

UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES

**DETERMINACIÓN DE LOS FLUJOS DE EMISIÓN Y ABSORCIÓN
DE GASES DE EFECTO INVERNADERO GENERADOS EN
PLANTACIONES DE *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Roxb EN
LA REGIÓN HUETAR NORTE DE COSTA RICA**

Tesis con formato de artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en
Ciencias Forestales con Énfasis en Manejo Forestal

Presentado por
Ana Gabriela Salazar Ruiz
David Antonio Carvajal Arroyo

Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica
2023

Determinación de los flujos de emisión de gases de efecto invernadero generados en plantaciones de *Tectona grandis* L. f y *Gmelina arborea* Roxb. en la Región Huetar Norte de Costa Rica

Trabajo de graduación bajo la modalidad de tesis con formato de artículo científico para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con Énfasis en Manejo Forestal

Miembros del tribunal examinador:

Dr. Mauricio Vega Araya
Representante del decanato de la Facultad
de Ciencias de la Tierra y el Mar

Dr. Federico Alice Guier
Representante de la Dirección de la
EDECA

Dr. Jorge Herrera Murillo
Director del trabajo

M.Sc. Rafael Murillo Cruz
Lector del trabajo

M.Sc. José Felix Rojas Marín
Lector del trabajo

Bach. Ana Gabriela Salazar Ruiz
Postulante del trabajo

Bachi. David Antonio Carvajal Arroyo
Postulante del trabajo

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestros padres Julio Antonio Carvajal Peralta, Adrián Salazar Barboza y a nuestras madres Olga Martha Arroyo Pérez, Ana Martha Ruiz Villalobos, quienes nos brindaron todo el apoyo y las herramientas necesarias para lograr llegar a este punto de nuestras vidas.

Agradecimiento

Al finalizar esta etapa de capacitación y desarrollo de habilidades en nuestras vidas, queremos agradecerle:

A nuestros familiares por estar presentes y por el apoyo incondicional que nos brindaron en todo momento, la motivación para seguir adelante y los consejos brindados para mejorar como personas.

A nuestro mentor, Rafael Murillo Cruz, quien no solamente se encargó de nuestra formación como profesionales, sino que nos brindó capacitaciones para la vida y nos enseñó el uso de la lógica para enfrentarnos a todo tipo de problemas.

A nuestro tutor, Jorge Herrera Murillo, por su orientación con la dirección del trabajo de investigación, sus acertadas sugerencias para la mejora de la tesis y por la confianza brindada en el desarrollo de este trabajo.

A nuestro lector José Felix y a Tomas Soto del Laboratorio de Análisis Ambiental de la EDECA por los conocimientos brindados en el uso del equipo LI-COR, y por su apoyo en la movilización del equipo.

A nuestros compañeros (Elena, Karol y Mónica Castillo) por compartir todos estos años de aprendizaje mutuo, por la motivación en la realización del trabajo y por su amistad.

A nuestro equipo de campo (Felipe, Paula, Mónica Cortés y Johny) por la colaboración, las risas, los momentos compartidos a lo largo de este proceso de aprendizaje y por su amistad invaluable.

A el proyecto D-TREE y a FOCAES por su apoyo técnico, logístico y financiero brindado para la realización de la investigación.

Al Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica por la información brindada para la realización de los análisis pertinentes.

A nuestros profesores de la carrera de Ingeniería en Ciencias Forestales por compartir sus experiencias y conocimientos. Mención a Gustavo Vargas, Mario Campos, William Fonseca y Marielos Alfaro por el apoyo, consejos y conocimientos brindados a lo largo de la carrera.

A la señora Violeta Evergarden por enseñarnos que nunca hay que perder la esperanza y de que los sueños se pueden cumplir al tener paciencia y fe.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimiento	I
Índice general	III
Índice de cuadros	IV
Índice de figuras	IV
Índice de apéndices	V
Resumen	1
Abstract	1
1.Introducción	2
2. Metodología	4
2.1 Descripción del sitio de muestreo	4
2.2 Muestreo	6
2.2.1 Variables dasométricas y edáficas	7
2.2.2 Variables meteorológicas	8
2.2.3 Flujo de gases de efecto invernadero	8
2.3 Procesamiento de la información	9
2.3.1 Variables dasométricas	9
2.3.2 Flujo de gases de efecto invernadero	9
2.3.3 Análisis estadístico	10
3. Resultados y discusión	11
3.1 Caracterización dasométrica y edáfica	11
3.1.1 <i>Tectona grandis</i>	11
3.1.2 <i>Gmelina arborea</i>	11
3.2 Flujo de gases de efecto invernadero	12
3.2.1 Flujos de Dióxido de carbono (CO ₂)	12
3.2.2 Flujos de vapor de agua (H ₂ O)	17
3.2.3 Flujos de metano (CH ₄)	19
3.3 Variables meteorológicas	20
3.3.1 Plantaciones de <i>Gmelina arborea</i>	20
3.3.2 Plantaciones de <i>Tectona grandis</i>	21

3.3 Modelos de predicción	22
3.3.1 Prueba de normalidad y correlaciones	22
3.3.2 Modelos de predicción del flujo de CO ₂ y vapor de H ₂ O.	23
4. Conclusiones y recomendaciones	24
5. Ética y conflicto de intereses	25
6. Referencias bibliográficas	25
7. Apéndice	33
8. Anexos	44

Índice de cuadros

Cuadro 1. Características de los sitios de muestreo según especies, edad y fecha de medición.	7
Cuadro 2. Características dasométricas de los sitios de muestreo según especie y edad.	12
Cuadro 3. Flujo de dióxido de carbono en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> y <i>Gmelina arborea</i> según edad y época del año, 2022.	14
Cuadro 5. Flujo de vapor de agua en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> y <i>Gmelina arborea</i> según edad y época del año, 2022.	18
Cuadro 6. Correlaciones de variables meteorológicas según el flujo de CO ₂ y vapor de H ₂ O en plantaciones de teca y melina en la Región Huetar Norte, Costa Rica.	22
Cuadro 7. Modelos de predicción para el flujo de CO ₂ y vapor de agua para <i>Gmelina arborea</i> y <i>Tectona grandis</i> según la edad y época del año.	23

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreo para el monitoreo de gases de efecto invernadero, Alajuela, Costa Rica, 2022.	6
Figura 2. Flujo diario de CO ₂ en plantaciones forestales de <i>Tectona grandis</i> según la época del año.	15
Figura 3. Flujo diario de CO ₂ en plantaciones forestales de <i>Gmelina arborea</i> según la época del año.	17
Figura 4. Flujo diario de vapor de H ₂ O en plantaciones forestales de <i>Tectona grandis</i> y <i>Gmelina arborea</i> .	19
Figura 5. Caracterización meteorológica de las plantaciones de <i>Gmelina arborea</i> . a) Relación entre la precipitación (mm) y la temperatura (°C) b) Relación entre la precipitación (mm) y humedad relativa (%).	20

Figura 6. Caracterización meteorológica de las plantaciones de *Tectona grandis*. a) Relación entre la precipitación (mm) y la temperatura (°C) b) Relación entre la precipitación (mm) y humedad relativa (%). 21

Índice de apéndices

Apéndice 1. Gráficos de histograma de frecuencias de datos para la determinación de normalidad en <i>Gmelina arborea</i> .	33
Apéndice 2. Gráficos de histograma de frecuencias de datos para la determinación de normalidad en <i>Tectona grandis</i> .	34
Apéndice 3. Huellas (footprint) de la torre de flujo por sitio.	34
Apéndice 4. Rosa de los vientos para cada sitio.	35
Apéndice 5. Resultados del fingerprint originales vs los obtenidos con el relleno de vacíos “gap filling” para dióxido de carbono.	36
Apéndice 6. Resultados del fingerprint originales vs los obtenidos con el relleno de vacíos “gap filling” para vapor de agua.	37
Apéndice 7. Localización de picos de medición según la distancia de la torre a las plantaciones.	38
Apéndice 8. Datos rellenados mediante el “Gap filling” para el flujo de dióxido de carbono.	39
Apéndice 9. Datos rellenados mediante el “Gap filling” para el flujo de vapor de agua.	39
Apéndice 10. Incertidumbre del “Gap filling” para el flujo de dióxido de carbono.	40
Apéndice 11. Incertidumbre del “Gap filling” para el flujo de vapor de agua.	41
Apéndice 12. Prueba de Kolmogorov-smirnov para el flujo de vapor de agua y dióxido de carbono en las plantaciones de <i>Tectona grandis</i> y <i>Gmelina arborea</i> según la edad.	41
Apéndice 13. Estadísticos del análisis de varianza (ANOVA) para las variables analizadas.	42
Apéndice 14. Prueba de Tukey con significancia de 0.95 para vapor de H ₂ O por especie.	42
Apéndice 15. Prueba de Tukey con significancia de 0.95 para CO ₂ por especie.	43
Apéndice 16. Prueba de Tukey para las variables analizadas con significancia de 0.95 para el promedio de CO ₂ por sitio.	43
Apéndice 17. Prueba de Tukey para las variables analizadas con significancia de 0.95 para el promedio de vapor de H ₂ O por sitio.	43
Apéndice 18. Prueba de Tukey para las variables analizadas con significancia de 0.95 para picos máximos de absorción de CO ₂ según el sitio.	44
Apéndice 19. Prueba de Tukey para las variables analizadas con significancia de 0.95 para picos máximos de emisión de vapor de agua según el sitio	44

Determinación de los flujos de gases de efecto invernadero en plantaciones de *Tectona grandis* L. f. y *Gmelina arborea* Roxb. en dos localidades de la Región Huetar Norte de Costa Rica

Determination of greenhouse gases fluxes in plantations of *Tectona grandis* L. f. and *Gmelina arborea* Roxb. in the northern zone of Costa Rica

Ana Gabriela Salazar Ruiz, David Antonio Carvajal Arroyo

Resumen

[Introducción]: Las plantaciones forestales juegan un papel relevante en la dinámica de absorción y emisión de gases de efecto invernadero, siendo consideradas una estrategia importante para mitigar los efectos del calentamiento global. **[Objetivo]:** Evaluar el comportamiento del intercambio neto ecosistémico de dióxido de carbono, metano y vapor de agua en plantaciones jóvenes (5 a 48.5 meses) de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* mediante la técnica de Eddy Covarianza. **[Metodología]:** La investigación fue realizada en los distritos de Pocosol y San Jorge de la Región Huetar Norte. Se establecieron 18 parcelas temporales de 500 m², donde se midió diámetro con cinta diamétrica, altura con clinómetro y vara telescópica, área foliar específica y diámetro de la copa. El muestreo del flujo de gases se realizó desde noviembre de 2021 hasta octubre de 2022. El procesamiento de los datos se ejecutó con el programa *Eddy pro versión 7.0.9* y con el software *TOVI versión 2.9.1*, mientras que el análisis estadístico para la generación de modelos se realizó en lenguaje de programación de *Python* en Google Colab. **[Resultados]:** El flujo promedio de dióxido de carbono en las plantaciones forestales de melina y teca fue de -4.45 y -0.38 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ siendo significativamente diferentes. En el caso de vapor de agua, el promedio fue de 3.36 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ para teca y 2.54 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ para melina, lo cual también es significativamente diferente. Finalmente, el flujo de metano en las plantaciones forestales fue de 0.0012 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. **[Conclusiones]:** Las plantaciones son sumideros de dióxido de carbono y la capacidad de absorción se ve influenciada por la estacionalidad, edad, calidad del suelo y la especie.

Palabras clave: Eddy Covarianza; flujo de gases de efecto invernadero; intercambio neto ecosistémico; modelos de predicción; sumidero.

Abstract

[Introduction]: Forest plantations play a relevant role in the dynamics of greenhouse gas absorption and emission, being considered an important strategy to mitigate the effects of global warming. **[Objective]:** To evaluate the behavior of net ecosystemic exchange of carbon dioxide,

methane and water vapor in young plantations (5 to 48.5 months) of *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* using the Eddy Covariance technique. **[Methodology]**: The research was conducted in the districts of Pocosol and San Jorge in the Northern Huetar Region. Eighteen temporary plots of 500 m² were established, where diameter was measured with a diameter tape, height with a clinometer and a telescopic rod, specific leaf area and crown diameter. Gas flux sampling was carried out from November 2021 to October 2022. Data processing was executed with the *Eddy pro version 7.0.9* program and with the *TOVI software version 2.9.1*; while the statistical analysis for model generation was done in the *Python* programming language at Google Colab. **[Results]**: The average carbon dioxide flux in melina and teak forest plantations was -4.45 and -0.38 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, being significantly different. In the case of water vapor, the average was 3.36 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for teak and 2.54 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for melina, which is significantly different as well. The methane flux in the forest plantations was 0.0012 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. **[Conclusions]**: Plantations are carbon dioxide sinks and the capacity is influenced by seasonality, age, soil quality and species.

Keywords: Eddy covariance; greenhouse gas flux; ecosystem net exchange; predictive models; sink.

1.Introducción

Las plantaciones forestales juegan un papel significativo en el calentamiento global al reducir la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) (Busch *et al.*, 2019; Locatelli *et al.*, 2015). La dinámica de emisión y absorción del flujo de dióxido de carbono que existe en estos ecosistemas varía según los procesos de la fotosíntesis durante el día y de la respiración celular durante la noche. En el primer caso, existe un flujo negativo de CO₂ (absorción), pues las plantas emplean el gas para generar carbohidratos; mientras que, en el segundo, el flujo es positivo (emisión), ya que las plantas y el microbiota del suelo metabolizan los carbohidratos fijados (Reddy *et al.*, 2021; Yan *et al.*, 2013).

Para comprender la contribución de la reforestación comercial en los efectos del cambio climático y la dinámica del ciclo de carbono, los principales parámetros son el intercambio neto ecosistémico (INE), la producción primaria neta (PPN) y la respiración ecosistémica (RE). El INE es el proceso de intercambio de gases entre la atmósfera y el ecosistema terrestre; mientras que la R es la emisión que se produce producto de la descomposición de materia orgánica, y la respiración nocturna y diurna de los organismos vivos que componen el ecosistema. Por su parte, la PPN es el carbono fijado que se emplea en el crecimiento de las plantas y es transformado en biomasa, incorporándose a la cadena trófica. En otras palabras, es la diferencia entre la energía química fijada por la

fotosíntesis y la pérdida por la respiración heterotrófica, autótrofa y la mortalidad (Casemiro, 2019; Yan *et al.*, 2013).

La magnitud de estos parámetros depende del ecosistema y la respuesta de las especies vegetales ante las condiciones edafoclimáticas y de estrés hídrico (Ahongshangbam, *et al.*, 2016). No obstante, la cuantificación y predicción de estos es compleja y requiere de técnicas precisas que consideren variables micro meteorológicas y su relación con los ecosistemas. Existen diferentes técnicas para la medición de las dinámicas de carbono que incluyen el uso de cámaras estáticas, mediciones biométricas para la determinación de biomasa y la técnica de Eddy Covarianza.

La técnica de flujos turbulentos, o técnica de Eddy Covarianza, permite estimar el intercambio neto de CO₂, CH₄, calor, agua y otros gases sobre la interfase de dosel-atmósfera utilizando la relación de la velocidad vertical del viento y la concentración escalar del gas (Burba, 2013). La técnica tiene la ventaja de realizar mediciones continuas, rápidas, con alta precisión, en tiempo real y considera un rango de área amplio, sin embargo, se caracteriza por ser un sistema complejo con un amplio número de datos que requiere de correcciones y transformaciones con software específicos (Aslan *et al.*, 2020; Wutzler *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2020).

Los estudios relacionados al intercambio gaseoso entre la atmósfera y las diferentes coberturas vegetales que emplean la técnica de Eddy Covariance, se extienden a nivel mundial principalmente hacia cultivos agrícolas, bosques naturales, turberas y ecosistemas áridos (Deb *et al.*, 2020; Sainju, *et al.*, 2021; Meng *et al.*, 2021; Paul, *et al.*, 2021; Wood, 2021; Tang, *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2018; Nakai, *et al.*, 2020). En plantaciones puras de *Tectona grandis* L.f (teca) y *Gmelina arborea* Roxb. (melina) existe poca información sobre mediciones de INE, PPN o RE utilizando la técnica de flujos turbulentos de GEI (Igarashi, 2013). De esta manera, las principales investigaciones con estas especies son en ecosistemas de plantaciones mixtas, áreas de restauración, bosques deciduos y semideciduos mixtos, en los cuales predominan la teca y la melina (Ahongshangbam *et al.*, 2016; Shekhar-Jha *et al.*, 2013; Nair, *et al.*, 2011; Sarma, 2019).

