

Universidad de San Carlos de Guatemala

Centro Universitario de Suroccidente

Ingeniería en Gestión Ambiental Local



Trabajo de graduación

Modelo matemático para la estimación de altura en la especie *Rhizophora mangle* L., para uso en las Parcelas Permanentes de Medición Forestal - PPMF- del ecosistema manglar

Por:

Bernardo Antonio Gordillo Maldonado

201844947

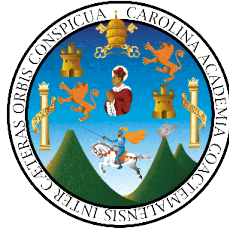
berndgordillo@gmail.com

Mazatenango, Suchitepéquez, mayo de 2023

Universidad de San Carlos de Guatemala

Centro Universitario de Suroccidente

Ingeniería en Gestión Ambiental Local



Trabajo de graduación

Modelo matemático para la estimación de altura en la especie *Rhizophora mangle* L., para uso en las Parcelas Permanentes de Medición Forestal - PPMF- del ecosistema manglar

Por:

Bernardo Antonio Gordillo Maldonado

201844947

Asesor:

MSc. Karen Rebeca Pérez Cifuentes

Revisor:

Ing. Kharla Leticia Vides Rodas

Presentado ante las autoridades del Centro Universitario de Suroccidente - CUNSUROC-, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, previo a conferírsele el título que le acredita como Ingeniero en Gestión Ambiental Local en el grado académico de Licenciado.

Mazatenango, Suchitepéquez, mayo de 2023

Universidad de San Carlos de Guatemala

Centro Universitario de Suroccidente

M. A. Walter Ramiro Mazariegos Biolis

Rector

Lic. Luis Fernando Cerdón Lucero

Secretario General

Miembros del Consejo Directivo del Centro Universitario del Suroccidente

M.A. Luis Carlos Muñoz López

Director en Funciones

Representante Profesores del CUNSUROC

MSc. Edgar Roberto del Cid Chacón

Vocal

Representante Graduado del CUNSUROC

Lic. Vilser Josvin Ramírez Robles

Vocal

Representantes estudiantiles

T.P.A. Angélica Magaly Domínguez Curiel

Vocal

P.E.M. y T.A.E. Rony Roderico Alonzo Solís

Vocal

Coordinación académica

Coordinador académico

MSc. Bernardino Alfonso Hernández Escobar

Coordinador Carrera de Licenciatura en Administración de Empresas

Dr. Álvaro Estuardo Gutiérrez Gamboa

Coordinador Carrera de Licenciatura en Trabajo Social

M.A. Edin Aníbal Ortiz Lara

Coordinador de las Carreras de Pedagogía

MSc. José Norberto Thomas Villatoro

Coordinador Carrera de Ingeniería en Alimentos

MSc. Víctor Manuel Nájera Toledo

Coordinador Carrera de Ingeniería en Agronomía Tropical

Dr. Mynor Raúl Otzoy Rosales

Coordinadora Carrera de Ingeniería en Gestión Ambiental Local

MSc. Karen Rebeca Pérez Cifuentes

**Coordinador Carrera de Licenciatura en Ciencias Jurídicas y Sociales,
Abogacía y Notariado**

Lic. Sergio Román Espinoza Antón

Coordinador Área Social Humanista

Lic. José Felipe Martínez Domínguez

Carreras Plan Fin de Semana del CUNSUROC

Coordinador de las carreras de Pedagogía

Lic. Néstor Fridel Orozco Ramos

**Coordinador Carrera Periodista Profesional y Licenciatura en Ciencias de la
Comunicación**

M.S. Juan Pablo Ángeles Lam

Acto que dedico

- A Dios:** Por haberme brindado vida, salud y sabiduría, permitiéndome finalizar una etapa más en el ámbito académico.
- A mis padres:** Onelia Leonor Maldonado Fernández y César Antonio Gordillo de León, por su amor, arduo esfuerzo y apoyo incondicional, lo cual me permitió culminar esta etapa.
- A mis hermanas:** Monserrat y Sofía, por amor y apoyo dentro y fuera del ámbito profesional.
- A mis abuelos:** Agustina Fernández, Bernardo Maldonado, Lucía de León y Oscar Gordillo, por su amor y apoyo incondicional.
- A mi familia:** Gracias por su amor y apoyo incondicional que en su momento me han brindado, los aprecio mucho.
- A mis amigos:** Gracias por ser una parte importante en mi vida, por su apoyo incondicional y el cariño que me han brindado dentro y fuera del ámbito profesional, son los mejores, los aprecio mucho.

Agradecimientos

- A:** La Universidad de San Carlos de Guatemala, por ser alma máter que me ha formado académica y profesionalmente.
- A:** El Centro Universitario de Suroccidente, por ser la casa de estudios que me permitió culminar esta etapa.
- A:** La Carrera de Ingeniería en Gestión Ambiental Local, por los conocimientos brindados durante mi formación académica.
- A:** El Instituto Técnico Industrial “Georg Kerschensteiner”, por el conocimiento brindado en mi formación académica del nivel diversificado.
- A:** El Instituto Nacional de Educación Básica Experimental “Lic. Julio César Méndez Montenegro”, por el conocimiento brindado en mi formación académica del ciclo básico.
- A:** La Municipalidad de Chicacao, por permitirme desarrollar el curso de Prácticas Ambientales I, en dicho municipio.
- A:** El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, por permitirme desarrollar el curso de Prácticas Ambientales II, en la delegación departamental de Suchitepéquez.
- A:** La Industria Licorera Euzkadi, por permitirme desarrollar el curso de Prácticas Ambientales III, en el Centro de Producción Nahualate.
- A:** El Instituto Nacional de Bosques -INAB-, por permitirme desarrollar el Ejercicio Profesional Supervisado -EPS- y la presente investigación.
- A:** Rainforest Alliance Inc., por el apoyo logístico y económico brindado.
- A:** MSc. Karen Pérez, por su asesoría y supervisión en las diferentes etapas del EPS.

- A:** Ing. Lucrecia Vela, por su apoyo durante mi etapa como estudiante y durante el desarrollo del EPS.
- A:** Ing. Kharla Vides, MSc. Celso González Ing. Allan Castro por la revisión asertiva de la presente investigación, lo cual permitió mejorar notablemente este documento.
- A:** Ing. Luis Vela, por el apoyo brindado durante el desarrollo del EPS en el INAB.
- A:** César Zacarías, por la asesoría, apoyo y conocimiento brindado.
- A:** Ing. Floridalma Miguel, Ing. José Morán, Ing. Danger Gómez, Ing. Catherin Hernández, Ing. Denis Morales, Lic. Dinora Orozco, Lic. Josselline Gómez, Brenda Zamora Recinos, Alex Rodas, Carlos Vides Rodas, Joel Moreno, Lic. Mario Rafael Rodríguez Palma, Ing. Erick Ochoa y Frydel González, por el apoyo y conocimiento brindado durante el desarrollo del EPS.
- A:** La finca “Tamashan”, por permitir el uso del recurso forestal necesario para llevar a cabo la presente investigación.
- A:** Ing. Guillermo Aguirre, por permitir el acceso a la finca “Tamashan” durante el desarrollo de la presente investigación.
- A:** El personal de la finca “Tamashan”, por el apoyo brindado en la logística y el trabajo de campo necesario para la investigación realizada.
- A:** La familia López Chugue, por su apoyo y hospitalidad.
- A:** MSc. Eysen Enríquez, Ing. Yvonne Cárdenas, MSc. Heydi Vela, Ing. Benjamín Gómez, MSc. Miguel Oroxom, Ing. Sharon Quiñónez, Arq. Milton Hernández, por el conocimiento brindado durante mi etapa como estudiante.
- A:** Lic. Magda Martínez, por el apoyo brindado durante mi etapa como estudiante becado.

Índice

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
I. Introducción	1
II. Planteamiento del problema	3
III. Hipótesis.....	5
IV. Objetivos.....	5
4.1 Objetivo general.....	5
4.2 Objetivos específicos	5
V. Revisión de literatura	6
5.1 Ecosistema manglar	6
5.2 Especies manglares y su distribución	7
5.3 Especie manglar en estudio.....	11
5.3.1 <i>Rhizophora mangle</i> L.....	11
5.4 Parcelas permanentes de medición forestal -PPMF-	12
5.4.1 Importancia de las parcelas permanentes de medición forestal	13
5.5 Variables dasométricas.....	13
5.5.1 Diámetro	13
5.5.2 Altura	15
5.6 Relación diámetro - altura.....	15
5.7 Modelos matemáticos	16
5.7.1 Análisis de regresión	17
5.7.2 Modelos de regresión	18
5.8 Área de estudio.....	21

5.8.1 Finca “Tamashan”	21
5.8.2 Mapa de localización	22
VI. Materiales y métodos.....	23
6.1 Materiales	23
6.2 Métodos	26
6.2.1 Revisión de la base de datos de las PPMF del ecosistema manglar.....	26
6.2.2 Medición de variables dasométricas.....	28
6.2.3 Modelización y análisis estadístico	35
VII. Resultados y discusión	38
VIII. Conclusiones	45
IX. Recomendaciones	46
X. Referencias	47
XI. Anexos.....	53

Índice de figuras

1. Ecosistema manglar presente en el área de estudio, finca “Tamashan”, Retalhuleu, Retalhuleu.....	7
2. Distribución del ecosistema manglar a nivel global.....	8
3. Distribución del ecosistema manglar Guatemala.....	9
4. Especies manglares presentes en Guatemala.....	10
5. Especie <i>Rhizophora mangle</i> L.	12
6. Consideraciones para la medición del DAP o DN en un árbol.....	14
7. Mapa de ubicación de la finca “Tamashan”.....	22
8. Ubicación de puntos de muestreo dentro de la plantación voluntaria en finca “Tamashan”.....	29
9. Boleta digital para el registro de los datos recolectados en campo.....	31
10. Medición del diámetro normalizado de los árboles seleccionados.....	32
11. Referencia ilustrativa de la altura medida en cada árbol.....	33
12. Medición de la altura total de los árboles seleccionados luego de ser talados.....	34
13. Modelos matemáticos sugeridos por el software <i>Curve Expert Professional</i>	36
14. Modelo polinomial de segundo grado (cuadrático).....	38
15. Modelo lineal.....	38
16. Modelo logarítmico natural.....	39
17. Análisis gráfico de residuales.....	41
18. Resultados de prueba t de muestras apareadas.....	42
19. Guía de uso de la ecuación sugerida para la estimación de altura en árboles de la especie <i>Rhizophora mangle</i> L.	55

Índice de tablas

1. Clases diamétricas utilizadas por el INAB para la clasificación de los árboles de mangle según su diámetro.....	15
2. Descripción y costo del recurso humano empleado para la investigación	23
3. Descripción y costo de la logística en el trabajo de campo para la investigación	23
4. Descripción y costo de los materiales utilizados para la investigación.....	24
5. Descripción y costo de los recursos digitales empleados en la investigación	25
6. Resumen de costos de la investigación inferencial realizada	26
7. Distribución de clases diamétricas en la zona del Manchón Guamuchal	27
8. Modelos sugeridos por el software <i>Curve Expert Professional</i>	40
9. Resultados del análisis de residuos	43
10. Resumen de los modelos ajustados al estudio	43
11. Datos recolectados en campo	53

Resumen

La altura total de los árboles es una variable importante para el manejo sostenible del recurso forestal, en este caso, del ecosistema manglar; sin embargo, la medición de esta variable en campo, es relativamente difícil y costosa. El objetivo de la presente investigación fue desarrollar una ecuación diámetro-altura que permite estimar de forma precisa la altura de árboles con base en el diámetro normalizado de la especie *Rhizophora mangle* L., para su uso en las Parcelas Permanentes de Medición Forestal -PPMF-.

Para determinar la ecuación, la muestra utilizada fue de 46 árboles, los cuales fueron suficientes para observar el comportamiento de la curva de variabilidad natural de la altura total de los árboles. La selección del mejor modelo estuvo basada en los siguientes criterios: coeficientes de determinación (R^2 y R^2_{adj}), coeficiente de correlación (r), error medio y típico, raíz de error medio cuadrático (REMC), criterio de información de Akaike (AIC) y una prueba t de muestras pareadas para la comparación de altura real y altura estimada; asimismo, se llevó a cabo un análisis gráfico y numérico entre los valores predichos por la ecuación y los datos medidos en campo.

La relación entre diámetro y altura fue altamente estrecha en cinco modelos propuestos (Coeficiente $r = 0.9081$), presentando un coeficiente de determinación cercano a 1 ($R^2 = 0.8246$ y $R^2_{adj} = 0.8206$). Sin embargo, el modelo logarítmico natural, fue el que se seleccionó como el más apropiado para predecir con mejor precisión la altura total de los árboles en función del diámetro normalizado, ya que presentó un error típico y un AIC menor en comparación con los otros modelos, lo cual indica que es preciso y menos complejo. Este tipo de ecuación resulta útil y confiable para su uso en las diferentes Parcelas Permanentes de Medición Forestal -PPMF- del país, durante los respectivos monitoreos; ya que reduce el tiempo, el costo y, a su vez, minimiza los errores de campo.

Abstract

The total height of trees is an important variable for the sustainable management of forest resources, in this case, the mangrove ecosystem; however, the measurement of this variable in the field is relatively difficult and costly. The aim of the present research was to develop a diameter-height equation that allows accurate estimation of tree height based on the normalized diameter of the species *Rhizophora mangle* L., for use in the Permanent Forest Measurement Plots -PFMP-.

To determinate the equation, the sample used was 46 trees, which were enough to observe the behavior of the natural variability curve of the total height of the individuals. The selection of the best model was based on the following criteria: coefficients of determination (R^2 and R^2_{adj}), correlation coefficient (r), mean and standard error, root mean squared error (RMSE), Akaike information criterion (AIC) and a paired samples t-test for the comparison of real height and estimated height; also, a graphical and numerical analysis of the residuals was carried out.

