Trees and Livelihoods* 28(3): 194-213. doi. 10.1080/14728028.2019.1620137
- Bi, Huiquan.; John Turner y Marcia Lambert. 2004. "Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia". *Trees* 18: 467–479. doi. 10.1007/s00468-004-0333-z
- Lasco, Rodel,Rafaela Delfino, Delia Catacutan, Elisabeth Simelton y David Wilson. 2014. "Climate risk adaptation by smallholder farmers: the roles of trees and agroforestry". *Current Opinion in Environmental Sustainability* 6:83-88. doi. 10.1016/j.cosust.2013.11.013
- Bloom, A. J., Chapin III, F. S., & Mooney, H. A. (1985). Resource limitation in plants—an economic analogy. *Annual review of Ecology and Systematics* 16(1); 363-392.
- Bontemps, Jean Daniel y Olivier Bouriaud. 2014. "Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives". *Forestry* 87(1): 109-128. doi.10.1093/forestry/cpt034
- Boisvenue, Céline y Steven Running. 2006. "Impacts of climate change on natural forest productivity—evidence since the middle of the 20th century". *Global Change Biology* 12(5): 862-882. doi. doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x
- Bosi, Cristian, Pezzopane José Ricardo, Paulo Cesar Sentelhas. 2020. "Silvopastoral system with Eucalyptus as a strategy for mitigating the effects of climate change

- on Brazilian pasturelands”. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 92. doi. 10.1590/0001-3765202020180425
- Bortz Jürgen y Christof Schuster. *Statistik für Human-und Sozialwissenschaftler: Limitierte Sonderausgabe*. Springer-Verlag Editorial, 2011.
- Brienen, Roel, Pieter Zuidema, Miguel Martínez-Ramos. 2010. “Attaining the canopy in dry and moist tropical forests: strong differences in tree growth trajectories reflect variation in growing conditions”. *Oecologia* 163: 485-496. doi.10.1007/s00442-009-1540-5
- Burkhart, Harold y Margarida Tomé. *Modeling forest trees and stands*. Springer Science & Business Media Editorial, 2012.
- Burkhart, Harold. 1977. “Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit”. *Southern Journal of Applied Forestry* 1(2): 7-9. doi. 10.1093/sjaf/1.2.7
- Canadell, Josep y Michael Raupach. 2008. “Managing forests for climate change mitigation”. *Science* 320(5882): 1456-1457. doi. 10.1126/science.1155458
- Cañadas Luis. 1983. *El Mapa Ecológico y Bioclimático del Ecuador*: Editores Asociados Cia. Editorial, 1983.
- Cañadas-López Álvaro, Paul Gamboa-Trujillo, Santiago Buitrón-Garrido, Byron Medina-Torres, Christian Velasco, Jesús Vargas-Hernández y Christian Wehenkel. 2023a. “Laurel regeneration management by smallholders to generate agroforestry systems in the Ecuadorian Amazon upper basin: Growth and yield models”. *Forests* 14(6): 1174. doi. 10.3390/f14061174
- Cañadas-López Álvaro, Paul Gamboa-Trujillo, P., Buitrón-Garrido, S., Medina-Torres, B., Vargas-Hernández, J.J., & Wehenkel, C. 2023b. “Thinning Levels of Laurel natural regeneration to establish Traditional Agroforestry Systems, Ecuadorian Amazon Upper Basin”. *Forests* 14(4): 667. doi.10.3390/f14040667
- Cañadas-López Álvaro, Diana Rade-Loor, Carlos Molina-Hidrovo. 2020a. “In situ assessment of *Jatropha curcas* germplasm under tropical dry forest conditions in Manabí-Ecuador”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 73(3): 9273-9281. doi. 10.15446/rfnam.v73n3.85788
- Cañadas-López, Álvaro., Rade-Loor, Dianna., Siegmund-Schultze, Marianna, Zambrano-Cedeño, Xiomara., Vargas-Hernández, Jesús Wehenkel, Christian. 2020. Pruning and fertilization effects on jatropha yields under smallholder's conditions in a Tropical Dry Forest from Ecuador. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(1), 9089-9097. doi. 10.15446/rfnam.v73n1.79059

- Cañadas-López Álvaro, Diana Rade-Loor, Marianna Siegmund-Schultze, Geovanny Moreira-Muñoz, Jesús Vargas-Hernández y Christian Wehenkel. 2019. "Growth and yield models for balsa wood plantations in the coastal lowlands of Ecuador". *Forests* 10(9): 733. doi. 10.3390/f10090733
- Cañadas-López Álvaro. 2018a. Proyecto de investigación: "Sostenibilidad de 45 especies nativas maderables en los programas de reforestación y conservación de la biodiversidad auspiciados por los GADs, Bosque seco tropical". Obtenido en: <https://departamentos.ulead.edu.ec/investigacion/files/2019/06/Proyectos-2018.pdf>
- Cañadas-López Álvaro, Joffre Andrade-Candell, Juan Manuel Domínguez, Carlos Molina, Odilón Schnabel, Jesús Vargas-Hernández, y Christian Wehenkel. 2018b. "Growth and yield models for teak planted as living fences in coastal Ecuador". *Forests* 9(2): 55. doi. 10.3390/f9020055
- Cañadas López, Á., Rade Loor, D., Andrade Candell, J., Hernández-Díaz, J. C., Molina Hidrovo, C., Zambrano Zambrano, M., & Wehenkel, C. (2018c). Gap edge attributes in Neotropical rainforest, Ecuador. *Revista de biología tropical*, 66(1), 149-163. doi.10.15517/rbt.v66i1.27612
- Cañadas-López, Álvaro, Rade-Loor, Diana, Siegmund-Schultze, Marianna, Iriarte-Vera, Marys, Domínguez-Andrade, Juan, Vargas-Hernández, Jesús, Wehenkel, Christian. 2018d. Productivity and oil content in relation to jatropha fruit ripening under tropical dry-forest conditions. *Forests*, 9(10), 611.
- Cañadas-López, Á., Rade-Loor, D., Domínguez-Andrade, J. M., Vargas-Hernández, J. J., Molina-Hidrovo, C., Macías-Loor, C., & Wehenkel, C. (2017). Variation in seed production of *Jatropha curcas* L. accessions under tropical dry forest conditions in Ecuador. *New Forests*, 48, 785-799. doi.org/10.1007/s11056-017-9597-1
- Cañadas-López Álvaro, Rade Loor D, Fernández G, Dominguez J, Molina Hidrovo C, y Quimiz H. 2016. Ecuaciones generales diámetro-altura para *Ochroma pyramidale*, Región Costa-Ecuador. *Bosque Latitud Cero* 6(1): 1-14.
- Cañadas-López Álvaro, Diana Rade, Juan Manuel Domínguez, Isabel Murillo y Carlos Molina. *Modelación forestal como innovación tecnológica para el manejo silvicultural y aprovechamiento económico de la balsa, Región Costa-Ecuador*. ABYA-YALA, Editorial, 2016a.
- Cañadas-López, Alvaro, Rade-Loor, Diana, Domínguez Juan, Fernández G. Molina-Hidrovo, Carlos, Quimis-Castro, H. 2016b. Ecuaciones generales de diámetro-

