

Calidad de sitio e influencia de las condiciones edafoclimáticas en plantaciones de *Hevea brasiliensis*. En tres municipios de Casanare.

Angie Natalia Parra Lozano, Cristhian David Hernández León

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero(a) Forestal

Director

Ronald Alfonso Montañez Valencia

M. Sc. Conservación y Uso sostenible de Sistemas Forestales. Ing. Forestal

Codirector

Jessica Lady Quintero Perilla

Ing. En Agroecología

Universidad Industrial de Santander

Instituto de proyección Regional y Educación a Distancia-IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Málaga

2023

Dedicatoria

Principalmente a Dios, sin su benignidad y fortaleza no hubiese llegado hasta este punto. A mi Madre Nora Ligia Hernández León y Abuela Mariela León viuda de Pérez, les debo todos mis logros ya que su incondicional apoyo, amor y sacrificio han sido fundamentales en todas las decisiones de mi vida. A mis tías Angela Hernández León, Maira Hernández León y demás familiares por su apoyo y motivación. A mi compañera Angie Natalia Parra Lozano por apoyarme y creer en mí. A Rony Alexander Aponte Ortiz por sus consejos y colaboración, y demás amigos que siempre me brindaron su amor y ánimo para poder escalar un peldaño más en mi vida.

Cristhian David Hernández León

Principalmente a Dios por darme la oportunidad de culminar este proceso mediante su amor, gracia, guía y respaldo. A mi familia, en especial a mi abuela Rubiela Estupiñán de Parra y tía Claudia Liliana Parra Estupiñán que me han educado con amor, valores y principios, convirtiéndose en mi bendición y motivación. A mi prima Wendy Beatriz Parra Prieto que ha sido ejemplo de inspiración y perseverancia, por su esfuerzo y colaboración. A Cristhian David Hernández León por su destreza, apoyo incondicional, por creer en mí y compartir conmigo este proceso académico. A mis amigos y compañeros por su amistad, consejos y experiencias vividas, en especial a Heidy Nathaly Vargas Castro y Yunairy Carolina Correa Rodríguez por su apoyo.

Angie Natalia Parra Lozano

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, Sede Málaga, por abrirnos las puertas y aportar los cimientos fundamentales que son parte del proceso de formación académica. A nuestro director de grado M. Sc. Ronald Alfonso Montañez Valencia e ingeniera Jessica Lady Quintero, por ser parte de una idea de investigación que hoy tiene como resultado nuestro trabajo de grado, donde aportaron conocimiento científico, tiempo y dedicación, siendo el apoyo fundamental para impulsarnos a ser mejores y por cooperar en la solución de dificultades.

A Rosa Higuera, José Méndez, Jessica Quintero, Alfonso Noa y Gustavo Reyes propietarios de las plantaciones que nos permitieron el acceso para llevar a cabo el desarrollo y validación del proyecto de investigación y por compartir información acerca del manejo de las plantaciones. A Sneyder y Ever, encargados en las labores de rayado, por su disposición para extender sus conocimientos sobre los procesos que incluyen las actividades de sangría y en general a los habitantes Casanareños que abrieron sus puertas y compartieron sus experiencias con nosotros.

A nuestros familiares, amigos, compañeros y demás personas que nos apoyaron, creyeron en nuestras fortalezas y aportaron su granito de arena durante este proceso de formación. Del mismo modo, agradecemos a los docentes por educarnos e inculcar una formación integral a través de sus conocimientos, en especial a los docentes Rony Alexander Aponte Ortiz y Diego Suescun Carvajal por sus concejos, apoyo e instrucción.

Cristhian David Hernández y Angie Natalia Parra

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos específicos	17
2. Marco Referencial	18
2.1 Marco Conceptual	18
2.2 Marco histórico	22
2.3 Marco Teórico.....	24
2.3.1 Descripción botánica.....	24
2.3.2 Fenología.....	25
2.3.3 Clones	25
2.3.4 Usos.....	26
2.3.4.1 Látex	26
2.3.4.2 Madera	26
2.3.4.3 Semilla	27
2.3.5 Aprovechamiento.....	27
2.3.5.1 Sangría	27
2.3.6 Principal enfermedad del caucho	27

2.3.7.1 Zona de Escape al SALB	28
2.3.8 Condiciones agroecológicas.....	29
2.3.9 Condiciones climáticas	29
2.3.10 Condiciones edáficas	30
2.3.11 Especies forestales comerciales óptimas para zona de vida bh-T.....	33
2.3.12 Calidad de sitio	34
2.3.12.2 Determinación del Índice de Sitio de un Rodal	35
2.3.12.2.1 Altura Media Dominante.	35
2.3.12.2.2 Curvas de índice de sitio.....	35
2.3.12.2.3 Método de Construcción de Curvas.....	35
3. Metodología	37
3.1 Área de estudio	37
3.1.1 Descripción de sitios	38
3.1.1.1 Paz de Ariporo, sitio 1	38
3.1.1.2 Aguazul, sitio 2	38
3.1.1.3 Villanueva, sitio 3	39
3.2 Recolección de datos.....	40
3.2.1 Describir las condiciones climáticas y edáficas en plantaciones forestales disetáneas de <i>H. brasiliensis</i>	40
3.2.1.1 Climatología.....	40
3.2.1.2 Muestreo de suelo.	41
3.2.1.2.1 Pendiente.....	41