En Costa Rica, la teca y la melina son las especies de mayor importancia económica y de cobertura con un área plantada de 48 930 y 14 966 respectivamente para el año 2021, siendo la Región Huetar Norte donde se da la mayor reforestación a nivel nacional (Meza, 2019; INEC, 2022). Así pues, la teca abarca el 60 % de toda la reforestación comercial del país; mientras que la melina abarca el

25% (Meza, 2019). En estos ecosistemas, se ha cuantificado el carbono almacenado en plantaciones forestales mediante mediciones biométricas considerando la biomasa almacenada en el fuste, las ramas, hojas y raíces (Fonseca *et al.*, 2021a; Fonseca *et al.*, 2021b; Fonseca *et al.*, 2022). No obstante, se desconoce el comportamiento de los flujos diarios y temporales de GEI en estos ecosistemas, así como la influencia de la estacionalidad en el comportamiento del INE.

Desde un punto de vista fisiológico, las especies forestales responden ante las variaciones ambientales con estrategias como la pérdida del follaje y cambios en la conductancia estomática que definen el crecimiento y capacidad fotosintética (Shekhar-Jha *et al.*, 2013; Ngangyo *et al.*, 2017; Chan *et al.*, 2018; Sarma *et al.*, 2018). Dependiendo de las condiciones del sitio, los ecosistemas vegetales podrían comportarse como fuente de CO₂ u otros gases producto de la respiración ecosistémica y descomposición heterotrófica (Igarashi *et al.*, 2012).

La cuantificación de los flujos de GEI en plantaciones forestales es beneficioso para la determinación del potencial de secuestro de carbono y la influencia de factores biofísicos sobre la dinámica de los INE. En mérito a lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el flujo de dióxido de carbono, metano y vapor de agua en plantaciones forestales jóvenes de *T. grandis* y *G. arborea* para la identificación de diferencias entre especies según la estacionalidad y la edad.

2. Metodología

2.1 Descripción del sitio de muestreo

El estudio se realizó en plantaciones de *T. grandis* y *G. arborea* ubicadas en la Región Huetar Norte de Costa Rica, la cual cuenta con un 23 % y 40 % respectivamente del área total plantada en el país (INEC, 2015). Los sitios muestreados se encuentran en los distritos de San Jorge, específicamente en las coordenadas -84.663437 Norte y 10.689241 Oeste (finca con *G. arborea*) y en Pocosol, dentro de las coordenadas -84.497307 Norte y 10.852337 Oeste (finca con *T. grandis*) (**Figura 1**).

Respecto a San Jorge, este pertenece al cantón de los Chiles y cuenta con un área de 214.5 km². El cantón se caracteriza por presentar un clima húmedo tropical, con precipitaciones que rondan entre los 1800 hasta los 5000 mm anuales. Específicamente en la parte sur del cantón (distrito de El

Amparo y San Jorge), las precipitaciones son de 2000 a 3000 mm anuales. La temperatura promedio varía de 17 a 24 °C y la velocidad promedio del viento es de 2.6 km*h⁻¹ con dirección sur-suroeste. Los suelos son principalmente de los órdenes ultisoles e inceptisoles; mientras que las principales actividades productivas corresponden al cultivo de piña, naranja, tubérculos, frijoles, caña de azúcar, ganadería y pesca (Municipalidad de los Chiles, 2018; Chaves y Chavarría, 2017; MIDEPLAN-PNUD, 2012).

Por otro lado, Pocosol pertenece al cantón de San Carlos y cuenta con una extensión de 631.5 km². El territorio se caracteriza por un clima tropical lluvioso, con una precipitación media anual de 3000 a 4000 mm, una temperatura promedio de 25°C y viento promedio de 4 km*h⁻¹ con dirección suroeste. Los suelos son ultisoles y las principales actividades económicas corresponden al cultivo de piña, industria de caña, ganadería, reforestación, producción pecuaria y agroturismo (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2020; INDER, 2015; Municipalidad de San Carlos, 2014).

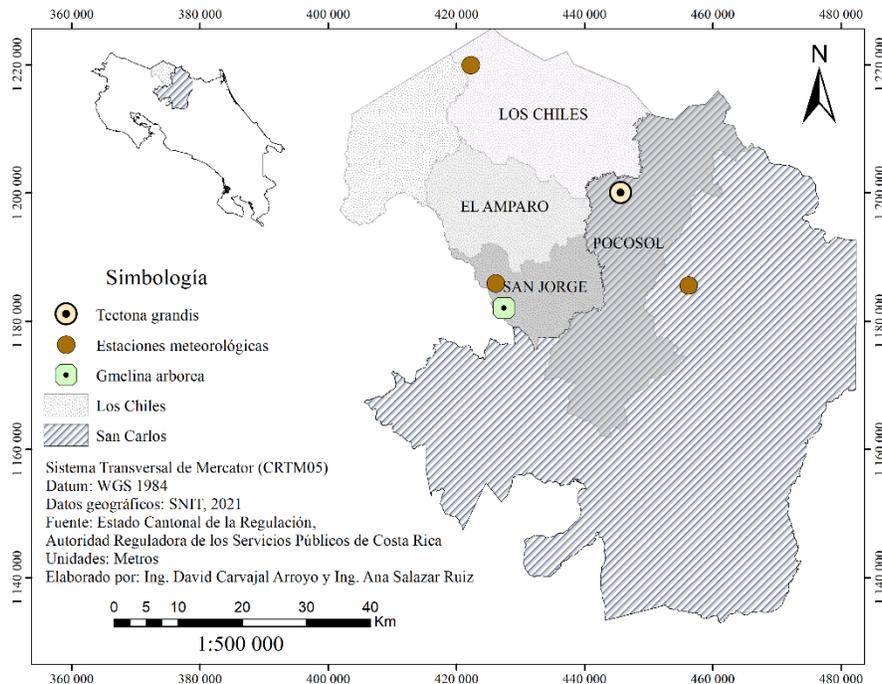


Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreo para el monitoreo de gases de efecto invernadero, Alajuela, Costa Rica, 2022.

Figure 1. Location of sampling points for the monitoring of greenhouse gases, Alajuela, Costa Rica, 2022.

2.2 Muestreo

El levantamiento de la información se realizó en dos fincas y en seis diferentes momentos, con el propósito de abarcar diferentes edades y la influencia de la estacionalidad en los flujos (**Cuadro 1**). Entre las características de selección del lugar para el establecimiento de la torre de flujos, se consideró que el terreno fuera plano y la altura de las plantaciones uniforme. En cada punto de ubicación dentro de las fincas se obtuvo información dasométrica, edáfica, meteorológica y del flujo de los gases.

Cuadro 1. Características de los sitios de muestreo según especies, edad y fecha de medición.

Table 1. Characteristics of the sampling sites according to species, age and date of measurement.

Muestreo	Especie	Edad (meses)	Fecha Inicial	Fecha final	Días medidos	Época del año
1	Teca	5.0	12/11/2021	17/12/2021	35	Lluviosa
2	Teca	44.5	20/1/2022	10/3/2022	49	Seca
3	Melina	8.5	1/4/2022	15/5/2022	44	Seca
4	Melina	12.0	16/5/2022	7/7/2022	52	Lluviosa
5	Teca	48.5	13/7/2022	8/9/2022	57	Lluviosa
6	Melina	14.5	9/9/2022	27/10/2022	48	Lluviosa

2.2.1 Variables dasométricas y edáficas

Se establecieron tres parcelas circulares de 500 m² en cada sitio de muestreo para un total de 18 parcelas. A los árboles se le midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) con cinta diamétrica y la altura total (m) con vara telescópica o clinómetro dependiendo de la edad de la plantación. En el caso del DAP, solo se midieron los individuos con una altura igual o mayor a 1.30 m sobre el nivel del suelo. Por ejemplo, a los individuos de 1.40 m la medición del DAP se realizó a 1.30 m mientras que en aquellos árboles cuya altura no superara los 1.30 m, la variable no fue medida. Igualmente, se examinó el estado fitosanitario de los árboles según la escala de valoración realizada por Salas, *et al.*, (2014) (**Anexo 1**).

En cada parcela se midió el diámetro de la copa (m) de cada árbol con cinta métrica, tomando dos medidas en direcciones opuestas (forma de cruz) y utilizando como referencia los extremos de la copa para obtener un promedio. Además, se recolectaron diez hojas al azar que fueron etiquetadas de forma consecutiva de acuerdo con la parcela para calcular el área foliar específica (AFE). El área de las hojas (cm²) se estimó utilizando fotografías y el programa Imagen J. Las hojas se colocaron en un horno a 60 °C durante un periodo de entre 48 y 72 horas y se pesaron en una balanza analítica con el propósito de estimar el peso seco (gramos). También se cuantificó el número de hojas de al menos diez árboles por parcela.

Finalmente, se realizó un muestreo de suelo a una profundidad de 15 cm, donde se recolectaron 10 submuestras en cada finca, para formar una muestra compuesta por medio del método del cuarteo en el que se selecciona dos extremos opuestos (Schweizer, 2011). Con estas muestras, se realizó un análisis químico del suelo: pH⁺, potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), acidez, fósforo (P), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), saturación de acidez, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), saturación de calcio y la relación calcio/magnesio.

2.2.2 Variables meteorológicas

Se registraron datos meteorológicos (humedad, temperatura, velocidad y dirección del viento) desde una estación que fue instalada a 500 m de las plantaciones. Para completar la información, se solicitó al Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN) datos sobre precipitación, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de viento de enero de 2020 hasta enero de 2023 de cuatro estaciones meteorológicas: Refugio Caño Negro, Saint George (San Jorge), Coopevega y Comando Los Chiles. Estos datos se utilizaron en la generación de los modelos de predicción del flujo de CO₂ y H₂O. Además, se calcularon promedios de las variables de temperatura (°C) y humedad relativa (%) y la sumatoria de la precipitación (mm) para cada uno de los meses con el propósito de realizar una descripción meteorológica de las fincas.

2.2.3 Flujo de gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero medidos fueron dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y metano (CH₄) utilizando la metodología de flujos turbulentos (Eddy Covarianza), utilizando el equipo LI-COR del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, Costa Rica.

De esta manera, el montaje del equipo consistió en una torre con un anemómetro sónico 3D modelo *Windmaster* y un analizador infrarrojo de gases de circuito cerrado para determinar la concentración de CO₂ y H₂O (LI-7200). Para el CH₄, se utilizó el analizador de gas modelo LI-7700. La altura de instalación de los equipos con respecto al suelo varió en cada uno de los sitios de acuerdo con el dosel de los árboles (**Cuadro 2**). Los datos fueron muestreados a 10 Hz y se almacenaron en un formato GHG en una tarjeta de memoria portátil (USB), creando archivos cada 30 minutos.

2.3 Procesamiento de la información

2.3.1 Variables dasométricas

Se calculó el volumen total con la **Ecuación 1** y el Incremento Medio Anual con la **Ecuación 2** para el DAP y la altura total. El área foliar se calculó con la **Ecuación 3**.

$$Vol\ total = H * AB * FF \text{ (E.1)}$$

Donde:

H: Altura total de cada árbol (m)

AB: Área basal del árbol (m²)

FF: Factor de forma de 0.55 para teca (Aguilar *et al.*, 2017) y 0.40 para melina (Garro, 2021)

$$IMA = \frac{DAP}{edad} \text{ o } \frac{Altura_{total}}{edad} \text{ (E.2)}$$

Donde:

IMA: Incremento Medio Anual (cm*añ⁻¹) en el caso del DAP y (m* añ⁻¹) en el caso de la altura total

DAP: Diámetro a la Altura del Pecho (cm)

Edad: años de los árboles

$$\text{Área específica} = \frac{\text{Área de la hoja (cm}^2\text{)}}{\text{Peso seco de la hoja (gramos)}} \text{ (E.3)}$$

2.3.2 Flujo de gases de efecto invernadero

El procesamiento de los datos se realizó con el software *Eddy pro versión 7.0.9*, mientras que el control de calidad se realizó con el software *TOVI versión 2.9.1*. Con el primer software, se transformaron los archivos GHG generados por el equipo en campo en un archivo único en formato de Excel. El control de calidad y post procesamiento realizado con *TOVI* consistió en la eliminación de los datos con una bandera de calidad de 2 (calidad baja) y la remoción de los datos de flujo mayores a $50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y los menores a $-50 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Jonhson, 2023), así como los datos de velocidad vertical del viento (u^*) menores a $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Burba, 2013). Posteriormente, se realizó la generación de la huella de alcance de medición de gases (*footprint*) con el propósito de eliminar datos cuyo origen no fueran pertenecientes a la plantación forestal.

Con el propósito de generar una base de datos completa para relacionar las variables meteorológicas con los flujos, se llenaron los vacíos de información “*Gap filling*”, considerando la velocidad de fricción del viento (u^*), el déficit de presión de vapor (DPV) y la temperatura del aire (TA). De esta forma, se consideró una tolerancia de 2.5 grados en la TA, 500 hectopascales en el DPV y mínimos de $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en la u^* .

2.3.3 Análisis estadístico

Para analizar los datos, se organizaron por fecha y hora las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, precipitación y dirección del viento) para que coincidieran con la información de flujos de CO_2 y vapor de agua obtenidos con el “*Gap filling*”. Además, se agregaron las variables dasométricas tomadas en las parcelas.

Se utilizó el lenguaje *Python* para realizar una prueba de normalidad, un análisis de correlación y la generación de modelos lineales multivariantes para la predicción del flujo de GEI. Las librerías utilizadas para este análisis fueron *Scypi.stats*, *Skylearn* y *pylab*. La prueba de normalidad realizada fue la de Kolmogórov-Smirnov (KS) para muestras con más de 50 datos, mientras que el análisis de correlación se realizó con Spearman para datos no paramétricos. En la prueba de KS se planteó una hipótesis nula basada en que los datos tenían una distribución normal y una alternativa en donde los datos no tenían una distribución normal. Los modelos fueron generados con base en las

variables que presentaron una correlación positiva superior a 0.4 y negativa inferior a -0.4, lo cual es considerado como una correlación moderada aceptable (Ortega *et al.*, 2009).

A todos los modelos se les aplicó *machine learning* con el propósito de mejorar y probar su confiabilidad. Para ello, se seleccionó de manera aleatoria un 20% de los datos probando, de esta manera, los datos originales de las variables independientes y las dependientes con respecto a los generados por el modelo. Para la comparación entre los valores medios de flujos, se generó un análisis de varianza y una prueba de medias de Tukey.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización dasométrica y edáfica

3.1.1 *Tectona grandis*

El promedio general en diámetro y altura para las plantaciones de teca fue de 7.0 cm con una desviación estándar (DE) de 4.81 cm y 6.25 m (DE=3.53 m) respectivamente. El IMA promedio general de la altura para la especie fue de 2.06 m*año⁻¹ y de 1.80 cm*año⁻¹ en diámetro. En cuanto al volumen total por árbol, se obtuvo que a los 44.5 meses este varió de 0.0030 a 0.1128 m³ y para los 48.5 meses los individuos registraron valores que van desde 0.0035 a 0.1387 m³.

En términos edáficos, el sitio presenta una Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) de 4.9 cmol*L⁻¹, un pH de 5.2 y una saturación de acidez del 6%. Estas tres características indican una calidad baja para el crecimiento de teca. Según Alvarado y Fallas (2004), el IMA en altura de *T. grandis* es afectado negativamente por saturaciones de acidez mayores al 3%, limitando el crecimiento y la capacidad de absorción de nutrientes. Además, sitios con valores de CICE menores a 8 cmol*L⁻¹, y con valores menores de 5.3 de pH, comprometen el óptimo desarrollo de la especie.

3.1.2 *Gmelina arborea*

Los árboles de melina registraron un DAP y altura total promedio general de 5.75 cm (DE= 2.04 cm) y 4.14 m (DE= 2.63 m). El IMA promedio general de la altura para la especie fue de 4.13 m*año⁻¹ y de 5.81 cm*año⁻¹ en diámetro.

Las características del suelo en las plantaciones de melina fueron ligeramente superiores en comparación con la teca. La CICE del sitio fue de $5.1 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$, el pH fue de 5.6 y la saturación de acidez fue del 2 %. En términos de requerimientos nutricionales, la melina es menos exigente que la teca ya que puede tolerar suelos con hasta 25 % de saturación de acidez y pH ácidos de hasta 4.8.

Cuadro 2. Características dasométricas de los sitios de muestreo según especie y edad.

Table 2. Dasometric characteristics of the sampling sites according to species and age.

Especie	Edad (meses)	Árb*ha ⁻¹	Ht (m)	DE (m)	IMA Ht (m*año ⁻¹)	DAP (cm)	DE (cm)	IMA (DAP) (cm*año ⁻¹)	Vt*ha ⁻¹ (m ³)
Teca	5.0	820	0.65	0.28	1.56	-	-	-	-
	44.5	847	8.76	1.35	2.37	10.18	1.99	2.74	35.48
	48.5	853	9.13	1.42	2.25	10.45	2.04	2.58	39.42
Melina	8.5	800	2.43	0.50	3.37	3.92	0.82	5.37	0.96
	12.0	840	4.14	0.58	4.17	5.37	1.13	5.41	3.44
	14.5	820	5.81	0.63	4.82	8.01	1.41	6.64	10.25

D.E: desviación estándar; **Vt:** volumen total, **IMA:** incremento medio anual, **Árb;** árboles, **Ht:** altura total, **DAP:** diámetro a 1.30 m.