The relationship between diameter and height was highly close in five proposed models (Coefficient $r = 0.9081$), presenting a coefficient of determination close to 1 ($R^2 = 0.8246$ and $R^2_{adj} = 0.8206$). However, the natural logarithmic model was selected as the most appropriate to predict with better accuracy, the total height of the trees as a function of the normalized diameter, since it presented a standard error and a lower AIC compared to the other models, which indicates that it is accurate and less complex. This type of equation is useful and reliable for use in the different Permanent Forest Measurement Plots -PFMP- of the country, during the respective monitoring; since it reduces time, cost and also minimizes field errors.

I. Introducción

Los manglares son ecosistemas de suma importancia para los seres humanos y para el mantenimiento de la biodiversidad marino-costera, al proporcionar un hábitat crítico para especies terrestres, marinas y costeras, sirviendo como zonas de crianza para muchas de ellas, así como para la pesca. (Instituto Nacional de Bosques; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales; Consejo Nacional de Áreas Protegidas, 2018). Es por ello, que el manejo sostenible de estos ecosistemas es indispensable para la protección y conservación de los servicios ecosistémicos que estos bosques proveen.

El Instituto Nacional de Bosques -INAB- en conjunto con diferentes instituciones gubernamentales, privadas y comunitarias, ha desarrollado acciones conjuntas que coadyuvan al manejo forestal sostenible del ecosistema manglar, con el fin de obtener información sobre la dinámica y la estructura del recurso forestal en dicho ecosistema.

Una de las acciones más importantes que ejecuta el INAB en los manglares, es el sistema de monitoreo forestal multipropósito que cuenta con parcelas permanentes de medición forestal -PPMF-, para poder estudiar la dinámica del ecosistema manglar, mediante la recolección de datos biométricos (Instituto Nacional de Bosques; Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático; Consejo Nacional de Áreas Protegidas, 2016). Entre dichos datos, se pueden mencionar las variables dasométricas: altura y diámetro a la altura del pecho -DAP- o diámetro normalizado -DN-, datos importantes para los procesos de monitoreo, necesarios para el cálculo de distintos parámetros que sirven para conocer la dinámica de estos bosques, información relevante para la toma de decisiones en el manejo integral del recurso forestal de este ecosistema.

La medición de las variables dasométricas en el monitoreo que realiza la institución en las PPMF, representa dificultades para el personal que lleva a cabo las inspecciones de campo, especialmente en la medición de la altura de los árboles, ya que suelen cometerse errores al medir este dato, por el difícil acceso y las condiciones del terreno en las áreas donde se encuentran las parcelas. Es por esto que la posibilidad de predecir la altura de los árboles en función de la variable de más fácil medición, en este caso, el DAP o DN, representa una aplicación muy útil.

Bajo esa premisa, esta investigación tiene como objetivo formular un modelo matemático que permita la estimación de la altura de los árboles de la especie *Rhizophora mangle* L., para su uso en las mediciones realizadas por la institución en las PPMF del ecosistema manglar. Para el cálculo de dicha ecuación fue necesario la recolección de una muestra de árboles de la especie mencionada, dentro del área de estudio, en este caso, la plantación voluntaria de finca "Tamashan" ubicada en el municipio de Retalhuleu, Retalhuleu, realizando una medición de las dos variables relacionadas, altura y diámetro, información sumamente importante para la elección y validación del modelo.

II. Planteamiento del problema

El ecosistema manglar ocupa un 0.23% de la cobertura forestal en Guatemala, lo cual es aproximadamente, 25,089 hectáreas a nivel nacional, siendo el bosque con menor representación. Este tipo de ecosistemas son fundamentales para el desarrollo de la vida humana y para el mantenimiento de la biodiversidad marino-costera, ya que funcionan como un hábitat idóneo para la crianza de especies importantes para la economía y seguridad alimentaria de los habitantes, tanto localmente como a nivel nacional y brinda varios servicios ecosistémicos vitales (Instituto Nacional de Bosques; Consejo Nacional de Áreas Protegidas, 2019).

Los manglares, al ser considerados de uso común, están expuestos a presiones internas y externas, que hacen peligrar estos bosques y las especies asociadas a ellos (Ammour et al., 1999). La deforestación, el cambio de uso del suelo y la extracción ilegal de madera y leña, son las principales amenazas que enfrentan los ecosistemas manglares, siendo necesario llevar a cabo acciones que contribuyan a la conservación, protección, y restauración de las áreas en las que se encuentra presente este bosque. (INAB et al., 2019). Entre estas acciones, se puede mencionar, la ejecución de proyectos de investigación, formulación de normativas, redacción de documentos, entre otros, que promuevan el manejo sostenible del recurso forestal de estos ecosistemas.

En el país existe una red de unidades experimentales llamadas Parcelas Permanentes de Medición Forestal -PPMF- las cuales han sido establecidas por diferentes entidades del sector gubernamental, privado y comunitario, lideradas por INAB, como un proyecto de investigación, con el objetivo de generar información sobre la dinámica, crecimiento y productividad de ecosistemas naturales de coníferas, latifoliadas, plantaciones forestales y manglares, para establecer lineamientos técnicos y generar herramientas que contribuyan al uso y aprovechamiento sostenible del recurso forestal a nivel nacional (INAB et al., 2016).

Según Zacarías C. (2022), en las PPMF que se encuentran en el país, en ecosistemas manglares, se lleva a cabo la medición de variables dasométricas, como la altura y el diámetro a la altura del pecho (DAP) en los árboles que se encuentran dentro de estas parcelas, dicha información recolectada en campo sirve posteriormente como

base para el cálculo de otras variables como biomasa, volumen, cobertura forestal, entre otras. El trabajo de campo realizado por personal de Región IX de INAB para la obtención de estos datos requiere, entre otros factores, tiempo e inversión económica, por lo cual debe ser un proceso de medición óptimo y eficiente con relación a los factores mencionados.

La altura total de los árboles resulta difícil de medir en esta especie, debido a las condiciones del terreno en donde crece, lo cual dificulta la movilidad del personal a cargo del monitoreo para poder tomar el dato exacto de dicha variable, esto implica que muchas veces puede estar sujeta a errores en su medición, por el contrario, el DAP puede ser medido de forma fácil, precisa, rápida y económica (Castillo Gallegos et al., 2018). Por lo tanto, es muy importante evaluar si existe una relación entre estas dos variables, para estimar la altura total del árbol en función del diámetro del fuste, en la especie *Rhizophora mangle* L., la cual, según el INAB (2011), es la de mayor representación (45%) en las PPMF, con el fin de disminuir el tiempo empleado y la inversión económica en los procesos de medición y remediación, como parte del monitoreo realizado por la institución.

III. Hipótesis

La altura de los árboles de la especie *Rhizophora mangle* L., presenta una relación con el diámetro normalizado de los mismos.

IV. Objetivos

4.1 Objetivo general

- Formular un modelo matemático que permita la estimación de la altura de los árboles de la especie *Rhizophora mangle* L., para uso en las Parcelas Permanentes de Medición Forestal -PPMF- del ecosistema manglar.

4.2 Objetivos específicos

- Medir el diámetro normalizado y la altura de los individuos seleccionados en campo, dentro del área de estudio.
- Relacionar las variables dasométricas tomadas en campo para calcular el modelo matemático que mejor se ajuste al estudio realizado.
- Comparar la altura estimada con la altura real de cada árbol seleccionado para la validación del modelo.

V. Revisión de literatura

5.1 Ecosistema manglar

Es un hábitat que se encuentra en la transición entre el entorno terrestre y acuático de áreas tropicales y subtropicales, ubicándose en suelos pantanosos y aguas tranquilas. Posee una amplia biodiversidad y proporciona varios servicios ecosistémicos.

Según el Organismo Ejecutivo de Guatemala (2019), los manglares son un ecosistema tropical y subtropical de la zona intermareal, que relaciona las especies de árboles de diferentes familias, denominadas mangles, con otras plantas, con animales que allí habitan permanentemente o durante algunas fases de su vida y con las aguas, los suelos y otros componentes del ambiente.

Estos ecosistemas tienen en su hábitat un gran número de especies de fauna, donde su biodiversidad adquiere un grado significativo caracterizándolo como un bosque protector. Según Sánchez (1992), la importancia de los manglares radica en tres aspectos, el primero es actuar como filtro de las escorrentías que llegan al mar, segundo, subsidian los ecosistemas litorales exportando materia orgánica y tercero, constituyen el hábitat de muchas especies animales.

Muchos manglares se desarrollan alrededor de las lagunas costeras, esteros y desembocadura de ríos y arroyos. En estas áreas, a nivel mundial, se llevan a cabo importantes actividades pesqueras artesanales que aportan alimento y desarrollo económico a comunidades asentadas en la costa. Asimismo, parte de la actividad pesquera de las zonas costeras existe en virtud de que distintas especies que se aprovechan comercialmente tuvieron al manglar como zona de crianza y crecimiento desde las primeras fases de su ciclo de vida. (Díaz J., 2011)

Los manglares son lugares con características de adaptación muy difíciles para el hombre, a pesar de ello allí se han asentado comunidades que se proveen de dicho ecosistema para su sustento, en muchos casos de una manera tradicional y sostenida, hasta el punto en que el uso se hace comercial o cuando las comunidades crecen en población, así las existencias no son suficientes, consumen los recursos y terminan modificando el medio. (Villalba, 2006)

Figura 1.

Ecosistema manglar presente en el área de estudio, finca “Tamashan”, Retalhuleu, Retalhuleu.



Nota: Gordillo, B., 2022.

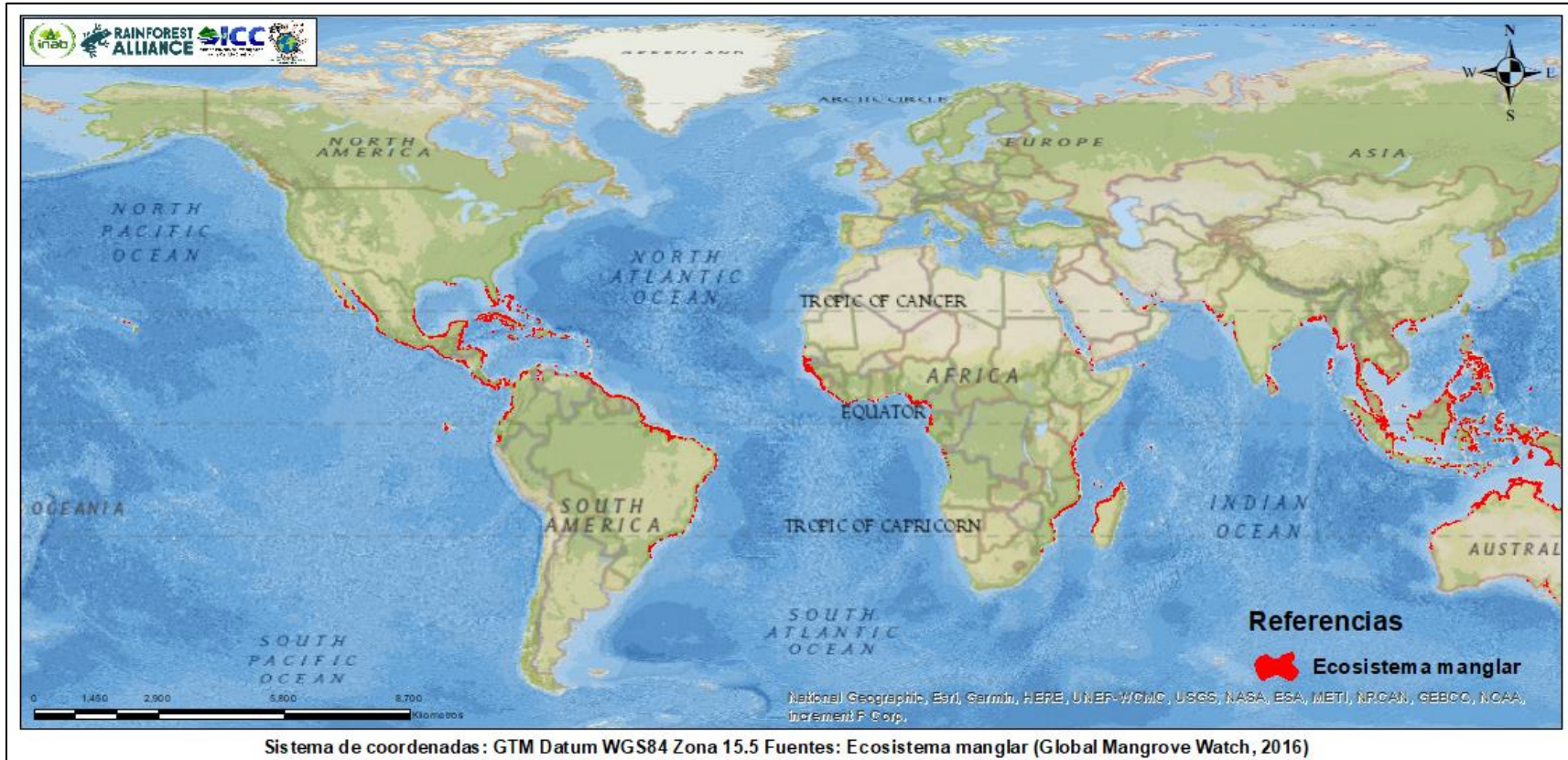
5.2 Especies manglares y su distribución

La mayor cantidad de manglares se encuentran en Asia (42%), seguidos por África (20%), América del Norte y Central (15%), Oceanía (12%) y América del Sur (11%). Aproximadamente el 75% de los manglares se concentra en solo 15 países (Giri et. al, 2010).

En Guatemala los manglares se ubican en las costas del Atlántico, Pacífico y en el departamento de Petén (zona interna del continente) estos bosques se caracterizan por crecer en áreas inundadas por las aguas que aportan los océanos y ríos (INAB, 2019). Según Sánchez (2022), los bosques manglares se ubican en los esteros de los ríos de la Costa Sur, formando rodales aislados o conectados a través de canales. En el norte del país, estos ecosistemas se encuentran en la bahía de La Graciosa y Punta de Manabique.

Figura 2.

Distribución del ecosistema manglar a nivel global.



Nota: Modificado por: Gordillo, B., 2022. Obtenido de: Global Mangrove Watch, 2016.

Figura 3.

Distribución del ecosistema manglar Guatemala.



