



UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO DE MANABÍ”
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERIA AGROPECUARIA

PROYECTO DE INVESTIGACION:
PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO AGROPECUARIO.

TEMA:
“CUANTIFICACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN ÁRBOLES COMERCIALES DE
MELINA (*Gmelina arborea*) Y TECA (*Tectona grandis*)”.

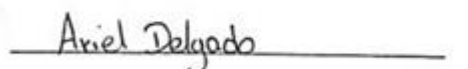
AUTORES:
YEPEZ VASQUEZ JEAN CARLOS
DELGADO ARCENTALES ARIEL LENIN

TUTOR(a):
ING. MERO ROSADO VALTER FRANCISCO

DECLARACIÓN DEL AUTORÍA

Yo, YEPEZ VASQUEZ JEAN CARLOS Y DELGADO ARCENTALES ARIEL LENIN, egresado de la carrera de Ingeniería Agropecuaria, que las ideas expuesta en este trabajo investigativo y los resultados obtenidos y conclusiones dentro del contenido de este presente trabajo de investigación titulado "CUANTIFICACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN ÁRBOLES COMERCIALES DE MELINA (*Gmelina arborea*) Y TECA (*Tectona grandis*)" es único y correspondiente bajo mi autoría; y que, anticipadamente no ha sido ostentado por calificación personal o por ningún grado; y, que he consultado las referencias bibliográficas que contienen en este documento.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.


YEPEZ VASQUEZ JEAN CARLOS
DELGADO ARCENTALES ARIEL LENIN

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ciencias de la vida de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría del estudiante Delgado Arcentales Ariel Lenin, Yépez Vásquez Jean Carlos, legalmente matriculado/a en la carrera de Ingeniería agropecuaria, período académico 2025-2026, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es "Cuantificación de carbono en árboles comerciales de Melina (*Gmelina arborea*) y Teca (*Tectona grandis*)".

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 16 de enero del 2026.

Lo certifico,



Ing. Valter Francisco Mero Rosado

Docente Tutor

Área: Agropecuaria

UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA Y TECNOLOGÍAS

TESIS DE GRADO

Los miembros del tribunal examinador aprueban el informe del Trabajo de Grado sobre el tema: "CUANTIFICACIÓN DEL CARBONO ALMACENADO EN ÁRBOLES COMERCIALES DE MELINA (*Gmelina arborea*) Y TECA (*Tectona grandis*)". De los egresados Ariel Lenin Delgado Arcentales y Jean Carlos Yépez Vásquez, luego de haber sido analizada por los señores Miembros del Tribunal de Grado, en cumplimiento con lo establecido en la ley, se da por aprobada la sustentación, acción que lo hace acreedor al título de:

INGENIERO AGROPECUARIO

MIEMBROS DEL TRIBUNAL



Ing. George Adalberto García Mera, MgSc.



Ing. Jeniffer Paulina Espinoza Zambrano, PhD.



Ing. Miguel Bolívar Zambrano Reyes, MgSc.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo, la guía y el acompañamiento de diversas personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a nuestro crecimiento personal y profesional, y a la consolidación de esta etapa fundamental de nuestra formación.

En primer lugar, agradecemos a Dios, fuente infinita de sabiduría, fortaleza y esperanza, por concedernos la vida, la salud y la perseverancia necesarias para afrontar cada desafío presentado durante este proceso. Su guía espiritual fue un pilar esencial para mantener la fe, la motivación y la confianza en los momentos de dificultad, permitiéndonos avanzar con responsabilidad, unión y compromiso hacia el cumplimiento de nuestros objetivos académicos.

De manera especial, expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestros padres, quienes han sido el principal sostén en nuestro camino de formación. Gracias por su amor incondicional, por los sacrificios realizados y por el apoyo moral y emocional brindado en cada etapa de nuestras vidas. Sus enseñanzas, valores y ejemplo de esfuerzo han sido determinantes para no rendirnos ante los obstáculos y para comprender que la educación constituye una herramienta fundamental de superación y servicio a la sociedad.

Asimismo, agradecemos a los docentes y maestros que, con profesionalismo, dedicación y vocación, compartieron sus conocimientos y experiencias durante nuestra formación académica. Su orientación, observaciones críticas y consejos oportunos fueron esenciales para el desarrollo de este anteproyecto, fortaleciendo nuestras capacidades investigativas, nuestro pensamiento crítico y nuestro sentido de responsabilidad académica.

Finalmente, agradecemos a nuestros amigos, compañeros y personas cercanas que confiaron en nosotros, brindándonos su apoyo constante, palabras de aliento y motivación. Su comprensión, paciencia y compañía hicieron más llevadero este camino, recordándonos la importancia del trabajo en equipo, la solidaridad y el respaldo humano en los retos académicos. A todos ellos, nuestro más sincero agradecimiento por formar parte de este logro tan importante y prestigioso como lo es cumplir nuestra meta académica.

DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto de tesis, en primer lugar, a Dios, por ser nuestra guía permanente, por iluminar nuestras mentes y fortalecer nuestro espíritu en cada paso de este proceso. A Él encomendamos nuestros esfuerzos y resultados, reconociendo que su presencia ha sido fundamental para alcanzar esta meta académica.

Con profundo cariño y gratitud, dedicamos este trabajo a nuestros padres, quienes con su amor, sacrificio y apoyo incondicional han sido la base de nuestra formación personal y profesional. Este logro es también de ustedes, por creer en nosotros, por impulsarnos a seguir adelante y por enseñarnos que la constancia, la humildad y el esfuerzo son claves para alcanzar los sueños.

De igual manera, dedicamos este anteproyecto a nuestros maestros, quienes con su ejemplo, conocimientos y compromiso contribuyeron significativamente a nuestro crecimiento académico. Su labor trasciende las aulas y se refleja en cada paso que damos como futuros profesionales, por lo que este trabajo representa un reconocimiento a su valiosa enseñanza.

Finalmente, dedicamos este esfuerzo a nuestros amigos, compañeros y a todas aquellas personas que confiaron en nosotros y nos brindaron su apoyo durante este proceso. Su amistad, comprensión y motivación fueron un impulso constante para no desistir y seguir avanzando con responsabilidad y dedicación.

INDICE

DECLARACIÓN DEL AUTORÍA.....	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTO.....	5
DEDICATORIA.....	6
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	1
CAPÍTULO I.....	2
INTRODUCCIÓN	2
MARCO TEORICO.....	3
1.1. Cambio climático	3
1.2. Causas del cambio climático.	4
1.3. Efectos del cambio climático.	5
1.4. Importancia del impacto de los gases de efecto invernadero	6
1.5. Contexto mundial	7
1.6. Surgimiento de nuevas prácticas para la reducción de la huella de carbono.	8
1.7. Captura de CO ₂	9
1.8. Uso de especies maderables como solución.....	10
1.9. Especies maderables en Ecuador con potencial de captura de CO ₂	10
1.10. MELINA (<i>Gmelina arborea</i>)	11
1.11. Usos de la Melina (<i>Gmelina arborea</i>) en América Latina y el Caribe.....	12
1.12. Condiciones edafoclimáticas	12
1.13. TECA (<i>Tectona grandis</i>).....	13
1.14. Usos de la Teca (<i>Tectona grandis</i>) en América Latina y el Caribe	13
1.15. Condiciones edafoclimáticas	14
Fuente: (Fonseca González 2003)	14
1.16. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA.....	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	17
JUSTIFICACION.....	17
HIPÓTESIS.....	19
OBJETIVOS.....	19

CAPÍTULO II	20
MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1 Características del sitio — Ubicación	20
2.2 Factores en estudio	20
2.3 Tratamientos	21
2.4 Diseño experimental y análisis de datos	21
2.5 Manejo específico que se desarrollara en el experimento.	22
2.6 Selección de los árboles de cada especie	22
2.7 Variables y métodos de evaluación	23
Peso de la Muestra	26
CAPÍTULO III	27
RESULTADOS Y DISCUSIONES	27
1.17. Biomasa de árboles comerciales de melina (10 años) (<i>Gmelina arborea</i>).....	27
1.18. Biomasa de árboles de 10 años de edad de teca (<i>Tectona grandis</i>)	28
1.19. Carbono en la biomasa de árboles comerciales de melina (<i>Gmelina arborea</i>) y teca (<i>Tectona grandis</i>) de 10 años de edad	30
1.20. Variación de almacenamiento de carbono en dos especies de árboles comerciales de 10 años de edad de teca y melina.	33
1.21. Análisis proximal	38
CAPÍTULO IV	42
CONCLUSIONES	42
RECOMENDACIONES	43
REFERENCIAS.....	44
ANEXOS.....	49

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Componentes de sistemas climáticos e incidencias	3
Ilustración 2 Estrategias de captación de carbono CO ₂	8
Ilustración 3. Proporción de la biomasa seca por compartimentos y por especie forestal (teca y melina) en rodales de 10 años de edad en el Valle del río Portoviejo.	33
Ilustración 4. Comparación de la biomasa seca total (A) y el carbono total entre especies forestales (B) (teca y melina) en rodales forestales de 10 años de edad en el valle del río Portoviejo.	35
Ilustración 5. Distribución del carbono por compartimento en teca y melina (A) y de la biomasa (B) en rodales forestales de 10 años de edad en el Valle del río Protoviejo	36

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Efectos del cambio climático en distintos procesos IPCC	5
Tabla 2 Gases de efecto invernadero origen e impacto	6
Tabla 3 Métodos de captura de CO ₂ de forma natural - biológico	9
Tabla 4 Especies maderables cultivadas en Ecuador con potencial de captación CO ₂	10
Tabla 5 Usos de la especie maderable Melina (<i>Gmelina arborea</i>) en América Latina y el Caribe .	12
Tabla 6 Condiciones edafoclimáticas de Melina (<i>Gmelina arborea</i>)	12
Tabla 7 Aplicación de la especie maderable Teca (<i>Tectona grandis</i>) en América Latina y el Caribe	13
Tabla 8 Condiciones edafoclimáticas de Teca (<i>Tectona grandis</i>).....	14
Tabla 9 Características de los sitios de estudio	20
Tabla 10 Tratamientos de las especies forestales	21
Tabla 11 Esquema del ADEVA del ensayo por localidad.....	21
Tabla 12. Biomasa por compartimento de los árboles de melina (<i>Gmelina arborea</i>) en estudio en el Valle del río Portoviejo, Manabí, Ecuador	27
Tabla 13. Biomasa por compartimento de los árboles de teca (<i>Tectona grandis</i>) de 10 años de edad en estudio en el Valle del río Portoviejo, Manabí, Ecuador.....	28
Tabla 14. Carbono total almacenado por árbol intervenido de teca y melina en el Valle del río Portoviejo	30
Tabla 15. Carbono almacenado por árbol y por compartimento intervenido, de teca y melina en el Valle del río Portoviejo.....	31
Tabla 16. Prueba T entre especies (teca y melina) por compartimento sobre la variable biomasa total en el valle del río Portoviejo..	37
Tabla 17. Análisis proximal (%) de la biomasa seca por compartimento en melina (<i>Gmelina arborea</i>) y teca (<i>Tectona grandis</i>) de 10 años de edad en el Valle del río Portoviejo.....	39

RESUMEN

El cambio climático es uno de los principales desafíos ambientales a nivel global, siendo el dióxido de carbono (CO₂) el gas de efecto invernadero más relevante, frente a lo cual los ecosistemas forestales cumplen un rol clave como sumideros naturales de carbono. El presente estudio tuvo como objetivo cuantificar el carbono almacenado y caracterizar la biomasa mediante análisis proximal en árboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) de 10 años de edad, establecidos en la cuenca del río Portoviejo, provincia de Manabí, Ecuador. La investigación se desarrolló bajo un diseño completamente al azar, considerando como factores la especie forestal y el origen de la muestra (tronco, ramas y raíces). Se realizaron mediciones dasométricas, estimación de biomasa fresca y seca, cálculo del contenido de carbono utilizando el factor de conversión del IPCC (0,5) y análisis proximal de la biomasa, evaluando humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo conforme a normas ASTM. Los resultados evidenciaron una relación directa entre las variables dasométricas, especialmente el diámetro a la altura del pecho, y la acumulación de biomasa y carbono. En ambas especies, el tronco concentró la mayor proporción de biomasa seca y carbono almacenado, mientras que las raíces representaron una fracción menor pero relevante para una estimación integral. La teca presentó, en promedio, mayores valores de biomasa seca y carbono almacenado por árbol en comparación con la melina, atribuible a su mayor densidad de madera, aunque la melina destacó por su rápido crecimiento y eficiente acumulación de biomasa. En conclusión, tanto la melina como la teca muestran un alto potencial para la captura de carbono y el aprovechamiento sostenible de la biomasa, constituyéndose en alternativas estratégicas para la mitigación del cambio climático y el desarrollo del sector forestal en la región costera del Ecuador.