Los individuos de teca y melina presentaron en su mayoría un estado fitosanitario sano. Solo 1.3% de todos los árboles presentaron problemas de marchitez y daños en el follaje, principalmente en la teca de cinco meses debido al ataque de insectos. La mortalidad fue de solo 4.7% en todas las plantaciones.

3.2 Flujo de gases de efecto invernadero

3.2.1 Flujos de Dióxido de carbono (CO₂)

El flujo promedio de CO₂ en las plantaciones forestales presenta diferencias estadísticamente significativas entre las especies evaluadas. En *G. arborea*, el flujo promedio fue de $-4.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; mientras que en teca fue de $-0.38 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Este flujo negativo indica que existe en promedio una mayor absorción que emisión en estos ecosistemas, lo cual define a estas

plantaciones como sumideros de carbono. No obstante, se obtuvo que variables como la edad de la plantación, la tasa de crecimiento, el área foliar específica, la época del año y/o la combinación de algunas de estas determinan el comportamiento de los flujos. En este sentido, se obtuvieron resultados de INE de CO₂ positivos, así como una menor tasa de absorción de CO₂.

Tanto en plantaciones de teca como de melina el flujo de CO₂ fue afectado por la estacionalidad. Durante la época lluviosa se registró una mayor magnitud de absorción para ambas especies debido a la mayor disponibilidad de agua (**Cuadro 3**). Lo anterior se debe a que durante la época seca los árboles suelen cerrar sus estomas para evitar y reducir la pérdida de agua; sin embargo, al realizar el cierre estomático también se limita la entrada de CO₂. Casimiro (2019) menciona que la disponibilidad de agua en la estación lluviosa promueve la fotosíntesis y consumo de CO₂; así pues, si la reserva de agua o las precipitaciones disminuye, se limita el metabolismo de las plantas, siendo un factor limitante del proceso de fotosíntesis y del INE al suprimir el ingreso de CO₂. En la zona norte de Costa Rica, el 90% de las precipitaciones (2600 mm) se da en la época lluviosa (mayo-diciembre); mientras que para la época seca (enero-abril) la lluvia es un factor limitante en la zona (340 mm). Esta condición climática influye en la capacidad de absorción y en el crecimiento de las plantaciones forestales, lo cual se observa en los cambios del flujo de CO₂ (Shekhar-Jha *et al.*, 2013).

Durante el periodo seco también se ha demostrado que los árboles suelen disminuir la cantidad de clorofila producida en sus hojas, disminuyendo su capacidad fotosintética. Por ejemplo, Valverde *et al.* (2021) encontraron que en situaciones de estrés hídrico los individuos de melina reducen la tasa fotosintética en un 60 %. Igualmente, Sachan *et al.* (2019) obtuvieron que la cantidad de clorofila en plántulas de melina y teca disminuye conforme aumenta la severidad de la sequía, siendo una estrategia adaptativa para generar un menor daño a la maquinaria fotosintética. Estos autores también mencionan que la concentración de clorofila es mayor en los individuos de *G. arborea* que en *T. grandis*, característica fisiológica que permite que la melina presente mayores tasas de absorción.

Cuadro 3. Flujo de dióxido de carbono en plantaciones de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* según edad y época del año, 2022.

Table 3. Carbon dioxide flux in *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* plantations according to age and time of year, 2022.

Flujo de CO ₂ (μmol*m ⁻² *s ⁻¹)								
Especie	Época	Edad (meses)	Promedio	Absorción máxima	Emisión máxima	Copa (m)	AFE (cm ² /g)	Hojas*arb
	Lluviosa	12.0	-5.00 A	-21.33 A	13.70	3.4	186.00	502
Melina	Seca	8.5	-2.80 B	-11.63 E	15.80	1.6	160.30	253
	Lluviosa	14.5	-5.91 A	-18.87 B	17.60	3.5	186.00	717
	Lluviosa	5.0	0.74 C	-6.93 F	9.60	1.2	76.52	12
Teca	Seca	44.5	-0.74 B	-16.13 C	16.60	3.6	101.75	338
	Lluviosa	48.5	-1.68 B	-14.74 C	14.80	3.5	101.75	579
Promedio		21.8	-2.56	-14.94	14.68	2.80	135.39	400

Prueba de medias con una significancia de 0.05. Las letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre los valores. Letras diferentes señalan que si hay diferencias significativas.

Esta influencia de la estacionalidad y la cobertura del dosel en el comportamiento del flujo de CO₂ también fue reportada en plantaciones de 37 años de teca, con valores máximos de absorción durante la época de lluvias de -46.4 μmol*m⁻²*s⁻¹ y de -5.6 μmol*m⁻²*s⁻¹ en la época seca (Igarashi et al., 2013). En la India, Reddy, *et al.* (2021) registraron que la teca en bosques mixtos se comporta como una fuente de CO₂ de marzo a junio (periodo seco), con un pico máximo de absorción de -1.2 μmol*m⁻²*s⁻¹ que pasa a -37.2 μmol*m⁻²*s⁻¹ durante la época lluviosa, donde el ecosistema se comporta como un sumidero. Shekhar-Jha. *et al.* (2013) encontraron que durante el invierno los bosques mixtos de teca presentan una mayor absorción de CO₂ (-25 μmol*m⁻²*s⁻¹), que disminuye a -2 μmol*m⁻²*s⁻¹ durante el verano (enero a mayo).

Las diferencias en el flujo de CO₂ indican que, a mayor edad de la plantación, mayor capacidad de absorción poseen los árboles. En este sentido, la teca de menor edad registró flujos promedios positivos, a pesar de estar en época lluviosa, con picos de absorción máximos de -6.93 μmol*m⁻²*s⁻¹; por otro lado, la misma especie con 48.5 meses presentó flujos negativos de hasta -14.74 μmol*m⁻²*s⁻¹ (**Figura 2**). El mismo comportamiento sucede en melina, la cual, a pesar de estar en época lluviosa, los árboles con 14.5 meses absorben en promedio un 18 % (-0.91 μmol*m⁻²*s⁻¹)

más CO₂ que los árboles de 12 meses (**Figura 3**), aunque sin una diferencia estadísticamente significativa.

Estas diferencias se deben a que los ecosistemas jóvenes tienden a responder diferente a la variabilidad climática y estacional en comparación con los ecosistemas maduros bien establecidos (Chan *et al.*, 2018). Además, características edafológicas, manejo del sitio y el historial de perturbaciones generan que la edad de transición de fuente a sumidero de CO₂ varíe entre plantaciones. Entre las actividades de preparación del terreno para las plantaciones de cinco meses se encuentran la rastro y los camellones, las cuales perturban los suelos y promueven la liberación de carbono.

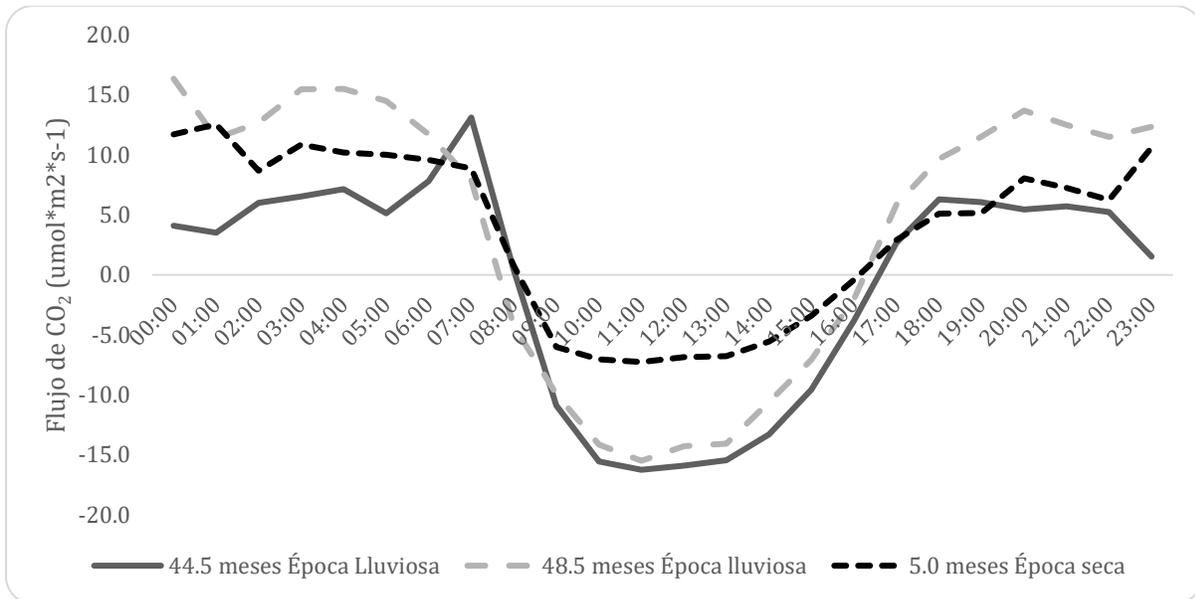


Figura 2. Flujo diario de CO₂ en plantaciones forestales de *Tectona grandis* según la época del año.

Figure 2. Daily flux of CO₂ in *Tectona grandis* forest plantations according to the time of the year.

La comparación de flujo entre especies muestra que la melina tiene una mayor capacidad de absorción de CO₂ con respecto a la teca, lo cual está directamente relacionado con el IMA, el AFE, la cantidad de hojas y las características fisiológicas de cada especie. En términos de IMA, en altura y DAP, la melina presentó valores de 4.13 m*año⁻¹ y 5.8 cm*año⁻¹ respectivamente; mientras que en teca estas mismas variables registraron 2.06 m*año⁻¹ y 2.7 cm*año⁻¹.

Según Warriier *et al.* (2014) desde el punto de vista fisiológico, la melina posee hasta un 20% más de actividad de anhidrasa carbónica (metaloenzima que cataliza la conversión reversible del CO₂) en comparación con la teca. Además, autores como Sachan *et al.* (2019) registraron que la conductancia estomática de melina (45 mmol*m⁻²* s⁻¹) es casi tres veces mayor a la de teca (12 mmol*m⁻²* s⁻¹). Esto implica que, al comparar la composición bioquímica de las hojas de ambas especies, la melina presenta una mayor cantidad de clorofila total (Sachan *et al.*, 2019), así como una mayor conductancia estomática (Warriier *et al.*, 2014). Otros estudios relacionados a la composición proteica en hojas de melina han demostrado que la concentración de proteínas fotosintéticas, tales como la rubisco activasa, la anhidrasa carbónica, la gliceraldehído-3-fosfato deshidrogenasa, la triosafosfato isomerasa y la ferredoxina NADP reductasa, equivalen al 37% del total de proteínas en la especie; en otras especies de lento crecimiento, la concentración de estas proteínas es menor (Rasineni *et al.*, 2010).

Otro factor que influyó fue el área foliar específica, la cual resultó ser superior en la melina mientras que la anchura de copa no presentó grandes diferencias en los sitios con mayor edad (**Cuadro 3**). El mayor valor de AFE en la melina evidencia una mayor capacidad para interceptar radiación y explica parcialmente su mayor productividad y capacidad de almacenar carbono (Olivas *et al.*, 2013; Nafarrate, 2017).

El flujo diario muestra que las plantaciones inician el proceso de absorción de CO₂ desde las 8:00 a.m., registrando el mayor pico entre las 11:00 a.m. y 12:00 m.d. A partir de las 16:00 p.m., el comportamiento de flujo tiende a ser positivo con valores promedio de emisión de 6.15 μmol*m⁻²*s⁻¹. Este comportamiento coincide con lo reportado para plantaciones (Igarashi *et al.* 2012) y bosque caducifolios secos mixtos de teca (Shekhar-Jha *et al.*, 2013; Reddy *et al.*, 2021). Estos autores reportan los mayores picos de absorción entre las 11:00 a.m. y 12:00 m.d. horas en los meses de junio a diciembre y de 13:00 p.m. a 14:00 p.m. horas de enero a mayo. Estas variaciones están ligadas a la fenología de las especies, ya que de diciembre a abril la teca (especie dominante) pierde totalmente sus hojas, contrario a la vegetación codominante que mantiene su follaje durante este periodo; siendo estas especies la que contribuyen más durante el secuestro de CO₂ y al cambio de picos durante los meses de enero a mayo.

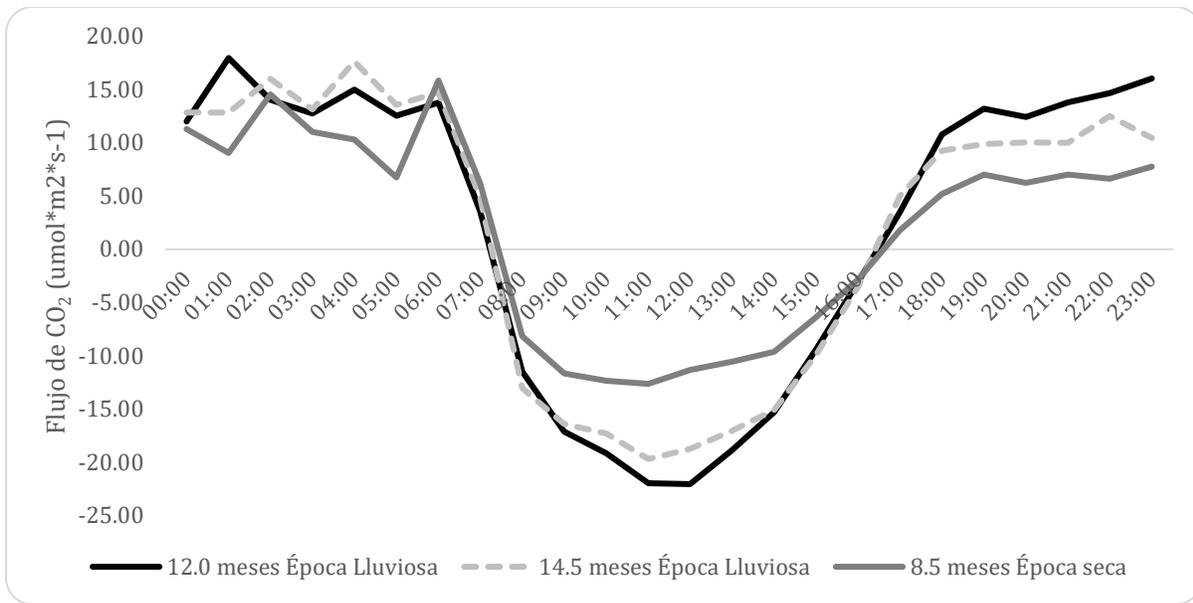


Figura 3. Flujo diario de CO₂ en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* según la época del año.

Figure 3. Daily flux of CO₂ in *Gmelina arborea* forest plantations according to the time of the year.

3.2.2 Flujos de vapor de agua (H₂O)

En los sitios con teca se obtuvo una media general de $3.36 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($DE=4.07 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); mientras que en melina fue de $2.54 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($DE=2.87 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), estas diferencias son estadísticamente significativas. Los mayores picos para la melina se dieron durante la época lluviosa a los 14 meses, los cuales disminuyeron durante la estación seca (**Cuadro 5**). Este comportamiento fue similar al reportado en bosques mixtos con teca cuyos valores máximos se dieron durante el periodo de invierno (20 a $15 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) y decrecieron durante el verano ($5 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (Shekhar-Jha *et al.* 2013).

En el caso de las plantaciones de teca sucedió lo contrario, ya que registraron los mayores valores durante la estación seca, a los 44.5 meses, con un pico de $9.42 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ que se redujo a $3.49 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ durante la época lluviosa (**Cuadro 5**). Las diferencias en el comportamiento del flujo entre las especies pueden estar ligadas a aspectos meteorológicos que se dieron durante los periodos de medición.

Durante la época seca (abril a mayo) se registraron los mayores picos de temperatura (29 °C) y las menores precipitaciones (101 mm), contrario a los meses de septiembre a octubre que presentaron el doble de agua (201 mm) y temperaturas máximas de 27 °C (**Figura 5**). En este caso la mayor disponibilidad de agua durante estos meses pudo contribuir a las mayores emisiones de vapor de H₂O en la melina de 14.5 meses, debido a que la menor cantidad de agua, principalmente cuando las temperaturas son tan altas (melina 8.5 meses) puede aumentar la severidad y mortalidad de la época seca (Manrique, 2017).