- altura para *Ochroma pyramidale*, Región Costa-Ecuador. Bosques Latitud Cero, 6(1). <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/177>
- Cañadas-López Álvaro, Frantisek Vilcko, Diana Rade, Carlos Zambrano, Carlos Molina. 2014. “Hacia una descripción de fuste para el Laurel *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales en el Bosque Protector Sumaco, Ecuador”. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* 6(1): doi. 10.18272/aci.v6i1.157
- Cañadas-López, Álvaro. 2013. Condiciones de sitio y crecimiento de *Centrolobium ochroxylum* especie nativa con potencial agrosilvopastoril del litoral ecuatoriano?. En: *I Encuentro Nacional de Bosques Recursos Genéticos Forestales y Agroforestales*. Editores INIAP, Quito. VE: INIAP. [https://www.researchgate.net/profile/Alvaro-Canadas-Lopez/publication/326674672\\_CONDICIONES\\_DE\\_SITIO\\_Y\\_CRECIMIENTO\\_DE\\_Centrolobium\\_ochroxylum\\_ESPECIE\\_NATIVA\\_CON\\_POTENCIAL\\_AGROSILVOPASTORIL\\_DEL\\_LITORAL\\_ECUATORIANO/links/5b5d3f6a0f7e9bc79a6c5091/CONDICIONES-DE-SITIO-Y-CRECIMIENTO-DE-Centrolobium-ochroxylum-ESPECIE-NATIVA-CON-POTENCIAL-AGROSILVOPASTORIL-DEL-LITORAL-ECUATORIANO.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alvaro-Canadas-Lopez/publication/326674672_CONDICIONES_DE_SITIO_Y_CRECIMIENTO_DE_Centrolobium_ochroxylum_ESPECIE_NATIVA_CON_POTENCIAL_AGROSILVOPASTORIL_DEL_LITORAL_ECUATORIANO/links/5b5d3f6a0f7e9bc79a6c5091/CONDICIONES-DE-SITIO-Y-CRECIMIENTO-DE-Centrolobium-ochroxylum-ESPECIE-NATIVA-CON-POTENCIAL-AGROSILVOPASTORIL-DEL-LITORAL-ECUATORIANO.pdf)
- Cañadas-López, Álvaro, Rade-Loor, Diana, Zambrano, Carlos, Molina-Hidrovo, Carlos, Arce, Luis. 2013b. Evaluación y manejo de fuentes semilleras de Teca (*Tectona grandis* Linn. f.) en la Estación Experimental Tropical Pichilinue, Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 5(1). doi. 10.18272/aci.v5i1.123
- Cañadas, Á., Korol, M., Zambrano, C. H., & Camacho, B. (2012). Modelos descriptivos de corona para Laurel (*Cordia alliodora*) bajo sistemas agroforestales en el Bosque Protector Sumaco, Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 4(2). doi. 10.18272/aci.v4i2.103
- Cañadas-López Álvaro y Alex Roca. 2011. “Can the reforestation projects stop the extraction of timber from the protected forest Chongón-Colonche?” En *International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development*”, Editado por Becker, Mathias, Kreye, Christine, Ripken, Christina, Tielkes, Erick. 259. Bonn, VE: Deutscher Tropentag/DITSL GmbH. 2011. [https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/9ad626b97f15547bdebb30bd17bcd9ca.pdf/Alvaro\\_Caniadas\\_Argentina.pdf](https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/9ad626b97f15547bdebb30bd17bcd9ca.pdf/Alvaro_Caniadas_Argentina.pdf)

- Cañadas-López, Álvaro. 2007a. Volumen y perfil de fuste para *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales del bosque protector Sumaco. Bosque latitud cero 2007, 15-20.
- Cañadas, Álvaro, Argüello, Janeth, Urquiso, Roberto. 2007. Sustitucionalidad y aumento de la eficiencia del uso de la riqueza natural, dilema ambiental ecuatoriano. Bosque Latitud Cero, 3, 30-33.
- Cañadas-López, Á. *Providing information about natural resources as a base to support the decentralization of the forest sector in Canton Loreto-Ecuador*. Göttingen, Germany: Forschungszentrum Waldökosysteme Editorial, 2005.
- Cañadas-López Álvaro, Frantisek Vilcko y Klaus von Gadow. "Management of Laurel (*Cordia alliodora*) within Agro forestry System in the Canton Loreto, Ecuador". Technological and Institutional Innovations for Sustainable Rural Development Editado por Becker, Mathias, Kreye, Christine, Ripken, Christina, Tielkes, Erick. 145, Göttingen, VE: Deutscher Tropentag/Cuvilier, 2003.
- Caspersen John, Mark Vanderwel, William Cole y Drew Purves. 2011. "How stand productivity results from size-and competition-dependent growth and mortality". *PLoS one* 6(12): e28660. doi. 10.1371/journal.pone.0028660
- ONU Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 2016. *Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015 Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twenty-first session*. 29 de enero FCCC/CP/2015/10
- Cornejo Camilo y Ann Wilkie. 2010. "Greenhouse gas emissions and biogas potential from livestock in Ecuador". *Energy for sustainable development* 14(4): 256-266. doi. 10.1016/j.esd.2010.09.008
- Chará Julian, Julián Rivera, Rolando Barahona, Enrique Murgueitio, Claus Deblitz, Ernesto Reyes, Rogerio Martins Mauricio, Juan José Molina, Martha Flores y Andrés Zuluaga. 2017. "Intensive silvopastoral systems: economics and contribution to climate change mitigation and public policies". *Integrating landscapes: Agroforestry for biodiversity conservation and food sovereignty* 395-416. doi. 10.1007/978-3-319-69371-2\_16
- da Silva, C. M., Elias, F., do Nascimento, R. O., & Ferreira, J. (2023). The potential for forest landscape restoration in the Amazon: state of the art of restoration strategies. *Restoration Ecology*, 31(5), e13955. doi.10.1007/s12665-020-08948-x

- Delzon, S, Sartore, M, Burlett, R, Dewar, R, Loustau, D. 2004. "Hydraulic responses to height growth in maritime pine trees". *Plant, Cell & Environment*, 27(9), 1077-1087. doi. 10.1111/j.1365-3040.2004.01213.x
- Dlugokencky Edward, Euan Nisbet, Rebecca Fisher y David Lowry. 2011. "Global atmospheric methane: budget, changes and dangers". *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369(1943): 2058-2072. doi. 10.1098/rsta.2010.0341
- Dollinger Jeanne y Shibu Jose. 2018. "Agroforestry for soil health". *Agroforestry systems* 92: 213-219. doi. 10.1007/s10457-018-0223-9
- Chave Jérôme, Maxime Réjou-Méchain, Alberto Búrquez, Emmanuel Chidumayo, Matthew S. Colgan, Welington B.C. Delitti, Alvaro Duque, Tron Eid, Philip M. Fearnside, Rosa C. Goodman, Matieu Henry, Angelina Martínez-Yrizar, Wilson A. Mugasha, Helene C. Muller-Landau, Maurizio Mencuccini, Bruce W. Nelson, Alfred Ngomanda, Euler M. Nogueira, Edgar Ortiz-Malavassi, Raphaël Pélissier, Pierre Ploton, Casey M. Ryan, Juan G. Saldarriaga y Ghislain Vieilledent. 2014. "Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees". *Global change biology* 20(10): 3177-3190. doi. 10.1111/gcb.12629
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., Yamakura, T. 2005. "Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests". *Oecologia*, 145, 87-99. doi. 10.1007/s00442-005-0100-x
- Chazdon, R. L., Lindenmayer, D., Guariguata, M. R., Crouzeilles, R., Benayas, J. M. R., & Chaverro, E. L. (2020). Fostering natural forest regeneration on former agricultural land through economic and policy interventions. *Environmental Research Letters*, 15(4), 043002. doi.10.1088/1748-9326/ab79e6
- Chebli Youssef, Samira El Otmani, Fouad Elame, Nassim Moula, Mouad Chentouf, Jean-Luc Hornick y Jean-Francois Cabaraux, J. F. 2021. "Silvopastoral system in Morocco: Focus on their importance, strategic functions, and recent changes in the Mediterranean side". *Sustainability* 13(19): 10744. doi. 10.3390/su131910744
- Enquist Brian y Karl Niklas. 2002. "Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants". *Science* 295: (5559): 1517-1520. doi. 10.1126/science.1066360