Palabras clave: Captura de carbono; Biomasa forestal; Análisis proximal; Plantaciones comerciales

ABSTRACT

Climate change is one of the main global environmental challenges, with carbon dioxide (CO₂) being the most significant greenhouse gas. Forest ecosystems play a key role as natural carbon sinks. This study aimed to quantify stored carbon and characterize biomass through proximate analysis in 10-year-old commercial melina (*Gmelina arborea*) and teak (*Tectona grandis*) trees established in the Portoviejo River basin, Manabí Province, Ecuador. The research was conducted using a completely randomized design, considering the forest species and the origin of the sample (trunk, branches, and roots) as factors. Forest mensuration measurements, fresh and dry biomass estimation, carbon content calculation using the IPCC conversion factor (0.5), and proximate biomass analysis were performed, evaluating moisture, ash, volatile matter, and fixed carbon according to ASTM standards. The results showed a direct relationship between dasometric variables, especially diameter at breast height (DBH), and biomass and carbon accumulation. In both species, the trunk concentrated the highest proportion of dry biomass and stored carbon, while the roots represented a smaller but relevant fraction for a comprehensive estimate. Teak showed, on average, higher values of dry biomass and stored carbon per tree compared to melina, attributable to its greater wood density, although melina stood out for its rapid growth and efficient biomass accumulation. In conclusion, both melina and teak show high potential for carbon sequestration and the sustainable use of biomass, making them strategic alternatives for climate change mitigation and the development of the forestry sector in the coastal region of Ecuador.

Keywords: Carbon sequestration; Forest biomass; Proximate analysis; Commercial plantations

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los principales retos ambientales del siglo XXI, estrechamente relacionado con el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, especialmente el dióxido de carbono (CO₂). Este gas es considerado el principal responsable del calentamiento global debido a su origen mayoritariamente antrópico, asociado a la quema de combustibles fósiles y a la deforestación. En este contexto, los ecosistemas forestales cumplen un rol estratégico al actuar como sumideros naturales de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático mediante la captura y almacenamiento de CO₂ en su biomasa aérea y subterránea (Burbano, 2018).

Las plantaciones forestales comerciales han cobrado relevancia como una alternativa viable para combinar producción económica y sostenibilidad ambiental, particularmente cuando se emplean especies de rápido crecimiento. Entre estas, la melina (*Gmelina arborea*) y la teca (*Tectona grandis*) destacan por su adaptabilidad a condiciones tropicales, su alto valor comercial y su capacidad para acumular biomasa en periodos relativamente cortos. No obstante, en Ecuador existe una limitada disponibilidad de información técnica que cuantifique de manera precisa el carbono almacenado en este tipo de plantaciones, lo que dificulta la planificación de estrategias de manejo forestal sostenible y el diseño de políticas públicas orientadas a la mitigación del cambio climático (Pérez et al., 2020).

Adicionalmente, la caracterización de la biomasa forestal mediante análisis proximal permite evaluar no solo su potencial de almacenamiento de carbono, sino también sus propiedades fisicoquímicas asociadas a posibles usos energéticos e industriales. Variables como el contenido de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo aportan información clave para determinar la calidad de la biomasa y su impacto ambiental en distintos escenarios de aprovechamiento. En este sentido, integrar el análisis proximal con la cuantificación de biomasa y carbono fortalece el enfoque integral del manejo forestal y amplía las oportunidades de valorización sostenible de las plantaciones comerciales de melina y teca (López Villacís et al., 2024).

MARCO TEORICO

1.1.Cambio climático

El clima se refiere al comportamiento general y habitual de las condiciones atmosféricas en una región específica durante largos periodos. Según (Forero Cantor et al. 2017) El sistema climático está integrado por cinco elementos fundamentales que interactúan de forma continua. Estos incluyen: la atmósfera, una capa gaseosa que rodea al planeta y donde ocurren procesos como el viento y la formación de nubes; los océanos, que funcionan como almacenes de calor y modifican los patrones climáticos; la biósfera, compuesta por todos los seres vivos que participan en el intercambio de gases y en el ciclo del carbono; la superficie terrestre, que con su diversidad de suelos, vegetación y relieve influye en la absorción y reflexión de la radiación solar; y la criósfera, que comprende las zonas cubiertas de nieve y hielo, cruciales para mantener el balance térmico global.

Ilustración 1 Componentes de sistemas climáticos e incidencias

SISTEMA CLIMÁTICO	
Subsistema	Característica principal
Atmósfera	Es el subsistema más variable. Atrapa y reirradia la energía a otros componentes del sistema como los gases de invernadero emitidos por la tierra y los océanos.
Océanos	Responde a influencias externas más lentamente que la atmósfera. Absorbe CO ₂ reduciendo su concentración en la atmósfera
Biósfera (Plantas y animales)	La vegetación funciona como un agente retroalimentador biogeoquímico y biogeofísico con la atmósfera. Influye sobre la composición atmosférica a través de la remoción de dióxido de carbono y la producción de aerosoles y oxígeno.
Superficie Terrestre Criósfera (glaciales, nieve estacional, hielo oceánico,	Sus propiedades reflectivas marcan diferencias en la forma en que se calienta el planeta

Fuente: (Forero Cantor et al. 2017)

Según (Forero Cantor et al. 2017) El cambio climático consiste en variaciones prolongadas y significativas en los patrones climáticos del planeta, originadas por desequilibrios en el sistema climático y sus subsistemas. Estas alteraciones generan impactos en múltiples sectores.

En las zonas costeras, el aumento del nivel del mar ha provocado erosión, inundaciones e intrusión salina, lo que afecta la disponibilidad de agua dulce y obliga al desplazamiento de comunidades. La agricultura también se ve fuertemente impactada, tanto por factores climáticos directos que afectan el crecimiento de los cultivos como por consecuencias indirectas como la pérdida de fertilidad del suelo, aparición de plagas y disminución de la productividad, lo que repercute en los ingresos y la seguridad alimentaria.

1.2.Causas del cambio climático.

El efecto invernadero según (Hernández 2019) es un proceso natural mediante el cual el calor emitido por la superficie terrestre es absorbido por ciertos gases presentes en la atmósfera y luego redistribuido en todas las direcciones, lo que provoca un aumento en la temperatura del planeta. Este fenómeno es provocado principalmente por ciertos compuestos presentes en la atmósfera, denominados gases de efecto invernadero, siendo los más relevantes el vapor de agua, el CO₂, el metano, entre otros.

De todos ellos, el CO₂ es considerado el más relevante, principalmente por su creciente concentración en la atmósfera en consecuencias de la actividad humana por quema de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) seguido con la deforestación. Frente al calentamiento global, la acción más efectiva consiste en reducir de manera sustancial las emisiones de dióxido de carbono mediante un cambio en el modelo energético, promoviendo tecnologías limpias, energías renovables y modos de vida más sostenibles que minimicen el impacto ambiental.

Según la investigación de (Díaz Cordero 2012) Los cambios en la temperatura media de la Tierra y en el clima global están influenciados por factores que son provocados por la actividad humana y naturales.

Entre ellos se encuentran el aumento del nivel del mar, la presencia y comportamiento de las nubes, la emisión de aerosoles en la atmósfera, y el incremento de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, el metano y los hidratos de metano.

También influyen las variaciones en la capacidad de la superficie terrestre para reflejar la radiación solar, los cambios en el campo magnético externo del planeta, la contaminación atmosférica, las modificaciones en las capas de hielo polar, el contenido de vapor de agua y la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre.

Según los informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), estas causas pueden ser tanto de origen natural como resultado directo de actividades humanas.

1.3.Efectos del cambio climático.

El informe especial del IPCC de 2018 señala que el principal impulsor del cambio climático actual es el modelo de desarrollo humano insostenible, por lo que se hace un llamado urgente a reducir las emisiones de dióxido de carbono con el fin de mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 1,5 °C. En paralelo, el más reciente informe del Consejo Mundial de la Biodiversidad advierte de alrededor de un millón de especies pueden estar en peligro de extinción si no se llevan a cabo transformaciones profundas en el uso del suelo, la protección ambiental y las estrategias de mitigación climática.

Tabla 1 Efectos del cambio climático en distintos procesos IPCC

Impacto ambiental	Descripción
Agricultura	Identificada como la principal causa de pérdida de biodiversidad.
Humedales	Aproximadamente el 85 % ha desaparecido.
Arrecifes de coral	Cerca del 50 % se ha perdido desde finales del siglo XIX.
Razas ganaderas	El 9 % se encuentra extinto.
Deforestación (1980–2000)	Se talaron 100 millones de hectáreas de selva tropical.
Deforestación (2010–2015)	Se perdieron otros 32 millones de hectáreas.
Degradación ecológica del suelo	El 23 % de la tierra del planeta está degradada y no es utilizable.
Pérdida de polinizadores	Afecta la producción de alimentos, valorada entre 235 y 577 mil millones USD al año.
Destrucción de ecosistemas costeros (manglares)	Aumenta la vulnerabilidad de hasta 300 millones de personas.

Fuente: (Toulkeridis et al. 2020)

Según (Toulkeridis et al. 2020) Los efectos del cambio climático varían según la región, por lo que cada país debe abordarlos de forma particular. En el caso de Ecuador, los riesgos no solo están

relacionados con su posición geográfica en la zona ecuatorial, sino también con factores como su fragilidad económica y cultural, el nivel de preparación ante futuros desastres y el grado de relevancia que la sociedad otorga a este fenómeno.

1.4.Importancia del impacto de los gases de efecto invernadero

Según la fuente (EUROPARL 2023) los gases de efecto invernadero funcionan como un invernadero natural, atrapando el calor solar y permitiendo que la Tierra mantenga una temperatura adecuada para la vida. Aunque muchos de estos gases existen de forma natural, las actividades humanas han incrementado su concentración, intensificando el calentamiento global. Esto ha provocado alteraciones en el clima, como cambios en las precipitaciones, aumento de temperaturas y mayor frecuencia de eventos extremos.

Tabla 2 Gases de efecto invernadero origen e impacto

Gas de Efecto Invernadero	Origen y Uso	Contribución al Calentamiento Global
Dióxido de carbono (CO ₂)	Emisiones naturales (respiración, descomposición), quema de combustibles fósiles, procesos químicos.	Es el principal gas emitido por el ser humano. Es absorbido por las plantas.
Metano (CH ₄)	Producción de gas natural, petróleo, ganadería, agricultura, vertederos.	Mucho más potente que el CO ₂ a corto plazo.
Óxido nitroso (N ₂ O)	Uso de fertilizantes, quema de biomasa, tratamiento de aguas, producción química.	Tiene un alto potencial de calentamiento global.
Hidrofluorocarburos (HFCs)	Refrigeración, aire acondicionado, aerosoles, extintores.	Representan el 90 % de los gases fluorados; se busca su eliminación gradual.
Perfluorocarburos (PFCs)	Procesos industriales.	Muy persistentes en la atmósfera.

Hexafluoruro de azufre (SF ₆)	Aislante en líneas eléctricas.	Tiene uno de los mayores potenciales de calentamiento conocidos.
Trifluoruro de nitrógeno (NF ₃)	Limpieza de cámaras en la fabricación de microprocesadores.	Altamente potente; se usa en procesos tecnológicos avanzados.

Fuente: (EUROPARL 2023).