Para el periodo seco de la teca (enero a marzo) se obtuvo que estos meses presentaron los picos de temperatura más bajos (25°C) (**Figura 6**) con una diferencia de 2 °C con respecto a la época lluviosa (julio a septiembre) y de 4 °C a la temperatura del periodo seco en el que se midió la melina. Esto podría ser un indicativo que durante el periodo en el que se midió la teca de 44.5 meses no se dio la temperatura idónea que funcionara como señal para iniciar el cierre de los estomas. Yepes y Buckeridge (2011) mencionan que, si los árboles son sometidos por lo menos a 5 °C arriba de su temperatura óptima de crecimiento, servirá como señal de estrés por calor incrementando la síntesis de nuevas proteínas que disminuyen la transpiración y generan el cierre estomático.

A lo anterior se le debe agregar que en la zona norte de Costa Rica es común que se den precipitaciones en la época seca debido a la influencia de los vientos provenientes de la región caribe. A pesar de que las lluvias registradas durante enero a marzo (80 mm) son menores que las obtenidas en el periodo lluvioso (455 mm) pudieron contribuir a mantener la humedad suficiente en el suelo para contrarrestar los impactos de la época seca (Hidalgo, 2020). En este caso al no tener la teca 44.5 meses restricciones en el suministro de agua y las bajas temperaturas pudieron generar los mayores flujos de vapor de agua.

La mayor pérdida de vapor de agua por parte de la teca de 44.5 meses durante la época seca también podría estar relacionado a que la especie no es totalmente capaz de evitar la pérdida de agua durante la época seca, razón por la que durante este periodo se dé la caída total del follaje, lo cual no sucede totalmente en la Región Huetar Norte. Además, el control de la pérdida de agua (apertura o cierre de estomas) dependerá de la estrategia primordial de la especie: seguridad hidráulica o el intercambio gaseoso (Manrique, 2017).

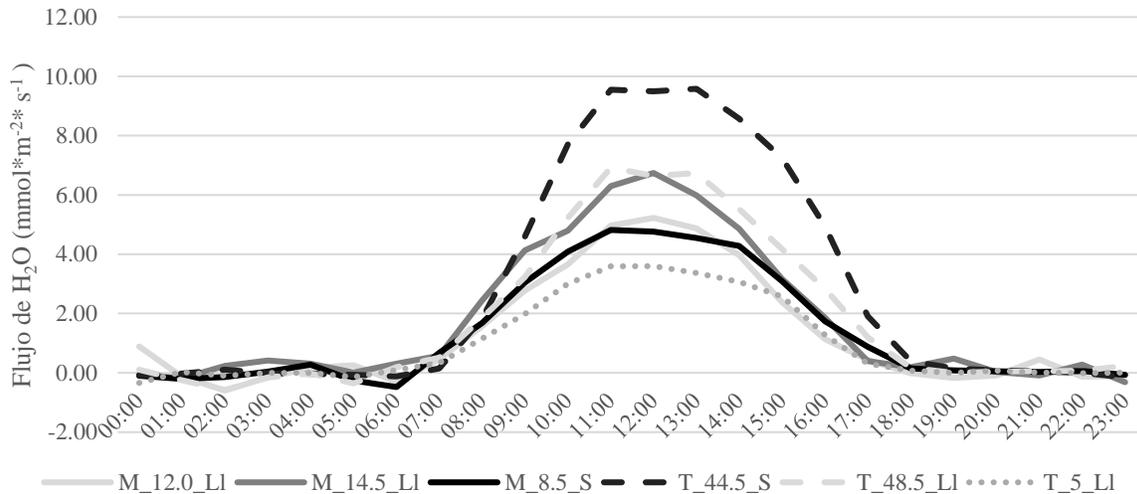
Cuadro 5. Flujo de vapor de agua en plantaciones de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* según edad y época del año, 2022.

Table 5. Water vapor flux in *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* plantations according to age and time of year, 2022.

Información del sitio			Flujo de vapor de agua ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
Especie	Época	Edad (meses)	Datos válidos	Promedio	Máximo pico
	Seca	8.5	1054	2.37 B	4.78 B
Melina	Lluviosa	12	1329	2.19 B	5.06 B
	Lluviosa	14.5	1148	3.10 C	6.45 C
	Lluviosa	5	831	1.62 A	3.49 A
Teca	Seca	44.5	1337	4.64 D	9.42 D
	Lluviosa	48.5	1401	3.19 C	6.87 C
Promedio			1183	2.85	6.01

Prueba de medias con una significancia de 0.05. Las letras iguales indican que no hay diferencias significativas entre los valores. Letras diferentes señalan que si hay diferencias significativas.

El comportamiento diario del flujo muestra que, en todos los sitios, la emisión inicia a las 7:00 a.m. horas y termina a las 18:00 p.m. horas, con los picos más altos entre las 10:00 a.m. y las 14:00 p.m. horas (**Figura 4**). Esto coincide con lo reportado por Shekhar-Jha, *et al.* (2013) quienes registraron el mayor pico entre las 11:00 a.m. y las 15:00 p.m. horas debido a la mayor transpiración del dosel, el cual corresponde al aumento de la radiación y temperatura ambiental.



M=melina, T=teca, Ll=época lluviosa, S=época seca

Figura 4. Flujo diario de vapor de H₂O en plantaciones forestales de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*.

Figure 4. Daily flow of H₂O vapor in forest plantations of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea*.

3.2.3 Flujos de metano (CH₄)

El flujo promedio de metano registrado fue de $0.0012 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ el cual se considera bajo en comparación con sitios saturados con agua que son fuentes importantes del gas como plantaciones de arroz, humedales y turberas (Warner *et al.*, 2017). Esto se debe a que el manejo silvicultural en plantaciones forestales no genera condiciones anaeróbicas ni de inundación por lo que no se da la metanogénesis ni la liberación del metano a la atmósfera (Ontiveros *et al.*, 2018; Díaz, 2018); por lo tanto, estas plantaciones de teca y melina no son fuente de este gas.

El comportamiento diario de los flujos muestra que la emisión se da principalmente desde las 7:00 a.m. horas hasta las 10:00 a.m. horas, dándose el mayor pico a las 9:00 a.m. ($0.006 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). Este pico de emisión es insignificante al compararlo con arrozales inundados ($0.46 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), turberas ($0.05 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) y humedales ($0.38 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (Maboni, 2016; Tang, *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2011). Tang *et al.*, (2018) reportaron en bosques tropicales de turba en Malasia que los mayores flujos de metano se dan más durante el día (entre 7:00 a.m. a 18:00 p.m. horas) con respecto a la noche dándose el menor pico a las 11:30 p.m. Del mismo modo, Xhuan *et al.* (2018) registran que las emisiones se dan principalmente durante la mañana (entre 7:00 a.m. a

10:30 a.m. horas), con el mayor pico de emisión de 8:00 a.m. a 9:00 a.m. horas, comportamiento similar al observado en los sitios con teca en el presente estudio.

3.3 Variables meteorológicas

3.3.1 Plantaciones de *Gmelina arborea*

La precipitación promedio durante los meses en los que se realizó la medición del flujo de GEI en las plantaciones de *G. arborea* fue de 277 mm mensuales, siendo el mes de junio y septiembre los meses más lluviosos. La relación entre la precipitación y la humedad relativa muestra un aumento durante los meses del periodo lluvioso y una reducción de ambas variables durante el periodo seco. También se registraron estas diferencias en temperatura promedio siendo el mes de mayo el que registró mayor pico de temperatura (**Figura 5**).

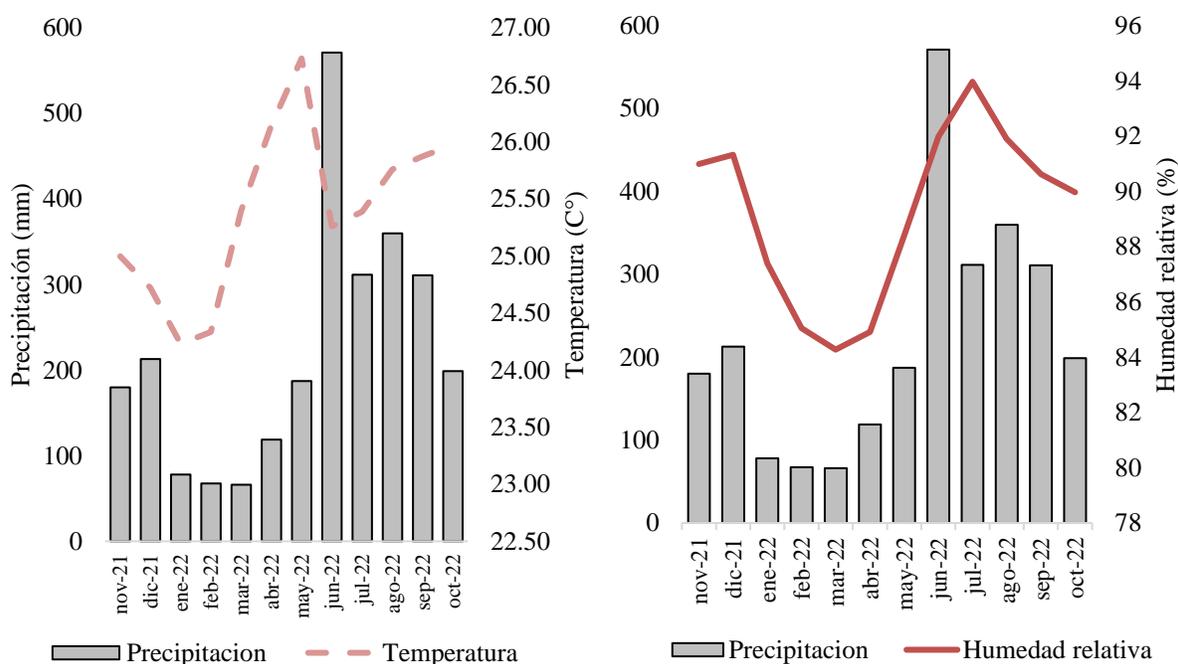


Figura 5. Caracterización meteorológica de las plantaciones de *Gmelina arborea*. a) Relación entre la precipitación (mm) y la temperatura (°C) b) Relación entre la precipitación (mm) y humedad relativa (%).

Figure 5. Meteorological characterization of *Gmelina arborea* plantations. a) Relationship between precipitation (mm) and temperature (°C) b) Relationship between precipitation (mm) and relative humidity (%).

3.3.2 Plantaciones de *Tectona grandis*

La temperatura promedio para los meses en los que estuvo la torre de medición en las plantaciones de teca fue de 23.9 °C. El mes de septiembre fue el que presentó el mayor pico de temperatura (24.6°C). Al igual que en la melina, la relación entre la precipitación y la humedad relativa aumenta durante los meses de la época lluviosa y disminuye durante el período seco. La precipitación para las plantaciones de teca, durante los meses de medición, varió de 66 a 497.8 mm, con un promedio de 281.7 mm mensuales. Las mayores precipitaciones se dieron durante el mes de julio (**Figura 6**) y la humedad relativa promedio fue de 89.5 %.

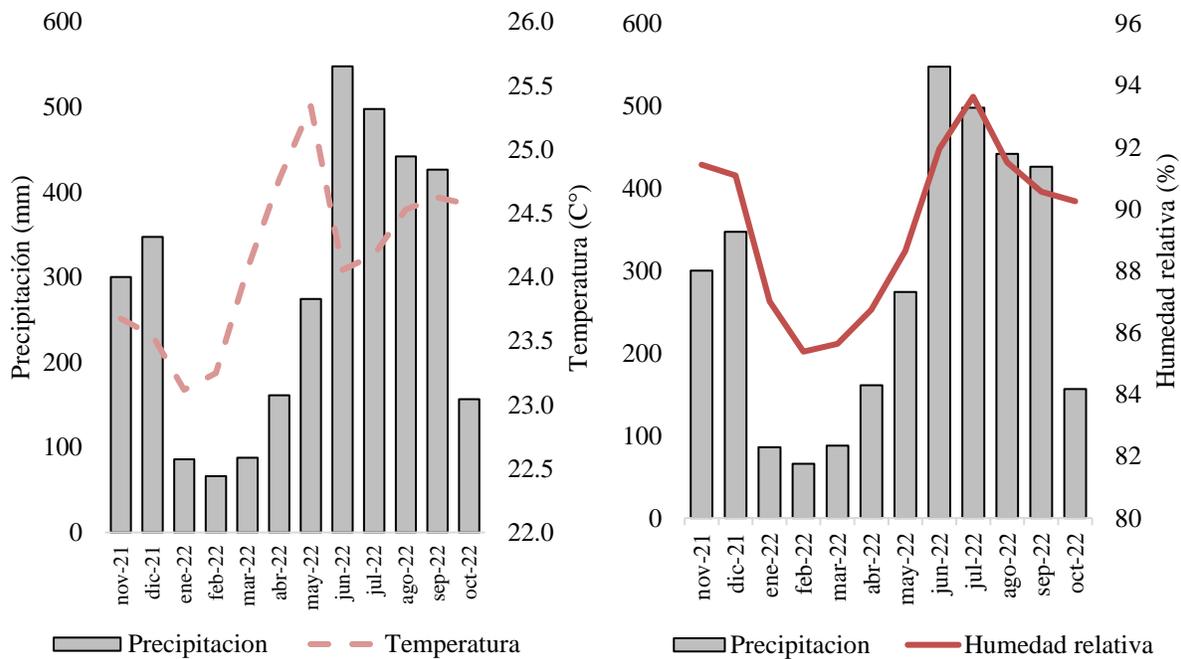


Figura 6. Caracterización meteorológica de las plantaciones de *Tectona grandis*. a) Relación entre la precipitación (mm) y la temperatura (°C) b) Relación entre la precipitación (mm) y humedad relativa (%).

Figure 6. Meteorological characterization of *Tectona grandis* plantations. a) Relationship between precipitation (mm) and temperature (°C) b) Relationship between precipitation (mm) and relative humidity (%).

3.3 Modelos de predicción

3.3.1 Prueba de normalidad y correlaciones

Los datos de flujos de CO₂ y H₂O no mostraron una distribución normal en ninguno de los sitios evaluados según la prueba de KS, es decir, en todos los casos el valor de p fue menor a 0.05, y se rechaza la hipótesis nula (**Apéndice 12**). Las variables con mayor correlación con los flujos de GEI fueron la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento. Estas variables, a excepción de la velocidad del viento, presentaron una correlación alta con el flujo de vapor de H₂O en la mayoría de los sitios. Para el flujo de CO₂, la única variable que presentó este nivel de correlación fue la temperatura (-0.58), presentando la mayor correlación en el sitio de teca de 44.5 meses de edad en época lluviosa. La precipitación registró correlaciones muy bajas en la mayoría de los sitios mientras que el resto de correlaciones fueron moderadas (**Cuadro 6**).

Cuadro 6. Correlaciones de variables meteorológicas según el flujo de CO₂ y vapor de H₂O en plantaciones de teca y melina en la Región Huetar Norte, Costa Rica.

Table 6. Correlations of meteorological variables according to the flux of CO₂ and H₂O vapor in teak and melina plantations in the Huetar Norte Region, Costa Rica.

Sitio	<i>Gmelina arborea</i>						<i>Tectona grandis</i>			
	8.5 meses		12 meses		14 meses		5 meses		44.5 meses	
	CO ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂ O	CO ₂	H ₂ O
n	585		1605		1145		264		272	
Precipitación	-0.09	-0.2	0.15	-0.25	0.15	-0.21	-	-	-	-
Temperatura	-0.53	0.7	-0.58	0.73	-0.61	0.73	-0.49	0.67	-0.73	0.91
Humedad relativa	0.46	-0.66	0.57	-0.74	0.59	-0.74	0.48	-0.61	0.6	-0.82

Velocidad-Viento -0.33 0.41 -0.23 0.30 -0.29 0.35 -0.41 0.48 -0.57 0.72

3.3.2 Modelos de predicción del flujo de CO₂ y vapor de H₂O.

Los modelos lineales generados explican la variabilidad de los datos entre un 26 y 65%, siendo los modelos predictivos de vapor de H₂O los que presentaron mayores valores en el coeficiente de determinación (R²). El modelo con mayor ajuste fue el obtenido para el sitio de teca de 44.5 meses al predecir el H₂O (R²=0.65); mientras que el de menor ajuste fue el obtenido en teca de 5 meses al predecir el flujo de CO₂. En promedio, el Error Medio Absoluto (EMA) para el CO₂ en los modelos de melina fue de 7 μmol*m²* s⁻¹ y en teca fue de 4.85 μmol*m²* s⁻¹ (**Cuadro 7**). Por su parte, el Error Medio Cuadrático (EMC) promedio obtenido fue de 75.8 para melina y 36.25 para teca.

Cuadro 7. Modelos de predicción para el flujo de CO₂ y vapor de agua para *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* según la edad y época del año.

Table 7. Prediction models for the flux of CO₂ and water vapor for *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* according to age and time of the year.