- FAO. *Forest Management and Climate Change: A Literature Review. Forests and Climate Change Working Paper 10*. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations, Editorial, 2012. <https://issuu.com/wocan/docs/fao-forest--climate-change>
- Fayolle Adeline, Alfred Ngomanda, Michel Mbasi, Nicolas Barbier, Yannick Bocko, Faustin Boyemba, Pierre Couteron, Noël Fonton, Narcisse Kamdem, John Katemo, HenrietteJosiane Kondaoule, Joel Loumeto, HervéMartial Maïdou, Géraud Mankou, Thomas Mengui, GislainMofack , Cynel Moundounga, Quentin Moundounga, Lydie Nguimbous, Norberto Nsue Nchama y Vincent Medjibe. 2018. “A regional allometry for the Congo basin forests based on the largest ever destructive sampling”. *Forest Ecology and Management* 430: 228-240. doi. 10.1016/j.foreco.2018.07.030
- Feldpausch, T.R., Banin, L., Philips, O., Baker, S., Lewis, S., Quesada, C., Affum-Baffoe, K., Arets, E., Berry, N.J., Bird, M., Brondizio, E.S., de Camargo, J., Chave, J., Djagbletey, Domingues, T.F., Drescher, M., Fearnside, P.M., França, M. B., Fyllas, N.M., Lopez-Gonzalez, G., Hladik, A., Higuchi, N., Hunter, M.O., Iida, Y., Salim, K.A., Kassim, A.R., Keller, M., Kemp, J., King, D.A., Lovett, J.C., Marimon, B.S., Marimon-Junior, B.H., Lenza, E., Marshall, A.R., Metcalfe, D. J., Mitchard, E.T.A., Moran, E.F., Nelson, B.W., Nilus, R.E., Nogueira, M., Palace, M., Patiño, S., Peh, K., Raventos, M.T., Reitsma, J.M., Saiz, G., Schrod, F., Sonké H. E., Taedoung, A., Tan L, White, L., Wöll, H. 2011. “Height-diameter allometry of tropical forest trees”. *Biogeosciences* 8(5): 1081-1106. doi. 10.5194/bg-8-1081-2011
- Fehrmann Lutz y Christof Kleinn. 2006. “General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe”. *Forest Ecology and Management* 236(2-3): 412-421. doi.10.1016/j.foreco.2006.09.026
- Fontés, L., Bontemps, J. D., Bugmann, H., Van Oijen, M., Gracia, C., Kramer, K., Lindner, M., Rötzer, T., Skovsgaard, J. P. 2010. “Models for supporting forest management in a changing environment”. *Forest Systems* 19: 8-29. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/400927>
- Gadow Klaus v., Timo Pukkala, Margarida Tomé. 2006. *Managing Forest Ecosystems*. Risk Anal Editorial.



- Garcia, Oscar. 2005. "Unifying sigmoid univariate growth equations". *Forest biometry, modelling and information sciences*, 1: 63-68. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=c92121aaec68bcbcf502532c85dbe3a88d343bfa>
- Gebru Belay Manjur, Sonam Wangye Wang, Sea Jim, Woo-Kyum Lee. 2019. "Socio-ecological niche and factors affecting agroforestry practice adoption in different agroecologies of southern Tigray, Ethiopia". *Sustainability* 11(13): 3729. doi. 10.3390/su11133729
- Gifford, Roger. *Carbon Content of Woody Roots*. National Carbon Accounting System Technical Report No. 7 Editorial, 2000a. <https://library.dbca.wa.gov.au/static/FullTextFiles/026162.pdf>
- Gifford, Roger. *Carbon Content of Above Ground Tissues of Forest and Woodland Trees*. National Carbon Accounting System Technical Report No. 22, Editorial, 2000b. <http://www.fullcam.com/FullCAMServer2016/Help/reps/TR22%20Carbon%20Contents%20of%20Above-Ground%20Tissues%20of%20Forest%20and%20Woodland%20Trees.pdf>
- Goodman Rosa, Phillips Oliver y Timothy Baker. 2014. "The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates". *Ecological Applications* 24(4): 680-698. doi.10.1890/13-0070.1
- Grass, I., Kubitzka, C., Krishna, V. V., Corre, M. D., Mußhoff, O., Pütz, P., ... & Wollni, M. 2020. Trade-offs between multifunctionality and profit in tropical smallholder landscapes. *Nature communications*, 11(1), 1186. doi. 10.1038/s41467-020-15013-5
- Gupta, Rajit y Sharma, Sharma Kant. 2019. The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: A review. *Ecological Modelling*, 397, 55-73. doi. 10.1016/j.ecolmodel.2019.01.007
- Heimann Martina y Markus Reichstein. 2008. "Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks". *Nature* 451(7176): 289-292. doi. 10.1038/nature06591
- Matieu Henry, Antonio Bombelli, Carlo Trotta, Alfredo Alessandrini, Luca Birigazzi, Gael Sola, Ghislain Vieilledent, Philippe Santenoise, Fleur Longuetaud, Riccardo Valentini, Nicolas Picard y Laurent Saint-André. 2013. "GlobAllomeTree: international platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment". *Iforest-biogeosciences and forestry* 6(6): 326. doi. 10.3832/ifor0901-006