Cada gas de efecto invernadero contribuye de manera diferente al calentamiento del planeta, por lo que para compararlos se utiliza una medida común llamada CO₂ equivalente. En el año 2021, las actividades económicas dentro de la Unión Europea generaron alrededor de 3.600 millones de toneladas en CO₂ equivalente, lo que refleja una disminución del 22 % en comparación con las cifras del 2008. El dióxido de carbono fue responsable de casi el 80 % del total de estas emisiones, seguido por el metano, que superó el 12 %. A pesar de que el metano permanece menos tiempo en la atmósfera en comparación con otros gases, posee una eficiencia mucho más alta para retener el calor. Además, su emisión representa un riesgo, ya que, al concentrarse en determinados entornos, puede generar explosiones, según (EUROPARL 2023).

1.5.Contexto mundial

Según el autor (Moncada 2025) el informe Global Carbon Budget de 2024 registró un aumento en las emisiones de CO₂ procedentes de combustibles fósiles: carbón (0,2 %), petróleo (0,9 %) y gas natural (2,4 %), representando respectivamente el 41 %, 32 % y 21 % del total de emisiones globales por este origen. A nivel de países, China lideró con el 32 % de las emisiones mundiales, con un leve incremento del 0,2 %; Estados Unidos aportó el 13 %, con una reducción del 0,6 %; India generó el 8 %, con un aumento del 4,6 %; y la Unión Europea, con el 7 %, redujo sus emisiones en un 3,8 %. El resto del mundo, que representa el 38 % del total, mostró un crecimiento del 1,1 %.

1.6.Surgimiento de nuevas prácticas para la reducción de la huella de carbono.

Según el autor propone una metodología para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en los sistemas de producción se estructura en cuatro etapas modulares, adaptables a distintos contextos técnicos, económicos y de recursos.

- La primera etapa se enfoca en mejorar la eficiencia productiva mediante buenas prácticas como el manejo de la alimentación, sanidad, reproducción y confort animal, con énfasis en dietas de alta digestibilidad y contenido proteico, lo que permite disminuir emisiones sin afectar la producción lechera.
- La segunda etapa busca reducir emisiones directas, como las entéricas y del suelo, a través del uso de aditivos alimentarios y una menor dependencia de fertilizantes sintéticos.
- En la tercera etapa, se proponen estrategias de optimización e integración, priorizando el uso eficiente del espacio productivo.
- Finalmente, la cuarta etapa promueve el secuestro de carbono mediante la plantación de árboles funcionales y el manejo adecuado del suelo como reservorio de carbono, contribuyendo así a la neutralidad de emisiones y a la generación de servicios ecosistémicos.



Ilustración 2. Estrategias de captación de carbono CO2

Fuente: (Moncada 2025)

1.7.Captura de CO2.

Según (EOS DATA ANALYTICS 2024) Existen tres enfoques principales para la captura o “secuestro” de dióxido de carbono: biológico, geológico y tecnológico, cada uno con sus propios métodos y aplicaciones. A continuación, se detallan especialmente las técnicas biológicas, enfocadas en los ecosistemas naturales.

Tabla 3 Métodos de captura de CO2 de forma natural - biológico

Método de captura Biológica		
Esta forma de captura de carbono ocurre en ecosistemas naturales como suelos, océanos, praderas y bosques. Es una de las estrategias más comunes y sostenibles para mitigar el cambio climático.		
a) Bosques	Los bosques funcionan como uno de los sistemas eficiente para capturar CO ₂ , gracias a la fotosíntesis que realizan los árboles. Se estima que los bosques tropicales han capturado cerca del 30 % de las emisiones de CO ₂ en las últimas décadas.	Reforestación y forestación: plantación de árboles en zonas degradadas.
		Gestión forestal sostenible: incluye prácticas como la tala selectiva, control de densidad de árboles y quemas planificadas.
b) Praderas	Las praderas también son efectivas, especialmente porque almacenan carbono bajo tierra, en raíces y suelos profundos.	Recuperar tierras degradadas, aumentando su fertilidad y capacidad de captación.
		Fomentar sistemas agroforestales, que combinan cultivos y vegetación leñosa.
c) Suelos Agrícolas	El carbono orgánico del suelo se forma por la descomposición de materia vegetal	Labranza mínima o conservación.
		Cultivos de cobertura.

	y es una reserva de CO ₂ que puede mantenerse durante décadas. Es una de las formas más económicas y sostenibles de mitigar el calentamiento global.	Rotación de cultivos de alta biomasa: incrementan la entrada de carbono al suelo.
		Manejo adecuado de residuos agrícolas: en lugar de quemarlos, se incorporan al suelo como fuente de materia orgánica.

Fuente: (EOS DATA ANALYTICS 2024)

1.8. Uso de especies maderables como solución

Según los autores (Acosta Mireles et al. 2020) Los ecosistemas forestales actúan como eficaces sumideros de carbono, capturando CO₂ tanto en etapas tempranas como en bosques maduros, especialmente cuando incluyen especies de rápido crecimiento. La gestión responsable de los recursos forestales, tanto en bosques naturales como en áreas de cultivo, contribuye a mantener la captura de carbono de forma sostenida a lo largo del tiempo, a través de prácticas como la reforestación y la rotación de especies. No obstante, cuando los árboles mueren, libera nuevamente el carbono en forma de gases o líquidos. Además, factores naturales como la lluvia, la erosión o la actividad de animales pueden afectar estos depósitos de carbono y alterar el equilibrio ecológico del ecosistema.

1.9. Especies maderables en Ecuador con potencial de captura de CO₂

Tabla 4 Especies maderables cultivadas en Ecuador con potencial de captación CO₂

Especie	Biomasa anual / Captura de Carbono	% de Captura Durante Vida Útil / Observaciones
Tectona grandis (Teca)	~5.4 Mg C/ha·año (~20 Mg CO ₂ e)	Alta captura sostenida en rotaciones; madera de alta densidad
Eucalyptus saligna	~10.8 t C/ha·año	Muy alta en corto tiempo; ideal para rotaciones rápidas

<i>Leucaena diversifolia</i>	10–20 t MS/ha (hojas); 24–100 m ³ madera/ha·año	Rápido crecimiento; alta producción de biomasa
<i>Cordia alliodora</i> (Laurel)	2.5 t C/ha·año; 24.9 t C/ha a 10 años	Alta retención en agroforestales; madera comercial valiosa
<i>Alnus acuminata</i> (Alder)	0.8 t C/ha·año; 25 t C/ha a 30 años	Estabilidad a largo plazo; útil en sistemas de conservación
<i>Cliricidia sepium</i> (Amargo)	1.7 t C/ha·año; 51.6 t C/ha a 30 años	Alta captura en bosques secundarios; sombra para cultivos
<i>Mimosa scabrella</i>	~7.1 t C/ha·año (14.2 t C en 2 años)	Captura muy rápida; ideal para ciclos cortos
<i>Inga edulis</i>	No cuantificado; alta biomasa en agroforestales	Mejora suelo, retiene carbono en raíces y materia orgánica

Fuente: (Acosta Mireles et al. 2020)

1.10. MELINA (*Gmelina arborea*)

Según el manual elaborado por (Rojas Rodríguez et al. 2004) La Melina (*Gmelina arborea*) es una especie arbórea de crecimiento acelerado originaria del sudeste asiático, desde India hasta el sur de China, que ha adquirido gran relevancia en programas de reforestación comercial en regiones tropicales de América, como Ecuador. Se trata de una especie de crecimiento inicial que requiere altos niveles de luz solar para desarrollarse, por lo que comúnmente se encuentra en áreas despejadas o con amplia exposición al sol. Posee una notable capacidad para regenerarse y rebrotar de manera natural, y su propagación resulta sencilla tanto por semillas como por estacas. Debido a su corto ciclo de aprovechamiento, que varía entre 8 y 12 años, o incluso menos en sistemas clonales, es muy valorada en plantaciones de uso industrial.

1.11. Usos de la Melina (*Gmelina arborea*) en América Latina y el Caribe

Tabla 5 Usos de la especie maderable Melina (*gmelina arborea*) en América Latina y el Caribe

Categoría	Aplicaciones	Países donde se aplica
Maderables	Muebles, chapas decorativas, ebanistería, tarimas, plywood, construcción liviana, vigas, puertas, embalajes	Costa Rica, Colombia, México
Forraje y sombra	Forraje para ganado (12 % proteína cruda), sombra en sistemas agroforestales	Colombia, Nicaragua
No maderables	Colorantes naturales (fruto), agentes antimicrobianos	México
Técnico-industrial	Trabajabilidad en carpintería, construcción de viviendas sociales, tableros aglomerados, instrumentos musicales	Costa Rica, Colombia

Fuente: (Rojas Rodríguez et al. 2004)

1.12. Condiciones edafoclimáticas

Tabla 6 Condiciones edafoclimáticas de Melina (*Gmelina arborea*)

Condiciones edafoclimáticas óptimas para Melina	
Factor	Condición recomendada
Altitud	0 a 900 metros sobre el nivel del mar
Precipitación anual	1.000 a 4.000 mm (óptimo: 2.000 a 2.500 mm)
Temperatura	18 a 38 °C (óptimo: 24 a 29 °C)
Régimen de lluvias	8–9 meses lluviosos y 3–4 meses secos
Tipo de suelo	Franco o franco arcilloso, profundo (> 60 cm, ideal > 100 cm)
pH del suelo	Levemente ácido a neutro (pH 5–6)

Drenaje	Bien drenado, sin encharcamientos
Topografía	Terreno plano a ondulado, con pendientes $\leq 30\%$
Fertilidad	Suelos ricos en calcio, magnesio y materia orgánica
Viento	Áreas protegidas de vientos fuertes

Fuente: (Rojas Rodríguez et al. 2004)

1.13. TECA (*Tectona grandis*)

Según el autor (Fonseca González 2003) La teca (*Tectona grandis*) es una especie forestal de gran valor comercial, destacada por la calidad y durabilidad de su madera. Originaria del sudeste, se ha introducido con éxito en diversas zonas tropicales y subtropicales alrededor del mundo, gracias a su adaptabilidad y las características de su madera. En América Latina, la teca se cultiva principalmente en países como Costa Rica, México, Colombia, Ecuador y Brasil. Esta especie ha sido seleccionada como una de las principales opciones en iniciativas de reforestación con fines comerciales, especialmente en estrategias que buscan preservar y aumentar las reservas de carbono. Su destacada habilidad para regenerarse después del corte y su tolerancia al fuego la hacen adecuada para proyectos de producción de madera en plazos relativamente cortos y medianos. Su madera es muy valorada para la elaboración de muebles, embarcaciones y otros productos de alta demanda en mercados nacionales e internacionales.

1.14. Usos de la Teca (*Tectona grandis*) en América Latina y el Caribe

Tabla 7 Aplicación de la especie maderable Teca (*Tectona grandis*) en América Latina y el Caribe

Uso	Descripción	Países destacados
Muebles de alta calidad	Fabricación de mobiliario resistente, duradero y estético para interiores y exteriores	Costa Rica, México, Colombia, Brasil
Construcción y carpintería	Elaboración de puertas, ventanas, pisos, molduras y estructuras ligeras	Costa Rica, Ecuador, México

Embarcaciones	Fabricación de partes para embarcaciones debido a su resistencia al agua y pudrición	Costa Rica, Colombia
Revestimiento y decoración	Uso en tarimas, revestimientos y chapas decorativas por su belleza y facilidad de acabado	México, Brasil, Colombia
Productos artesanales	Creación de objetos tallados y artesanías de madera	México, Ecuador
Reforestación comercial	Cultivo en plantaciones para producción sostenible de madera y captura de carbono	Costa Rica, Brasil, Colombia

Fuente: (Fonseca González 2003)

1.15. Condiciones edafoclimáticas

Tabla 8 Condiciones edafoclimáticas de Teca (Tectona grandis)

Condiciones Edafoclimáticas Óptimas para la Teca	
Factor	Condición Ideal
Altitud	0 a 1,200 metros sobre el nivel del mar
Temperatura	22 °C a 27 °C (óptimo alrededor de 24 °C)
Precipitación anual	1,200 a 3,000 mm bien distribuidos durante el año
Suelo	Profundos, bien drenados, con buena retención de humedad
pH del suelo	Entre 5.5 y 7.5 (ligeramente ácido a neutro)
Textura del suelo	Franco a franco arenoso, con buen contenido de materia orgánica
Drenaje	Bueno, sin encharcamientos
Topografía	Terrenos planos a ondulados, pendientes $\leq 30\%$
Viento	Áreas protegidas de vientos fuertes

Fuente: (Fonseca González 2003)

1.16. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL TEMA.