Nota: Modificado por: Gordillo, B., 2022. Obtenido de: Instituto Nacional de Bosques, 2019.

Figura 4.

Especies manglares presentes en Guatemala.

Mangle rojo o colorado
(Rhizophora mangle)



Mangle rojo
(Rhizophora racemosa)



Mangle blanco
(Laguncularia racemosa)



Mangle negro
(Avicennia germinans)



Ixtatén o mangle negro
(Avicennia bicolor)



Mangle botoncillo
(Conocarpus erectus)



Nota: Modificado por: Gordillo, B., 2022. Obtenido de: Domínguez, A., 2021.

Según Zacarías y Sánchez (2019), en el país se encuentran 6 especies arbóreas de manglar: mangle colorado o rojo (*Rhizophora mangle* L.), mangle rojo (*Rhizophora racemosa* G. Mey.), mangle blanco (*Laguncularia racemosa* L. Gaertn. f.), mangle negro o madresal (*Avicennia germinans* L.), mangle negro (*Avicennia bicolor* Standl) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus* L.).

5.3 Especie manglar en estudio

5.3.1 *Rhizophora mangle* L.

Comúnmente es conocido como mangle rojo o colorado, debido al color de su madera y pertenece a la familia Rhizophoraceae, este es un árbol perenne considerado como una especie rara debido a lo restringido de su hábitat circunscrito en lagunas costeras y bahías protegidas de la acción física del oleaje y mareas. Alcanza su máximo desarrollo estructural en ambientes con bajos niveles de estrés ambiental y antropogénico. (Muñiz Salazar et al., 2013)

Según Claudia M. Agraz-Hernández (2007), se encuentran sometidos en condiciones de mayor inmersión del suelo y con bajos rangos de salinidad entre 0 a 37 unidades prácticas de salinidad (ups), con tolerancia de hasta 65 ups.

5.3.1.1 Descripción de la especie

Estos árboles, pueden llegar a medir hasta 30 m de altura o se pueden encontrar como arbustos, depauperados y muy ramificados. Sus hojas tienen forma elíptica y pueden tener dimensiones entre 5 a 20 por 2 a 10 centímetros (cm), con un ápice agudo y un pecíolo de 1 a 4 cm; sus estípulas miden entre 3 a 7 cm. Se encuentra en zonas de marea, lagunas estuarinas y costeras, de aguas salobres. (INAB, 2019)

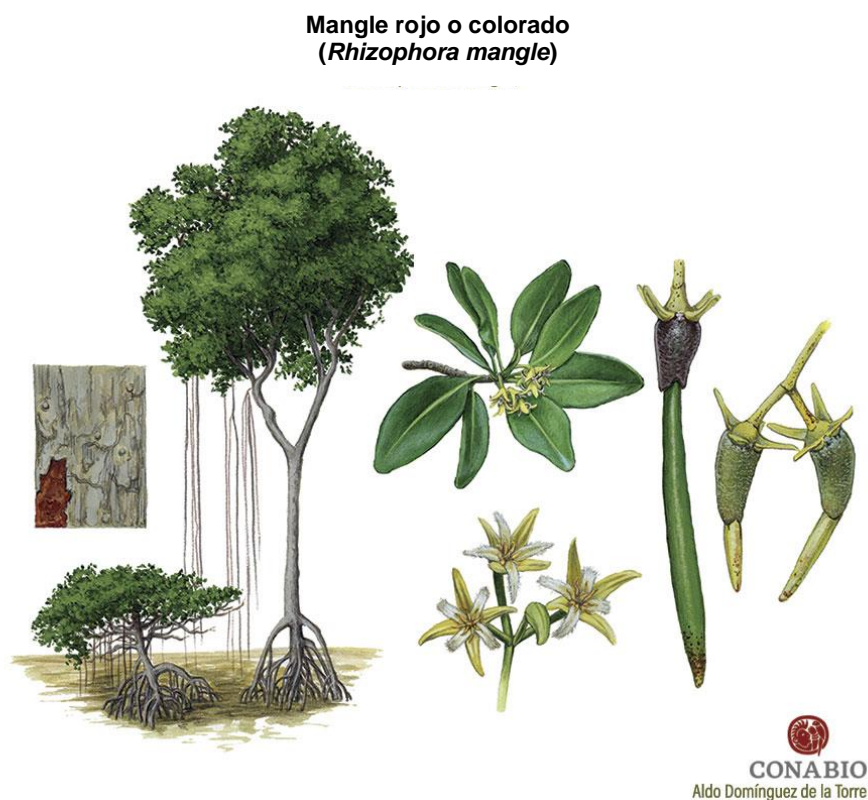
5.3.1.2 Distribución

Se encuentra desde México hasta el norte de Ecuador en la costa Pacífico y de México a Brasil en la costa oeste del Atlántico. Se localiza además en la costa oeste de África desde Angola hasta Mauritania (SEMARNAT, 2017). Según INAB (2019) su distribución es la de mayor de abundancia en todo el Pacífico y Atlántico de Guatemala.

Cabe resaltar que ésta especie está reportada dentro del área protegida de la Laguna del Tigre ubicada en el departamento de Petén.

Figura 5.

Especie Rhizophora mangle L.



Nota: Modificado por: Gordillo, B., 2022. Obtenido de: Domínguez, A., 2021.

5.4 Parcelas permanentes de medición forestal -PPMF-

Son sitios de investigación permanentes que permiten realizar mediciones de manera periódica, que son de utilidad para fines descriptivos. Una red de parcelas permanentes de monitoreo -PPM- puede ser distribuida al azar, de una manera aleatoria, o seguir un diseño; del tamaño y ubicación de un conjunto de parcelas permanentes de muestreo se obtiene el análisis de cierta información básica: variabilidad de las condiciones abióticas del sitio; tipos de bosque, en términos de composición, densidad de individuos, área basal, volúmenes totales, entre otros. (Brumér, 2002)

Se denominan unidades experimentales que pretenden generar conocimiento acerca de la dinámica de los mismos incluyendo crecimiento, productividad y en función de ello establecer lineamientos técnicos y otras herramientas de decisión tanto para el uso y aprovechamiento sostenido de los recursos forestales, así como para su conservación, protección y restauración. (Instituto Nacional de Bosques; Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático; Consejo Nacional de Áreas Protegidas, 2016)

5.4.1 Importancia de las parcelas permanentes de medición forestal

Las parcelas permanentes generan información sobre el estado y dinámica de los bosques, proporcionando un mejor sustento para la planificación, diseño de políticas, estrategias y directrices, así como también conservación y manejo sostenible a los diferentes ecosistemas forestales del país (INAB, 2012). Esto permite generar documentos metodológicos y estudios que permiten entender la biodiversidad y las modificaciones ecológicas que ocurren en los recursos y así evidenciar las diversas variables y su comportamiento con el entorno.

Dentro de la información que se recolecta en los monitoreos realizados en las PPMF, se encuentran los datos de la medición de variables dasométricas, importantes para el cálculo de otras variables del bosque, tales como volumen, área basal, biomasa, entre otros.

5.5 Variables dasométricas

Es la determinación o estimación de las dimensiones de medida en los árboles. Para su medición, el árbol, arbusto o planta, es tratado como un ente numérico, es decir, un cuerpo sólido que se asemeja a un cilindro, en el cual se pueden medir el diámetro y la altura. (Brumér, 2002)

5.5.1 Diámetro

Es la medida de longitud que indica la distancia entre los extremos de una circunferencia.

5.5.1.1 Diámetro a la altura del pecho

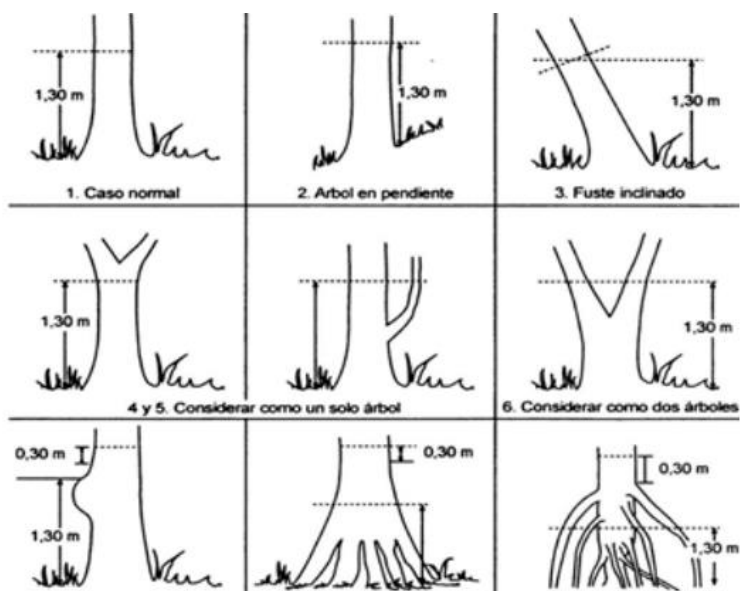
Conocido por su abreviatura DAP, es la medición que se realiza a una altura de 1.30 m sobre el nivel del suelo. (Félix, 2014)

5.5.1.2 Diámetro normalizado. Este se toma en cualquier sección del fuste, cuando el árbol presenta algún defecto que dificulta medir el DAP. En el género *Rhizophora* se toma 30 centímetros arriba de la última raíz fúlcrea anclada que nace en el fuste principal o arriba de cualquier defecto. Se abrevia como DN. (INAB et al., 2016)

Según el Ministerio de Ambiente de Colombia (1998), cuando el árbol tiene defectos en su tronco a la altura del DAP o raíces grandes y muy altas, como en el caso del mangle rojo, el diámetro se mide a unos 30 centímetros arriba de la última raíz o del defecto.

Figura 6.

Consideraciones para la medición del DAP o DN en un árbol.



Nota: Obtenido de: Instituto Nacional de Bosques; Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático y Consejo Nacional de Áreas Protegidas (2016).

Para el almacenamiento de la información sobre esta variable, el Instituto Nacional de Bosques, clasifica los datos en clases diamétricas, un intervalo que agrupa a los árboles con un diámetro desde 5 hasta 94.99 centímetros. Esto permite tener un mejor control de la base de datos, permitiendo sesgar el estudio de la dinámica de los bosques, tanto de árboles jóvenes como árboles adultos.

Tabla 1.

Clases diamétricas utilizadas por el INAB para la clasificación de los árboles de mangle según su diámetro.

Clases diamétricas		
5-9.99 cm	35-39.99 cm	65-69.99 cm
10-14.99 cm	40-44.99 cm	70-74.99 cm
15-19.99 cm	45-49.99 cm	75-79.99 cm
20-24.99 cm	50-54.99 cm	80-84.99 cm
25-29.99 cm	55-59.99 cm	85-89.99 cm
30-34.99 cm	60-64.99 cm	90-94.99 cm

Nota: Instituto Nacional de Bosques, 2011.

5.5.2 Altura

Según INAB et al. (2016), la altura total es la longitud que se mide en un árbol desde el suelo hasta el ápice de su copa. Sirve para estimar el volumen total, el crecimiento de un árbol, el índice de sitio, altura dominante, entre otros. Para su medición se utiliza un hipsómetro.

5.6 Relación diámetro - altura

La estimación de la altura total de un árbol o grupo de árboles es una de las mediciones requeridas para la toma de decisiones sobre el manejo de una plantación y para los trabajos de investigación sobre crecimiento y rendimiento. (Arias, 2004)

La relación diámetro - altura se utiliza, principalmente, para caracterizar la estructura vertical de las masas forestales; es decir, simula el crecimiento forestal, estima el volumen de los árboles individuales o de la masa y determina la altura dominante con el propósito de evaluar la calidad de la estación. Su conocimiento es importante también en otros contextos, los cuales incluyen la estimación de biomasa forestal, simulación de

la dinámica de masas forestales y el análisis de las bases teóricas del crecimiento de árboles. (Guzmán, y otros, 2019)

Según Larsen & Hann (1987), una aplicación de la relación entre estas dos variables es la posibilidad de predecir la altura de los árboles en función de la variable de más fácil medición.

5.7 Modelos matemáticos

Al representar en forma matemática los elementos y relaciones que intervienen en un problema, se tienen algunas ventajas: permite la utilización de los instrumentos matemáticos ya desarrollados en la consecución de una solución y proporciona una manera sistemática, explícita y eficiente de encontrarla. También es útil para predecir y comparar el comportamiento de la situación representada frente a diferentes alternativas o en diferentes momentos. (Narro, 1996)

Un modelo matemático es un modelo que utiliza fórmulas matemáticas para representar la relación entre distintas variables, parámetros y restricciones. (Roldán, 2019)

Los pasos a seguir para construir un modelo matemático, según Roldán (2019) son:

- Encontrar un fenómeno o problema.
- Formular un modelo representando el problema elegido identificando las variables relevantes (dependientes e independientes).
- Establecer hipótesis y un método de prueba de su veracidad.
- Aplicar los conocimientos matemáticos para resolver el modelo y hacer predicciones si es necesario.
- Hacer comparaciones de los datos obtenidos con datos reales.
- Si los resultados no se ajustan a lo esperado, ir ajustando el modelo matemático.

Al establecer una relación entre las variables en estudio, puede llevarse a cabo un análisis de regresión, lo que permite observar el grado de dependencia entre la variable independiente y la variable respuesta.

5.7.1 Análisis de regresión

Es una herramienta de frecuente uso en estadística, la cual permite investigar las relaciones entre diferentes variables cuantitativas. Esto, mediante la formulación de ecuaciones matemáticas. Visto de otro modo, dicho análisis es un proceso o modelo que analiza el vínculo entre una variable dependiente y una o varias variables independientes. Así, a partir de dicho estudio, se halla una relación matemática. (Galán, 2016)

Es la técnica estadística más utilizada para investigar o estimar la relación entre las variables dependientes y un conjunto de variables explicativas independientes. (Dzib, 2022)

Según Ferre Jaén (2019), la regresión es el conjunto de técnicas usadas para explorar y cuantificar la relación de dependencia entre una variable cuantitativa llamada variable dependiente o respuesta y una o más variables independientes llamadas variables predictoras.