- Henry, M., Besnard, A., Asante, W. A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., Bernoux, M., Saint-André, L. 2010. "Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa". *Forest Ecology and Management*, 260(8), 1375-1388. doi.10.1016/j.foreco.2010.07.040
- Hernández-Velasco, J., Hernández-Díaz, J. C., Fladung, M., Cañadas-López, Á., Prieto-Ruiz, J. Á., & Wehenkel, C. (2017). Spatial genetic structure in four *Pinus* species in the Sierra Madre Occidental, Durango, México. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(1), 73-80. doi.org/10.1139/cjfr-2016-0154
- Hernández-Cuevas Miguel, Wencesleao Santiago-García, Hector Santos-Posadas, Pablo Martínez-Antúnez y Fautino Ruiz-Aquino. 2018. "Modelos de crecimiento en altura dominante e índices de sitio para *Pinus ayacahuite* Ehren". *Agrociencia* 52(3): 437-453. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952018000300437](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000300437)
- Heyer, R., Donnelly, M. A., Foster, M., & McDiarmid, R. (Eds.). 2014. Measuring and monitoring biological diversity: standard methods for amphibians. Smithsonian Institution.
- Hiura Tsutom. 2005. "Estimation of aboveground biomass and net biomass increment in a cool temperate forest on a landscape scale". *Forest Ecosystems and Environments* 20: 271-277. doi. 10.1007/sk1284.005.0042-0
- Hogg, E.H. Ted y Ross Wein. 2005. "Impacts of drought on forest growth and regeneration following fire in southwestern Yukon, Canada". *Canadian Journal of Forest Research* 35(9): 2141-2150. doi. 10.1139/x05-12
- Hollinger David. 2008. "Defining a landscape-scale monitoring tier for the North American Carbon Program". *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring: A Landscape-Scale Approach* 3-16: doi. 10.1007/978-1-4020-8506-2\_1
- Hosfeld, J.W. 1822. *Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten*. Gotha, 4, 310.
- Hruska Tracy, Lynn Huntsinger, Mark Brunson, Wenjun Li, Nadie Marshall, José Oviedo, Hillary Whitcomb. 2017. *Applying the social-ecological systems framework on rangelands*. En *Rangeland Systems: Processes, Management and Challenge*. Springer Editorial. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-46709-2>

- Hudiburg Tara, Beverly Law, David Turner, John Campbell, Dan Donato, Maureen Duane. 2009. "Carbon dynamics of Oregon and Northern California forests and potential land-based carbon storage". *Ecological applications* 19(1): 163-180. doi. 10.1890/07-2006.1
- Inamhi. 2023. "Anuarios meteorológicos". [www.https://www.inamhi.gob.ec/](http://www.inamhi.gob.ec/)
- Iskandar Johan, Budiawati Iskandar y Ruhyat Partasasmita. 2016. "Responses to environmental and socio-economic changes in the Karangwangi traditional agroforestry system, South Cianjur, West Java". *Biodiversitas Journal of Biological Diversity* 17(1). doi. 10.13057/biodiv/d170145
- Ilic Jugo, Doug Boland, Maurice McDonald, Geoff Downes y Philip Blakemore. 2000. *Woody density phase 1—state of knowledge. National carbon accounting system*. Australian Greenhouse Office, Commonwealth of Australia, Editorial, 2000. [https://azkurs.org/pars\\_docs/refs/28/27323/27323.pdf](https://azkurs.org/pars_docs/refs/28/27323/27323.pdf)
- Ivancich Horacio, Guillermo Martínez Pastur y Pablo Peri. 2011. "Modelos forzados y no forzados para el cálculo del índice de sitio en bosques de *Nothofagus antarctica* en Patagonia Sur". *Bosque (Valdivia)* 32(2): 135-145. doi. 10.4067/S0717-92002011000200004
- Jensen Ditte, Mide Rao, Jian Zhang, J., Mette Grøn, Songyan Tian, Keping Ma y Jens-Christian Svenning. 2021. "The potential for using rare, native species in reforestation—A case study of yews (Taxaceae) in China". *Forest Ecology and Management* 482: 118816. doi. 10.1016/j.foreco.2020.118816
- Jenkins Jennifer, David Chojnacky, Linda Heath y Richard Birdsey. 2003. "National-scale biomass estimators for United States tree species". *Forest science* 49(1): 12-35. doi:10.1093/forestscience/49.1.12
- Johansson, T. 1999. "Biomass equations for determining fractions of pendula and pubescent birches growing on abandoned farmland and some practical implications". *Biomass and bioenergy*, 16(3), 223-238. doi.10.1016/S0961-9534(98)00075-0
- Jucker Tommaso, John Caspersen, Jérôme Chave, Cécile Antin, Nicolas Barbier, Frans Bongers, Michele Dalponte, Karin Y. van Ewijk, David I. Forrester, Matthias Haeni, Steven I. Higgins, Robert J. Holdaway, Yoshiko Iida, Craig Lorimer, Peter L. Marshall, Stéphane Momo, Glenn R. Moncrieff, Pierre Ploton, Lourens Poorter, Kassim Abd Rahman, Michael Schlund, Bonaventure Sonké, Frank J. Sterck, Anna T. Trugman, Vladimir A. Usoltsev, Mark C. Vanderwel, Peter

- Waldner, Beatrice M. M. Wedeux, Christian Wirth, Hannsjörg Wöll, Murray Woods, Wenhua Xiang, Niklaus E. Zimmermann y David Coomes 2017. “Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes”. *Global change biology*, 23(1), 177-190. doi.10.1111/gcb.13388
- Koops, Wiebe. 1986. Multiphasic growth curve analysis. *Growth*, 50(2), 169-177. <https://www.proquest.com/openview/86871d867a4d679dd3a8892bfe5035f4/1.pdf?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y#page=18>
- Keeling Helen y Oliver Phillips. 2007. “The global relationship between forest productivity and biomass”. *Global Ecology and Biogeography* 16(5): 618-631. doi.10.1111/j.1466-8238.2007.00314.x
- Lambert, M.C, Ung, C.H., Raulier, F. 2005. “Canadian national tree aboveground biomass equations”. *Can. J. Forest Res.* 35, 1996–2018. doi.10.1139/x05-112
- Landsberg Joe y Peters Sands. 2011. *Physiological ecology of forest production: principles, processes and models* (Vol. 4). Elsevier Editorial. <https://shop.elsevier.com/books/physiological-ecology-of-forest-production/landsberg/978-0-12-374460-9>
- Laughlin, Daniel. 2014. Applying trait-based models to achieve functional targets for theory-driven ecological restoration. *Ecology letters*, 17(7), 771-784. doi. 10.1111/ele.12288
- Lemes Amanda Prudêncio, Alexandre Rossetto Garcia, José Ricardo Macedo Pezzopane, Felipe Zandonadi Brandão, Yeda Fumie Watanabe, Reinaldo Fernandes Cooke, Mariana Sponchiado, Claudia Cristina Paro de Paz, Annelise Carla Camplesi, Mario Binelli y Lindsay Unno Gimenes. 2021. “Silvopastoril system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems”. *Scientific Reports* 11(1): 14092. doi. 10.1038/s41598-021-93609-7
- Limongi Andrade, Ricardo, Guiracocha Freire Giniva, Yépez Monserrate Crhistian. 2011. *Amarillo de Guayaquil Centrolobium ochroxylum Rose ex Rudd: Especie de uso múltiple del bosque seco del Ecuador*. INIAP Editorial.
- Little, E. L. (1969). Árboles comunes de la Provincia de Esmeraldas, Ecuador. Cuerpo de Paz.
- Magalhães, C. A. S., Pedreira, B. C., Tonini, H., & Farias Neto, A. L. (2019). Crop, livestock and forestry performance assessment under different production systems