Especie	Edad	Época	Modelo diurno	R ²	EMA	EMC
Flujos de vapor de CO₂ (μmol*m⁻²* s⁻¹)						
<i>Gmelina arborea</i>	8	Seca	110,0029974-2,935253*Temp-0,390742*HR	0,33	6,1	58,1
	12	Lluviosa	123,43-3,62285*Temp-0,367502*HR	0,33	8,3	102,5
	14	Lluviosa	97,17767133-2,89155*Temp-0,271496*HR	0,39	6,6	66,9
<i>Tectona grandis</i>	5	Lluviosa	30,57071458-0,891606*Temp-0,059755*HR-0,464349*VV	0,26	4	25,3
	44	Seca	61,88483728-2,330216*Temp-0,028243*HR-1,105906*VV	0,53	5,7	47,2
Flujos de vapor de H₂O (mmol*m⁻²* s⁻¹)						
<i>Gmelina arborea</i>	8	Seca	-13.199232411+0.4750150*Temp+0.0265950*HR	0.49	1.1	1.8
	12	Lluviosa	5.723656634+0.1582810*Temp-0.0907080*HR	0.53	1.3	2.7
	14	Lluviosa	11.757039227+0.847420*Temp-0.1314990*HR	0.54	1.3	3.0
<i>Tectona grandis</i>	5	Lluviosa	-11.099935452+0.3798440*Temp+0.0252520*HR+0.0916290*VV	0.31	1.3	3.0
	44	Seca	25.266921255+1.0388950*Temp+0.01430*HR+0.866130*VV	0.65	2.0	5.6

Temp=temperatura en °C, HR= humedad relativa en %, VV= velocidad del viento en m*s⁻¹.

Los coeficientes de determinación obtenidos en melina coinciden con lo registrado por Chan *et al.* (2018) en plantaciones clonales jóvenes de *Pinus strobus* (R²=0.34) en Canadá, al generar un modelo de regresión lineal múltiple para predecir el flujo de CO₂ utilizando la radiación, la temperatura y humedad relativa como variables independientes. También son similares a los

registrados por Hayek (2017) al predecir el INE de manera horaria ($R^2=0.59$). En el presente estudio, tanto en teca como melina, los valores de R^2 aumentan en los sitios con mayor edad, lo cual sugiere que en edades tempranas la predicción pierde precisión. Este comportamiento podría deberse a que los árboles en los estadios jóvenes son más susceptibles a las variaciones edafoclimáticas, lo cual limita la precisión de los modelos (Chan *et al.*, 2018). Es necesario considerar que explicar la variabilidad del intercambio neto de CO_2 y H_2O con variables meteorológicas requiere tiempos largos de medición del flujo para revelar tendencias interanuales (Pilegaard *et al.*, 2011).

En México en un bosque templado, Hidalgo (2020) generó un modelo de regresión lineal múltiple para predecir el intercambio neto ecosistémico de CO_2 , utilizando la radiación neta, déficit de presión de vapor y humedad relativa y esto explica el 43% de la variabilidad del proceso. En este mismo estudio, para el flujo de H_2O , las principales variables fueron temperatura, radiación neta, déficit de presión de vapor y contenido de humedad del suelo que en conjunto explican el 61% de los datos. Los datos anteriores son muy similares al R^2 obtenido para teca de 44.5 meses utilizados para la presente investigación (**Cuadro 7**). Por otra parte, en plantaciones de *Pinus taeda* en Carolina del Sur, Estados Unidos, Ruzol (2021) reportó un $R^2=0.68$ al generar un modelo de regresión múltiple para predecir la evapotranspiración del ecosistema utilizando las mismas variables y la pérdida de hojas.

La aplicabilidad práctica de estos modelos incluye el ayudar a los responsables de la formulación de políticas a comprender como las emisiones de CO_2 pueden evolucionar en el futuro en diferentes escenarios, lo que les permite evaluar el impacto de las medidas de mitigación propuestas. Además, son útiles para facilitar los inventarios de remociones para proyectos u organizaciones que pretendan determinar su huella de carbono. Los modelos también ayudan a comprender mejor los procesos que influyen en las emisiones y absorciones de CO_2 en las plantaciones forestales.

4. Conclusiones y recomendaciones

- Las plantaciones forestales de melina absorben mayor CO_2 en edades tempranas en comparación con la teca debido a una mayor área foliar específica y por mantener un follaje constante, es decir, por características asociadas directamente a la genética de la especie.

Esta capacidad de absorción aumenta durante la época lluviosa para ambas especies y se reduce en fincas con baja calidad de sitio.

- Las plantaciones de teca menores a los 5 meses se comportan como una fuente de CO₂, principalmente por la poca AFE y cantidad de hojas, lo cual restringe su capacidad de absorción.
- Las diferencias en la disponibilidad de agua en los sitios evaluados y su relación con la época del año determinan el comportamiento tanto de los flujos de dióxido de carbono como los de vapor de agua.
- Las actividades de manejo silvicultural y las características propias de la reforestación comercial con teca, melina y otras especies hace que los flujos de metano en plantaciones sean despreciables ya que no existen las condiciones necesarias anaeróbicas para el intercambio gaseoso entre la vegetación, suelo y la atmósfera.
- Se recomienda utilizar los modelos de predicción de vapor de agua para plantaciones de melina y teca con edades superiores a 12 y 44.5 meses respectivamente, debido a que en edades tempranas los modelos presentan mayor error absoluto y menores coeficientes de determinación. Con respecto a los modelos de dióxido de carbono, se recomienda utilizar el modelo de teca a los 44.5 meses debido a que el resto no tiene la suficiente precisión.

5. Ética y conflicto de intereses

Las personas autoras declaran que han cumplido totalmente con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no hay conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras se mencionan completa y claramente en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo.

6. Referencias bibliográficas

Aguilar- Rodríguez, C., Sequeira-Guillen, A. y Peralta-Tercero, E. (2017). Factor de forma para la *Tectona grandis* L.F, empresa MLR-Forestal, Siuna, Costa Caribe Norte de

Nicaragua. *Revista Ciencia e interculturalidad*, 21 (2), 74-84.
[10.5377/rci.v21i2.5602](https://doi.org/10.5377/rci.v21i2.5602)

Ahongshangbam, J., Patel, N. R., Kushwaha, S. P. S., Taibanganba, W. y V. K. Dhadwal (2016). Estimating Gross Primary Production of a Forest Plantation Area Using Eddy Covariance Data and Satellite Imagery. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 44, 895–904. <https://doi.org/10.1007/s12524-016-0564-7>

Aslan, T., Peltola, O., Ibrom, A., Nemitz, E., Rannik, Ü., y Mammarella, I. (2020). The high frequency response correction of eddy covariance fluxes. Part 1: an experimental approach for analyzing noisy measurements of small fluxes. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 14, 1–27.
<https://doi.org/10.5194/amt-2020-478>

Burba, G. (2013). *Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates*. LI-Cor Biosciences.

Busch, J., Engelmann, J., Cook-Patton, S. C., Griscom, B. W., Kroeger, T., Possingham, H. y Shyamsundar, P. (2019). Potencial de eliminación de dióxido de carbono a bajo costo mediante la reforestación tropical. *Nature Climate Change*, 9, 463–466.
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0485-x>

Casemiro-Soriano, E.M. (2019). Balance de carbono, energía y productividad ecosistémica en la amazonía occidental empleando el método de flujos turbulentos [Tesis de maestría, Pontifica Universidad Católica del Perú, Escuela de posgrado].
[https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/14900/CASI MIRO SORIANO ENZO MARTIN.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/14900/CASI_MIRO_SORIANO_ENZO_MARTIN.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Chan, F. C.C., Araina-Altalf, M., Khomik, M., Brodeur, J. J, Peichl, M., Restrepo-Coupea, N., Thorne, R., Beamesderfer, E., McKenziea, S., Xu, B., Crofte, H., Pejama, M., Tranta, J., Kulaa, M. y Skubela, R. (2018). Carbon, water and energy exchange dynamics of a young pine plantation forest during the initial fourteen years of growth, *Forest Ecology Management*, 410, 12–26.

- Chaves-Solera, M.A. y Chavarría-Soto, E. (2017). *Aproximación taxonómica y territorial de los suelos sembrados con caña de azúcar en Costa Rica. I. Ordenes de Suelos*. San José, Costa Rica: LAICA. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/bKkHwijyPFKqGFyANxJqzHxCWDaLMdMq>
- Deb Burman, P., Shurpali, N., Chowdhuri, S., Karipot, A., Chakraborty, S., Lind, S., Martikainen, P., Chellappan, S., Arola, A., Tiwari, Y., Murugavel, P., Gurnule, D., Todekar, K. y Prabha, T. (2020). Eddy covariance measurements of CO₂ exchange from agro-ecosystems located in subtropical (India) and boreal (Finland) climatic conditions. *Journal of Earth System Science*, 129 (1), 1–18. <https://doi.org/una.idm.oclc.org/10.1007/s12040-019-1305-4>
- Díaz, M. A. (2018). *Flujos de CO₂ y CH₄ en suelos de matorrales y bosques esclerófilos en la Reserva Nacional Roblería del cobre de Loncha, Región Metropolitana*. [Tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional Universidad de Chile. repositorio.uchile.cl/handle/2250/152404
- Fonseca-González, W., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Benavidez-Fallas, R., Arce-Ledezma, V., Carmona-Solís, R., Ulloa-Saborío, G., Salazar-Ruiz, A. G., y Carvajal-Arroyo, D. (2022). Predicción de biomasa en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L. f y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 19 (44). <https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i44.6104>
- Fonseca-González, W., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Rojas-Vargas, M. y Spínola-Parallada, R. M. (2021a). Modelos de biomasa y carbono para árboles de *Gmelina arborea* en plantaciones clonales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55 (1), 143-159. <https://dx.doi.org/10.15359/rca.55-1.7>
- Fonseca-González, W., Ávila-Arias, C., Murillo-Cruz, R. y Rojas-Vargas, M. (2021b). Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f. *Colombia forestal*, 24 (1), 31–44. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15961>

- Garro-Fuentes, J.C. (2021). *Comportamiento de clones de Gmelina arborea Roxb. en Cañaza de Puerto Jiménez, pacífico sur de Costa Rica*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacimiento, Escuela de Ciencias Ambientales].
- Hayek, M. (2017). Drivers of Long-Term Variability in Amazon Forest Carbon Fluxes. [Tesis de doctorado. Universidad de Harvard, Estados Unidos]. <https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/2450195532/16CDD8412FF2443EPQ/3?accountid=37045>
- Hidalgo-Sánchez, M. E. (2020). *Evapotranspiración e intercambio neto del ecosistema de un bosque bajo manejo para producción maderable*. [Tesis de licenciatura, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas].
- IDER [Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica]. (2015). *Informe de Caracterización Básica Territorio San Carlos-Peñas Blancas-Río Cuarto*. San Carlos, Costa Rica: Oficina Subregional de San Carlos Dirección Huetar Norte.
- INEC [Instituto de Estadística y Censo]. (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario*. Atlas Estadístico Agropecuario / Instituto Nacional de Estadística y Censos. (1.ª ed.). San José. Costa Rica.: INEC.
- INEC [Instituto de Estadística y Censo]. (2022). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2021 Resultados generales de la actividad agrícola y forestal*. San José, Costa Rica. <https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-09/reagropecENAAGR%C3%8DCOLA2021-01.pdf>
- Igarashi, Y., Tanaka, N., Tanaka, K., Yoshifuji, N., Takanori, S., Chatchai, T- y Masakazu, S. (2012). Seasonality of water and carbon dioxide exchanges at a teak plantation in northern Thailand. *Ecohydrology*, 6 (1), 125-133. <https://doi.org/10.1002/eco.284>
- Jonhson, D. (2023). *Tovi Software Online Mini-Series: Session 2: Gap filling and footprint modeling*. [Webinar]. LI-COR Bioscience. <https://www.licor.com/env/webinars/tovi-online-mini-series-session-two?=&access>

- Kim, J., Hwang, T., Schaaf, C., Kljun, N., y Munger, J. (2018). Seasonal variation of source contributions to eddy-covariance CO₂ measurements in a mixed hardwood-conifer forest. *Agricultural & Forest Meteorology*, 253-254, 71–83. <https://doi.org.una.idm.oclc.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.004>
- Locatelli, B., Catterall, C. P., Imbach, P., Kumar, C., Lasco, R., Marín-Spiotta, E., Mercer, B., Powers, J. S., Schwartz, N. y Uriarte, M. (2015). Tropical reforestation and climate change: beyond carbon. *Restoration Ecology*, 24 (4), 337-343. <https://doi.org/10.1111/rec.12209>
- Maboni, C. (2016). *Flujo de metano na atmosfera sobre uma cultura de arroz irrigado por inundação no sul do Brasil*. [tesis de licenciatura, Universidad Federal de Santa María]. Repositorio digital de UFSM. <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/9265>
- Martínez-Ortega, R, M, Tuya-Pendás, L. C, Martínez-Ortega, M., Pérez-Abreu, A., y Cánovas, A. M. (2009). El Coeficiente De Correlación De Los Rangos De Spearman Caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8 (2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017&lng=es&tlng=es.
- Meng, L., Rong-hao, C., Abu R., Islam, T., Yue-lin, J. y Shuang-ha, S. (2021). Estimating daily actual evapotranspiration of a rice–wheat rotation system in typical farmland in the Huai River Basin using a two-step model and two one-step models. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(1), 274–288. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63223-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63223-3)
- Manrique-Alba, A. (2017). *Ecohydrological relationships in pine forests in water-scarce environments*. [Tesis de doctorado, Universidad de Alicante, España]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=136980>
- Meza-Picado, V., Alfaro-Jiménez, K., Bedoya-Arrieta, R., Romero-Mora, M., Valerio-Madrigal, A. y Montenegro-Salas, P. (2019). Reforestación comercial en Costa Rica, Regiones Huetar Atlántica, Huetar Norte y Chorotega. Heredia, Costa Rica:

1a. ed. UNA/INISEFOR.
https://www.fonafifo.go.cr/media/2976/reforestacion_comercial.pdf

MIDEPLAN-PNUD. [Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo]. (2012). *Plan de Desarrollo Humano Local Cantón de los Chiles 2013-2023*.
https://muniloschiles.go.cr/images/documentos2021/Planesmunicipales/Plan_de_Desarrollo_Humano_Cantonal_2013_2023..pdf

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2020). *Caracterización de la Agencia de Santa Rosa: Dirección de extensión Agropecuaria*.
http://www.mag.go.cr/regiones/huetar_norte/caracterizacion-AEA-SantaRosa.pdf

Municipalidad de San Carlos. (2014). *Plan de Desarrollo Distrital, Pocosol: 2014-2024*.
<https://www.munisc.go.cr/documentos/NuestraMunicipalidad/Plan%20desarrollo%20Distrital%20de%20Pocosol.pdf>

Municipalidad de los Chiles. (2018). *Plan de Desarrollo Municipal 2018-2022*.
https://www.muniloschiles.go.cr/images/normativalegal/Planes/PlandeDesarrolloMunicipalLosChiles_2018-2022.pdf

Nafarrate-Hecht, A.C. (2017). *Estimación directa e indirecta del índice de área foliar y su modelación con LIDAR en un bosque tropical seco de Yucatán*. [Tesis de licenciatura, Centro de Investigación Científica de Yucatán].

Ngangyo-Heya, M., Foroughbakch-Pournavab, R., Carrillo-Parra, A. y Salas-Cruz, L.R. (2017). Respuesta fenológica de especies maderables a los factores ambientales del noreste de México. *Ciencia UANL*, 20 (86), 48-55.