El primer paso para determinar si puede existir o no dependencia/relación entre variables es representando gráficamente los pares de valores observados mediante una nube de puntos, lo que se conoce como diagrama de dispersión. (IBM SPSS Statistics, 2014)

5.7.1.1 Diagrama de dispersión

Los diagramas de dispersión o gráficos de correlación permiten estudiar la relación entre 2 variables. Dadas 2 variables X e Y, se dice que existe una correlación entre ambas si cada vez que aumenta el valor de X aumenta proporcionalmente el valor de Y (correlación positiva) o si cada vez que aumenta el valor de X disminuye en igual proporción el valor de Y (correlación negativa). (Cristobal, 2003)

Para entender de mejor forma, los datos que se encuentran dispersos en dicho diagrama, se puede hacer uso de una línea de tendencia (CK-12 Foundation, 2021).

5.7.1.2 Línea de tendencia

Es una línea que representa de mejor manera los puntos en un diagrama de dispersión, puede atravesar algunos puntos, pero no necesariamente los atraviesa todos. Es utilizada para mostrar el patrón que siguen los datos y puede mostrar una tendencia positiva o una tendencia negativa. (CK-12 Foundation, 2021)

Según Minnaard (2010), las líneas de tendencia se presentan como una función que describe aproximadamente a los datos dispersos en un diagrama, entre dichas funciones, las más utilizadas son las siguientes:

- Polinomiales: Es una función cuya expresión algebraica es un polinomio, es decir, una función polinómica está definida por la suma o resta de un número finito de términos de diferente grado.
- Exponenciales: se representan como una potenciación de la forma $f(x) = b^x$, donde $b > 0$ y $b \neq 1$. Al igual que cualquier expresión exponencial, b se llama base y x se llama exponente.
- Logarítmicas: Las funciones logarítmicas son funciones del tipo $f(x) = \log_a x$, donde a (la base) es un número real mayor que cero y distinto de 1.

Los diagramas de dispersión, en conjunto con las líneas de tendencia, son fundamentales para determinar un modelo de regresión.

5.7.2 Modelos de regresión

El objetivo principal de construir un modelo de regresión puede ser, por ejemplo, evaluar cómo afecta el cambio en unas características determinadas (variables independientes) sobre otra característica en concreto (variable dependiente), denominado modelo con fines explicativos; o también podría ser, intentar estimar o aproximar el valor de una característica (variable dependiente) en función de los valores que pueden tomar en conjunto otra serie de características (variables independientes), denominado entonces modelo con fines predictivos (Moral Peláez, 2006).

Para elegir el mejor modelo de regresión, ajustado al estudio realizado, es fundamental estudiar la bondad de ajuste.

5.7.2.1. Bondad de ajuste

Por bondad del ajuste hay que entender el grado de acoplamiento que existe entre los datos originales y los valores teóricos que se obtienen de la regresión. Obviamente cuanto mejor sea el ajuste, más útil será la regresión a la pretensión de obtener los valores de la variable regresando a partir de la información sobre la variable regresora. (Lejarza, 2022)

En la evaluación de la bondad de ajuste de un modelo de regresión, se pueden utilizar parámetros que indican que tan estrecha y precisa es la relación entre las variables estudiadas, entre dichos parámetros se encuentran los siguientes:

5.7.2.2 Coeficiente de determinación (R^2)

Es una medida estadística que indica qué tan cerca están los datos de la línea de regresión ajustada. Es el porcentaje de la variación en la variable de respuesta. Generalmente se encuentra entre 0 y 1, mientras más cercano a 0, indica que el modelo no explica ninguna porción de la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media, mientras que para valores cercanos a 1, éste indicaría que el modelo explica toda la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media. En conclusión, cuanto mayor es el R-cuadrado, mejor se ajusta el modelo a los datos estudiados. (Minitab, 2019)

Según Minnaard (2010):

- El coeficiente de determinación toma valores entre 0 y 1. ($0 \leq R^2 \leq 1$).
- Todo ajuste mínimo cuadrático debe venir acompañado de su respectivo coeficiente de determinación para poder conocer el poder representativo de la función de ajuste, es decir el valor explicativo del modelo.

5.7.2.3 Coeficiente de correlación (r)

Es una herramienta estadística elemental e importante para el estudio econométrico de relaciones lineales bivariadas que involucran el uso de datos de corte transversal o series de tiempo (Lahura, 2003).

La correlación es una medida de la relación (covariación) lineal entre dos variables cuantitativas continuas (x, y). La manera más sencilla de saber si dos variables están correlacionadas es determinar si co-varían (varían conjuntamente) (Vinuesa, 2016).

5.7.2.4 Criterio de información de Akaike

Utilizado ampliamente en el campo de la biología y la econometría, es una herramienta objetiva que permite cuantificar la idoneidad de un modelo particular en relación con un conjunto finito de modelos (Martínez, y otros, 2009). Es una medida de la bondad de ajuste de un modelo estadístico. Se puede decir que describe la relación entre el sesgo y varianza en la construcción del modelo, o hablando de manera general, acerca de la exactitud y complejidad del modelo (Camargo, 2019)

5.7.2.4 Prueba t para muestras pareadas

Es un procedimiento que compara las medias de dos variables de un solo grupo. El procedimiento calcula las diferencias entre los valores de las dos variables de cada caso y contrasta si la media difiere de 0. (International Business Machines, 2021)

Según Dietrichson (2019), esta prueba paramétrica, es utilizada a menudo en investigaciones experimentales en las que se mide la variable dependiente antes y después de cambiar la variable independiente. En esta prueba, se calculan las diferencias entre las dos medidas y se comparan estas diferencias con la distribución teórica.

5.8 Área de estudio

5.8.1 Finca “Tamashan”

Se encuentra al sureste del municipio de Retalhuleu departamento de Retalhuleu, Latitud 14°29'56.52"N; Longitud 92° 8'1.72"O, colindando al oeste con el departamento de San Marcos.

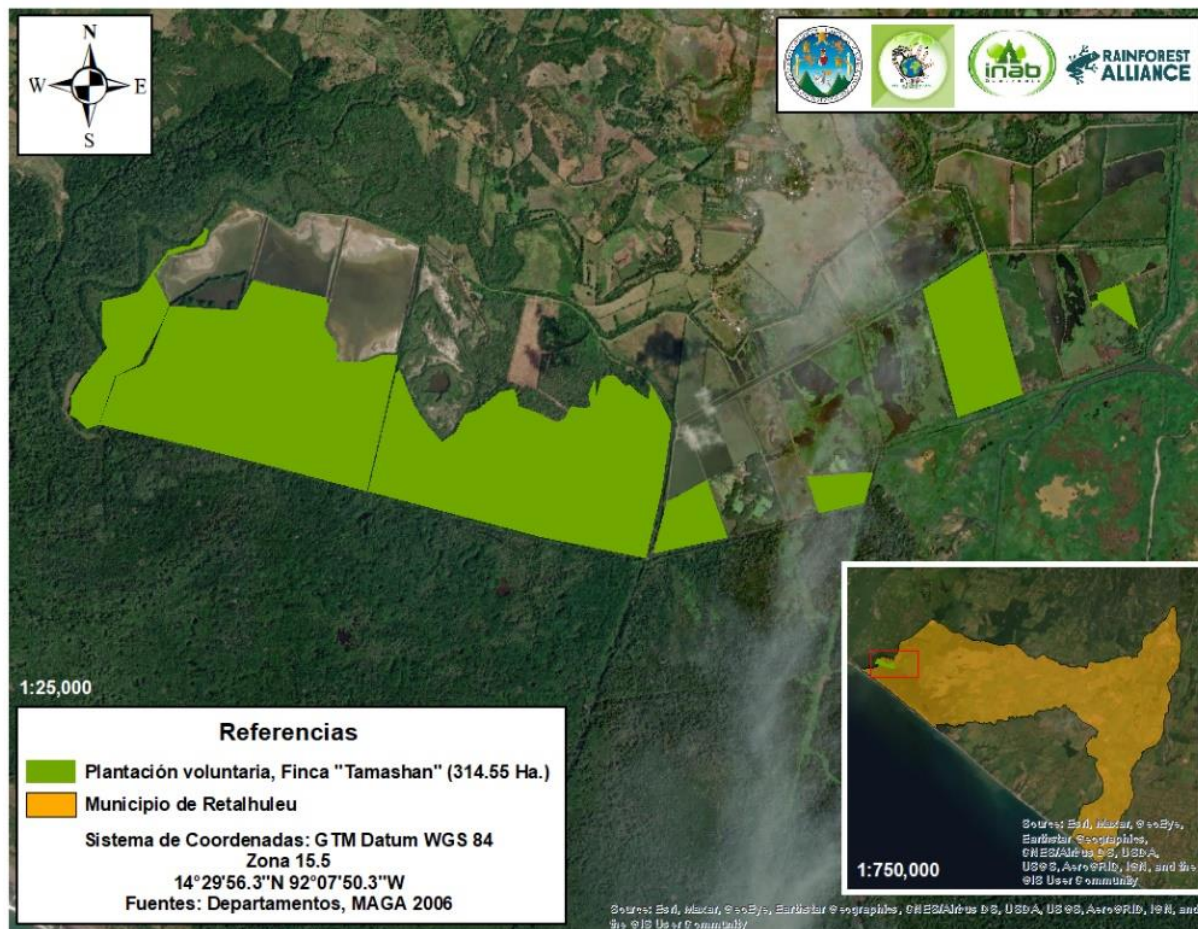
Según el expediente 93-036-3.2.1-2020 de INAB (Agustín & Méndez, 2020), la finca cuenta con 314.55 hectáreas (ha.) de bosque manglar, de las cuales 32.03 hectáreas son de la especie *Rhizophora mangle* L., que ha sido seleccionada para el presente estudio. Dicho bosque, es una plantación forestal voluntaria, por lo que, su administración y medidas de conservación están a cargo de su propietario. (Finca Tamashan, 2022)

Según Zacarías (2022), la finca comercializa el recurso forestal extraído del bosque manglar presente en dicha área, a su vez, reforestan las áreas aprovechadas de manera periódica, haciendo de esta forma, un manejo sostenible de dicho recurso, como se dicta en los compromisos adquiridos con el Estado, tras su aprobación como plantación voluntaria.

5.8.2 Mapa de localización

Figura 7.

Mapa de ubicación de la finca "Tamashan".



Nota: Modificado por: Gordillo, B., 2022. Obtenido de: Agustín y Méndez, 2020.

VI. Materiales y métodos

La metodología y los materiales necesarios para llevar a cabo esta investigación, se describen en el siguiente inciso:

6.1 Materiales

Para la correcta elaboración y ejecución de la presente investigación, se emplearon los materiales descritos a continuación:

Tabla 2.

Descripción y costo del recurso humano empleado para la investigación.

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio por día	Precio total	Observaciones
1	Obrero forestal*	Q120.00	Q120.00	Q600.00	Encargado de motosierra
2	Asistentes de medición*	Q120.00	Q240.00	Q1,200.00	Encargados de medición de árboles
1	Auxiliar de campo*	Q120.00	Q120.00	Q600.00	Guía dentro del área de estudio
Total				Q 2,400.00	

Nota: Gordillo, B., 2022. *Financiado por Rainforest Alliance Inc.

Tabla 3.

Descripción y costo de la logística en el trabajo de campo para la investigación.

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio por día	Precio total	Observaciones
5	Alimentación*	Q60.00	Q180.00	Q900.00	Consumo propio

10	Agua pura*	Q5.00	Q50.00	Q250.00	Consumo del equipo de trabajo
5	Hospedaje*	Q150.00	Q150.00	Q750.00	Consumo propio
1	Transporte*	Q20.00	Q40.00	Q200.00	Uso propio
Total				Q 2,100.00	

Nota: Gordillo, B., 2022. *Financiado por Rainforest Alliance Inc.

Tabla 4.

Descripción y costo de los materiales utilizados para la investigación.

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio por día	Precio total	Observaciones
1	Aceite para motor 2T*	Q38.00	N/A	Q38.00	Para uso de la motosierra
6	Combustible (Galón)*	Q39.00	N/A	Q234.00	Para vehículo y motosierra
1	Botiquín de primeros auxilios*	Q1,300.00	N/A	Q1,300.00	Para uso del equipo de trabajo en caso de emergencias
1	Equipo de cómputo	(Ya se cuenta con dicho equipo)			Marca Dell, modelo Inspiron 3585
1	Lapicero	(Ya se cuenta con dicho material)			Para anotaciones en campo
1	Libreta para anotaciones	(Ya se cuenta con dicho material)			Para anotaciones en campo

1	Cinta métrica	(Ya se cuenta con dicho material)	Para medición de alturas
1	Cinta diamétrica	(Ya se cuenta con dicho material)	Para medición de diámetros
Total			Q 1,572.00

Nota: Gordillo, B., 2022. *Financiado por Rainforest Alliance Inc.

Tabla 5.

Descripción y costo de los recursos digitales empleados en la investigación.

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio por día	Precio total	Observaciones
	Software				
1	ArcGIS ® 10.8*	Q 769.48	N/A	Q 769.48	Licencia anual
	Software				
1	Microsoft ® Excel*	Q469.99	N/A	Q469.99	Licencia anual
	Software				
1	Google™ Earth Pro	Q0.00	N/A	Q0.00	Licencia de uso libre
	Software				
1	InfoStat	Q0.00	N/A	Q0.00	Licencia de uso libre
	Software				
1	Curve Expert Professional	Q0.00	N/A	Q0.00	Licencia de prueba
Total			Q 1,239.47		

Nota: Gordillo, B., 2022. *Financiamiento propio.

Tabla 6.

Resumen de costos de la investigación inferencial realizada.

Descripción	Costo
Recursos humanos	Q 2,400.00
Logística	Q 2,100.00
Recursos materiales	Q 1,572.00
Recursos digitales	Q 1,239.47
Total	Q 7,311.47

Nota: Gordillo, B., 2022. *Financiado por Rainforest Alliance Inc.

6.2 Métodos

La metodología empleada para la presente investigación, se divide en tres fases, las cuales son descritas a continuación.