- in the north of Mato Grosso, Brazil. *Agroforestry Systems*, 93(6), 2085-2096. doi. 10.1007/s10457-018-0311-x
- Magnani, F., Mencuccini, M., Grace, J. (2000). “Age-related decline in stand productivity: the role of structural acclimation under hydraulic constraints”. *Plant, Cell & Environment* 23(3): 251-263. doi. 10.1046/j.1365-3040.2000.00537.x
- Maia Alexandre Gori, Gabriela dos Santos Eusebio, Maria do Carmo Ramos Fasiaben, Andre Steffens Moraes, Eduardo Delgado Assad y Vanessa Silva Pugliero. 2021. “The economic impacts of the diffusion of agroforestry in Brazil”. *Land use policy*, 108, 105489. doi. 10.1016/j.landusepol.2021.105489
- Mauya Ernest, Wilson Mugasha, Eliakimu Zahabu, Ole Bollandasås y Tron Eid. 2014. “Models for estimation of tree volume in the miombo woodlands of Tanzania”. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 76(4): 209-219. doi. 10.2989/20702620.2014.957594
- MCPFE. Expert level meeting. *Improved pan-European indicators for sustainable forest management*. October 7–8th, Vienna, Austria. Editorial. <https://www.cbd.int/doc/pa/tools/Improved%20Pan-European%20Indicators%20for%20Sustainable%20Forest%20Management.pdf>
- McGroddy Megan, Amy Lerner, Diana Burbano, Laura Schneider y To, Rudel. 2015. “Carbon stocks in silvopastoral systems: a study from four communities in southeastern Ecuador”. *Biotropica* 47(4): 407-415. doi.10.1111/btp.12225
- MacKenzie William y Colin Mahony. 2021. “An ecological approach to climate change-informed tree species selection for reforestation”. *Forest Ecology and Management* 481: 118705. doi. 10.1016/j.foreco.2020.118705
- McNamara, S., Tinh, D. V., Erskine, P. D., Lamb, D., Yates, D., & Brown, S. (2006). Rehabilitating degraded forest land in central Vietnam with mixed native species plantings. *Forest Ecology and Management*, 233(2-3), 358-365. doi. 10.1016/j.foreco.2006.05.033
- Menéndez-Miguélez María, Elena Canga, Marcos Barrio-Anta, Juan Majada y Pedro Álvarez-Álvarez. 2013. “A three level system for estimating the biomass of *Castanea sativa* Mill. coppice stands in north-west Spain”. *Forest Ecology and Management* 291: 417-426. doi.10.1016/j.foreco.2012.11.040
- Metsaranta Juha, Caren Dymond, Werner Kurz y David Spittlehouse. 2011. “Uncertainty of 21st century growing stocks and GHG balance of forests in British Columbia, Canada resulting from potential climate change impacts on ecosystem processes”.

- Forest Ecology and Management* 262: 827–837.  
doi.10.1016/j.foreco.2011.05.016
- Milledge Simon, Richard Elibariki, Richard East. 2005. “Green Gold: Ongoing efforts towards preventing illegal harvesting and exports of Tanzania’s most valuable hardwoods”. *The Arc Journal*, 17. [http://coastalforest.tfcg.org/wp-content/uploads/2018/05/the\\_arc\\_journal\\_200417.pdf](http://coastalforest.tfcg.org/wp-content/uploads/2018/05/the_arc_journal_200417.pdf)
- Montreal Process Working Group. “Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests”. Santiago declaration, February 3rd. 1994.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953497100125>
- Mugasha Wilson, Ole Bollandsås y Trom Eid. 2013. “Relationships between diameter and height of trees in natural tropical forest in Tanzania”. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 75(4): 221-237. doi. 10.2989/20702620.2013.824672
- Monserud Robert. 1984. “Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type”. *Forest Science* 30(4): 943-965. doi. 10.1093/forestscience/30.4.943
- Mpanda Mathew, Mpanda Luoga, George Kajembe y Tron Eid. 2011. “Impact of forestland tenure changes on forest cover, stocking and tree species diversity in Amani Nature Reserve, Tanzania”. *Forests, Trees and Livelihoods* 20(4): 215-229. doi. 10.1080/14728028.2011.9756710
- Mugasha Wilson Ancelm, Ezekiel Edward Mwakalukwa, Emmanuel Luoga, Rogers Ernest Malimbwi, Eliakimu Zahabu, Dos Santos Silayo, Gael Sola, Philippe Crete, Matieu Henry y Almas Kashindy. 2016. “Allometric models for estimating tree volume and aboveground biomass in lowland forests of Tanzania”. *International Journal of Forestry Research*. doi. 10.1155/2016/8076271
- Murphy Peter y Lugo Ariel. 1986. “Ecology of tropical dry forest”. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 17: 67-88. doi. 10.1146/annurev.es.17.110186.000435
- Nabeshima Eri, Takuya Kubo y Tsutom Hiura. 2010. “Variation in tree diameter growth in response to the weather conditions and tree size in deciduous broad-leaved trees”. *Forest Ecology and Management* 259(6): 1055-1066. doi. 10.1016/j.foreco.2009.12.012

- Nascimento Henrique y William Laurance. 2002. "Total aboveground biomass in central Amazonian rainforests: a landscape-scale study". *Forest Ecology and Management* 168(1-3): 311-321. doi. 10.1016/S0378-1127(01)00749-6
- Niklas Karl. 1994. "Morphological evolution through complex domains of fitness". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 91(15): 6772-6779. doi. 10.1073/pnas.91.15.6772
- Niklas Karl, y Brian Enquist. 2002. "On the vegetative biomass partitioning of seed plant leaves, stems, and roots". *The American Naturalist* 159(5): 482-497. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.1086/339459>
- Noordermeer Lennart, Terje Gobakken, Erik Næsset y Ole Bollandsås. 2020. "Predicting and mapping site index in operational forest inventories using bitemporal airborne laser scanner data". *Forest Ecology and Management* 457 117768. doi. 10.1016/j.foreco.2019.117768
- NunesSâmia, Markus Gastauer, Rosane Cavalcante, Silvio Ramos, CecílioCaldeira , Daniel Silva, RicardoRodrigues, Rafael Salomão, Mariana Oliveira, Pedro Souza-Filho y José Siqueira 2020. "Challenges and opportunities for large-scale reforestation in the Eastern Amazon using native species". *Forest Ecology and management* 466: 118120. doi. 10.1016/j.foreco.2020.118120
- Ohtsuka Toshiyuki, Nobuko Saigusa y Hiroshi Koizumi. 2009. "On linking multiyear biometric measurements of tree growth with eddy covariance-based net ecosystem production". *Global Change Biology* 15(4): 1015-1024. doi. 10.1111/j.1365-2486.2008.01800.x
- Ortiz-Olivas, M. E., Hernández-Díaz, J. C., Fladung, M., Cañadas-López, Á., Prieto-Ruíz, J. Á., & Wehenkel, C. (2017). Spatial genetic structure within and among seed stands of *Pinus engelmannii* Carr. and *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham, in Durango, Mexico. *Forests*, 8(1), 22. doi.org/10.3390/f8010022
- Olson Mark, Diana Soriano, Julieta Rosell, Tommaso Anfodillo, Michael Donoghue, ErikaEdwards, Calixto LeónGómez, Todd Dawson, Julio CamareroMartínez, Matiss Castorena, Alberto Echeverría, Carlos Espinosa, Alex Fajardo, Antonio Gazol, Sandrine Isnard, Rivete Lima, Carmen Marcati y Rodrigo Méndez-Alonzo. 2018. "Plant height and hydraulic vulnerability to drought and cold". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(29): 7551-7556. doi. 10.1073/pnas.1721728115