Nair, R., Juwarkar, A. A., Wanjari, T., Singh, S. K y Chakrabarti T. (2011). Study of terrestrial carbon flux by eddy covariance method in revegetated manganese mine spoil dump at Gumgaon, India. *Cambio climático*, 106, 609–619 .
<https://doi.org/10.1007/s10584-010-9953-z>

- Nakai, T., Hiyama, T., Petrov, R., Kotani, A., Ohta, T., y Maximov, T. (2020). Application of an open-path eddy covariance methane flux measurement system to a larch forest in eastern Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 282-283, 1-16. <https://doi.org/una.idm.oclc.org/10.1016/j.agrformet.2019.107860>
- Olivas, P.C., Oberbauer, S.F., Clark, D.B., Clark, D.A., Ryan, M.G., O'Brien J.J. y Ordoñez, H. (2013). Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rainforest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 110-116.
- Ontiveros, S., Manrique, S., Franco, J. y Camacho, D. (2018). Secuestro de metano (CH₄) bajo cobertura de bosque nativo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 22, 04.35-04.46.
- Paúl, S., Ammann, C., Alewell, C. y Leifeld, J. (2021). Carbon budget response of an agriculturally used fen to different soil moisture conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 300 (108319), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108319>
- Pilegaard, K., Ibrom, A., Courtney, M. S., Hummelshøj, P. y Jensen, N. O. (2011). Increasing net CO₂ uptake by a Danish beech forest during the period from 1996 to 2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (7), 934-946. <https://doi.org/una.remotexs.co/10.1016/j.agrformet.2011.02.013>
- Rasineni, GK, Chinnaboina, M. y Reddy, AR. (2010) Proteomic approach to study leaf proteins in a fast-growing tree species, *Gmelina arborea* Linn. Roxb. *Trees*, 24, 129–138. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0386-0>
- Reddy-Rodda, S., Chand-Thumaty, K., Praveen, M., Shekhar-Jha, C. y Kumar-Dadhwal, V. (2021). Multi-year eddy covariance measurements of net ecosystem exchange in tropical dry deciduous forest of India. *Agricultural and Forest Meteorology*, 301-302. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108351>

- Ruzol, R. A. (2021). *Water use of an intensively managed loblolly pine plantation: implications of rapid tree growth on stand evapotranspiration and its components*. [Tesis de licenciatura, Universidad de Alabama, Estados Unidos].
- Sachan, S., Pradesh, M., Verma, I., Kumar, S., Verma, S. y Kumar, A. (2019). Morphological, physiological and biochemical performance of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* under drought stress conditions. *International Journal of Chemical Studies*, 8 (1): 1305-1314. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1r.8437>
- Sainju, U.M., Ghimire R. y Dangi, S. (2021). Soil carbon dioxide and methane emissions and carbon balance with crop rotation and nitrogen fertilization. *Science of The Total Environment*, 775, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145902>
- Salas-Rodríguez, A., Murillo-Gamboa, O., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., y Mata-Granados, X. (2016). Evaluación de la severidad de la pudrición del tronco en *Gmelina arborea* Roxb. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 13 (32), 01–10. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v0i0.2547>
- Sarma, D., Kumar-Baruah, K., Buruah, R., Gogoi, M., Bora, A., Chakraborty, S. y Karipot, A. (2018). Carbon dioxide, water vapour and energy fluxes over a semi-evergreen forest in Assam, Northeast India. *Journal of Earth System Science*, 127 (94), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12040-018-0993-5>
- Schweizer-Lassaga, S. (2011). Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. San José. CR.: Instituto Nacional Tecnología y Agropecuaria. Ministerio de Agricultura y Ganadería. ISBN 978-9968-586-08-5. <http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/08/00428-muestreoyanalisidesuelos.pdf>
- Shekhar-Jha, C., Chand-Thumaty, K., Reddy-Rodda, S., Sonakia, A. y Kumar-Dadhwal, V. (2013). Analysis of carbon dioxide, water vapour and energy fluxes over an Indian teak mixed deciduous forest for winter and summer months using eddy

- covariance technique. *Journal of Earth System Science*, 122, 1259-1268.
<https://doi.org/10.1007/s12040-013-0350-7>
- Silva-Vinasco, J. P. y Valverde-Solís, A. (2011). Estimación de gases de efecto invernadero en humedales construidos de flujo subsuperficial. *Ingeniería y Universidad*, 15 (2), 519-533.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262011000200013&lng=en&tlng=es.
- Tang, A., Stoy, P., Hirata, R., Musin, K., Aeries, E., Wenceslaus, J. y Melling, L. (2018). Eddy Covariance Measurements of Methane Flux at a Tropical Peat Forest in Sarawak, Malaysian Borneo. *Geophysical Research Letters*, 45 (9), 4390–4399.
<https://doi-org.una.idm.oclc.org/10.1029/2017GL076457>
- Warner, D., Villarreal, S., McWilliams, K., Inamdar, S. y Vargas, R. (2017). Carbon Dioxide and Methane Fluxes from Tree Stems, Coarse Woody Debris, and Soils in an Upland Temperate Forest. *Ecosystems*, 20, 1205-1216.
- Warrier, R., Suryanarayanan, L. y Chellappan, S. (2014). A Modified Assay of Carbonic Anhydrase Activity in Tree Species. *Biochemistry and biotechnology reports*, 3, 48-55. 10.5433/2316-5200.2014v3n1p48.
- Wood, D. (2021). Net ecosystem carbon exchange prediction and insightful data mining with an optimized data-matching algorithm. *Ecological Indicators*, 124 (107426), 2-17.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107426>
- Wutzler, T., Lucas-Moffat, A., Migliavacca, M., Knauer, J., Sickel, K., Šigut, L., Menzer, O. y Reichstein, M. (2018). Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, 15, 5015–5030.
<https://doi.org/10.5194/bg-15-5015-2018>
- Xhuan-Wong, G., Hirata, R., Hirano, T., Kiew, F., Baran-Aeries, E., Kemudang-Musin, K., Wenceslaus-Waili, J., San-Lo, K. y Melling, L. (2018). Micrometeorological measurement of methane flux above a tropical peat swamp forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256-257, 353-361.
<https://doi.org.una.remotexs.co/10.1016/j.agrformet.2018.03.025>

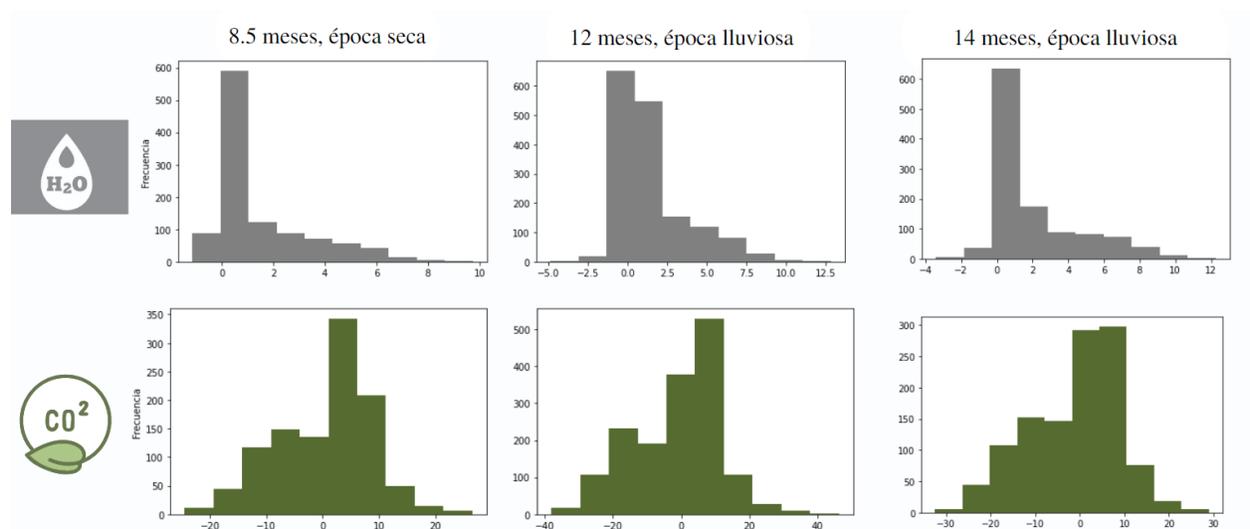
Yan, J., JiaHua, Z., XiangDe, X. y ZhiXin D. (2013). A GPP assimilation model for the southeastern Tibetan Plateau based on CO₂ eddy covariance flux tower and remote sensing data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23 (1), 213-225, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.08.015>.

Yepes, A., y Buckeridge, M. S. (2011). Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global: Revisión. *Colombia Forestal*, 14 (2), 213-232.

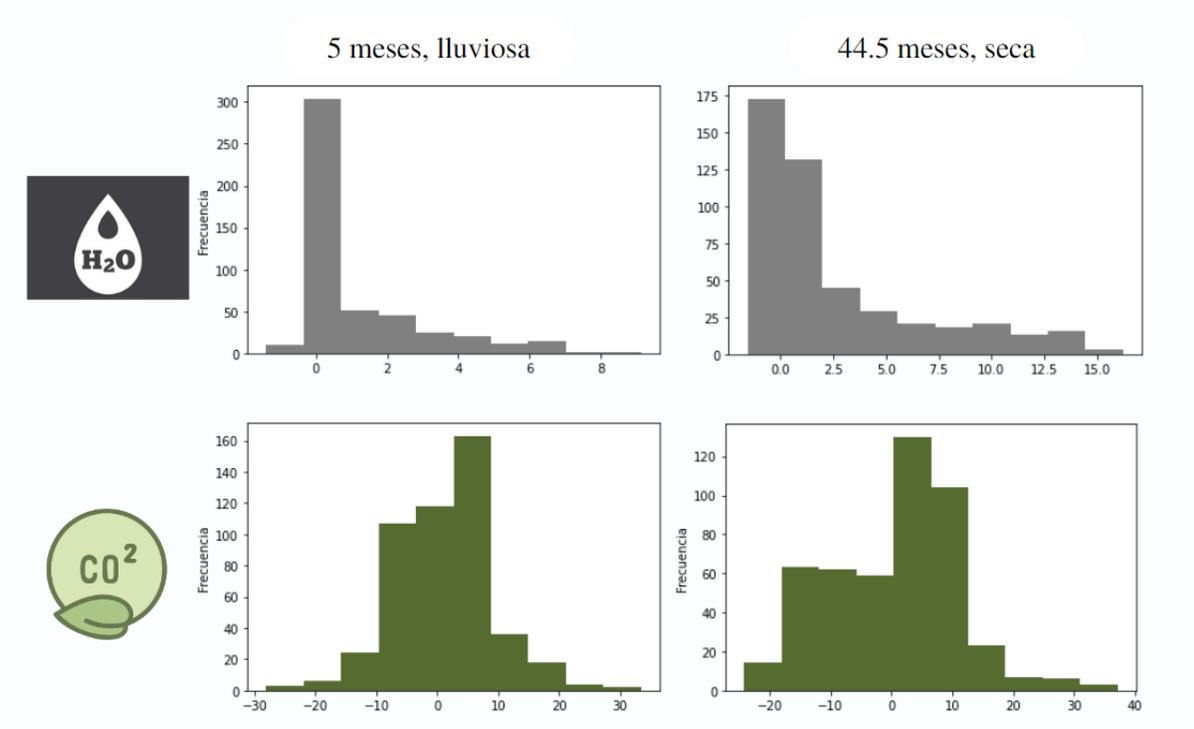
Yu, X., Song, C., Sun, L., Wang, X. y Tan, W. (2020). Towards an improved utilization of eddy covariance data: Growing season CO₂ exchange from a permafrost peatland in the Great Xing'an Mountains, Northeast China. *Ecological Indicator*, 127 (1), 106-427. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106427>

7. Apéndice

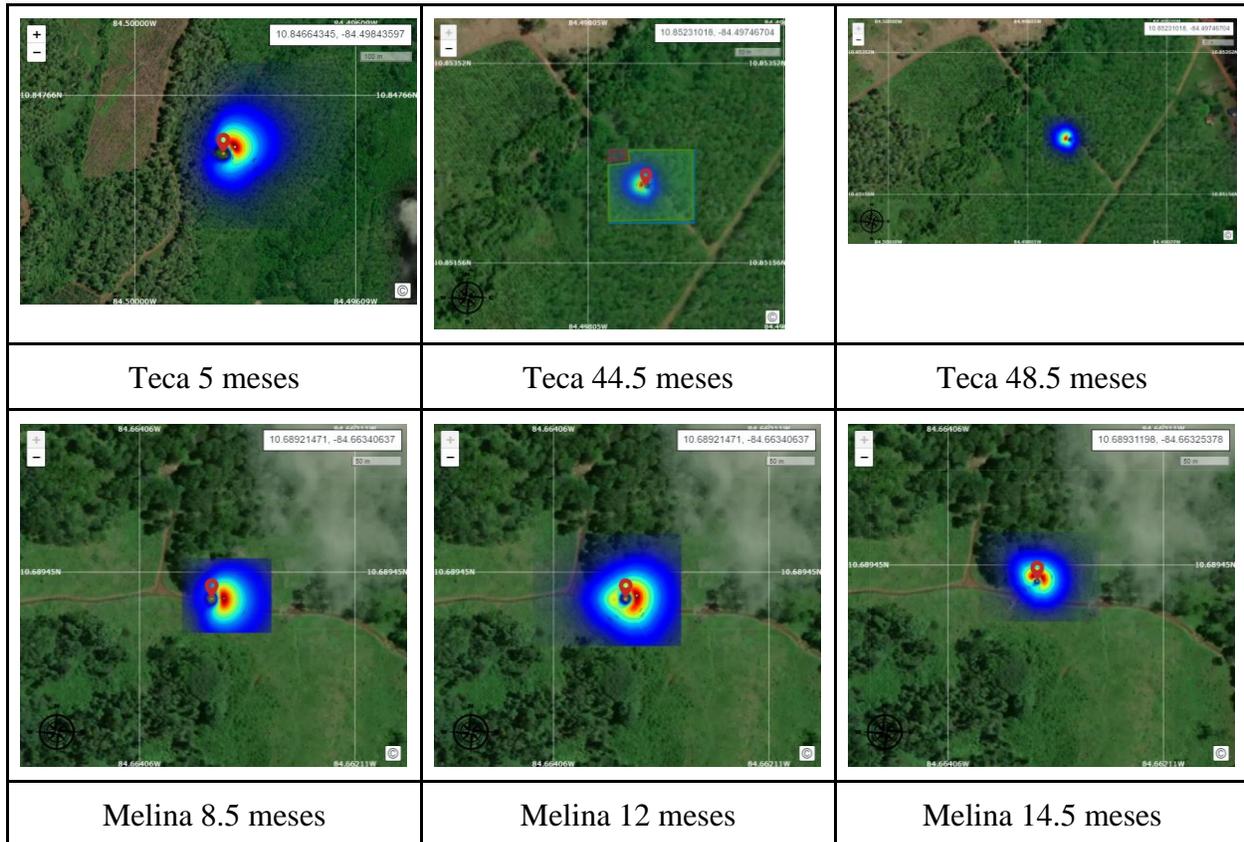
Apéndice 1. Gráficos de histograma de frecuencias de datos para la determinación de normalidad en *Gmelina arborea*.



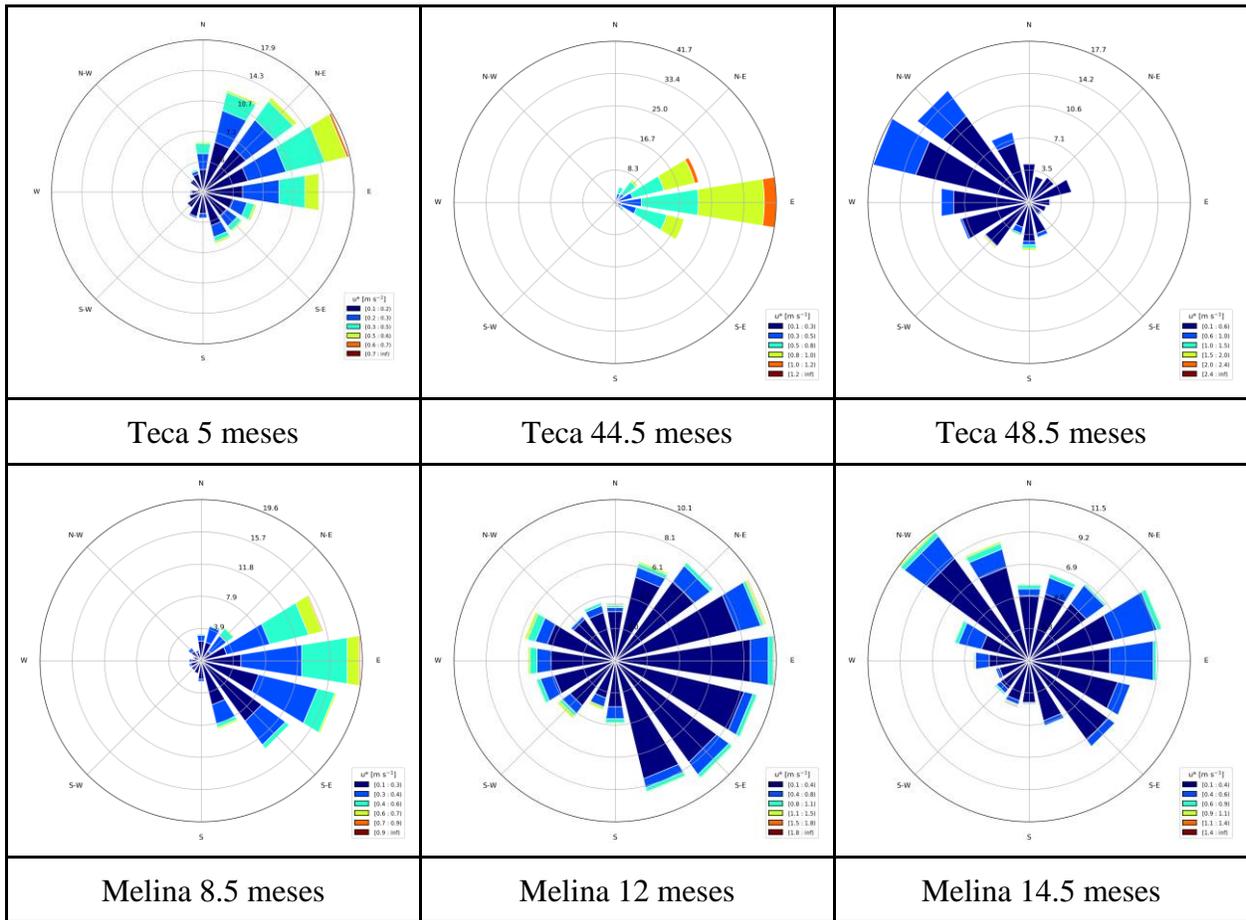
Apéndice 2. Gráficos de histograma de frecuencias de datos para la determinación de normalidad en *Tectona grandis*.