6.2.1 Revisión de la base de datos de las PPMF del ecosistema manglar

Se revisaron datos generales, diámetros y alturas de los árboles en las mediciones realizadas en los últimos años por el INAB, en las PPMF de la zona del Manchón Guamuchal, lugar donde se ubica el área de estudio, específicamente con la especie *Rhizophora mangle* L., esto con el objetivo de tener una base estadística, como un bosquejo de los datos que se encontraron en campo para llevar a cabo la investigación inferencial que se presenta en este documento.

Fue importante observar la cantidad de mediciones que se han realizado por cada clase diamétrica en las PPMF, lo cual está registrado en dicha base de datos, esto sirvió para priorizar la medición en campo de aquellos intervalos cuya representatividad es mayor, logrando así recolectar una muestra significativa del diámetro de los árboles.

Tabla 7.*Distribución de clases diamétricas en la zona del Manchón Guamuchal.*

Clase diamétrica (cm)	Número de árboles	Abundancia relativa %
5-9.99	1,773	49
10-14.99	415	11.5
15-19.99	468	13
20-24.99	344	9.5
25-29.99	245	6.8
30-34.99	131	3.6
35-39.99	106	3
40-44.99	62	1.77
45-49.99	36	1
50-54.99	24	0.
55-59.99	4	0.1
60-64.99	0	0
65-69.99	0	0
70-74.99	2	0.05
75-79.99	0	0
80-84.99	0	0
85-89.99	1	0.03
90-94.99	2	0.05

Nota: Obtenido de: Instituto Nacional de Bosques (2011).

Como se observa, los árboles más abundantes en el área de estudio, son aquellos cuyos diámetros están dentro del intervalo de 5 a 39.99 centímetros, por lo que fue imposible encontrar árboles con diámetros mayores dentro del área de estudio, tomando en cuenta que es el único lugar en el país donde se puede llevar a cabo la tala de árboles de mangle de manera legal.

Para poder realizar esta revisión fue necesario un equipo de cómputo, donde se ejecutó la hoja de cálculo con el software Microsoft® Excel, en la que se encuentra la base de datos en forma digital.

6.2.2 Medición de variables dasométricas

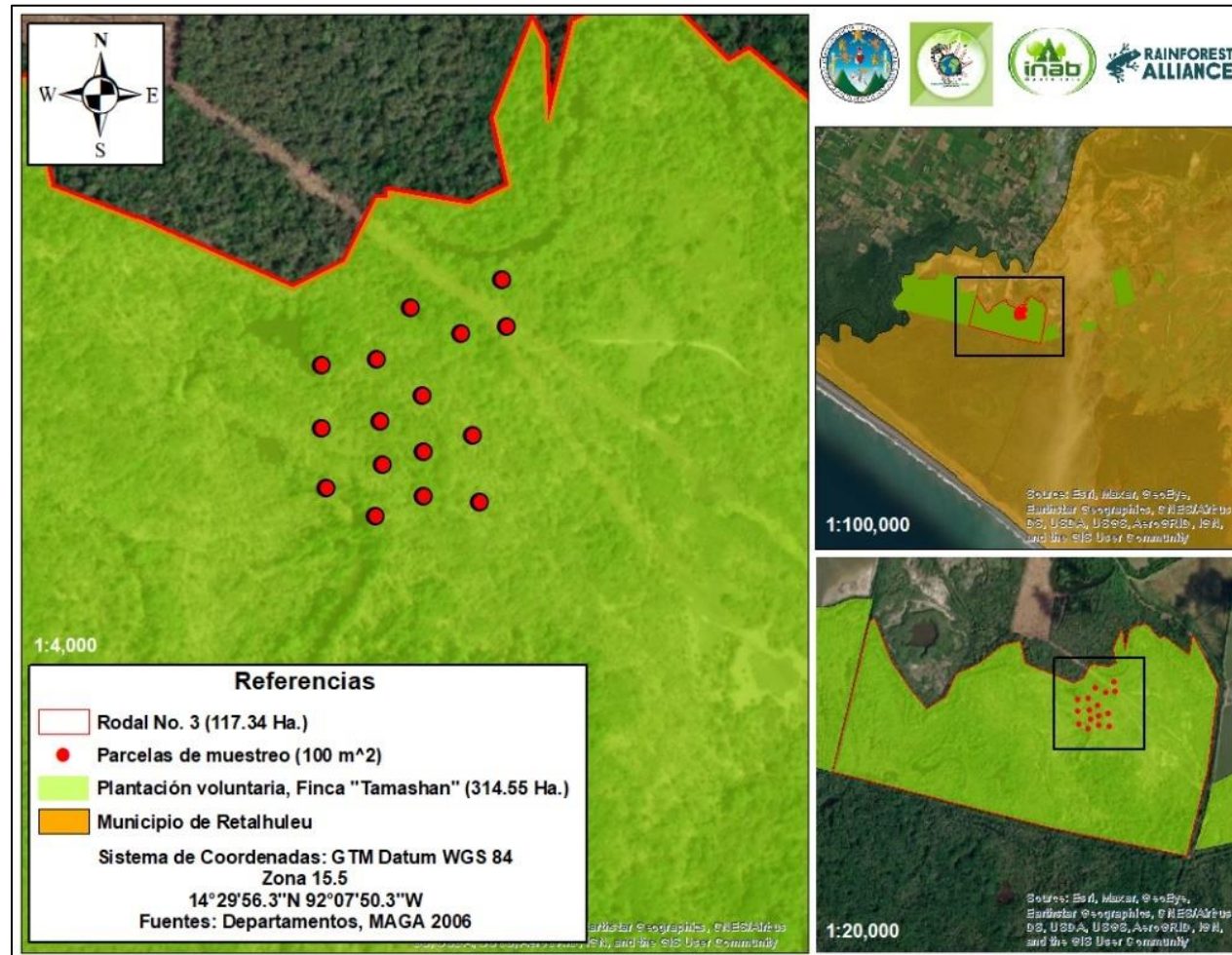
En el área asignada, en este caso, finca "Tamashan", Retalhuleu, se realizó la medición de las variables dasométricas requeridas para el cálculo del modelo matemático en los individuos de la especie *Rhizophora mangle* L.

La muestra tomada se basó en el muestreo por conveniencia, tomando como parámetro a seguir, el diámetro normalizado de los individuos. Dicha muestra fue tomada en el rodal 3, del área registrada como plantación voluntaria, dentro de la finca, en este rodal es donde se encuentra mayor abundancia de mangle rojo y su superficie es amplia, por lo que no se hizo una presión significativa sobre el ecosistema, derivado de la tala de árboles necesaria para llevar a cabo esta investigación.

En total se establecieron 16 puntos de muestreo, cada uno con forma circular, de una superficie de 100 metros cuadrados, con radio 5.64 metros, esto con el fin de obtener otros datos importantes para la investigación, tales como la densidad de árboles o el diámetro promedio. La medición de la superficie de cada punto se hizo de manera empírica, es decir, que se midieron 6 pasos como radio, aproximando la distancia de los 5.64 metros, que se menciona anteriormente, midiendo aquellos árboles de mangle rojo que se encontraron dentro de dicho círculo.

Figura 8.

Ubicación de puntos de muestreo dentro de la plantación voluntaria en finca "Tamashan".



Nota: Modificado por: Gordillo, B., 2022. Obtenido de: Agustín y Méndez, 2020.

Se inició con la medición de los árboles encontrados en el primer punto, avanzando de manera sucesiva hasta llegar al último punto de muestreo, clasificando a los individuos por clase diamétrica, obteniendo una muestra representativa acorde a la abundancia de árboles en la zona, la cual se detalla en la Tabla 2. Cabe destacar que la medición se realizó hasta observar una normalidad en la curva que describe la relación diámetro – altura, para ello fue de mucha utilidad el índice de determinación (R^2), que se agregó en la boleta digital de campo.

Para el registro de los datos que se recolectan en campo, se utilizó la boleta digital mencionada, la cual mostraba un diagrama de dispersión que permitió visualizar la tendencia de las mediciones, la función que describía dicha tendencia y el coeficiente de determinación del modelo ajustado.

Al finalizar la medición el recurso forestal necesario para la recolección de datos de campo en dicha medición fue aprovechado por la finca provecha para la comercialización de productos maderables ya que, al ser una plantación voluntaria, el manejo y aprovechamiento de este recurso está a cargo de su propietario, quien autorizó la colaboración entre dicho lugar y el INAB para llevar a cabo esta investigación inferencial.

Figura 9.

Boleta digital para el registro de los datos recolectados en campo.

Boleta de registro de datos en campo												
Datos generales												
Lugar:												
Institución responsable:												
Persona responsable:												
Fecha de medición:												
Medidores:												
No. De árbol	Estado físico	Ecología de crecimiento	No de ejes	No. De árboles/parcela (100m ²)	Densidad (árboles/hectárea)	Diámetro promedio por parcela	Diámetro normalizado (cm)	Altura de fuste (m)	Altura de raíces (m)	Altura de copa (m)	Altura total (m)	Clase diamétrica

Nota: Gordillo, B., 2022.

6.2.2.1 Medición del diámetro

Haciendo uso de una cinta diamétrica, se tomó la medida del diámetro normalizado de cada árbol, tomando en cuenta que éste tiene que ser representativo, siguiendo los lineamientos técnicos establecidos en la “Metodología para el establecimiento y mantenimiento de PPMF en bosque natural del ecosistema manglar” (INAB et al., 2016), especificados en la revisión de literatura de este documento.

Se midieron aquellos árboles con un DN > 5 cm, clasificándolos por clase diamétrica, dicha clasificación se hizo acorde a las clases diamétricas que establece la base de datos de PPMF elaborada por el INAB, la cual se puede observar en la Tabla 1 de este documento.

Figura 10.

Medición del diámetro normalizado de los árboles seleccionados.



Nota: Ramos, A., 2022.

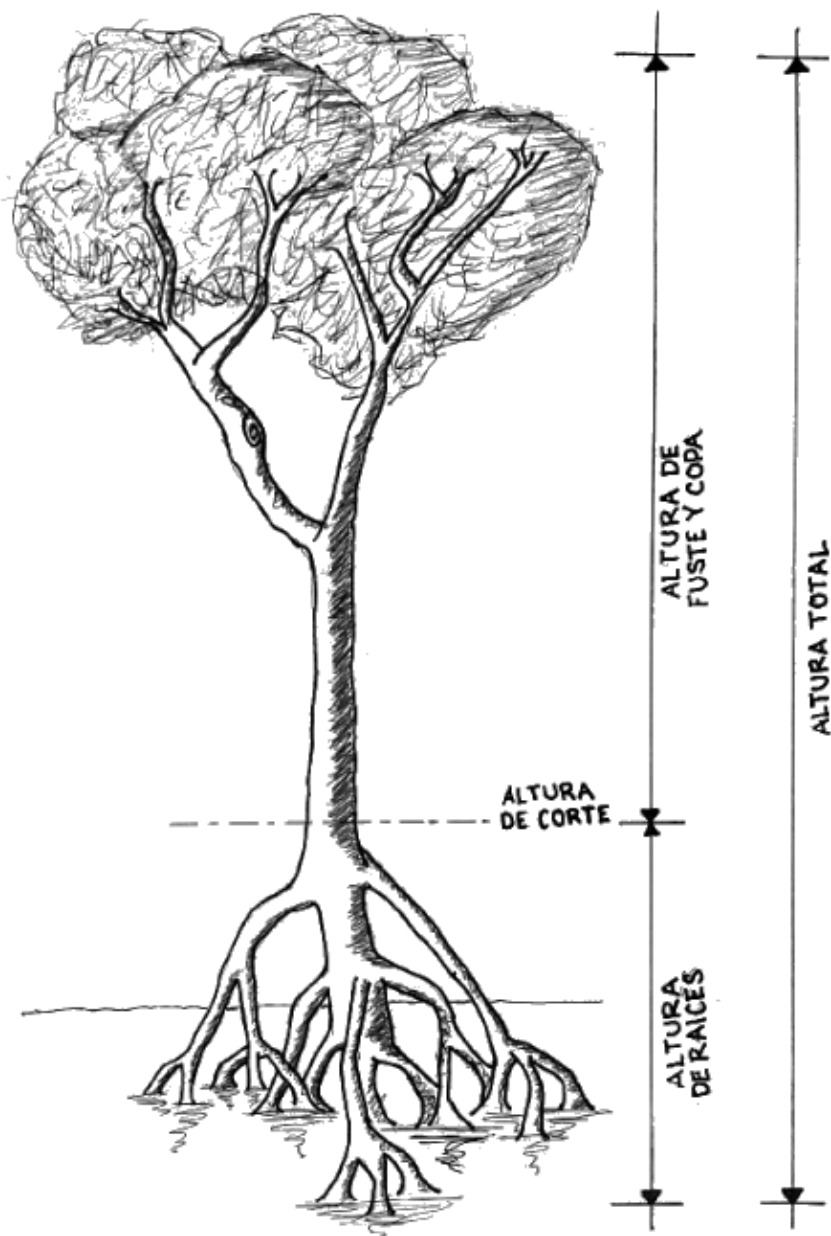
6.2.2.2 Medición de la altura total

Luego de haber realizado la medición del DN, los árboles fueron talados con una motosierra para medir sus respectivas alturas con una mejor precisión, para lo cual fue necesario utilizar una cinta métrica, que sirvió para calcular la longitud desde la base del

corte realizado hasta el ápice de la copa. Asimismo, se midió la altura desde la base del árbol hasta las raíces aéreas de cada individuo, utilizando también la cinta métrica, teniendo como resultado de la suma de las medidas, la altura total de cada árbol.

Figura 11.

Referencia ilustrativa de la altura medida en cada árbol.



Nota: Gordillo, B., 2022.

Figura 12.

Medición de la altura total de los árboles seleccionados luego de ser talados.



Nota: Gordillo, B., 2022.

5.2.2.3 Observación del estado físico y patrón de distribución. Para tener una idea del tipo de árboles que se abarcaron para la modelización de la ecuación, también se tomó en cuenta el estado físico de cada árbol, siendo este torcido, inclinado, bifurcado o recto, clasificación que se incluyó en la boleta digital de campo. Asimismo, se observó el patrón de distribución de los árboles medidos, tomando en cuenta que pueden estar agrupados, de forma individual o en grupo de ejes en un mismo individuo, lo cual también se anotó en dicha boleta.