- Olschewski Roland y Pablo Benitez. 2005. "Secondary forests as temporary carbon sinks? The economic impact of accounting methods on reforestation projects in the tropics". *Ecological Economics* 55(3): 380-394. doi. 10.1016/j.ecolecon.2004.09.021
- Palomo-Campesino Sara, Federica Ravera, José González y Marina García-Llorente. 2018. "Exploring current and future situation of mediterranean silvopastoral systems: Case study in Southern Spain". *Rangeland Ecology & Management* 71(5): 578-591. doi. 10.1016/j.rama.2017.12.013
- Pan Yude, Richard Birdsey, Jingyun Fang, Richard Houghton, Pekka Kauppi, Werner Kurz, OliverPhillips, Anatoly Shvidenko, SimonLewis, Josep Canadell, Philippe Ciais,RobertJackson, StephenPacala, David Mcguire, Shilong Piao, Aapo Rautia inen, Stephen Sitch y Daniel Hayes. 2011. "A large and persistent carbon sink in the world's forests". *Science* 333(6045): 988-993. doi. 10.1126/science.1201609
- Pelletier Johanne, Navin Ramankutty y Catherine Potvin. 2011. "Diagnosing the uncertainty and detectability of emission reductions for REDD+ under current capabilities: an example for Panama". *Environmental Research Letters* 6(2): 024005. doi. 10.1088/1748-9326/6/2/024005
- Peters Emily, Kirk Wythers, Shuxia Zhang, John Bradford y Peter Reich. 2013. "Potential climate change impacts on temperate forest ecosystem processes". *Canadian Journal of Forest Research* 43(10): 939-950. doi. 10.1139/cjfr-2013-0013
- Poorter Hendrik, Karl Niklas, Peter Reich, Jacek Oleksyn, Pieter Poot y Liesje Mommer. 2012. "Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control". *New Phytologist* 193(1): 30-50. doi. 10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x
- Porro, R., Miller, R. P., Tito, M. R., Donovan, J. A., Vivan, J. L., Trancoso, R., ... & Gonçalves, A. L. 2012. Agroforestry in the Amazon region: a pathway for balancing conservation and development. *Agroforestry-The future of global land use*, 391-428. doi. 10.1007/978-94-007-4676-3\_20
- Porte Annabel, Patrich Trichet, Didier Bert y Denis Loustau, D. 2002. "Allometric relationships for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.)". *Forest Ecology and Management* 158(1-3): 71-83. doi. 10.1016/S0378-1127(00)00673-3
- Poulter Benjamin, Fred Hattermann, Ed Hawkins, Sönke Zaehle, Stephen Sitch, Natalia Restrepo-Coupe, Ursula Heyder y Wolfgang. 2010. "Robust dynamics of Amazon



- dieback to climate change with perturbed ecosystem model parameters”. *Global Change Biology*, 16(9), 2476-2495. doi. 10.1111/j.1365-2486.2009.02157.x
- Pretzsch Hans, ., Grote, R., Reineking, B., Rötzer, T.H., Seifert, S.T. 2008. “Models for forest ecosystem management: a European perspective”. *Annals of botany*, 101(8), 1065-1087. doi. 10.1093/aob/mcm246
- Prudhomme Remi, Cathal O'Donoghue, Mary Ryan y David Styles. 2021. “Defining national biogenic methane targets: Implications for national food production & climate neutrality objectives”. *Journal of Environmental Management* 295: 113058. doi. 10.1016/j.jenvman.2021.113058
- Prudhomme Remi, Colm Duffy, James Gibbons, Cathal O'Donoghue, Mary Ryan y David Styles. 2022. “GOBLIN version 1.0: a land balance model to identify national agriculture and land use pathways to climate neutrality via backcasting”. *Geoscientific Model Development* 15(5): 2239-2264. doi. 10.5194/gmd-15-2239-2022
- Ralston, Charles. *Evaluation of forest site productivity. In International review of forestry research* (Vol. 1, pp. 171-201). Elsevier, Editorial, 1964.
- Reed David y Margarida Tomé, M. 1998. “Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation”. *Forest Ecology and Management* 103(1): 21-32. doi. 10.1016/S0378-1127(97)00174-6
- Reisinger Andy y Sinead Leahy. 2019. “Scientific aspects of New Zealand’s 2050 emission targets.” *Accessed*, 7, 07-19. <http://www.nzagrc.org.nz/assets/Publications/NZAGRC-Report-Scientific-aspects-of-2050-methane-targets.pdf>
- Rennolls, Keith 1978. "Top Height"; Its definition and estimation. *The Commonwealth Forestry Review*, 215-219. <https://www.jstor.org/stable/42607466>
- Reynolds Phillip, James Simpson, Naresh Thevathasan y Andrew Gordon. 2007. “Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada”. *Ecological engineering* 29(4): 362-371. doi. 10.1016/j.ecoleng.2006.09.024
- Robinson Alyssa, Camille Defrenne, Jean Roach, Caren Dymond, Brian Pickles y Suzanne Simard. 2022. “Harvesting intensity and aridity are more important than

- climate change in affecting future carbon stocks of Douglas-fir forests”. *Frontiers in Forests and Global Change* 5: 934067. doi. 10.3389/ffgc.2022.934067
- Rogelj Joeri y Carl-Friedrich Schleussner. 2019. “Unintentional unfairness when applying new greenhouse gas emissions metrics at country level”. *Environmental Research Letters* 14(11): 114039. doi. 10.1088/1748-9326/ab4928
- Rogers Alistair, Belinda Medlyn, Jeffrey Dukes, Gordon Bonan, Susanne von Caemmerer, Michael Dietze, Jens Kattge, Andrew Leakey, Lina Mercado, Ülo Niinemets, Colin Prentice, Shawn Serbin, Stephen Sitch, Danielle Way y Sönke Zaehle. 2017. “A roadmap for improving the representation of photosynthesis in Earth system models”. *New Phytologist*, 213(1), 22-42. doi. 10.1111/nph.14283
- Roshetko, James, Dede Rohadi, Aulia Perdana, Gerhard Sabastian, Nunung Nuryartono, Agus Pramono, Nurin Widayani, Philip Manalu, Muhammad Fauzi, Purnomo Sumardomto y Nuning Kusumowardhani. 2013. “Teak agroforestry systems for livelihood enhancement, industrial timber production, and environmental rehabilitation”. *Forests, Trees and Livelihoods* 22(4): 241-256. doi. 10.1080/14728028.2013.855150
- Röhrig Nina, Markus Hassler y Tim Roesler. 2020. “Capturing the value of ecosystem services from silvopastoral systems: Perceptions from selected Italian farms”. *Ecosystem Services* 44: 101152. doi. 10.1016/j.ecoser.2020.101152
- Ryan Michael y Barbara Yoder. 1997. “Hydraulic limits to tree height and tree growth”. *Bioscience* 47(4): 235-242. <https://www.jstor.org/stable/1313077>
- Salas-Eljatib, Christian. 2020. “Height growth–rate at a given height: A mathematical perspective for forest productivity”. *Ecological Modelling*, 431, 109198. doi. 10.1016/j.ecolmodel.2020.109198
- Sarabia-Salgado Lucero, Francisco Solorio-Sánchez, Luis Ramírez-Avilés, Bruno Rodrigues Alves, Juan Ku-Vera, Carlos Aguilar-Pérez, Segunda Urquiaga y Robert Boddey. 2020. “Increase in milk yield from cows through improvement of forage production using the N<sub>2</sub>-fixing legume *Leucaena leucocephala* in a silvopastoral system”. *Animals* 10(4): 734. doi. 10.3390/ani10040734
- Sauniois Marielle, Ann R. Stavert, Ben Poulter, Philippe Bousquet, Josep G. Canadell, Robert B. Jackson, Peter A. Raymond, Edward J. Dlugokencky, Sander Houweling, Prabir K. Patra, Philippe Ciais, Vivek K. Arora, David Bastviken, Peter Bergamaschi, Donald R. Blake, Gordon Brailsford, Lori Bruhwiler, Kimberly M. Carlson, Mark Carrol, Simona Castaldi, Naveen