Las plantaciones de árboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) se han convertido en una opción forestal con un valor elevado, por lo que la adaptabilidad es muy buena en estas especies al clima local y a su rápida tasa de crecimiento, fomentando una buena economía relevante, además las especies están relacionadas con la mitigación al cambio climático al capturar y almacenar dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, uno de los principales gases de efecto invernadero según (Ospino-Araya et al. 2020).

Sin embargo, existe una carencia de estudios específicos que cuantifiquen el carbono almacenado en estas plantaciones en la zona, donde es fundamental no solo mejorar la obtención de madera, sino también maximizar la capacidad de captura de carbono. Del mismo modo, llevar a cabo una caracterización detallada de la biomasa a través del análisis proximal adquiere un papel relevante, ya que facilita la estimación de su aprovechamiento potencial, su efecto sobre el medio ambiente y su valor como fuente de energía, según (Espinoza 2011)

Este conocimiento permitirá contribuir a las metas ambientales del país y a los compromisos internacionales relacionados con la mitigación del cambio climático. El presente estudio surge de la necesidad de llenar este vacío de conocimiento, proporcionando una base científica para el desarrollo de estrategias de manejo forestal. Estas estrategias buscan equilibrar la producción económica con la preservación y mejora de los servicios ecosistémicos, particularmente en la captura de carbono, asegurando así un desarrollo forestal que sea tanto rentable como ambientalmente responsable. Además, el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, requiere de esta información mediante la Subsecretaría de Producción Forestal, con el fin de iniciar posibles programas de incentivos por captura de carbono de estas especies forestales comerciales.

Los árboles de melina (*Gmelina arborea*) que serán objeto de estudio en esta investigación se encuentran en áreas de ensayo ubicadas tanto en la Estación Experimental Portoviejo como en la Estación Experimental Tropical Pichilingue, pertenecientes al INIAP. Por otro lado, los ejemplares de teca (*Tectona grandis*) se localizan en plantaciones próximas a dichas estaciones, identificadas por el MAG, y presentan la edad adecuada para considerarse dentro del rango de plantaciones forestales establecidas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el contexto de la creciente necesidad de mitigar el cambio climático, las plantaciones comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) han cobrado relevancia en Ecuador, no solo por su valor económico y adaptabilidad al clima local, sino también por su capacidad de capturar y almacenar dióxido de carbono (CO₂), uno de los gases principales de efecto invernadero. a pesar de ser potencial ambiental, hay un vacío notable en la falta de estudios especiales que evalúen cuantitativamente el carbono que se almacena en estas especies en el país, especialmente

Esta falta de información limita el diseño e implementación de estrategias de manejo forestal que puedan maximizar tanto la productividad maderera como el secuestro de carbono. Además, el análisis de la biomasa mediante métodos como el análisis proximal no ha sido suficientemente abordado, a pesar de ser esencial para predecir la utilidad energética, el impacto ambiental y el aprovechamiento sostenible de estos recursos forestales.

La ausencia de datos confiables y contextualizados dificulta la toma de decisiones por parte de entidades gubernamentales como el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, que a través de la Subsecretaría de Producción Forestal requiere esta información para desarrollar políticas públicas e incentivos orientados a la captura de carbono en plantaciones comerciales. Esta situación evidencia un vacío de conocimiento técnico-científico que debe ser abordado con urgencia, tanto para contribuir a los compromisos internacionales sobre cambio climático, como para promover un desarrollo forestal ambientalmente responsable y económicamente viable.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la cantidad de carbono almacenado en las plantaciones de melina y teca, y cómo se caracteriza su biomasa mediante análisis proximal, en una zona determinada del Ecuador, para proponer estrategias de manejo forestal sostenibles y eficientes?

JUSTIFICACION

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos ambientales a nivel global, siendo el dióxido de carbono (CO₂) uno de los principales gases responsables del efecto invernadero. En este contexto, los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental al actuar como sumideros naturales de carbono según (Burbano Orjuela 2018). Las plantaciones forestales comerciales, especialmente aquellas con especies de rápido crecimiento como la melina (*Gmelina arborea*) y la teca (*Tectona grandis*), han demostrado tener un alto potencial para capturar y almacenar carbono, lo que contribuye significativamente al cambio climático.

En Ecuador, estas especies han sido ampliamente introducidas por su adaptabilidad, valor económico y rápida tasa de crecimiento. No obstante, existe una escasez de estudios locales que cuantifiquen el carbono almacenado en estos sistemas y que caractericen la biomasa con un enfoque técnico que permita su aprovechamiento integral según la investigación de (Pérez et al. 2020). Esta falta de información limita tanto el diseño de estrategias de manejo forestal sostenible como la posibilidad de implementar programas de incentivos basados en la captura de carbono, lo cual representa una oportunidad desaprovechada para alinear la producción forestal con los compromisos internacionales del país, como los establecidos en el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Asimismo, el análisis proximal de la biomasa (contenido de humedad, cenizas, volátiles, carbono fijo, entre otros) permite evaluar su calidad energética y su impacto ambiental en diferentes usos industriales según (López Villacis et al. 2024).

Por otro lado, instituciones como el Ministerio de Agricultura y Ganadería en Ecuador de políticas públicas para el manejo responsable de plantaciones forestales comerciales. En este sentido, el

presente estudio busca llenar un vacío técnico-científico y ofrecer una base sólida para el diseño de políticas ambientales que equilibren la productividad económica con la sostenibilidad ambiental según datos de (GOB EC 2017).

En resumen, este trabajo contribuirá con datos relevantes sobre el potencial de captura de carbono y las propiedades energéticas de la biomasa en cultivos de melina y teca. Esta información apoyará prácticas de manejo forestal responsables, alineadas con los objetivos climáticos y el desarrollo sostenible del sector forestal en Ecuador.

HIPÓTESIS

Hipótesis Nula

No existe una diferencia significativa en la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea total entre los árboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) en la cuenca del río Portoviejo.

Hipótesis Alternativa

Existe una diferencia significativa en la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea total entre los árboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) en la cuenca del río Portoviejo.

OBJETIVOS

Objetivos General

Cuantificar el carbono almacenado en arboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*).

Objetivos Específicos

- Estimar el volumen de la biomasa de árboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*).
- Determinar el contenido de carbono en la biomasa de árboles comerciales de melina y teca
- Analizar la variación de almacenamiento de carbono en dos especies de árboles comerciales forestales.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Características del sitio — Ubicación

A continuación, se detalla la ubicación y las características de clima y suelo de la localidad en estudio basados en los datos de (López et al. 2018):

Tabla 9 Características de los sitios de estudio

Provincia	Manabí
Cantón	Portoviejo
Sitio	Km 12,5 vía Portoviejo, Santa Ana (INIAP)
Altitud (msnm)	44
Latitud	1 09' 52.1" s
Longitud	80 23' 18.3"W
Zona climática	Semiárido Cálido
Temperatura promedio	25
Precipitación media anual	627,7
Topografía	Plana
Textura	Limoso

Fuente: 1 INAMHI, 2020 2 Gad Portoviejo, 2020 3 EE Santa Catalina, 2022

2.2 Factores en estudio

- **Factor A:** Especie forestal

A1 = Teca (*Tectona grandis*)

A2 = Melina (*Gmelina arborea*)

- **Factor B:** Origen de la muestra

BI = Tronco

B2 = Ramas

B3 = Raíces

Nota: no se consideran las hojas para este estudio, debido a que son árboles caducifolios y al momento de realizar esta investigación, no tienen este componente aéreo.

2.3 Tratamientos

La combinación de los factores en estudio da como resultados 6 tratamientos:

Tabla 2. Descripción de los tratamientos.

Tabla 10 Tratamientos de las especies forestales

Descripción			
Número	Código	Especie	Origen de la muestra
1	A1B1	Teca	Tronco
2	A2B1	Melina	Tronco
3	A1B2	Teca	Ramas
4	A2B2	Melina	Ramas
5	A1B3	Teca	Raíces
6	A2B3	Melina	Raíces

Fuente: 1 INAMHI, 2020 2 Gad Portoviejo, 2020 3 EE Santa Catalina, 2022

2.4 Diseño experimental y análisis de datos

La presente investigación se implementó bajo un diseño completamente al azar (DCA), con tres repeticiones. Previo al análisis de datos se efectuó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilks y de homogeneidad de varianzas con la de Bartlett. A las variables que presentaran significación estadística se realizará la prueba de separación de medias de Tukey al 5%; y las que no presenten significancia estadística, se realizará una tabla de promedios. En caso de comprobarse la falta de normalidad de los datos, se utilizaron pruebas de estadística no paramétricas. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete estadístico R Studio.

Tabla 11 Esquema del ADEVA del ensayo por localidad

Fuentes de variación	Grados de libertad
Factor A (a-l)	1
Factor B (b-l)	2

Interacción AxB (a-l 1)	2
Error experimental a*b (r-l)	12
Total	17

Fuente: 1 INAMHI, 2020 2 Gad Portoviejo, 2020 3 EE Santa Catalina, 2022

2.5 Manejo específico que se desarrollara en el experimento.

Origen de los árboles: Los árboles, se escogieron a partir de un ensayo establecido en la Estación Experimental Portoviejo, con el título de "Comportamiento de procedencias de melina *Gmelina arborea*, especie forestal con potencial para producción de madera en Ecuador", el ensayo establecidos en el año 2015 cuentan con tres repeticiones, mientras que los rodales de teca (*Tectona grandis*), así mismo son ensayos sembrados en la EEP.

2.6 Selección de los árboles de cada especie

Se seleccionaron dos árboles de cada especie, las cuales fueron de la misma procedencia tipificadas en los protocolos de los ensayos antes mencionados, para la selección de la procedencia, se consideró los siguientes criterios: Óptimo estado sanitario, ausencia de gambas y grano en espiral, ramas cortas de poco diámetro y de ángulo inserción en el fuste lo más cercano a 90 grados, con la mejor calidad del fuste, además de ser coetáneos. Para la selección de los árboles, los cuales no estuvieron en el borde del rodal, se usó la técnica del árbol promedio propuesta por (MacDicken, 1997), en este caso en particular, una vez medido el diámetro del tallo de los árboles; se seleccionó un árbol que esté debajo de la media (Representa individuos con menor potencial o desarrollo) y otro por encima de la media (Representa los árboles de mayor calidad o desarrollo), para tener datos confiables.

- **Actividades de campo:** Una vez seleccionados los árboles, se hicieron las medidas dasométricas respectivas, la tala de los árboles a 25 cm del suelo y el pesaje total de cada una de las partes.
- **Actividades de laboratorio:** Se seleccionaron tres submuestras de cada parte del árbol (fuste y ramas) por árbol y por especie, estas muestras serán de 500 g, fueron llevados al

laboratorio a realizar los procedimientos respectivos con el fin de obtener los resultados requeridos en análisis proximal.