5.2.2.4 Densidad de árboles por hectárea. Gracias a que los puntos de muestreo fueron en superficies con un área determinada, se pudo calcular la densidad de árboles por hectárea, lo cual es útil para saber en qué densidades se puede utilizar la ecuación calculada.

5.2.3 Modelización y análisis estadístico

Mediante el uso del software Excel, se elaboró una hoja de cálculo en la que se vaciaron los datos recolectados en campo (Ver Tabla 3), durante la ejecución de la metodología descrita en los incisos 5.2.1 y 5.2.2. En este caso, se obtuvieron las dos variables en estudio, las cuales son, el DN y la altura.

Una vez contenidos estos datos de manera digital en la hoja de cálculo, se generó un diagrama de dispersión, herramienta que se encuentra en la pestaña de *Gráficos*, estos diagramas se representan en dos ejes (x, y), donde el DN (Variable independiente) se ubicó en el eje horizontal y la altura total (Variable dependiente) se posicionó en el eje vertical. El diagrama de dispersión se insertó en la hoja de cálculo haciendo uso del mismo software, este diagrama permitió realizar un análisis gráfico del comportamiento de las variables estudiadas. Asimismo, permitió observar e identificar la tendencia que siguieron los datos, mediante la línea de tendencia insertada en el diagrama, donde se mostraron los distintos modelos matemáticos con los que se ajustó el estudio, basándose en el coeficiente de determinación (R^2).

Este procedimiento, también se llevó a cabo en el software Curve Expert Professional, el cual, con las herramientas *calculate straight-line regression* y *calculate non linear regression*, generó varios diagramas de dispersión de manera automática, que muestran los modelos mejor ajustados al estudio, los cuales, el programa ordena, de manera ascendente, mostrando los mejores modelos al inicio de la lista.

Al seleccionar cada modelo, se pueden visualizar las gráficas y otras pruebas paramétricas, además del R^2 , tales como, el coeficiente de correlación (r), el valor de AIC y el error típico, información importante para analizar cuál de las ecuaciones sugeridas es la más confiable y precisa.

Figura 13.

Modelos matemáticos sugeridos por el software Curve Expert Professional.

Name	Kind	Score
Natural Logarithm	Regression	788
Vapor Pressure Model	Regression	788
Rational Model	Regression	788
Modified Hoerl	Regression	788
Exponential Plus Linear	Regression	788
DR-LogProbit	Regression	787
Exponential Association 2	Regression	787
Logistic Power	Regression	787
Shifted Power	Regression	787
MMF	Regression	787
Weibull Model	Regression	787
Saturation Growth Rate	Regression	786
Exponential Association 3	Regression	786
Modified Geometric	Regression	786
Reciprocal Quadratic-YD	Regression	786
Bleasdale-YD	Regression	786
Farazdaghi-Harris-YD	Regression	786
Reciprocal-YD	Regression	786
Heat Capacity	Regression	785
Hoerl	Regression	785
Modified Exponential	Regression	784
Root	Regression	784
Gompertz Relation	Regression	783

Nota: Gordillo, B., 2022.

Posteriormente, se realizó un análisis gráfico y numérico de los residuales, es decir, la diferencia entre la altura real de los árboles y la altura estimada por los modelos generados en ambos programas. Para este procedimiento, además de Microsoft Excel ®, se utilizó el software InfoStat ®, en el cual, se generó una prueba *t* de muestras pareadas, para comparar ambas alturas.

En el programa Microsoft Excel ®, se calcularon los residuos absolutos, realizando una resta entre altura real y altura estimada, posteriormente, con la función PROMEDIO se determinó el sesgo (*e*) y el error medio y con la función SUMA.CUADRADOS se calculó el REMC de dichos residuos, asimismo se generó una gráfica que presenta todos los residuales y en la cual, se hace énfasis del mayor y el menor de los residuos, para mostrar la amplitud del error que presenta la ecuación.

Con el software InfoStat ®, se generó una prueba *t* de muestras pareadas, insertando la altura real de los árboles y la altura estimada por el modelo matemático. Dicha prueba paramétrica, se encuentra en la pestaña Estadísticas, específicamente en la herramienta *inferencia basada en dos muestras*. Esta prueba paramétrica genera la

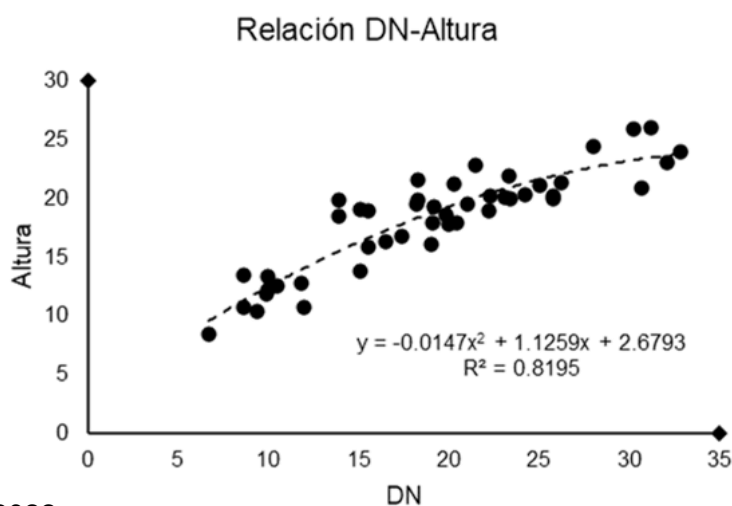
tabla de resultados, en la cual se muestra que tanta diferencia existe entre ambas muestras.

VII. Resultados y discusión

Con la medición de los 46 árboles tomados como muestra para la modelización de la ecuación, se obtuvieron 3 ecuaciones sugeridas por el software Microsoft Excel®, dicho programa, se basa en el índice de determinación (R^2), para la elección del modelo, las ecuaciones generadas, se presentan a continuación:

Figura 14.

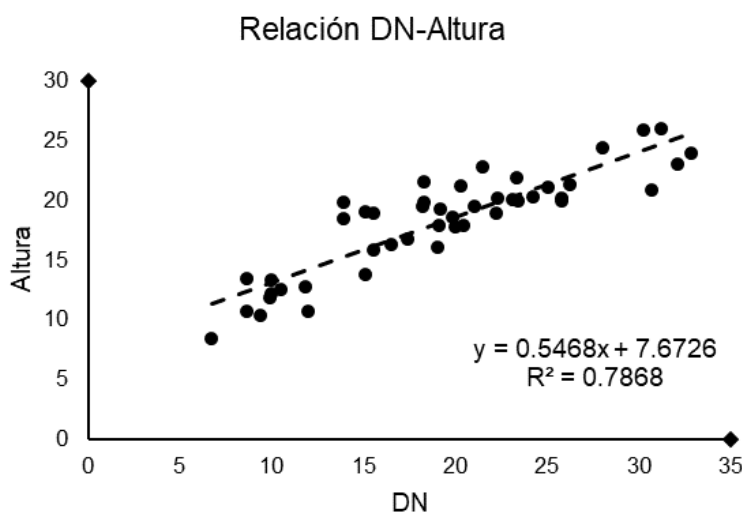
Modelo polinomial de segundo grado (cuadrático).



Nota: Gordillo, B., 2022.

Figura 15.

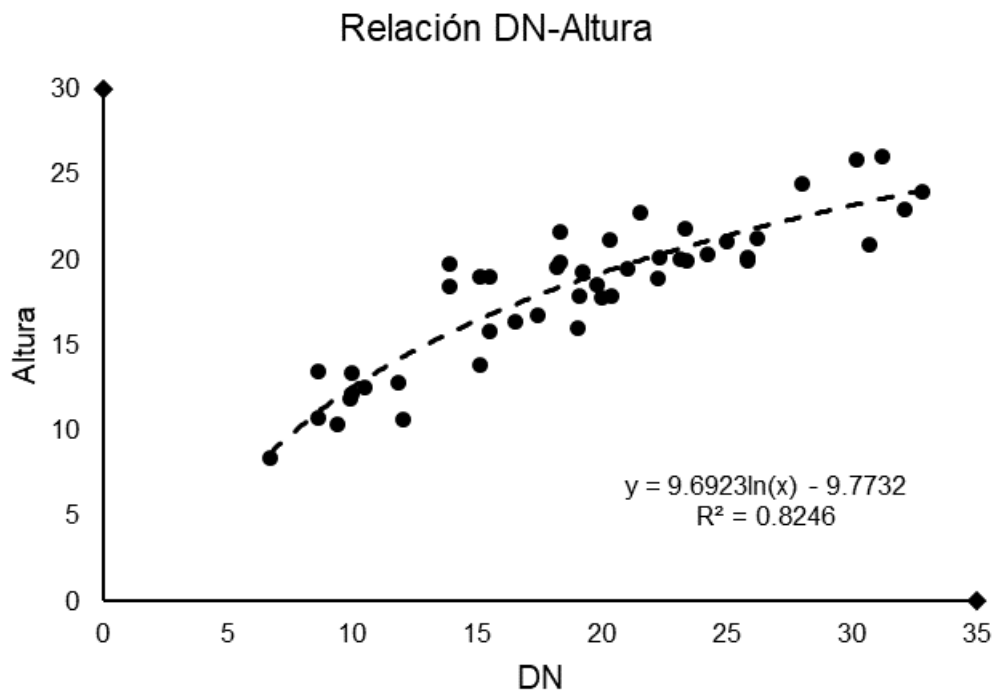
Modelo lineal.



Nota: Gordillo, B., 2022.

Figura 16.

Modelo logarítmico natural.



Nota: Gordillo, B., 2022.

Como se puede observar en las gráficas, el modelo mejor ajustado es el logarítmico natural con un índice de determinación alto y aceptable ($R^2 = 0.8246$), sin embargo, fue necesario evaluar otros criterios para la validación del modelo, utilizando también, otros softwares.

Derivado de ello, los datos recolectados, fueron analizados en el software Curve Expert Professional, para determinar si ambos programas coincidían en la elección del modelo y a su vez, tomar en cuenta otros modelos que podrían ser ajustados al estudio, evaluando otros criterios de validación.

Tabla 8.

Modelos sugeridos por el software Curve Expert Professional.

Modelo	Ecuación	Índice de determinación (R ²)	Coefficiente Correlación (r)	Criterio de Información Akaike (AIC)	Error típico
Logarítmico Natural	$y = a + b \cdot \ln(x)$	0.8246	0.9081	54.28	1.8032
Vapor Pressure	$y = \exp(a + b/x + c \cdot \ln(x))$	0.8246	0.9081	56.46	1.8238
Racional	$y = \frac{a+b \cdot x}{1 + c \cdot x + d \cdot x^2}$	0.8253	0.9084	58.59	1.8423

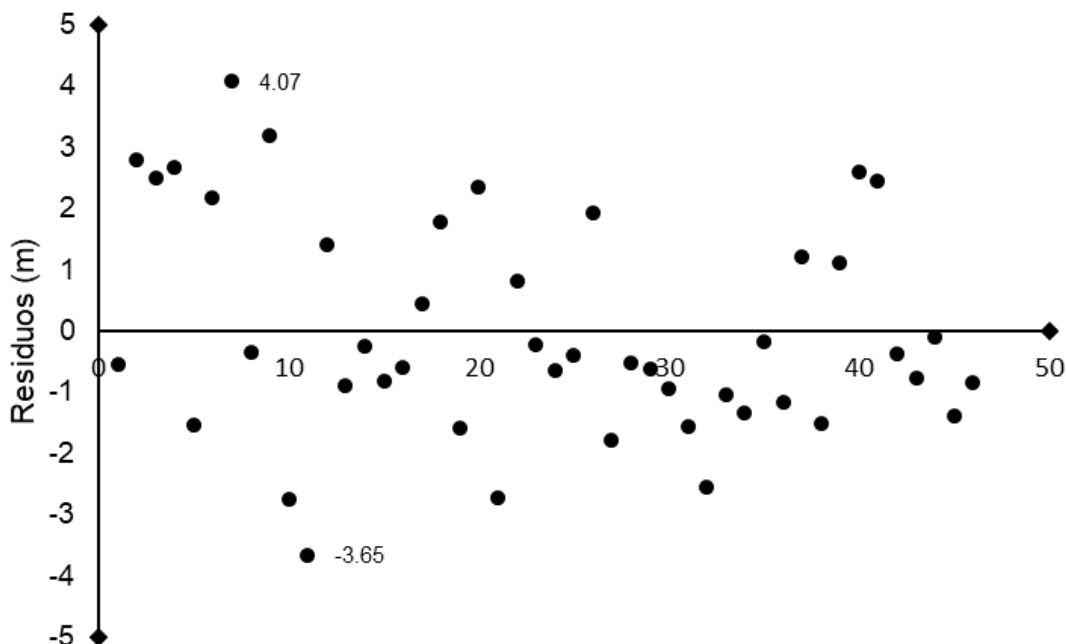
Nota: Gordillo, B., 2022.

En la tabla anterior se observa que el programa mencionado, sugiere otros dos modelos que pueden ajustarse al estudio, sin embargo, hay que prestar atención a otros criterios de selección del modelo, ya que, por ejemplo, el modelo racional, basándose únicamente en el R², podría parecer una mejor ecuación, pero tiene un error estándar más alto y un AIC mayor que el del modelo logarítmico natural. Bajo esa premisa, el modelo basado en logaritmo natural, de la familia de modelos exponenciales, es la ecuación mejor ajustada a la relación altura – diámetro que estudia esta investigación, ya que presenta una relación estrecha entre variables, indicada por el coeficiente de correlación ($r = 0.9081$) y es un modelo preciso y sencillo, según el criterio de información de Akaike, el cual indica que, siendo menor, el modelo es igual de preciso y a su vez menos complejo.

Para la validación del modelo, también fue fundamental el análisis gráfico de los residuos, entre altura real versus altura estimada por el modelo, para ello, se utilizó el software Microsoft Excel®, que se muestra a continuación.

Figura 17.

Análisis gráfico de residuales.



Nota: Gordillo, B., 2022.

Se pueden observar los residuos entre altura real versus altura estimada, que resultan de la diferencia entre la altura real de los árboles y la altura estimada por la ecuación seleccionada como modelo matemático para la estimación de alturas.