Chandra, Cyril Crevoisier, Patrick M. Crill, Kristofer Covey, Charles L. Curry, Giuseppe Etiope, Christian Frankenberg, Nicola Gedney, Michaela I. Hegglin, Lena Höglund-Isaksson, Gustaf Hugelius, Misa Ishizawa, Akihiko Ito, Greet Janssens-Maenhout, Katherine M. Jensen, Fortunat Joos, Thomas Kleinen, Paul B. Krummel, Ray L. Langenfelds, Goulven G. Laruelle, Licheng Liu, Toshinobu Machida, Shamil Maksyutov, Kyle C. McDonald, Joe McNorton, Paul A. Miller, Joe R. Melton, Isamu Morino, Jurek Müller, Fabiola Murguia-Flores, Vaishali Naik, Yosuke Niwa, Sergio Noce, Simon O'Doherty, Robert J. Parker, Changhui Peng, Shushi Peng, Glen P. Peters, Catherine Prigent, Ronald Prinn, Michel Ramonet, Pierre Regnier, William J. Riley, Judith A. Rosentreter, Arjo Segers, Isobel J. Simpson, Hao Shi, Steven J. Smith, L. Paul Steele, Brett F. Thornton, Hanqin Tian, Yasunori Tohjima, Francesco N. Tubiello, Aki Tsuruta, Nicolas Viovy, Apostolos Voulgarakis, Thomas S. Weber, Michiel van Weele, Guido R. van der Werf, Ray F. Weiss, Doug Worthy, Debra Wunch, Yi Yin, Yukio Yoshida, Wenxin Zhang, Zhen Zhang, Yuanhong Zhao, Bo Zheng, Qing Zhu, Qiuhan Zhu, and Qianlai Zhuang 2020. "The global methane budget 2000–2017". *Earth system science data*, 12(3), 1561-1623. doi. 10.5194/essd-12-1561-2020

Searchinger Timothy, Stefan Wirseniuss, Tim Beringer y Patrice Dumas. 2018. "Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change". *Nature* 564(7735): 249-253. doi.10.1038/s41586-018-0757-z

Shabenberger Oliver y Francis Pierce, F.J. *Contemporary statistical models for the plants and soil science*. CRC PRESS, Editorial, 2001.

Schöngart Jochen, Rogério Gribel, Sinomar Ferreira da Fonseca-Junior y Torbejorn Haugaasen. 2015. "Age and growth patterns of Brazil nut trees (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in Amazonia, Brazil". *Biotropica* 47(5): 550-558. doi. 10.1111/btp.12243

Shorohova Ekaterina, Timo Kuuluvainen, Ahto Kangur y Kalev Jõgiste. 2009. "Natural stand structures, disturbance regimes and successional dynamics in the Eurasian boreal forests: a review with special reference to Russian studies". *Annals of Forest Science* 66 (2): 1-20. doi.10.1051/forest/2008083

SIGtierras. *Mapa de órdenes de Suelos del Ecuador*. 2023, Consultado en: [www.http://www.sigtierras.gob.ec/mapa-de-ordenes-de-suelos/](http://www.sigtierras.gob.ec/mapa-de-ordenes-de-suelos/)

- Sileshi, Gudeta. 2014. "A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures". *Forest Ecology and Management* 329: 237-254. doi. 10.1016/j.foreco.2014.06.026
- Skovsgaard, J. A., Vanclay, J. K. "Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands". *Forestry*, 81(1), 13-31 (2008). doi. 10.1093/forestry/cpm041
- Shukla Priyadarshi, Jin Skea, Eduardo Calvo Buendia, Valérie Masson-Delmotte, Hans Pörtner, Debra Roberts y Jim Skea. 2019. IPCC, 2019: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Slik Ferry, Niels Raes, Shin-Ichiro Aiba, Francis Q. Brearley, Charles H. Cannon, Erik Meijaard, Hidetoshi Nagamasu, Reuben Nilus, Gary Paoli, Axel D. Poulsen, Douglas Sheil, Eizi Suzuki, Johan L. C. H. Van Valkenburg, Campbell O. Webb, Peter Wilkie y Stephan Wulffraat. 2009. " ". *Diversity and Distributions*, 15(3), 523-532. doi. 10.1111/j.1472-4642.2009.00557.x
- Slik Ferry, Shin-Ichiro Aiba, Francis Q. Brearley, Chuck H. Cannon, Olle Forshed, Kanehiro Kitayama, Hidetoshi Nagamasu, Reuben Nilus, John Payne, Gary Paoli, Axel D. Poulsen, Niels Raes, Douglas Sheil, Kade Sidiyasa, Eizi Suzuki y Johan van Valkenburg. 2010. "Environmental correlates of tree biomass, basal area, wood specific gravity and stem density gradients in Borneo's tropical forests". *Global ecology and biogeography* 19(1): 50-60. doi. 10.1111/j.1466-8238.2009.00489.x
- Stephenson, N.L., Das, A.J., Condit, R., Russo, S.E., Baker, P.J., Beckman, N.G., Coomes, D., Lines, E., Morris, K., Rüger, N., Álvarez, E., Blundo, C., Bunyavejchewin, S., Chuyong, G., Davies, S., Duque, A, Ewango, C., Flores, O., Frnaklin, J., Grau, H., Hao, Z., Harmon, M., Hubbell, S., Kenfack, D., Zavala, M.A. 2014. "Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size". *Nature* 507(7490): 90-93. doi. 10.1038/nature12914
- Storm Ida, Anne Louise Hellwing, Nicolaj Nielsen y Jorgen Madsen, J. 2012. "Methods for measuring and estimating methane emission from ruminants". *Animals* 2(2): 160-183. doi. 10.3390/ani2020160