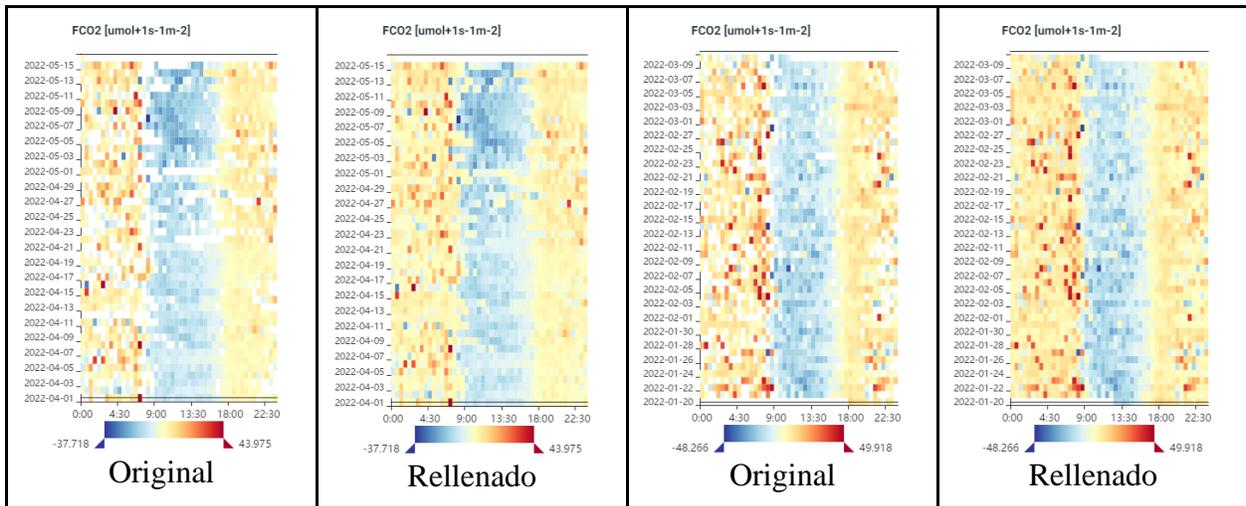
Apéndice 3. Huellas (footprint) de la torre de flujo por sitio.

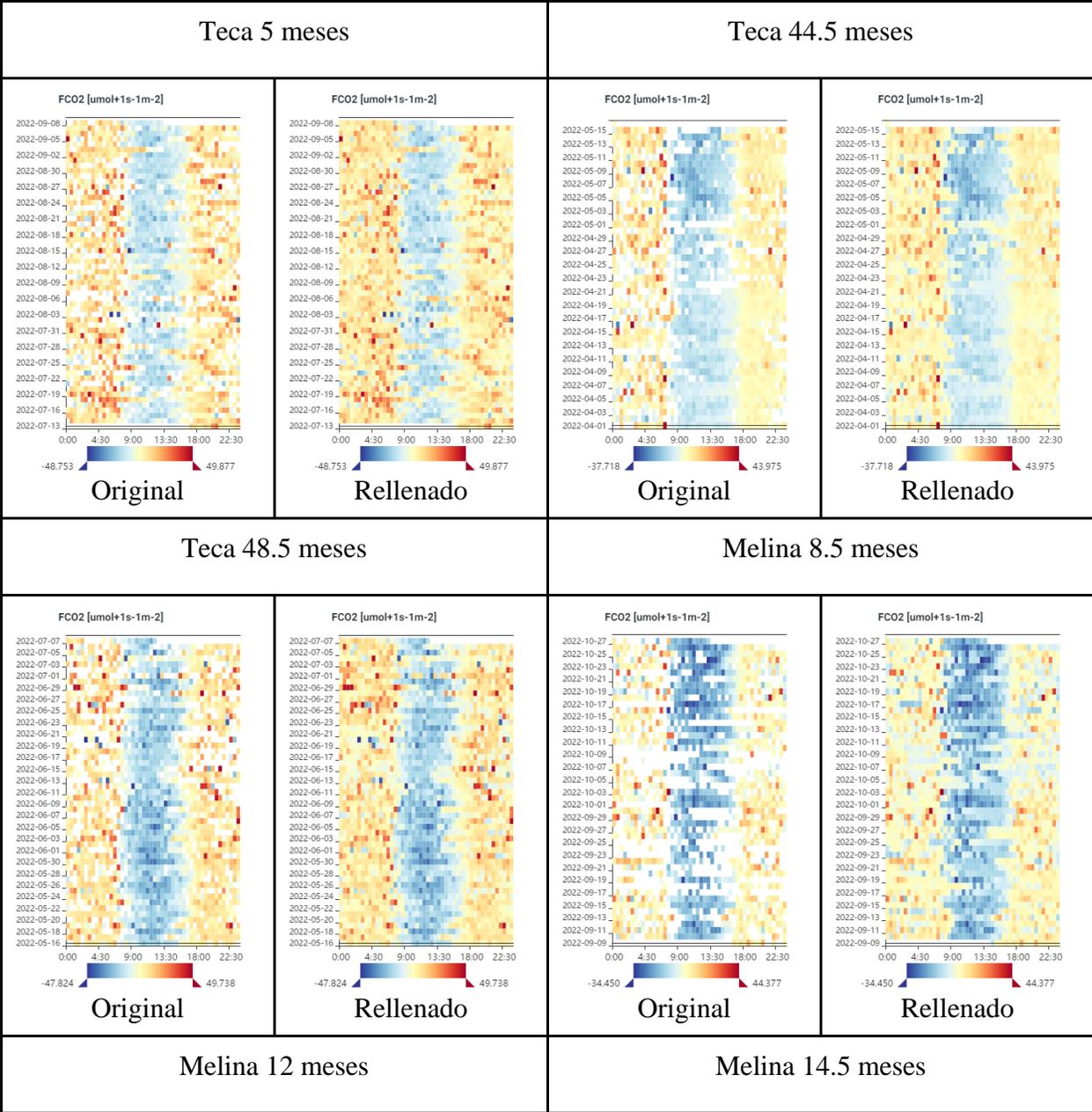


Apéndice 4. Rosa de los vientos para cada sitio.

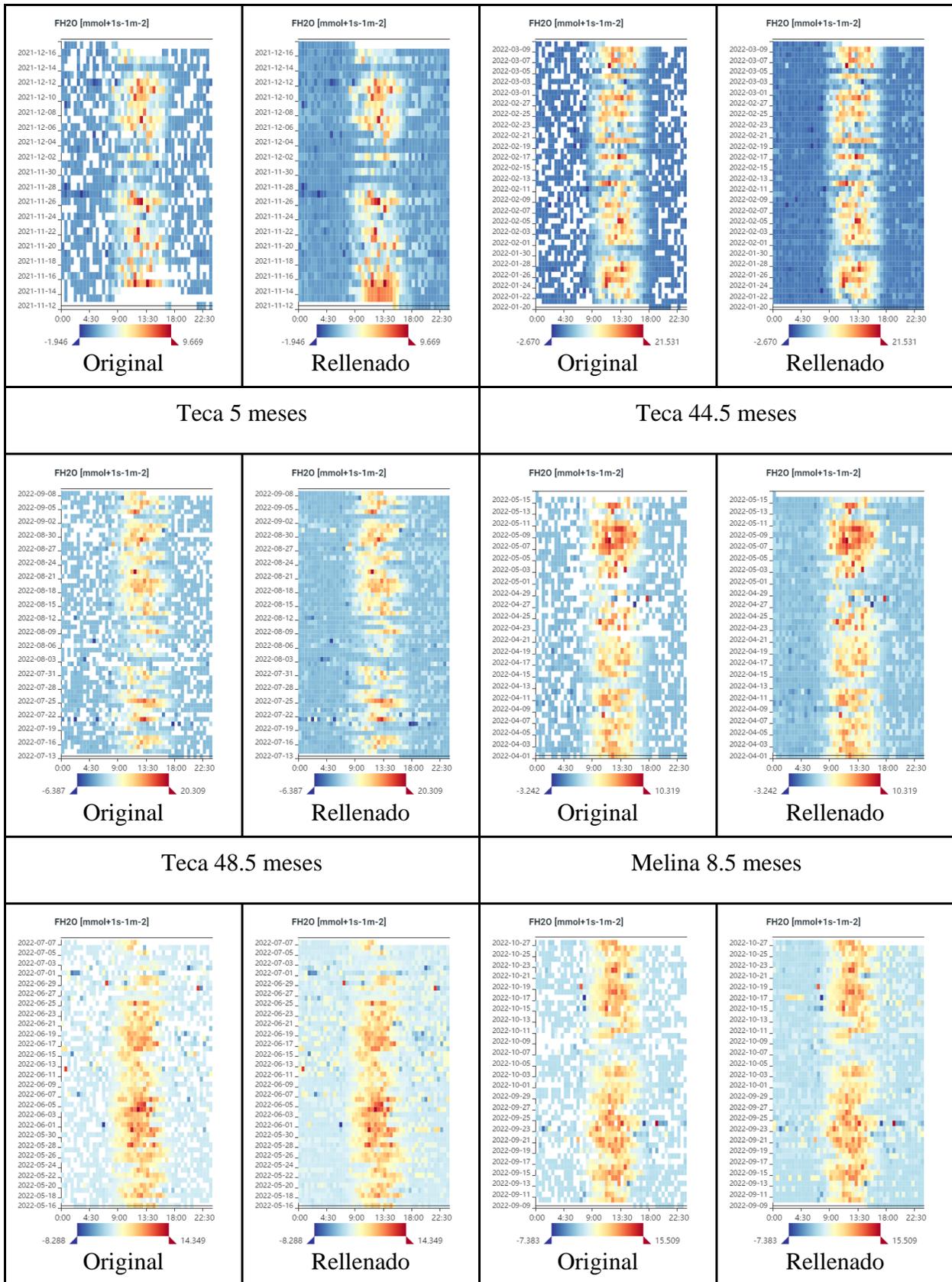


Apéndice 5. Resultados del fingerprint originales vs los obtenidos con el relleno de vacíos “gap filling” para dióxido de carbono.

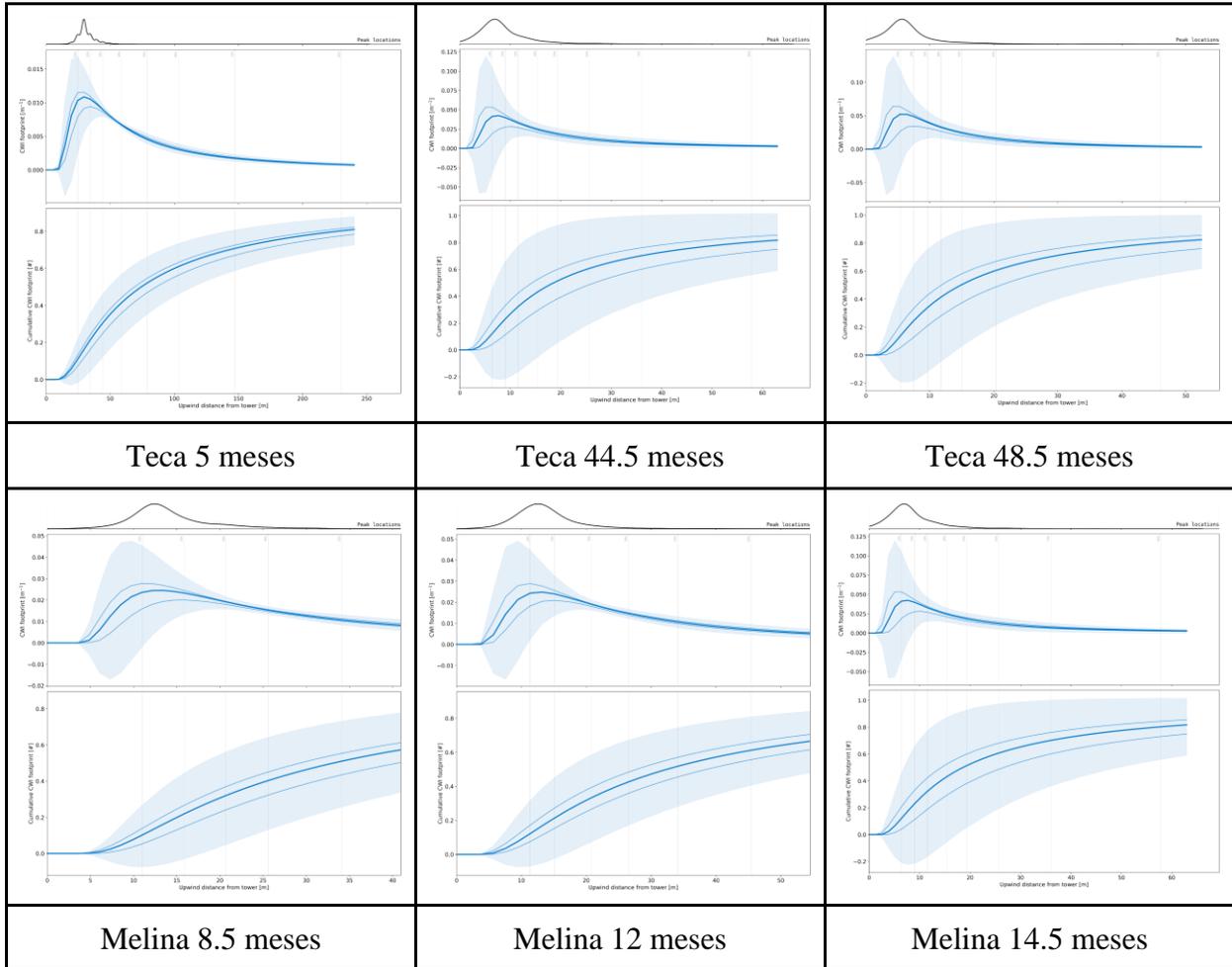




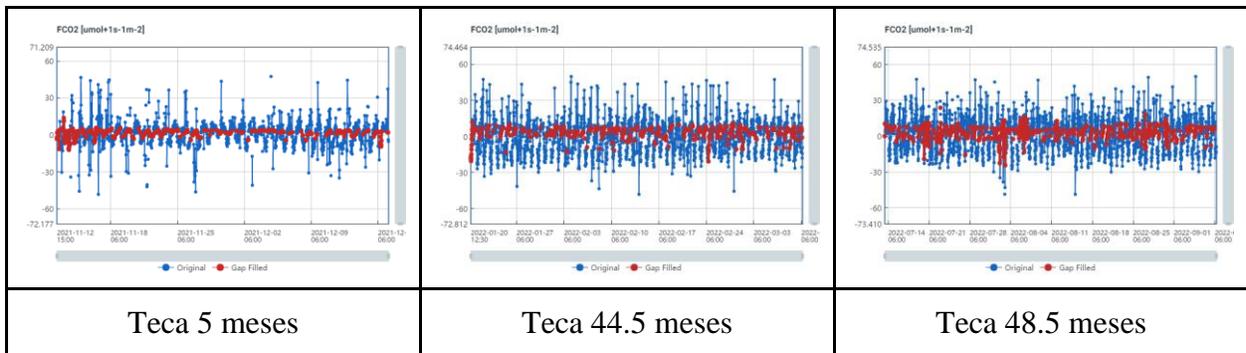
Apéndice 6. Resultados del fingerprint originales vs los obtenidos con el relleno de vacíos “gap filling” para vapor de agua.