Con el programa InfoStat, se generó una prueba t de muestras pareadas, para determinar si existía una variación significativa que afectara el modelo. En esta prueba, la hipótesis nula, es que no hay diferencia significativa entre ambas muestras y la hipótesis alterna indica que si existe diferencia entre datos reales y estimados.

Figura 18.

Resultados de prueba t de muestras apareadas.

Prueba T (muestras apareadas)

Obs(1)	Obs(2)	N	media(dif)	Media(1)	Media(2)	DE(dif)	LI(95%)	LS(95%)	T	Bilateral
h	h est	46	0.00	18.16	18.16	1.78	-0.53	0.53	0.00	>0.9999

Nota: Gordillo, B., 2022.

Se observa que el p – valor es mayor a la significancia (0.05), asimismo, se determinó que el cero queda entre los límites de confianza (-0.53 y 0.53), ambos casos indican que, se acepta la hipótesis nula. Con un 95% de confianza se puede afirmar entonces, que no hay diferencia entre las medias, por lo que la ecuación estima la altura con valores similares a la altura real de cada individuo.

Asimismo, se obtuvo un valor de 1.78 metros como desviación típica, este resultado es más bajo que el error promedio de los hipsómetros utilizados por la institución, ya que según Aunós y Rodríguez (2002), los hipsómetros poseen un error medio de 2.34 metros, este dato le da una ventaja al uso de la ecuación para la medición de alturas en la especie en estudio.

Para validar la información proporcionada por el software InfoStat, el análisis de los residuos también fue llevado a cabo en el software Microsoft Excel®, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 9.

Resultados del análisis de residuos.

Análisis de residuos	
REMC	1.7830
Sesgo (e)	1.4583
Promedio	1.4583

Nota: Gordillo, B., 2022.

Los resultados obtenidos, confirman la información generada en InfoStat, además se calculó raíz del error cuadrático medio y el sesgo de los residuos, los cuales dieron un resultado bastante aceptable, menor al error medio de la herramienta utilizada actualmente para la medición de alturas en PPMF.

Al finalizar la validación de los modelos matemáticos mejor ajustados al estudio, se obtuvieron cinco en total, generados con los softwares mencionados anteriormente, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 10.

Resumen de los modelos ajustados al estudio.

Modelo	Ecuación
Logarítmico Natural	$y = a + b \cdot \ln(x)$
Vapor Pressure	$y = \exp(a + b/x + c \cdot \ln(x))$
Racional	$y = (a + b \cdot x) / (1 + c \cdot x + d \cdot x^2)$
Cuadrático	$y = -0.0147x^2 + 1.1259x + 2.6793$

Lineal

$$y = 0.5468x + 7.6726$$

Nota: Gordillo, B., 2022.

El modelo mejor ajustado al estudio, es el logarítmico natural, este modelo pertenece a la familia de modelos exponenciales y cuenta con dos parámetros.

- ✓ Ecuación: $a + b \times \ln(x)$
- ✓ Variables independientes: 1
- ✓ Parámetros:
 - $a = -9.77322162016487$
 - $b = 9.69225390195790$

El uso de este modelo matemático para el monitoreo de PPMF, se detalla en la Figura 18, en el capítulo de anexos, del presente documento.

VIII. Conclusiones

1. A través de la metodología empleada en esta investigación, se formularon cinco modelos matemáticos que se ajustan al estudio realizado, la relación diámetro-altura en la especie *Rhizophora mangle* L., el modelo logarítmico natural, *vapor pressure*, racional, cuadrático y lineal, los cuales fueron generados a través de softwares de cálculo y evaluados mediante pruebas paramétricas, que fueron indispensables para analizar la confiabilidad y precisión de cada uno de ellos, y así, seleccionar el modelo mejor ajustado.
2. Para la formulación de los modelos mencionados, se tomó en cuenta la altura total y el diámetro normalizado de cada individuo, dichos datos fueron medidos en el área de estudio y permitieron observar la variabilidad natural de la relación que presentan estas dos variables, aceptando de esta forma, la hipótesis planteada al inicio de esta investigación, la cual indica que, la altura de los árboles de la especie *Rhizophora mangle* L., presenta una relación con el diámetro normalizado de los mismos.
3. La altura estimada por los modelos generados fue comparada con la altura real de cada árbol, dando como resultado un error medio de 1.46 metros, un sesgo menor a 1.5 metros y variaciones no significativas entre datos reales y datos generados por el modelo predictivo, lo cual indica que es una herramienta confiable y precisa para estimar la altura de los árboles de la especie estudiada.

IX. Recomendaciones

Para uso en las Parcelas Permanentes de Medición Forestal -PPMF- del ecosistema manglar, se sugiere utilizar el modelo logarítmico natural para la estimación de altura en árboles de la especie *Rhizophora mangle* L., ya que dicho modelo matemático presentó un error típico y un AIC menor en comparación con los otros modelos, valores que hacen que sea una ecuación sencilla y precisa para cumplir con tal función.

Utilizar el modelo mencionado anteriormente, en árboles cuyo diámetro oscile entre 5 a 34.99 centímetros, dado que, dicho rango pertenece a la muestra utilizada para el cálculo de esta ecuación, por lo cual, los valores que se encuentren fuera de ese intervalo podrían presentar errores mayores a los esperados.

La ecuación generada puede utilizarse en los árboles de la especie en estudio, sin importar el estado físico y patrón de crecimiento de los mismos, ya que dichas características fueron tomadas en cuenta en la muestra utilizada para la formulación del modelo. También puede utilizarse en bosques que se encuentren en zonas con densidades que oscilen entre 200 a 1300 árboles de *Rhizophora mangle* L., por hectárea.

X. Referencias

- Agraz, C. (2007). *Restauración con manglar: criterios y técnicas hidrológicas de reforestación y forestación*.
https://books.google.com.gt/books/about/Restauraci%C3%B3n_con_manglar.html?id=UiXGtgAACAAJ&redir_esc=y
- Agustín, M., y Méndez, F. (2020). *Expediente No. 93-036-3.2.1-2020*. Instituto Nacional de Bosques. <https://www.inab.gob.gt/index.php/component/content/article/112-servicios/112-registro-nacional-forestal?Itemid=437>
- Ammour, T., Imbach, A., Suman, D., y Windevoxhel, N. (1999). *Manejo productivo de manglares en América Central*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2984#:~:text=Los%20recursos%20de%20los%20manglares,divisas%20para%20las%20econom%C3%ADas%20nacionales.>
- Arias, D. (2004). *Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la Zona Sur de Costa Rica*.
<https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/571>
- Avila, M. (2005). *Positividad de la legislación guatemalteca con relación a la conservación del bosque salado o manglar*.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/04/04_6156.pdf
- Brumér, E. (2002). *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2600>
- Camargo, J. (2019). *Criterio de información de Akaike*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://es.scribd.com/document/412143904/Criterio-de-Informacion-de-Akaike>
- Castillo Gallegos, E., Jarillo Rodríguez, J., y Escobar Hernández, R. (2018). *Relación altura-diámetro en tres especies cultivadas en una plantación forestal comercial*

en el Este tropical de México.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182018000100033&lng=es&nrm=iso&tlng=es

CK-12 Foundation. (29 de enero de 2021). *Conceptos de Matemáticas de la Escuela Secundaria*.

<https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-conceptos-de-matem%C3%A1ticas-de-la-escuela-secundaria-grado-8-en-espa%C3%B1ol/section/10.8/primary/lesson/utilizaci%C3%B3n-del-diagrama-de-dispersi%C3%B3n-para-interpretar-los-datos/>

Cristobal, J. (2003). *Lecciones de Inferencia Estadística*. Prensas Universitarias de Zaragoza. <https://puz.unizar.es/420-lecciones-de-inferencia-estadistica.html>

Díaz, J. (2011). *Una revisión sobre los manglares: características, problemáticas y su marco jurídico*. *Ra Ximhai*, 355-369.

<https://www.redalyc.org/pdf/461/46121063005.pdf>

Dietrichson, A. (2019). *Métodos Cuantitativos*. Universidad Nacional San Martín. <https://bookdown.org/dietrichson/metodos-cuantitativos/>

Dzib, A. (17 de marzo de 2022). *Análisis de regresión: Qué es, tipos y cómo realizarlo*. <https://www.questionpro.com/blog/es/analisis-de-regresion/>

Félix, Y. (2014). *Dasometría*.

https://www.academia.edu/35493332/DASOMETR%C3%8DA_Apuntes_de_Clas_e_y_Gu%C3%ADa_de_Actividades_Pr%C3%A1cticas

Ferre Jaén, M. (4 de abril de 2019). *Fundamentos Estadísticos para Investigación: modelos de regresión*. <https://gauss.inf.um.es/feir/40/>

Finca Tamashan. (27 de abril de 2022). *Quiénes somos*. <http://tamashan.com/index.php?language=es>

Galán, J. (4 de octubre de 2016). *Análisis de regresión*. <https://economipedia.com/definiciones/analisis-de-regresion.html>

Guzmán, J., Aguirre, O., González, M., Treviño, E., Pérez, J., Larreta, B., y De Los Santos, H. (2019). *Relación altura-diámetro para Abies religiosa Kunth Schltl. & Cham. en el centro y sur de México*. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 99-120. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322019000200099

Instituto Nacional de Bosques. (2012). *Guía para el establecimiento, monitoreo y rehabilitación de parcelas permanentes de medición forestal en bosques naturales de coníferas*. https://www.inab.gob.gt/images/publicaciones/GUIA_PPMF%20coniferas.pdf .

Instituto Nacional de Bosques. (2011). *Base de datos de PPMF del ecosistema manglar del país*. <https://sig.inab.gob.gt/>

Instituto Nacional de Bosques. (16 de febrero de 2022). *Acerca del Instituto Nacional de Bosques*. <https://www.inab.gob.gt/index.php/quienes-somos>

Instituto Nacional de Bosques y Consejo Nacional de Áreas Protegidas. (2019). *Reglamento para el manejo sostenible del recurso forestal del ecosistema Manglar*. https://www.inab.gob.gt/images/centro_descargas/reglamentos/Reglamento-Mangle%20.pdf

Instituto Nacional de Bosques, Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático y Consejo Nacional de Áreas Protegidas. (2016). *Metodología para el establecimiento y mantenimiento de parcelas permanentes de medición forestal - PPMF- en bosque natural del ecosistema manglar*. <https://icc.org.gt/es/metodologia-para-el-establecimiento-y-mantenimiento-de-parcelas-permanentes-de-medicion-forestal-ppmf-en-bosque-natural-del-ecosistema-manglar/>

Instituto Nacional de Bosques, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y Consejo Nacional de Áreas Protegidas. (2018). *Herramientas para la restauración del recurso forestal del ecosistema manglar en Guatemala*.

<https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/gt/82cb5d9e6accdce77b42489ee60b50c3d636a1bef5f70cd8b750957e2632853f.pdf>

International Business Machines. (28 de febrero de 2021). *SPSS Statistics*. Obtenido de: <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/27.0.0?topic=tests-paired-samples-t-test>

International Business Machines Statistics. (13 de octubre de 2014). *Regresión lineal*. <https://www.ibm.com/mx-es/analytics/learn/linear-regression#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20de%20la%20regresi%C3%B3n,variale%20se%20denomina%20variable%20independiente.>

Lahura, E. (2003). *El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas*. Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://core.ac.uk/download/pdf/6445817.pdf>

Larsen, D., y Hann, D. (1987). *Height-diameter equations for seventeen tree species in southwest Oregon*. Forest Research Laboratory, 2-16. https://www.researchgate.net/publication/259399438_Height-diameter_equations_for_seventeen_tree_species_in_southwest_Oregon

Lejarza, J. (17 de marzo de 2022). *Regresión*. <https://www.uv.es/ceaces/base/regresion/simple.htm>

Ley Forestal. [Decreto no. 101-96]. (1996). Congreso de la República de Guatemala. https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/15._Ley_Forestal_Decreto_101_96.pdf

López, J. (2 de octubre de 2017). *Coeficiente de determinación (R cuadrado)*. <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html>

Martínez, D., Albín, J., Cabaleiro, J., Pena, T., Rivera, F., y Blanco, V. (2009). *El Criterio de Información de Akaike en la Obtención de Modelos Estadísticos de Rendimiento*. Jornadas de Paralelismo, 439-444. <https://www.researchgate.net/profile/Tomas-Pena/publication/236279245>

- Ministerio de Ambiente. (1998). *Estudio de la dinámica de los bosques de manglar del pacífico colombiano*.
[http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2473/Technical/pd171-91-p2-s1-1%20rev2\(F\)%20s_Estudio%20de%20la%20din%C3%A1mica_S.pdf](http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2473/Technical/pd171-91-p2-s1-1%20rev2(F)%20s_Estudio%20de%20la%20din%C3%A1mica_S.pdf)
- Minitab. (18 de abril de 2019). *Análisis de Regresión: ¿Cómo puedo interpretar el R-cuadrado y evaluar la bondad de ajuste?*. <https://blog.minitab.com/es/analisis-de-regresion-como-puedo-interpretar-el-r-cuadrado-y-evaluar-la-bondad-de-ajuste>
- Minnaard, C. (2010). *Modelos de regresión lineales y no lineales: aplicación en problemas de ingeniería*. Universidad Nacional de Lomas de Zamora.
<https://pdfslide.tips/documents/modelos-de-regresion-lineales-y-no-lineales-su-aplicacion-en-.html?page=1>
- Moral Peláez, I. (2006). *Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística*. En R. Crespo, A. Rodríguez, A. Guillén, N. Canal Díaz, Á. Carreño, y I. Moral Peláez, *Métodos estadísticos para enfermería nefrológica* (págs. 195-214).
<https://revistaseden.org/files/14-CAP%2014.pdf>
- Muñiz Salazar, R., Sandoval Castro, E., Riosmena Rodríguez, R., Tovilla Hernández, C., Aguilar May, B., López Vivas, J., y Zertuche González, J. (2013). *El mangle rojo del Pacífico Norte de México*. *Biodiversitas*, 7-11.
<https://www.researchgate.net/publication/258940460>
- Narro, A. (1996). *Aplicación de algunos modelos matemáticos a la toma de decisiones*. *Política y Cultura*, 185. <https://www.redalyc.org/pdf/267/26700614.pdf>
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., y Real, P. (1997). *Mensura forestal*.
<https://repositorio.iica.int/handle/11324/15038>
- Roldán, P. (3 de enero de 2019). *Modelo matemático*.
<https://economipedia.com/definiciones/modelo-matematico.html>
- Sánchez, M. (1992). *Determinación de la edad y tasa de crecimiento de *Rhizophora mangle* L. por medio del estudio anatómico de la madera en los esteros de San*

José Chiquirín, Mazatenango, Suchitepéquez.
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_1467.pdf

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). *Plan de manejo tipo para la conservación y aprovechamiento sustentable del mangle (MARISMAS NACIONALES, NAYARIT)*.
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/282453>

Uam, L. (3 de octubre de 2017). *Regresión y correlacion con Excel* [YouTube].
<https://www.youtube.com/watch?v=b3rpc0-PPYc>

Villalba, J. (2006). *Los manglares en el mundo y en Colombia: estudio descriptivo básico*. Sociedad Geográfica de Colombia.
<https://www.researchgate.net/publication/336767657>

Vinuesa, P. (2016). *Correlación: teoría y práctica*. Universidad Nacional Autónoma de México.
https://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/R4biosciences/docs/Tema8_correlacion.html

Zacarías, C., Sánchez, M., y Cifuentes, J. (2019). *Especies Arbóreas en los ecosistemas de manglar de Guatemala*. Instituto Nacional de Bosques.
<file:///C:/Users/bernd/OneDrive/Escritorio/desk1/Restauraci%C3%B3n.pdf>

Vo. Bo. 
 Lcda. Ana Teresa de González
 Bibliotecaria CUNSUROC 

Vo. Bo. Licda. Ana Teresa Cap Yes

Bibliotecaria CUNSUROC

XI. Anexos

Tabla 11.