2.7 Variables y métodos de evaluación

- **Diámetro (altura del pecho):** Esta variable se registró en cada una de los árboles seleccionadas, empleando para ello una cinta especializada para este tipo de mediciones.
- **Altura total del árbol:** Con ayuda de una cinta métrica, se midió la altura total del árbol (una vez derribado), en metros
- **Altura comercial:** Utilizando una cinta métrica, se determinó la altura del tronco caído, expresada en metros, tomando como referencia desde la base hasta el punto donde comienza la primera ramificación o la copa.
- **Diámetro del fuste cada dos metros:** Con la ayuda de una cinta diamétrica o cinta métrica para transformar los datos, se midió el esta variable en cm.
- **Peso fresco de fuste y ramas:** Con la ayuda de una balanza, se pesó en fresco por separado de las partes del árbol, es decir, peso fresco del tallo y peso fresco de las ramas, esto se hizo en kg.
- **Estimación del volumen de la biomasa aérea:** De acuerdo con lo descrito por Magnussen y Reed (2013) se detalla la estimación de volumen siguiendo 3 pasos:
 - **Primer paso:** consistió en colocar las muestras de 500 g en un recipiente con agua por un periodo de 2 horas, lo cual permite llenar las células de la superficie con agua y prevenir la adsorción de agua durante la determinación de volumen.
 - **Segundo paso:** Transcurridas dos horas, se utilizó una probeta de vidrio con base hexagonal y capacidad de 2000 ml, la cual se llena hasta la marca de 1000 ml; este volumen inicial (Vol 1) se registró en mililitros y se convierte a centímetros cúbicos.
 - **Tercer paso:** la submuestra que ha pasado dos horas en agua, se sumerge en la probeta, se mide el volumen final (Vol 2) en ml y se transforma en centímetros cúbicos.

Después se realizó el cálculo de volumen de la sub muestra, a través de la siguiente fórmula:

$$Vol\ de\ la\ submuestras\ (cc) = \frac{Vol\ 2\ (cc)}{Vol\ 1\ (cc)}$$

Se secaron las submuestras, en un horno Thermo scientific a temperatura promedio de 70 a 80 °C, hasta que se estabiliza el peso, se tomó la referencia del peso seco el peso estabilizado que da la submuestra. Las submuestras del fuste estuvieron un mayor tiempo en el horno, por ser estas de mayor grosor, aproximadamente 96 horas, mientras que las ramas, dependiendo del tamaño (gruesas, medianas y delgadas) estuvieron en el horno alrededor de (48 y 72 horas).

Conforme a la metodología descrita por Castellanos et al. (2010), se aplicó la fórmula correspondiente para calcular la densidad específica de las secciones del tallo, hojas y ramas, expresada en gramos por centímetro cúbico.

Densidad específica correspondiente al tronco y las ramas:

$$DE = \frac{PS}{VF}$$

- DE= densidad específica
- PS= peso de la muestra, secado con horno
- VF= volumen fresco de la muestra.

Una vez determinadas las densidades específicas de las tres secciones de la planta, se calculó el volumen total sumando los volúmenes específicos de cada segmento y especie, empleando la siguiente fórmula:

$$VB = \frac{DE}{PS}$$

- VB= Volumen de la biomasa
- DE= Densidad específica
- PS= Peso seco total de cada parte de la planta.

Estimación del volumen de la biomasa de la raíz

Para determinar la biomasa de la raíz, se consideró lo recomendado por (MacDicken, 1997), en donde menciona que, para los bosques tropicales, donde se indica que existe una relación de la

biomasa entre raíz: brote de 0,10 a 1,15; para este estudio se consideró un valor intermedio, es decir de 0,125; quedando de relación de la siguiente manera:

$$Br = Ba * 0,125$$

- Br es la biomasa de la raíz
- Ba es la biomasa aérea o brote.

Cuantificación de carbono (medición de la huella de carbono)

La conversión de biomasa seca a carbono se hizo utilizando el factor de conversión estándar de 0,5 (IPCC, 2003), la fórmula para obtener el contenido de carbono fue la siguiente:

$$Ct = 0,5 * PS$$

- Ct= Contenido de carbono total de cada parte de la planta
- PS= Peso seco total de cada parte de la planta

Análisis estadístico

Una vez obtenidos todos los resultados de los objetivos anteriores, se realizó una prueba t para determinar la diferencia en el contenido de carbono entre las especies y entre las partes de los árboles.

Análisis (proximal)

Inicialmente se efectuó el análisis proximal de biomasa dentro de las instalaciones del laboratorio de bromatología del INIAP-Portoviejo a las materias primas empleadas para conocer las características que poseen: Humedad (%H), cenizas (%C), materia volátil (%MV), carbono fijo (%CF), los métodos empleados están basados por lo informado por Adegoke, Fuwape y Fabiyi (2014) y la Norma ASTM E870 — 82 (2013).

La determinación del porcentaje de humedad (%H) se llevó a cabo en una estufa MEMMERT, siguiendo la norma BS EN 14774-3 (2009), aplicando una temperatura de $105 \pm 1-2$ °C durante una hora, utilizando la fórmula correspondiente.

$$\%H = \frac{M1 - M2}{M1 - M3 * 100}$$

- M1: Masa del recipiente vacío (g)
- M2: Masa (Inicial) antes del secado (g)
- M3: Masa (final) después del secado (g)

Para el análisis de cenizas (%C) se procede a pesar 1 gramo de muestra en un crisol durante 4 horas a 575 °C en mufla (Sluiter et al., 2008), el equipo que se usó fue una mufla Termolyne marca THERMO SCIENTIFIC el cual fue expresado mediante la ecuación:

Peso de la Muestra

La materia volátil (%MV) se hará a 950°C durante 7 minutos como lo manifiesta la ASTM D1 762 — 84, que se expresó por la ecuación:

$$\%MV = \frac{A - B}{A * 100}$$

En donde:

- A: Peso (inicial) (g)
- B: Peso (Final) (g)

El porcentaje de carbono fijo (%CF), conforme a la norma ASTM E870 — 82 (2006), representa la cantidad de carbono que queda en la muestra después de eliminar la humedad, las cenizas y los compuestos volátiles. Por lo cual se utiliza la formula:

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

1.17. Biomasa de árboles comerciales de melina (10 años) (*Gmelina arborea*)

A partir del corte de dos árboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) de 10 años de edad, se registraron las variables dasométricas y se cuantificó la biomasa por compartimentos (tronco, ramas y raíces), lo que permitió estimar la biomasa seca total por individuo (Tabla 12). El árbol 1, con un DAP de 24,5 cm y una altura total de 18,3 m, presentó una biomasa seca total de 209,23 kg, mientras que el árbol 2, con mayor DAP (35,6 cm) y mayor altura total (20 m), alcanzó una biomasa seca total de 290,39 kg, evidenciando una mayor acumulación de materia orgánica.

Tabla 12. Biomasa por compartimento de los árboles de melina (*Gmelina arborea*) en estudio en el Valle del río Portoviejo, Manabí, Ecuador

Árbol	DAP (cm)	Altura total (m)	Altura comercial (m)	Biomasa fresca tronco (kg)	Biomasa fresca ramas (kg)	Humedad fuste (%)	Humedad ramas (%)	Biomasa seca tronco (kg)	Biomasa seca ramas (kg)	Biomasa seca raíces (kg)	Biomasa total (kg)
1	24,5	18,3	6,7	285,6	52,18	45,43	41,63	155,85	30,46	22,92	209,23
2	35,6	20	9	371,9	62,61	39,65	45,47	224,44	34,14	31,81	290,39

En ambos individuos, el tronco concentró la mayor proporción de biomasa, representando 155,85 kg y 224,44 kg de la biomasa total en los árboles 1 y 2, respectivamente, seguido por ramas y raíces, lo que confirma que el fuste es el principal reservorio de carbono en plantaciones comerciales de melina.

La biomasa seca de raíces, aunque menor en comparación con la biomasa aérea, alcanzó valores de 22,92 kg en el árbol 1 y 31,81 kg en el árbol 2, lo que resalta su contribución al almacenamiento de carbono subterráneo y a la estabilidad del sistema forestal. En conjunto, los resultados confirman que la melina (*Gmelina arborea*) presenta una alta capacidad de acumulación de biomasa y, por

ende, de carbono, especialmente en individuos con mayor crecimiento diamétrico y altura, consolidándose como una especie estratégica para sistemas productivos forestales y para iniciativas de mitigación del cambio climático en el Valle del río Portoviejo.

Los valores de humedad observados en fuste y ramas presentan variaciones entre individuos, lo que puede atribuirse a diferencias fisiológicas y a condiciones locales de crecimiento; sin embargo, estas variaciones no alteran el patrón general de acumulación de biomasa seca. Los resultados coinciden con estudios desarrollados en bosques tropicales, donde se reporta que la melina alcanza elevados niveles de biomasa aérea a edades cercanas a los 10 años, consolidándose como una especie con alto potencial productivo y capacidad de fijación de carbono en periodos relativamente cortos (Brown, 1997). La melina se perfila como una alternativa estratégica tanto para la producción forestal como para iniciativas de mitigación del cambio climático en la región costera del Ecuador.

1.18. Biomasa de árboles de 10 años de edad de teca (*Tectona grandis*)

A partir del corte de dos árboles de teca (*Tectona grandis*), se registraron las variables dasométricas correspondientes y se determinó el peso de los diferentes componentes del árbol. Siguiendo la metodología establecida para este tipo de evaluaciones, se procedió a la cuantificación de la biomasa por compartimentos (tronco, ramas y raíces), lo que permitió estimar la biomasa total de los árboles seleccionados para el efecto.

Tabla 13. Biomasa por compartimento de los árboles de teca (*Tectona grandis*) de 10 años de edad en estudio en el Valle del río Portoviejo, Manabí, Ecuador

Árbol	DAP (cm)	Altura total (m)	Altura comercial (m)	Biomasa fresca tronco (kg)	Biomasa fresca ramas (kg)	Humedad fuste (%)	Humedad ramas (%)	Biomasa seca tronco (kg)	Biomasa seca ramas (kg)	Biomasa seca raíces (kg)	Biomasa total (kg)
1	21,2	21	9	299,05	109,05	23,26	29,62	229,49	76,75	37,67	343,91

2	19,	20,8	11	201	100,8	27,64	30,84	145,4	69,75	26,47	241,6
	4				5			4			6

La biomasa estimada en árboles de teca (*Tectona grandis*) de 10 años en el Valle del río Portoviejo evidencia una relación consistente entre las variables dasométricas y la acumulación de biomasa seca total (Tabla 13). En este estudio, el árbol 1, con un DAP de 21,2 cm y una altura total de 21 m, registró una biomasa seca total de 343,91 kg, valor superior al observado en el árbol 2, que presentó un DAP de 19,4 cm, una altura total de 20,8 m y una biomasa seca total de 241,66 kg. Estos resultados resaltan la importancia del diámetro del fuste como variable clave en la acumulación de biomasa, incluso cuando las alturas totales son similares, confirmando que el crecimiento diamétrico influye de manera determinante en la productividad de la teca en edades intermedias de rotación.

La distribución de la biomasa por compartimentos muestra que el tronco concentra la mayor proporción de biomasa seca total, representando aproximadamente el 66,7 % y 60,2 % del total en los árboles 1 y 2, respectivamente, seguido por las ramas y, en menor medida, las raíces. Esta predominancia del fuste responde a la alta proporción de tejido leñoso denso característico de la teca, lo cual refuerza su relevancia en las estimaciones de biomasa y carbono almacenado en plantaciones comerciales. La biomasa seca de raíces, aunque representa una fracción menor (37,67 kg en el árbol 1 y 26,47 kg en el árbol 2), cumple un rol importante en el almacenamiento subterráneo de carbono y debe ser considerada para obtener evaluaciones más integrales del sistema forestal.

Las variaciones observadas en los contenidos de humedad del fuste y las ramas entre ambos árboles pueden estar asociadas a diferencias individuales en el estado fisiológico y a condiciones locales de crecimiento; sin embargo, estas diferencias no modifican el patrón general de acumulación de biomasa seca. El comportamiento observado es coherente con estudios desarrollados en bosques tropicales, donde se reporta una elevada acumulación de biomasa aérea en teca a edades cercanas a los 10 años, destacando su alto potencial productivo y su contribución a la fijación de carbono en sistemas forestales comerciales (Brown, 1997). En este contexto, la teca se consolida como una

especie estratégica para iniciativas de producción maderera y mitigación del cambio climático en la región costera del Ecuador.

1.19. Carbono en la biomasa de árboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) de 10 años de edad

Para la estimación del carbono almacenado en la biomasa de los árboles comerciales de melina y teca, se siguió la metodología recomendada por el IPCC (2003). La conversión de biomasa seca a contenido de carbono se realizó utilizando el factor de conversión estándar de 0,5, el cual asume que, en promedio, el 50 % de la biomasa seca corresponde a carbono.