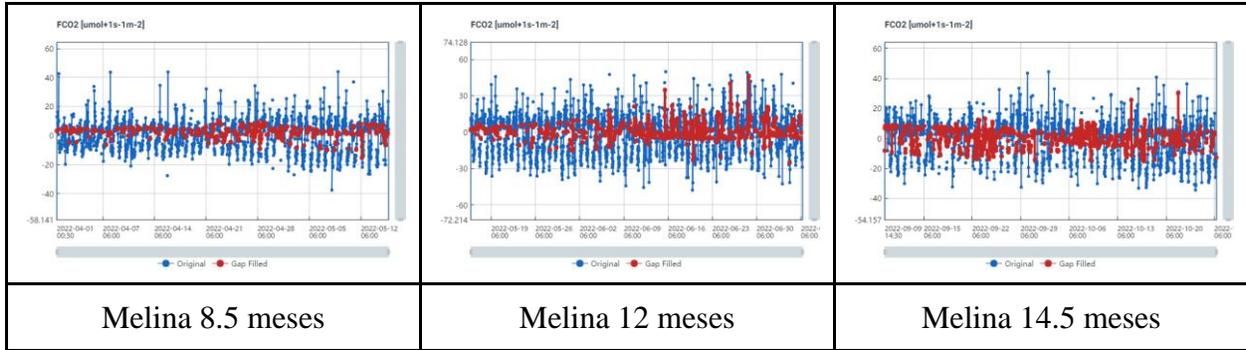


Apéndice 7. Localización de picos de medición según la distancia de la torre a las plantaciones.

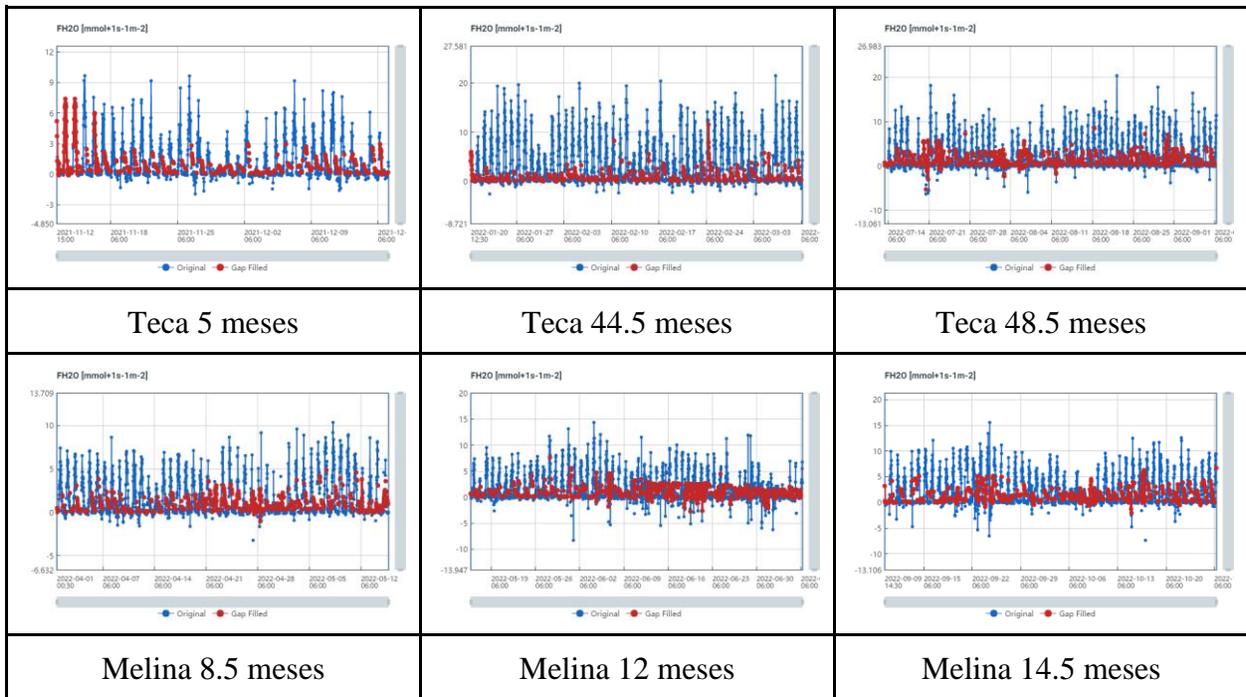


Apéndice 8. Datos rellenados mediante el “Gap filling” para el flujo de dióxido de carbono.

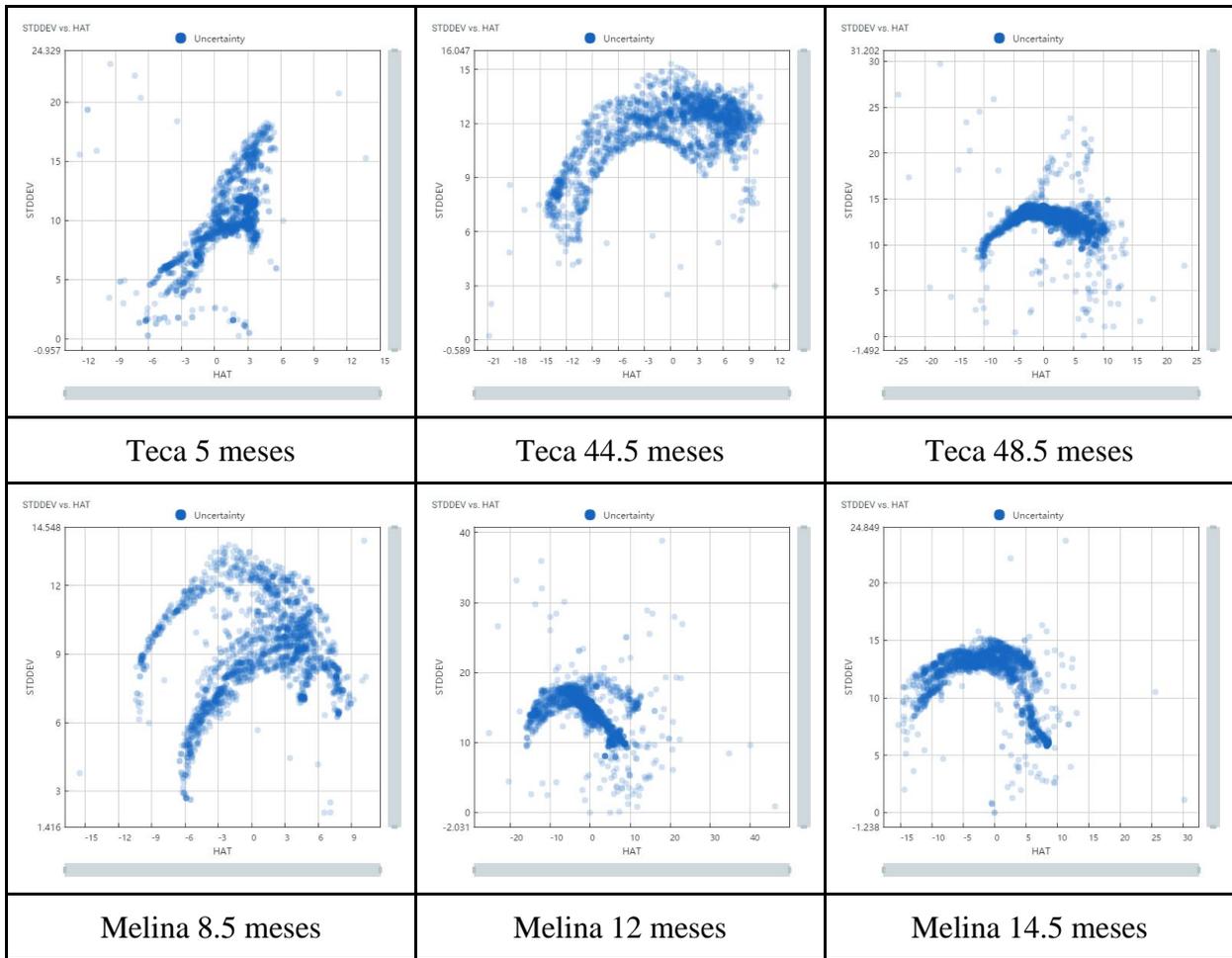




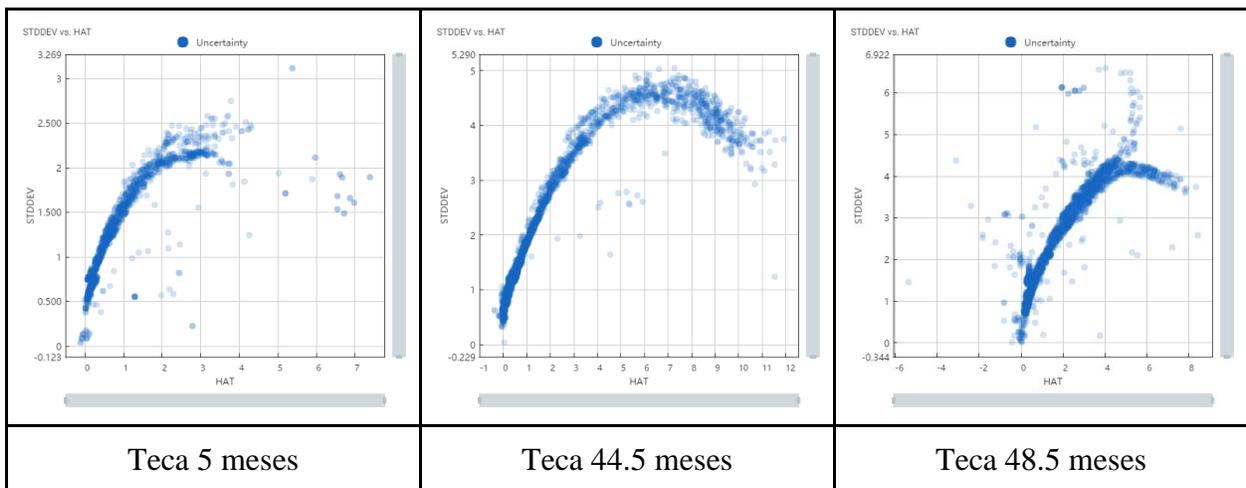
Apéndice 9. Datos rellenados mediante el “Gap filling” para el flujo de vapor de agua.

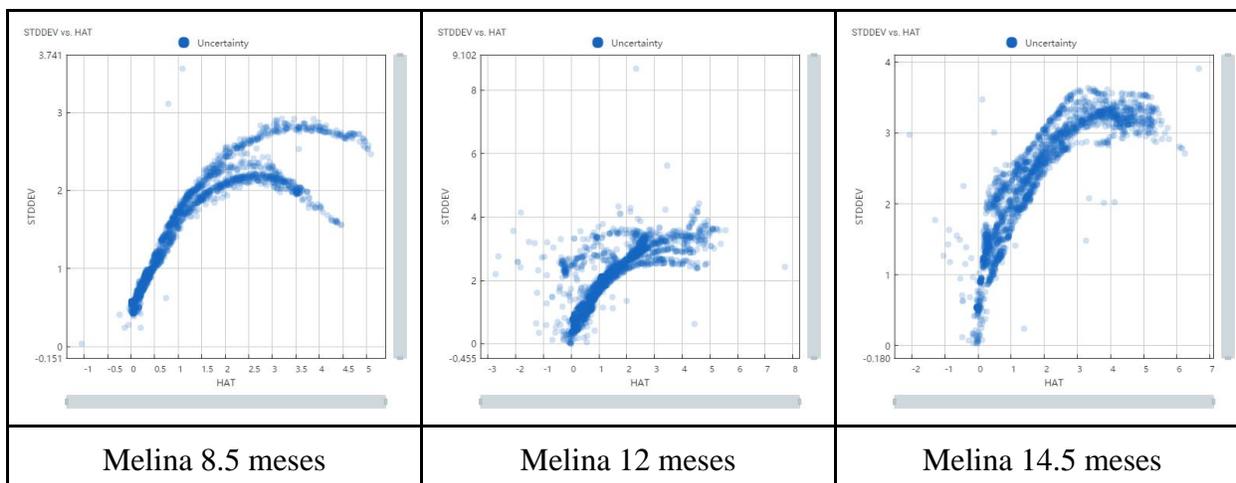


Apéndice 10. Incertidumbre del “Gap filling” para el flujo de dióxido de carbono.



Apéndice 11. Incertidumbre del “Gap filling” para el flujo de vapor de agua.





Apéndice 12. Prueba de Kolmogorov-smirnov para el flujo de vapor de agua y dióxido de carbono en las plantaciones de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* según la edad.

Especie	Edad	Valor p		Estadístico	
		H ₂ O	CO ₂	H ₂ O	CO ₂
<i>Gmelina arborea</i>	8.5	9.81x10-141	1.15x10-202	0.5084	0.6010
	12.0	3.35x10-175	0.0000	0.4664	0.619
	14.5	1.97x10-179	4-11x10-234	0.5523	0.6227
<i>Tectona grandis</i>	5.0	2.76x10-49	2.88x10-56	0.4499	0.4792
	44.5	1.01x10-86	3.06x10-77	0.5780	0.5482

Apéndice 13. Estadísticos del análisis de varianza (ANOVA) para las variables analizadas.

Variable	n	R ²	CV	SC	gl	F	Valor p
Promedio H ₂ O	7100	0.07	115.70	6490	5	111	<0.0001
Promedio CO ₂	7184	0.02	465.89	28404	5	29.65	<0.0001
Máximos H ₂ O	1300	0.24	52.16	4335	5	81.9	<0.0001

Variable	n	R ²	CV	SC	gl	F	Valor p
Promedio H ₂ O	7100	0.07	115.70	6490	5	111	<0.0001
Máximos CO ₂	1242	0.33	40.31	23848	5	123.25	<0.0001
Pruebas por especie							
Promedio H ₂ O	7100	0.01	119.30	1200	1	96.54	<0.0001
Promedio CO ₂	7184	0.01	468.09	14661	1	7581	<0.0001

Apéndice 14. Prueba de Tukey con significancia de 0.95 para vapor de H₂O por especie.

Especie	Medias	n	Letra	Alfa	DMC
Teca	3.36	3569	A	0.05	0.16423
Melina	2.54	3531	B	0.05	0.16423

Apéndice 15. Prueba de Tukey con significancia de 0.95 para CO₂ por especie.

Especie	Medias	n	Letra	Alfa	DMC
Teca	-1.61	3771	B	0.05	0.64474
Melina	-4.47	3413	A	0.05	0.64474

Apéndice 16. Prueba de Tukey para las variables analizadas con significancia de 0.95 para el promedio de CO₂ por sitio.

Especie	Medias	n	Letra	Alfa	DMC
Teca 5 meses	0.74	930	C	0.05	1.65170
Teca 44.5 meses	-0.74	1370	B	0.05	1.65170
Teca 48.5 meses	-1.68	1471	B	0.05	1.65170
Melina 8.5	-2.80	1167	B	0.05	1.65170

Melina 12.0	-5.00	1402	A	0.05	1.65170
Melina 14.5	-5.91	844	A	0.05	1.65170

Apéndice 17. Prueba de Tukey para las variables analizadas con significancia de 0.95 para el promedio de vapor de H₂O por sitio.

Especie	Medias	n	Letra	Alfa	DMC
Teca 5 meses	1.62	831	A	0.05	0.40795
Melina 12.5 meses	2.19	1329	B	0.05	0.40795
Melina 8.5 meses	2.37	1054	B	0.05	0.40795
Melina 14.0 meses	3.10	1148	C	0.05	0.40795
Teca 48 meses	3.19	1401	C	0.05	0.40795
Teca 44.5 meses	4.64	1337	D	0.05	0.40795

Apéndice 18. Prueba de Tukey para las variables analizadas con significancia de 0.95 para picos máximos de absorción de CO₂ según el sitio.

Especie	Medias	n	Letra	Alfa	DMC
Melina 12.0	-21.33	245	A	0.05	1.79088
Melina 14.5	-18.87	158	B	0.05	1.79088
Teca 44.5 meses	-16.13	236	C	0.05	1.79088
Teca 48.5 meses	-14.74	261	C	0.05	1.79088
Melina 8 meses	-11.63	199	D	0.05	1.79088
Teca 5 meses	-6.93	143	E	0.05	1.79088

Apéndice 19. Prueba de Tukey para las variables analizadas con significancia de 0.95 para picos máximos de emisión de vapor de agua según el sitio.

Especie	Medias	n	Letra	Alfa	DMC
Teca 5 meses	3.49	145	A	0.05	0.90973

Melina 8.5 meses	4.78	194	B	0.050.05	0.90973
Melina 12.0	5.06	239	B	0.050.05	0.90973
Melina 14.5 meses	6.45	223	C	0.050.05	0.90973
Teca 48 meses	6.87	264	C	0.050.05	0.90973
Teca 44.5 meses	9.42	235	D	0.050.05	0.90973

8. Anexos

Anexo 1. Escala de valoración para el estado fitosanitario de los árboles de *Tectona grandis* y *Gmelina arborea* en los sitios de muestreo.

Anexo 1. Assessment scale for the phytosanitary status of *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* in the sampling sites.

Escala de valoración	Estado fitosanitario
1	Árbol completamente sano.
2	Árbol con daños muy leves en el tronco. Con al menos un 70 % de follaje.
3	Árbol parcialmente enfermo, con daño de hasta un 75 % en el tronco. Con al menos un 50 % de follaje
4	Árbol casi muerto, pérdida del eje dominante y con pudriciones o chancros en el tronco. Menos de 50 % del follaje
5	Muerto

Fuente: Salas, *et al.*, 2014