Datos recolectados en campo.

No.	Estado físico	Patrón de distribución	No de ejes	No. De árboles/parcela (100m ²)	Densidad (árboles/hectárea)	Diámetro promedio por parcela	Diámetro normalizado (cm)	Altura de fuste (m)	Altura de raíces (m)	Altura de copa (m)	Altura total (m)	Clase diamétrica
1	Recto	Individual	1	5	500	15	9.9	2.35	1.7	7.85	11.9	5-9.99
2	Recto	Individual	1	5	500	15	21.5	1.9	3.2	17.67	22.77	20-24.99
3	Recto	Individual	1	5	500	15	15.1	0.46	3.03	15.54	19.03	15-19.99
4	Recto	Individual	1	5	500	15	13.9	0.75	2.42	15.25	18.42	10-14.99
5	Recto	Individual	1	2	200	12	9.4	1.2	2.04	7.18	10.42	5-9.99
6	Recto	Agrupados	1	2	200	12	15.5	0.8	2.08	16.1	18.98	15-19.99
7	Recto	Agrupados	1	5	500	15	13.9	0.58	2.49	16.74	19.81	10-14.99
8	Recto	Agrupados	1	5	500	15	8.6	0.67	2.5	7.56	10.73	5-9.99
9	Recto	Agrupados	1	5	500	15	18.3	0.27	3.1	18.23	21.6	15-19.99
10	Recto	Individual	1	6	600	17	19	0.35	3.31	12.36	16.02	15-19.99
11	Bifurcado	Individual	1	6	600	17	12	1.26	2.3	7.1	10.66	10-14.99
12	Inclinado	Individual	1	11	1100	17	18.3	2.81	3.2	13.81	19.82	15-19.99
13	Recto	Individual	1	11	1100	17	19.1	0.32	3.4	14.21	17.93	15-19.99
14	Inclinado	Agrupados	2	8	800	23	21	0.15	4.55	14.8	19.5	20-24.99
15	Recto	Agrupados	2	8	800	23	23.4	0.07	2.8	17.1	19.97	20-24.99
16	Inclinado	Individual	1	8	800	23	26.2	0.62	2.26	18.41	21.29	25-29.99
17	Recto	Individual	1	4	400	19	19.2	0.75	2.85	15.71	19.31	15-19.99
18	Bifurcado	Individual	1	3	300	20	20.3	4.83	2.87	13.48	21.18	20-24.99
19	Recto	Agrupados	5	10	1000	20	20.4	1.1	3.75	13.03	17.88	20-24.99
20	Recto	Agrupados	5	10	1000	20	8.6	2.05	1.3	10.09	13.44	5-9.99
21	Bifurcado	Agrupados	5	10	1000	20	15.1	0.54	2.93	10.35	13.82	15-19.99
22	Recto	Grupo de ejes en un mismo individuo	2	10	1000	20	10	0.98	3	9.38	13.36	10-14.99
23	Recto	Grupo de ejes en un mismo individuo	2	10	1000	20	6.7	0.15	2.55	5.73	8.43	5-9.99
24	Recto	Grupo de ejes en un mismo individuo	2	10	1000	20	19.8	2.1	1.95	14.48	18.53	15-19.99

25	Bifurcado	Grupo de ejes en un mismo individuo	2	10	1000	20	10	1.33	1.6	9.22	12.15	10-14.99
26	Recto	Individual	1	7	700	20	28	5.2	2.45	16.8	24.45	25-29.99
27	Recto	Individual	1	5	500	15	25.8	1.94	2.25	15.76	19.95	25-29.99
28	Recto	Individual	1	5	500	15	10.5	0.4	1.52	10.58	12.5	10-14.99
29	Torcido	Individual	1	5	500	15	23.1	1.5	4.35	14.18	20.03	20-24.99
30	Recto	Individual	1	5	500	15	15.5	0.9	2.53	12.41	15.84	15-19.99
31	Recto	Individual	1	4	400	20	25.8	2.7	2.88	14.6	20.18	25-29.99
32	Recto	Individual	1	13	1300	25	30.7	1.5	2.8	16.56	20.86	30-34.99
33	Inclinado	Grupo de ejes en un mismo individuo	4	13	1300	25	16.5	0.5	3.2	12.66	16.36	15-19.99
34	Inclinado	Grupo de ejes en un mismo individuo	4	13	1300	25	11.8	0.93	3	8.89	12.82	10-14.99
35	Recto	Grupo de ejes en un mismo individuo	2	13	1300	25	22.3	0.05	3.6	16.5	20.15	20-24.99
36	Inclinado	Individual	1	13	1300	25	17.4	1.62	2.3	12.83	16.75	15-19.99
37	Recto	Agrupados	2	7	700	20	18.2	5.48	2.2	11.87	19.55	15-19.99
38	Inclinado	Agrupados	2	7	700	20	20	0.92	1.7	15.14	17.76	20-24.99
39	Recto	Individual	1	7	700	20	23.3	1.82	3.89	16.15	21.86	20-24.99
40	Inclinado	Agrupados	2	9	900	25	30.2	1.71	2.74	21.4	25.85	30-34.99
41	Bifurcado	Individual	1	9	900	25	31.2	2.85	3.8	19.37	26.02	30-34.99
42	Recto	Individual	1	7	700	25	25	0.07	2.57	18.42	21.06	25-29.99
43	Inclinado	Individual	1	8	800	20	24.2	1.02	2.91	16.42	20.35	20-24.99
44	Recto	Agrupados	2	8	800	20	32.8	0.05	2.5	21.4	23.95	30-34.99
45	Recto	Agrupados	2	8	800	20	22.2	2.1	2.97	13.82	18.89	20-24.99
46	Bifurcado	Agrupados	2	8	800	20	32.1	0.8	5.05	17.15	23	30-34.99

Nota: Gordillo, B., 2022.

Figura 19.

*Guía de uso de la ecuación sugerida para la estimación de altura en árboles de la especie *Rhizophora mangle* L.*

El modelo matemático generado para estimar la altura total de árboles de mangle rojo (*Rhizophora mangle* L.), es una ecuación que se puede utilizar para calcular esta variable dasométrica a partir de la medición del diámetro normalizado -DN-.

Ejemplo. Se realiza la medición de un árbol de mangle rojo, cuyo diámetro es de **15.2 cm**, dado que esta medida **SÍ** se encuentra dentro del rango indicado, se puede utilizar la ecuación mencionada anteriormente para estimar su altura total.

Ecuación:

$$h_t = - 9.7732 + 9.6923 \times \ln(\text{DN})$$

Sustituimos **DN** en la ecuación:

$$h_t = - 9.7732 + 9.6923 \times \ln(15.2)$$

Operamos la multiplicación:


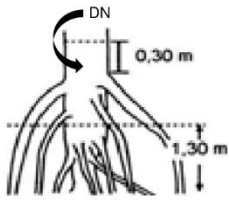
$$h_t = - 9.7732 + 26.375$$

Operamos la resta:

$$h_t = 16.6024 \approx 16.6$$

Obtenemos la altura total del árbol:

$h_t = 16.6 \text{ metros}$

La ecuación es la siguiente:


$$h_t = - 9.7732 + 9.6923 \times \ln(\text{DN})$$

Donde:

- h_t = Altura total
- \ln = Logaritmo natural
- DN = Diámetro normalizado

Se ingresa el DN en **centímetros** y nos da como resultado, la altura total del árbol en **metros**. Cabe resaltar que esta ecuación se debe utilizar únicamente en árboles cuyo diámetro normalizado -DN- mide entre 5 a 34.99 centímetros.

***Para árboles cuyo diámetro NO está dentro del intervalo mencionado, se recomienda medir la altura total con un hipsómetro.**



Nota: Gordillo, B., 2022.



Mazatenango 14 de noviembre de 2022

Coordinadora de Carrera
Ingeniería en Gestión Ambiental Local
CUNSUROC

Respetable Coordinadora:

Muy respetuosamente me dirijo a usted, para presentarle el Informe Final de Investigación Inferencial titulado **“Modelo matemático para la estimación de altura en la especie *Rhizophora mangle* L. , para uso en las Parcelas Permanentes de Medición Forestal –PPMF- del ecosistema manglar”**, del estudiante **Bernardo Antonio Gordillo Maldonado, carne 201844947**, dentro del programa de Ejercicio Profesional Supervisado de la carrera de Ingeniería en Gestión Ambiental Local. – EPSIGAL-.

Este documento se presenta para que de acuerdo con el artículo 6, inciso 6.4 del Normativo de Trabajo de Graduación, pueda a través de sus buenos oficios darse el procedimiento para poder ser considerado como Trabajo de Graduación, para la obtención del título de Ingeniero en Gestión Ambiental Local.

Sin otro particular, con mis más altas muestras de estima y respeto.

Atentamente,

MSc. Karen Rebeca Pérez Cifuentes
Supervisora EPSIGAL
CUNSUROC



Mazatenango, 13 de febrero de 2023.

MSc. Karen Rebeca Pérez Cifuentes
Coordinadora de Carrera
Ingeniería en Gestión Ambiental Local
CUNSUROC

Respetable Maestra Pérez:

Muy respetuosamente me dirijo a usted, para informarle que de acuerdo al artículo 9, del Normativo de Trabajo de Graduación de la carrera de Ingeniería en Gestión Ambiental Local, he realizado la revisión y observaciones de la Investigación titulada: **“MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE ALTURA EN LA ESPECIE *Rhizophora Mangle* L., PARA USO EN LAS PARCELAS PERMANENTES DE MEDICIÓN FORESTAL -PPMF- DEL ECOSISTEMA MANGLAR”**, presentada por el estudiante: **Bernardo Antonio Gordillo Maldonado**, quién se identifica con número de carné: 201844947, y con Código Único de Identificación: 3300 89625 1201 .

Por lo tanto, en mi calidad de revisora le informo que después de realizar el proceso que se me fue asignado y verificar la incorporación de las observaciones por parte del estudiante a la investigación, procedo a dar visto bueno al documento para que se continúe con el proceso de mérito.

Respetuosamente, se despide de usted.

Atentamente,

Kharla Leticia Marysol Vides Rodas
Ingeniera en Gestión Ambiental Local
Revisora de Trabajo de Graduación IGAL
CUNSUROC



Mazatenango 07 de marzo, 2022

Lic. Luis Carlos Muñoz López
Director en Funciones
Centro Universitario del Suroccidente

Respetable Señor Director:

De la manera más atenta, me dirijo a usted para referirle el Informe Final de Trabajo de Graduación titulado "**Modelo matemático para la estimación de altura en la especie *Rhizophora mangle L.*, para uso en las Parcelas Permanentes de Medición Forestal- PPMF- del ecosistema manglar**", de la estudiante **Bernardo Antonio Gordillo Maldonado** carné número **201844947**, de la Carrera de Ingeniería en Gestión Ambiental Local.

Con base en el dictamen favorable emitido y suscrito por el revisor del informe, el cual fue corregido de acuerdo a las recomendaciones indicadas.

Por lo tanto, en mi calidad de Coordinadora de la Carrera, me permito solicitarle el **IMPRÍMASE** respectivo para que el estudiante continúe con el proceso de mérito y pueda presentarlo en el Acto Público de Graduación.

Sin otro particular



MSc. Karen Rebeca Pérez Cifuentes
Coordinadora de Carrera
Ingeniería en Gestión Ambiental Local
CUNSUROC





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL SUR OCCIDENTE
MAZATENANGO, SUCHITEPEQUEZ
DIRECCIÓN DEL CENTRO UNIVERSITARIO

CUNSUROC/USAC-I-27-2023

DIRECCION DEL CENTRO UNIVERSITARIO DEL SUROCCIDENTE,
Mazatenango, Suchitepéquez, el veinticuatro de abril de dos mil veintitrés-----

Encontrándose agregados al expediente los dictámenes del Asesor y Revisor, se autoriza la impresión del Trabajo de Graduación Titulado: **“MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE ALTURA EN LA ESPECIE *Rhizophora mangle L.*, PARA USO EN LAS PARCELAS PERMANENTES DE MEDICIÓN FORESTAL –PPMF- DEL ECOSISTEMA MANGLAR”** del estudiante: **Bernardo Antonio Gordillo Maldonado**, Carné **201844947**. CUI: **3300 89625 1201** de la Carrera Ingeniería en Gestión Ambiental Local.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.A. Luis Carlos Muñoz López
Director



/gris