Con base en este procedimiento, se construyó la siguiente tabla, en la que se presenta la estimación del carbono almacenado para las especies teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*), con fines comparativos y explicativos.

Tabla 14. Carbono total almacenado por árbol intervenido de teca y melina en el Valle del río Portoviejo

Árbol	Número	Biomasa seca total (kg)	Carbono almacenado total (kg)
Melina	1	209,23	104,61
Melina	2	290,39	145,19
Teca	1	343,91	171,95
Teca	2	241,66	120,83

La estimación del carbono total almacenado en la biomasa de árboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) de 10 años en el Valle del río Portoviejo permitió identificar diferencias claras tanto entre individuos como entre especies (Tabla 14). A partir de la conversión de la biomasa seca total mediante el factor estándar de 0,5, se observó que los árboles con mayor biomasa presentaron, de forma proporcional, mayores contenidos de carbono almacenado. En melina, el árbol 1 almacenó 104,61 kg de carbono, mientras que el árbol 2 alcanzó 145,19 kg, asociado a su mayor biomasa seca total. Estos resultados confirman que la biomasa seca es un indicador directo y confiable para la estimación del carbono almacenado en sistemas forestales comerciales.

En el caso de la teca, los valores de carbono almacenado por árbol fueron superiores a los registrados en melina. El árbol 1 presentó el mayor valor de todo el estudio, con 171,95 kg de carbono, seguido del árbol 2 con 120,83 kg. Este comportamiento se explica principalmente por la mayor biomasa seca total registrada en teca, así como por las características propias de la especie, como la mayor densidad de la madera y la elevada proporción de biomasa concentrada en el fuste. Al comparar ambas especies, la teca mostró una mayor capacidad de almacenamiento de carbono por individuo, mientras que la melina destacó por su eficiencia en la acumulación de biomasa en periodos relativamente cortos, característica típica de especies de rápido crecimiento.

La metodología empleada para la estimación del carbono, basada en el uso de un factor de conversión del 50 % de la biomasa seca, es ampliamente utilizada en estudios forestales tropicales debido a su simplicidad, consistencia y aplicabilidad para análisis comparativos. Este enfoque permite obtener estimaciones conservadoras y comparables entre especies y regiones, siendo adecuado para evaluaciones preliminares de captura de carbono y para la planificación de proyectos forestales con fines productivos y ambientales (IPCC, 2003). En conjunto, los resultados obtenidos refuerzan el potencial de las plantaciones de melina y teca como alternativas viables para contribuir a la mitigación del cambio climático y al manejo sostenible de los sistemas forestales en la región costera del Ecuador.

A continuación, en la tabla siguiente, y siguiendo la misma metodología descrita anteriormente, se presentan los resultados de la estimación del carbono almacenado por compartimento en los árboles intervenidos para este estudio.

Tabla 15. Carbono almacenado por árbol y por compartimento intervenido, de teca y melina en el Valle del río Portoviejo

Árbol	Número	Biomasa seca de tronco (kg)	Carbono almacenado en tronco (kg)	Biomasa seca de ramas (kg)	Carbono almacenado en ramas (kg)	Biomasa seca de raíces (kg)	Carbono almacenado en raíces (kg)
Melina	1	155,85	77,92	30,46	15,23	22,92	11,46

Melina	2	224,44	112,22	34,14	17,07	31,81	15,90
Teca	1	229,49	114,74	76,75	38,37	37,67	18,83
Teca	2	145,44	72,72	69,75	34,87	26,47	13,23

La estimación del carbono almacenado por compartimento en árboles comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) de 10 años en el Valle del río Portoviejo evidencia una distribución diferenciada del carbono entre los distintos componentes del árbol (Tabla 15). En ambas especies, el tronco concentró la mayor proporción del carbono total, alcanzando valores entre 77,92 y 112,22 kg de carbono por árbol en melina, y entre 72,72 y 114,74 kg en teca. Esta concentración responde directamente a la mayor biomasa seca del fuste y a su función estructural, confirmando que el tronco constituye el principal reservorio de carbono en plantaciones forestales comerciales orientadas a la producción maderera.

Al comparar las especies y los compartimentos secundarios, la teca presentó valores superiores de carbono almacenado en ramas y raíces en relación con la melina. En particular, el árbol 1 de teca almacenó 38,37 kg de carbono en ramas y 18,83 kg en raíces, superando a los valores registrados en melina, que oscilaron entre 15,23 y 17,07 kg en ramas, y entre 11,46 y 15,90 kg en raíces. Este patrón sugiere una mayor asignación de biomasa a compartimentos secundarios y subterráneos en la teca, lo que puede estar asociado a su arquitectura, al mayor desarrollo de copa y a la densidad de su madera. En contraste, la melina mostró una mayor concentración relativa de carbono en el tronco, coherente con su estrategia de crecimiento rápido y priorización del fuste en etapas tempranas de desarrollo.

La distribución del carbono por compartimentos observada en este estudio es consistente con lo reportado para especies forestales tropicales, donde el tronco representa la fracción dominante del carbono total, seguido por ramas y raíces en proporciones menores pero relevantes para una evaluación integral del sistema forestal (Ketterings et al., 2001). La inclusión del componente radicular resulta fundamental para evitar subestimaciones del carbono almacenado, especialmente en estudios orientados a mitigación del cambio climático y planificación forestal. En conjunto, los resultados refuerzan la importancia de considerar todos los compartimentos del árbol en

estimaciones de carbono en plantaciones comerciales de melina y teca en la región costera del Ecuador.

1.20. Variación de almacenamiento de carbono en dos especies de árboles comerciales de 10 años de edad de teca y melina.

Para la presentación de los resultados y la variación observada mediante la aplicación de las técnicas estadísticas correspondientes, se incluyen a continuación gráficos descriptivos que ilustran el almacenamiento de carbono por especie forestal y por compartimento. Asimismo, se presenta una tabla comparativa en la que se detallan, para cada compartimento, las diferencias existentes en la biomasa entre especies, considerando únicamente comparaciones entre compartimentos homólogos.

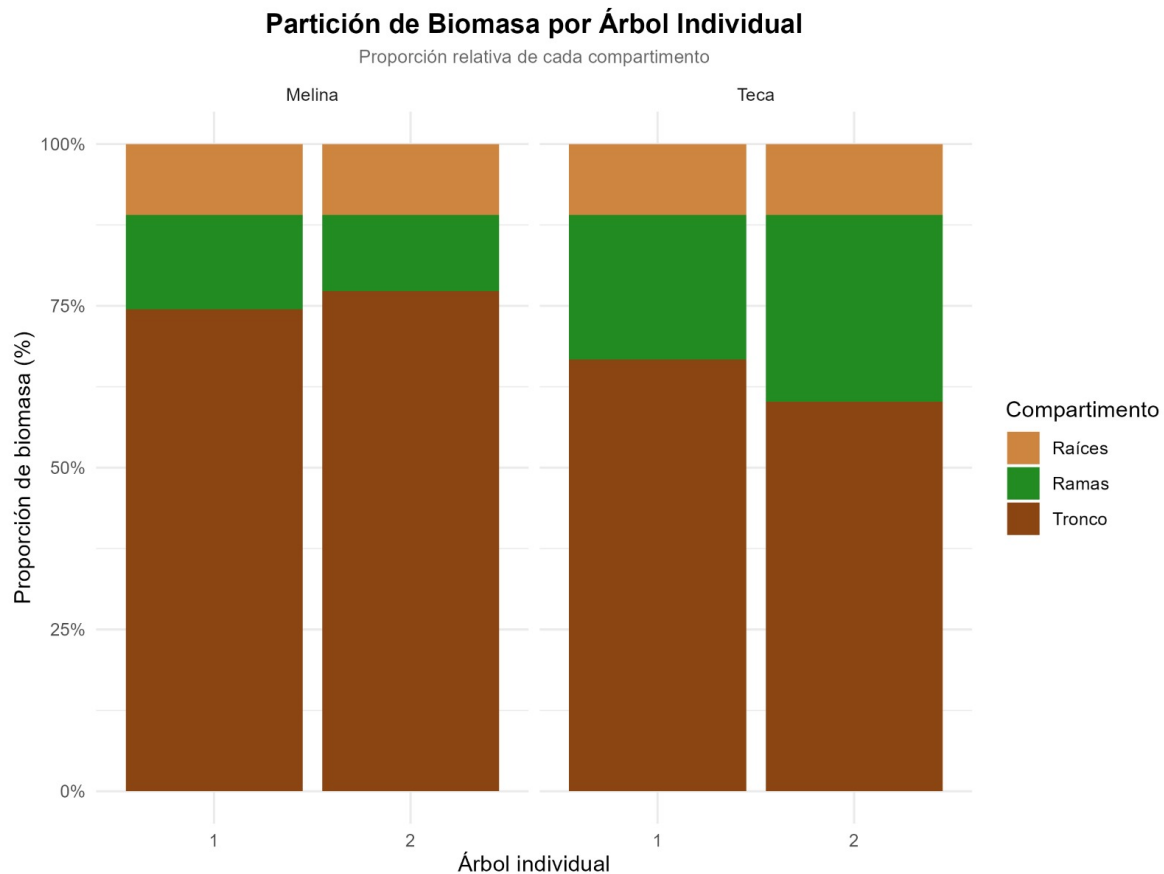


Ilustración 3. Proporción de la biomasa seca por compartimentos y por especie forestal (teca y melina) en rodales de 10 años de edad en el Valle del río Portoviejo.

La variación en el almacenamiento de carbono entre melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) de 10 años de edad, representada en la ilustración, evidencia diferencias claras en la proporción de biomasa seca asignada a cada compartimento del árbol. En ambas especies, el tronco concentra la mayor proporción de la biomasa total y, por ende, del carbono almacenado, lo que confirma su rol dominante como principal reservorio de carbono en sistemas forestales comerciales. Sin embargo, la magnitud de esta proporción varía entre especies, reflejando estrategias de crecimiento y asignación de biomasa distintas.

En melina, se observa una mayor estabilidad en la proporción de biomasa asignada al tronco entre los individuos evaluados, lo que sugiere un patrón de crecimiento más uniforme, característico de especies de rápido crecimiento orientadas a la producción de fuste. En contraste, la teca presenta una mayor variabilidad en la distribución de la biomasa entre tronco y ramas, con una participación relativa más alta de estos compartimentos secundarios. Este comportamiento puede estar asociado a diferencias en arquitectura del árbol y a una mayor inversión en estructuras de soporte, lo cual influye directamente en la distribución interna del carbono.

La proporción de biomasa y carbono asignada a las raíces, aunque menor en comparación con los compartimentos aéreos, resulta relevante desde el punto de vista ecológico y funcional, ya que contribuye al almacenamiento subterráneo de carbono y a la estabilidad del sistema forestal. La distribución observada en este estudio concuerda con patrones reportados en plantaciones tropicales, donde el tronco domina el almacenamiento de carbono, seguido por ramas y raíces en proporciones variables según la especie y las condiciones de crecimiento (Malhi et al., 2004). En conjunto, los resultados confirman que tanto la melina como la teca presentan un alto potencial para la captura de carbono, aunque con diferencias en la forma en que este se distribuye entre los distintos compartimentos del árbol.