- Surová Diana y Teresa Pinto-Correia. 2021. *Societal views on the silvopastoral systems. Governance for Mediterranean Silvopastoral Systems: Lessons from the Iberian Dehesas and Montados*. Libro de Google Books.
- Suyanto Susan, Noviana Khususiyah y Beria Leimona. 2007. "Poverty and environmental services: case study in Way Besai watershed, Lampung Province, Indonesia". *Ecology and Society* 12 (2): <https://www.jstor.org/stable/26267871>
- Tang J Jianwu, Sebestiaan Luyssaert, Andrew Richardson, Wernwe Kutsch y Ivan Janssens. 2014. "Steeper declines in forest photosynthesis than respiration explain age-driven decreases in forest growth". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(24): 8856-8860. doi.10.1073/pnas.1320761111
- Torralba Mario, Nora Fagerholm, Paul Burgess, Gerardo Moreno y Tobias Plieninger. 2016. "Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis". *Agriculture, ecosystems & environment* 230:150-161. doi.10.1016/j.agee.2016.06.002
- Torres Bolier, Liette Vasseur, Rolando López, Pablo Lozano, Yudel García, Yasiel Arteaga, Carlos Bravo, Cecilio Barba y Antón García. 2020. "Structure and above ground biomass along an elevation small-scale gradient: case study in an Evergreen Andean Amazon forest, Ecuador". *Agroforestry Systems* 94:1235-1245. doi.10.1007/s10457-018-00342-8
- Tölgyesi Cesba., Zoltán Bátor, Róbert Gallé, István Urák y Tibor Hartel. 2018. "Shrub encroachment under the trees diversifies the herb layer in a romanian silvopastoral system". *Rangeland Ecology & Management* 71(5):571-577. doi. 10.1016/j.rama.2017.09.004
- ONU Cumbre de la Tierra. 1992. *Non-legally binding authoritative statement of principles for a global consensus on the management, conservation and sustainable development of all types of forests*. 3-4 junio. A/CONF.151/6.
- Unger Malte, Jürgen Homeier y Christoph Leuschner. 2012. "Effects of soil chemistry on tropical forest biomass and productivity at different elevations in the equatorial Andes". *Oecologia*, 170, 263-274. doi. 10.1007/s00442-012-2295-y
- Valenzuela Que, Fabiolo, Villanueva-López, Gilberto, Alcudia-Aguilar, Alejandro, Medrano-Pérez, Ojilve, Cámara-Cabrales, Luisa, Martínez-Zurimendi, Pablo, Casanova, Fernando, Aryal, Deb. 2022. Silvopastoral systems improve carbon stocks at livestock ranches in Tabasco, Mexico. *Soil Use and Management*, 38(2), 1237-1249. doi. <https://doi.org/10.1111/sum.12799>

- Vanneste Thomas, Sanne Van Den Berge, Enya Riské, Jörg Brunet, Guillaume Decocq, Martin Diekmann, Bente J. Graae, Per-Ola Hedwall, Jonathan Lenoir, Jaan Liira, Sigrid Lindmo, Kathrin Litza, Tobias Naaf, Anna Orczewska, Monika Wulf, Kris Verheyen y Pieter De Frenne. 2020. “Hedging against biodiversity loss: forest herbs’ performance in hedgerows across temperate Europe”. *Journal of Vegetation Science*, 31(5), 817-829. doi. 10.1111/jvs.12917
- Van Den Berge Sanne, Pieter Vangansbeke, Lander Baeten, Margot Vanhellemont, Thomas Vanneste, Tom De Mil, Jan van den Bulcke y Kirs Verheyen. 2021. “Biomass increment and carbon sequestration in hedgerow-grown trees”. *Dendrochronologia* 70:125894. doi. 10.1016/j.dendro.2021.125894
- Vashum Kuimi y Stephan Jayakumar, S. 2012. “Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests-a review”. *Journal of Ecosystem & Ecography* 2(4): 1-7. doi. 10.4172/2157-7625.1000116
- Vera, Raul. *Country Pasture/Forage Resource Profiles: Ecuador*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Editorial. 2006. [https://ees.kuleuven.be/eng/klimos/toolkit/documents/652\\_Ecuador-English.pdf](https://ees.kuleuven.be/eng/klimos/toolkit/documents/652_Ecuador-English.pdf)
- Walker Anthony P., Martin De Kauwe, Ana Bastos, Soumaya Belmecheri, Katerina Georgiou, Ralph F. Keeling, Sean M. McMahon, Belinda E. Medlyn, David Moore, Richard Norby, Sönke Zaehle, Kristina Anderson-Teixeira, Giovanna Battipaglia, Roel Brienen, Kristine G. Cabugao, Maxime Cailleret, Elliott Campbell, Josep Canadell, Philippe Ciais, Matthew Craig, David Ellsworth, Graham Farquhar, Simone Fatichi, Joshua Fisher, David C. Frank, Heather Graven, Lianhong Gu, Vanessa Haverd, Kelly Heilman, Martin Heimann, Bruce Hungate, Colleen Iversen, Fortunat Joos, Mingkai Jiang, Trevor Keenan, Jürgen Knauer, Christian Körner, Victor Leshyk, Sebastian Leuzinger, Yao Liu, Natasha MacBean, Yadvinder Malhi, Tim McVicar, Josep Penuelas, Julia Pongratz, A. Shafer Powell, Terhi Riutta, Manon Sabot, Juergen Schleucher, Stephen Sitch, William K. Smith, Benjamin Sulman, Benton Taylor, César Terrer, Margaret Torn, Kathleen Treseder, Anna Trugman, Susan Trumbore, Phillip van Mantgem, Steve Voelker, Mary Whelan y Pieter Zuidema 2021. “Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO<sub>2</sub>”. *New phytologist*, 229(5), 2413-2445. doi. 10.1111/nph.16866

- Wenger, Seth y Julian Olden. 2012. "Assessing transferability of ecological models: an underappreciated aspect of statistical validation". *Methods in Ecology and Evolution* 3(2): 260-267. doi. 10.1111/j.2041-210X.2011.00170.x
- Wollenberg Eva y Ani Nawir. 2005. "Turning straw into gold: specialization among damar agroforest farmers in pesisir, Sumatra. Forests", *Trees and Livelihoods* 15(4): 317-336. doi. 10.1080/14728028.2005.9752534
- Xiao Jingfeng, Ge Sun, Jiquan Chen, Hui Chen, Shiping Chen, Gang Dong, Shenghua Gao, Haiqiang Guo, Jixun Guo, Shijie Han, Tomomichi Kato, Yuelin Li, Guang hui Lin, Weizhi Lu, Mingguo Ma, Steven McNulty, Changliang Shao, Xufeng Wang, Xiao Xie, Xudong Zhang y Jie Zhou. 2013. "Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China". *Agricultural and forest meteorology*, 182, 76-90. doi. 10.1016/j.agrformet.2013.08.007
- Zaehle, Sam. 2005. "Effect of height on tree hydraulic conductance incompletely compensated by xylem tapering". *Functional Ecology* 19(2): 359-364. doi. 10.1111/j.0269-8463.2005.00953.x
- Zabala, Alam. *Motivations and incentives for pro-environmental behaviour: the case of silvopasture adoption in the tropical forest frontier* (Doctoral dissertation, University of Cambridge, Editorial, 2015. <https://www.semanticscholar.org/paper/Motivations-and-incentives-for-pro-environmental-of-Zabala/e8c44148bf08cd335219e8f1574f9b07f5d62cbd>
- Zhao Dehai, Michael Kane, Daniel Markewitz, Robert Teskey y Michael Clutter. 2015. "Additive tree biomass equations for midrotation loblolly pine plantations". *Forest Science* 61(4): 613-623. doi. 10.5849/forsci.14-193
- Zheng Xueting, Xingwen Cao, Wenqiang Xu, Lvbei Yi, Zhengyu Wang, Shimei Xiong, Zefu Tao y Qianfeng Li. 2023. "Dynamic growth models and estimation distinction of carbon stock for coniferous trees under different afforestation modes". *ResearchSquare*, doi. 10.21203/rs.3.rs-3173487/v1