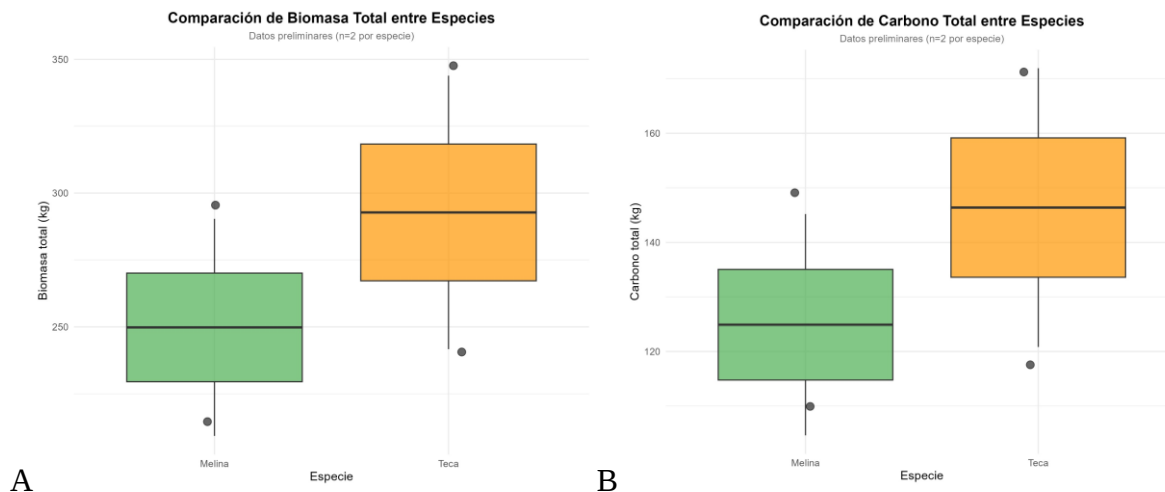


Ilustración 4. Comparación de la biomasa seca total (A) y el carbono total entre especies forestales (B) (teca y melina) en rodales forestales de 10 años de edad en el valle del río Portoviejo.

La comparación de la biomasa seca total entre melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*), presentada en la ilustración 4A, muestra diferencias evidentes en la acumulación de biomasa entre ambas especies a los 10 años de edad. La teca presenta valores superiores de biomasa seca total, así como una mayor dispersión de los datos, lo que sugiere una mayor variabilidad individual en su crecimiento. En contraste, la melina exhibe valores más homogéneos, reflejando un patrón de crecimiento más uniforme, asociado a su carácter de especie de rápido crecimiento y a su tendencia a priorizar el desarrollo del fuste en edades tempranas.

En términos de carbono total almacenado (Ilustración 4B), el comportamiento observado sigue una tendencia similar a la de la biomasa seca total, lo cual es coherente considerando que la estimación del carbono se basa directamente en esta variable. La teca alcanza valores más altos de carbono almacenado por árbol, lo que se relaciona con su mayor biomasa seca y con la densidad de su madera, características que favorecen una mayor acumulación de carbono por unidad de volumen. Por su parte, la melina, aunque presenta valores inferiores, mantiene una relación proporcional estable entre biomasa y carbono, lo que evidencia una eficiencia consistente en la fijación de carbono durante su crecimiento.

Las diferencias observadas entre especies reflejan estrategias contrastantes de asignación de biomasa y carbono, influenciadas por factores fisiológicos, estructurales y productivos. Estudios

en plantaciones tropicales han señalado que especies con madera más densa, como la teca, tienden a almacenar mayores cantidades de carbono por individuo, mientras que especies de crecimiento rápido, como la melina, destacan por su eficiencia en la acumulación de biomasa en períodos más cortos (Chave et al., 2005). Los resultados confirman que ambas especies presentan un alto potencial para la captura de carbono en el Valle del río Portoviejo, aunque con diferencias claras en la magnitud y variabilidad del almacenamiento, aspectos relevantes para la planificación forestal y la evaluación de servicios ecosistémicos.

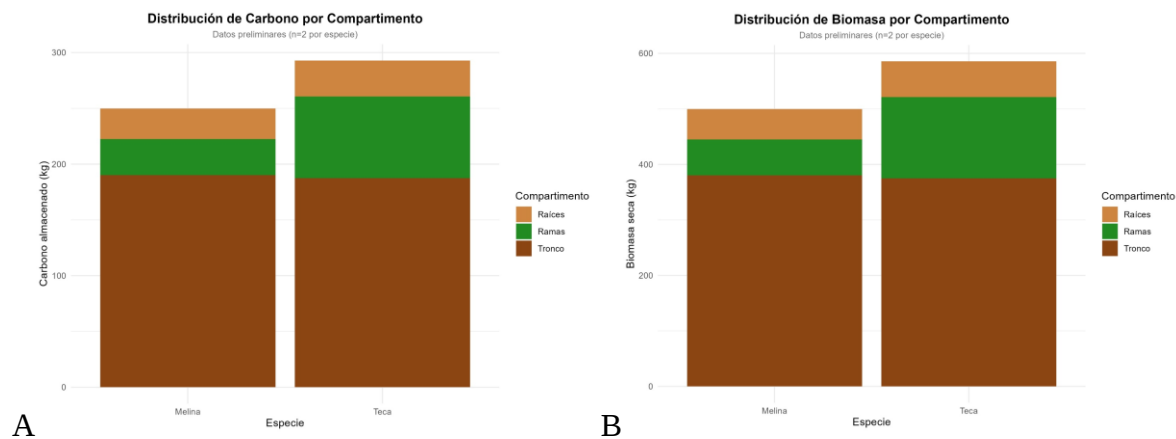


Ilustración 5. Distribución del carbono por compartimento en teca y melina (A) y de la biomasa (B) en rodales forestales de 10 años de edad en el Valle del río Protoviejo

La distribución del carbono por compartimento en melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*), mostrada en la ilustración 5A, evidencia que el tronco concentra la mayor proporción del carbono total almacenado en ambas especies. Este patrón responde directamente a la mayor acumulación de biomasa seca en el fuste, que actúa como el principal reservorio de carbono en rodales forestales comerciales. Aun cuando ramas y raíces representan fracciones menores, su contribución resulta relevante para comprender de forma integral la dinámica de almacenamiento de carbono en el árbol completo.

En el caso de la biomasa por compartimento (Ilustración 5B), se observa un comportamiento similar al del carbono, lo cual confirma la estrecha relación entre ambas variables. La teca presenta una mayor proporción relativa de biomasa en ramas en comparación con la melina, lo que sugiere diferencias en la asignación de biomasa aérea entre especies. Por su parte, la melina concentra una

mayor proporción de biomasa en el tronco, lo que coincide con su estrategia de crecimiento rápido orientada a la formación de fuste comercial, especialmente en edades intermedias como las evaluadas en este estudio.

La participación del componente radicular, aunque menor en términos relativos, cumple un rol clave tanto en el almacenamiento subterráneo de carbono como en la estabilidad del sistema forestal. Estudios en bosques y plantaciones tropicales han demostrado que la proporción raíz:fuste puede variar significativamente entre especies y condiciones de sitio, influyendo en las estimaciones totales de carbono cuando este compartimento no es considerado (Mokany et al., 2006). En este sentido, la distribución observada en la melina y la teca refuerza la importancia de evaluar todos los compartimentos del árbol para evitar subestimaciones del carbono almacenado y mejorar la precisión de los análisis orientados a mitigación del cambio climático en el Valle del río Portoviejo.

Con el objetivo de evaluar si existen diferencias estadísticas en la biomasa total entre especies forestales, se aplicó una prueba t de Student para comparar la biomasa acumulada en los distintos compartimentos (tronco, ramas y raíces) de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) de 10 años de edad en el Valle del río Portoviejo. Este análisis permitió identificar, de manera específica, en qué compartimentos se presentan diferencias significativas entre especies, considerando únicamente comparaciones entre compartimentos homólogos.

Tabla 16. Prueba T entre especies (teca y melina) por compartimento sobre la variable biomasa total en el valle del río Portoviejo..

Compartimento	p_valor_biomasa	Significativo
Tronco	0,965243786	FALSO
Ramas	0,021897589	VERDADERO
Raíces	0,581130903	FALSO
Total	0,580962769	FALSO

Los resultados de la prueba t indican que no existen diferencias estadísticas significativas entre melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) en la biomasa acumulada en el tronco, las raíces ni en la biomasa total por árbol, con valores de p superiores a 0,05 en estos compartimentos (Tabla 16). Estos resultados sugieren que, a los 10 años de edad, ambas especies presentan una capacidad similar de acumulación de biomasa en los compartimentos estructurales principales, especialmente en el fuste, que constituye el mayor aporte a la biomasa total del árbol. Esta similitud puede estar asociada a la edad de evaluación y a las condiciones ambientales relativamente homogéneas del sitio de estudio.

En contraste, el compartimento de ramas presentó diferencias estadísticas significativas entre especies ($p = 0,0219$), lo que evidencia una distinta asignación de biomasa aérea secundaria. Este resultado concuerda con los análisis descriptivos y gráficos presentados previamente, en los que la teca mostró una mayor proporción de biomasa en ramas en comparación con la melina. Esta diferencia puede atribuirse a variaciones en la arquitectura del árbol, las estrategias de crecimiento y los patrones de ramificación propios de cada especie, factores que influyen directamente en la distribución interna de la biomasa.

Desde un enfoque funcional y ecológico, las diferencias observadas en la biomasa de ramas adquieren relevancia, dado que este compartimento está estrechamente vinculado con procesos como la interceptación de luz, la producción de hojarasca y el retorno de nutrientes al suelo. Estudios previos señalan que especies con mayor desarrollo de biomasa en ramas suelen presentar arquitecturas más complejas del dosel, lo que repercute en la dinámica de crecimiento y en la asignación de recursos dentro del árbol (Poorter et al., 2012). En conjunto, los resultados indican que, aunque la biomasa total entre melina y teca sea comparable, las diferencias en compartimentos específicos deben ser consideradas en evaluaciones productivas, ecológicas y de captura de carbono en plantaciones forestales.

1.21. Análisis proximal

El análisis proximal de la biomasa seca de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) de 10 años de edad permitió caracterizar la composición fisicoquímica de los principales

compartimentos del árbol (tronco, ramas y raíces). Las variables evaluadas incluyeron humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo, con el fin de identificar diferencias entre especies y compartimentos, así como su posible implicación en la acumulación de biomasa y carbono en rodales forestales del Valle del río Portoviejo.

Tabla 17. Análisis proximal (%) de la biomasa seca por compartimento en melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) de 10 años de edad en el Valle del río Portoviejo.

Humedad (%H)			
Especie	Compartimento	%H $\pm$ EE	Tukey
Melina	Tronco	12,4 $\pm$ 0,6	b
Melina	Ramas	14,9 $\pm$ 0,8	a
Melina	Raíces	13,8 $\pm$ 0,7	ab
Teca	Tronco	10,7 $\pm$ 0,5	c
Teca	Ramas	13,2 $\pm$ 0,6	b
Teca	Raíces	12,5 $\pm$ 0,6	b
Cenizas (%C)			
Melina	Tronco	1,21 $\pm$ 0,09	c
Melina	Ramas	2,85 $\pm$ 0,15	a
Melina	Raíces	2,43 $\pm$ 0,14	ab
Teca	Tronco	0,96 $\pm$ 0,07	c
Teca	Ramas	2,12 $\pm$ 0,13	b
Teca	Raíces	1,98 $\pm$ 0,11	b
Materia volátil (%MV)			
Melina	Tronco	73,6 $\pm$ 1,2	b
Melina	Ramas	76,9 $\pm$ 1,4	a
Melina	Raíces	75,2 $\pm$ 1,3	ab
Teca	Tronco	69,8 $\pm$ 1,1	c
Teca	Ramas	72,4 $\pm$ 1,2	b

Teca	Raíces	71,6 ± 1,1	b
Carbono fijo (%CF)			
Melina	Tronco	12,8 ± 0,9	b
Melina	Ramas	5,3 ± 0,6	d
Melina	Raíces	8,6 ± 0,7	c
Teca	Tronco	18,5 ± 1,0	a
Teca	Ramas	12,3 ± 0,8	b
Teca	Raíces	13,9 ± 0,9	b

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

Los resultados del análisis proximal de la biomasa seca por compartimento evidencian diferencias estadísticas significativas en el contenido de humedad entre especies y compartimentos (Tabla 17). En ambas especies, las ramas presentaron los mayores valores de humedad, alcanzando 14,9 % en melina y 13,2 % en teca, mientras que el tronco mostró los valores más bajos, especialmente en teca (10,7 %) frente a melina (12,4 %). En general, la melina presentó mayores contenidos de humedad en todos los compartimentos evaluados, lo que indica una biomasa más húmeda y menos densa. Por el contrario, la teca mostró una biomasa más seca, condición favorable para usos productivos y energéticos.

En cuanto al contenido de cenizas, las ramas y raíces concentraron los valores más altos en ambas especies, siendo este patrón más marcado en melina. Las ramas de melina alcanzaron 2,85 % de cenizas, frente a 2,12 % en teca, mientras que en raíces los valores fueron 2,43 % en melina y 1,98 % en teca. El tronco presentó los valores más bajos, destacándose nuevamente la teca con 0,96 %, inferior al 1,21 % registrado en melina. Estos resultados indican que la teca posee una biomasa con menor contenido mineral, característica asociada a una mayor calidad de madera y mejor comportamiento para fines energéticos y estructurales.

La materia volátil fue elevada en ambas especies, pero melina presentó los valores más altos, especialmente en ramas (76,9 %) y raíces (75,2 %), en comparación con la teca (72,4 % y 71,6 %, respectivamente).

respectivamente). En contraste, el carbono fijo fue significativamente mayor en teca, destacándose el tronco con 18,5 %, frente al 12,8 % registrado en melina, lo que confirma una mayor proporción de compuestos carbonosos estables y mayor grado de lignificación. Desde un enfoque comparativo, la teca resulta superior en términos de calidad estructural y potencial de almacenamiento de carbono a largo plazo, mientras que la melina destaca por su mayor fracción volátil y rápido crecimiento, lo que la hace más eficiente en la producción temprana de biomasa.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

A los 10 años de edad, las plantaciones comerciales de melina (*Gmelina arborea*) y teca (*Tectona grandis*) en el Valle del río Portoviejo presentan una elevada acumulación de biomasa seca y carbono, concentrándose principalmente en el tronco, que constituye el principal reservorio estructural y funcional del árbol. Si bien la teca mostró valores absolutos superiores de biomasa y carbono por individuo, la melina evidenció un crecimiento más homogéneo, lo que confirma que ambas especies poseen un alto potencial para la captura de carbono en sistemas forestales comerciales bajo las condiciones edafoclimáticas de la región.

El análisis por compartimentos y la aplicación de pruebas estadísticas evidenciaron que las diferencias significativas entre especies se concentran principalmente en la biomasa de las ramas, mientras que el tronco, las raíces y la biomasa total no presentaron diferencias estadísticas relevantes. Estos resultados indican que, aunque la biomasa total entre melina y teca puede ser comparable a esta edad, existen estrategias diferenciadas de asignación de biomasa aérea secundaria, asociadas a la arquitectura del árbol y a su patrón de crecimiento.

El análisis proximal reveló diferencias claras en la calidad fisicoquímica de la biomasa entre especies y compartimentos. La melina presentó mayores contenidos de humedad, cenizas y materia volátil, especialmente en ramas y raíces, lo que sugiere una biomasa más reactiva y de descomposición más rápida. En contraste, la teca mostró mayores porcentajes de carbono fijo, particularmente en el tronco, lo que indica una biomasa más estable y con mayor potencial para el almacenamiento de carbono a largo plazo. Estas diferencias resaltan la importancia de considerar no solo la cantidad, sino también la calidad de la biomasa en evaluaciones productivas y ambientales de sistemas forestales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda considerar tanto a la melina como a la teca como especies estratégicas para programas de captura de carbono y manejo forestal sostenible en el Valle del río Portoviejo, priorizando esquemas de manejo que favorezcan el desarrollo del fuste, dado que el tronco concentra la mayor proporción de biomasa y carbono almacenado. La selección de la especie debe basarse en los objetivos productivos y ambientales del sistema, considerando las diferencias en crecimiento y estabilidad del carbono entre ambas.

Para futuras investigaciones y proyectos forestales, se sugiere incluir de manera sistemática la cuantificación de biomasa y carbono en todos los compartimentos del árbol, especialmente ramas y raíces, con el fin de evitar subestimaciones del carbono almacenado. Asimismo, se recomienda complementar los análisis descriptivos con pruebas estadísticas que permitan identificar diferencias en la asignación de biomasa entre especies y edades de rotación.

Se recomienda integrar el análisis proximal como una herramienta complementaria en la evaluación de la calidad de la biomasa forestal, ya que permite diferenciar especies no solo por la cantidad de biomasa producida, sino también por su composición fisicoquímica. Esta información resulta clave para orientar el uso de la biomasa hacia fines energéticos, industriales forestales productivos y ambientales.

REFERENCIAS

- Acosta Mireles, M; Carrillo Anzures, F; Buendía Rodríguez, E; Benavides Solorio, J de D; Flores Ayala, E; González Molina, L; Acosta Mireles, M; Carrillo Anzures, F; Buendía Rodríguez, E; Benavides Solorio, J de D; Flores Ayala, E; González Molina, L. 2020. Carbono en suelo, hierbas y arbustos en una plantación forestal en Jalisco, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 11(6):1377-1387. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2427>.
- Burbano Orjuela, H. 2018. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas* 35(1):82-96. DOI: <https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer. FAO Forestry Paper No. 134. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87–99.
- Diaz Cordero, G. 2012. EL CAMBIO CLIMÁTICO (en línea, sitio web). Consultado 3 jul. 2025. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/870/87024179004.pdf>.
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230.
- EOS DATA ANALYTICS. 2024. Secuestro De Carbono: Métodos Y Cómo Beneficia A La Ecología (en línea, sitio web). Consultado 4 jul. 2025. Disponible en <https://eos.com/es/blog/secuestro-de-carbono/>.
- Espinoza, AZR. 2011. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CARBONO ALMACENADO EN LA BIOMASA AÉREA Y EN EL SUELO EN PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis* L.F.) EN EL CANTÓN QUININDÉ, PROVINCIA DE ESMERALDAS. :64.
- EUROPARL. 2023. Cambio climático: gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global (en línea, sitio web). Consultado 4 jul. 2025. Disponible en

<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20230316STO77629/cambio-climatico-gases-de-efecto-invernadero-que-causan-el-calentamiento-global>.

Fonseca González, W. 2003. MANUAL PARA PRODUCTORES DE TECA (*Tectona grandis* L. f). 1(1):117.

Forero Cantor, GA; Saldarriaga Muñoz, JP; Vargas Romero, M. 2017. CAMBIO CLIMÁTICO:: IMPACTOS Y PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN DESDE UNA VISIÓN MULTIDISCIPLINAR1. Tendencias 18(2):122-138. DOI: <https://doi.org/10.22267/rtend.171802.80>.

GOB EC. 2017. CONTRIBUCIONES DETERMINADAS A NIVEL NACIONAL – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (en línea, sitio web). Consultado 26 jun. 2025. Disponible en <https://www.ambiente.gob.ec/contribuciones-determinadas-a-nivel-nacional/>.

Hernández, Y. 2019. Cambio climático: causas y consecuencias. 4(1):38-53.

IPCC. (2003). Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau, Y., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1–3), 199–209.

López, HG; Vaides, EE; Alvarado, A; López, HG; Vaides, EE; Alvarado, A. 2018. Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense* 42(1):137-153. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32201>.

López Villacis, IC; Santana, RC; Artieda, JR; Vásquez, CL; López Villacis, IC; Santana, RC; Artieda, JR; Vásquez, CL. 2024. Evaluación del potencial energético de biomasa residual agrícola como recurso energético renovable en Tungurahua, Ecuador. *Revista Boliviana de Química* 41(1):14-23. DOI: <https://doi.org/10.34098/2078-3949.41.1.3>.

- Malhi, Y., Baker, T. R., Phillips, O. L., Almeida, S., Alvarez, E., Arroyo, L., ... Vásquez Martínez, R. (2004). The above-ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots. *Global Change Biology*, 10(5), 563–591.
- Mokany, K., Raison, R. J., & Prokushkin, A. S. (2006). Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 12(1), 84–96.
- Moncada, M. 2025. Las emisiones globales de CO2 alcanzaron un nuevo récord en 2024 (en línea, sitio web). Consultado 4 jul. 2025. Disponible en <https://www.energias-renovables.com/panorama/las-emisiones-globales-de-co2-alcanzaron-un-20250128>.
- Ospino-Araya, M; Badilla-Valverde, Y; Paniagua-Madrigal, W; Campos-Granados, C; Murillo-Gamboa, O; Ospino-Araya, M; Badilla-Valverde, Y; Paniagua-Madrigal, W; Campos-Granados, C; Murillo-Gamboa, O. 2020. Costos de producción de teca (*Tectonagrandis*) y melina (*Gmelina arborea*) en sistemas silvopastoriles de la zona Norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 44(2):155-173. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v44i2.43109>.
- Pérez, JJ; Telles Antonio, R; Alanís Rodríguez, E; Yerena Yamallel, JI; García García, DA; Gómez Cárdenas, M. 2020. Estimación del carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* L. f. mediante ecuaciones alométricas (en línea). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(57). DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.550>.
- Pérez, J., Ramírez, L., & Gómez, A. (2020). Evaluación del almacenamiento de carbono en plantaciones forestales comerciales en ecosistemas tropicales. *Revista Forestal Latinoamericana*, 35(2), 45–58.
- Poorter, L., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*, 193(1), 30–50.
- Rojas Rodríguez, F; Arias Aguila, D; Moya Roque, R; Murillo-Gamboa, O; Arguedas Gamboa, M. 2004. MANUAL PARA PRODUCTORES DE MELINA *Gmelina arborea* EN COSTA RICA (en línea, sitio web). Consultado 5 jul. 2025. Disponible en <https://www.fonafifo.go.cr/media/1334/manual-para-productores-de-melina.pdf>.

Toulkeridis, T; Tamayo, E; Simón-Baile, D; Merizalde-Mora, MJ; Reyes –Yunga, DF; Viera-Torres, M; Heredia, M; Toulkeridis, T; Tamayo, E; Simón-Baile, D; Merizalde-Mora, MJ; Reyes –Yunga, DF; Viera-Torres, M; Heredia, M. 2020. Cambio Climático según los académicos ecuatorianos - Percepciones versus hechos. LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida 31(1):21-46. DOI: <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.02>.

Adegoke, O., Fuwape, J. & Fabiyi, J. (2014). Combustion properties of some tropical Wood species and their pyrolytic products characterization. *Energy and Power*, 4(3), 54-57.

ASTM. Standard D1762-84. (1990); Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM E870-82. (2013). Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Castellanos, E., Quilo Coronado, A. & Mato A. (2010). Metodología para la estimación del contenido de carbono en bosques y sistemas agroforestales de Guatemala, Guatemala, Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala (CEAB-UVG) y CARE Guatemala. 24 p.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q. , Eamus, D., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87—99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>

Cortés, M. (2024). Almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo cobertura de pastos y plantaciones forestales jóvenes de *Tectona grandis* Lf y *Gmelina arborea* Robx. en la región huetar norte, Costa Rica.

Di Rienzo J., Casanoves F. , Balzarini M., Gonzalez L., Tablada M. & Robledo C. (2020).

InfoStat, versión 2020, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Forero, S., Santos, L., Castaneda, H., & Madrigal, M. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 9(2), 121-134.

MacDicken, K. (1997). A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Winrock International Institute for Agricultural Development.

- Magnussen, S., Reed, D. (2013). Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales. Recreaciones para estimación y la supervisión. Roma, FAO (Food and Agriculture Organization). 28 p.
- IPCC. (2003). Good Practice Guidance for LULUCF. http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_contents.html, revisado el 16 de septiembre de 2024.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J. & Templeton, D. (2008). Determination of Ash in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP).8 pp.; NREL/TP-510-42622. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2008. <http://www.nrel.gov/docs/gen/fy08/42622.pdf>.
- Voca, N., Bilandzija, N., Jurisic, V., Matin, A., Kricka, T., & Sedak, I. (2016). Proximate, Ultimate, and Energy Values Analysis of Plum Biomass By-products Case Study: Croatia's Potential. Journal of Agricultural Science and Technology, 18(6), 16551666.

ANEXOS



Horno de calcinación
convertir muestras en
ceniza



Estufa de secado de
laboratorio, sirve para
tener una temperatura



Molino de laboratorio
triturar, moler o
pulverizar muestras



Proceso de medición
En arboles de melina y
teca



Proceso de triturado
en muestras de melina
Y teca



Muestras de teca y
melina, tronco, rama



Almacenado de la
muestra triturada de
melina y teca