3.2.2 Estimar el volumen de madera total y comercial de árboles en pie en plantaciones de <i>H. brasiliensis</i>	42
3.2.2.1 Sistema de muestreo.	42
3.2.2.2 Establecimiento de parcelas temporales.	42
3.2.2.3 Mediciones de variables dendrométricas.	44
3.2.3 Validar métricas provenientes de modelos matemáticos aplicados a la calidad de sitio para la especie <i>H. brasiliensis</i>	44
3.2.3.1 Alturas dominantes (H_o).....	44
3.2.3.2 Construcción curvas de calidad de sitio.....	44
3.2.4 Evaluar la incidencia de las características climáticas y edáficas interespecíficas relacionadas con la altura dominante en <i>H. brasiliensis</i>	45
3.2.4.1 Generación base de datos.....	45
3.3 Procesamiento de datos.....	45
3.3.1 Describir las condiciones climáticas y edáficas en plantaciones forestales disetáneas de <i>H. brasiliensis</i>	45
3.3.1.1 Climatología.....	45
3.3.1.1.1 Datos climáticos faltantes.	45
3.3.1.1.2 Estimación valores mensuales – anuales - multianuales.....	46
3.3.1.1.3 Análisis de datos.	46
3.3.1.1.4 Descripción de variables climáticas.....	46
3.3.1.2 Variables edáficas	47
3.3.1.2.1 Análisis de variables.	47

3.3.1.2.2 Descripción de variables edáficas.....	47
3.3.1.3 Comparación de variables climáticas y edáficas	47
3.3.2 Estimar volumen de madera total y comercial de árboles en pie en plantaciones de <i>H. brasiliensis</i>	47
3.3.2.1 Generación Bases de datos.....	47
3.3.2.1.1 Análisis de datos dendrométricos	48
3.3.2.2 Estimación volumen (m ³)	48
3.3.3 Validar métricas provenientes de modelos matemáticos aplicados a la calidad de sitio para la especie <i>H. brasiliensis</i>	48
3.3.3.1 Análisis de datos	48
3.3.3.1.1 Evaluación de modelos matemáticos	48
3.3.3.1.2 Estimación altura dominante (H _o).....	49
3.3.3.1.3 Índice de sitio y construcción de curvas de calidad de sitio.	49
3.3.4 Evaluar la incidencia de las características climáticas y edáficas interespecíficas relacionadas con la altura dominante en <i>H. brasiliensis</i>	49
3.3.4.1 Correlaciones	49
4. Resultados	50
4.1 Climatología.....	50
4.1.1 Análisis de datos climáticos.....	50
4.1.1.1 Descripción de variables climáticas.....	52
4.1.1.1.1 Análisis de gráficas mensuales multianuales.	52
4.1.1.1.2 Análisis de gráficas anuales multianuales (1996 – 2022).....	54

4.1.1.2 Comparación de variables climáticas.....	55
4.2 Variables edáficas	56
4.2.1 Descripción y comparación de variables edáficas	56
4.3 Volumen (m ³).....	58
4.3.1 Datos tomados en campo	58
4.3.1.1 Análisis de variables dendrométricas.....	59
4.3.1.2 Cálculo de volumen (m ³).	60
4.4 Calidad de sitio	61
4.4.1 Modelos evaluados.....	61
4.4.1.1 Estimación de alturas dominantes referente a la edad de los sitios.	63
4.1.1.1 Curvas anamórficas de índice de sitio.	63
4.5 Correlación de altura dominantes respecto a variables edáficas y climáticas	65
5. Discusión.....	66
6. Conclusiones.....	73
7. Recomendaciones	74
Referencias Bibliográficas	76

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Parámetros generales para la determinación de zonas de escape al SALB	28
Tabla 2 Condiciones climáticas requeridas y clasificadas para el desarrollo de la especie <i>Hevea brasiliensis</i>	30
Tabla 3 Clases agroecológicas pertenecientes al departamento de Casanare	31
Tabla 4 Condiciones edáficas requeridas para la especie <i>H. brasiliensis</i>	32
Tabla 5 Requerimientos nutricionales para la especie <i>H. brasiliensis</i>	33
Tabla 6 Requerimiento óptimo para especies que se desarrollan en condiciones agroecológicas similares a la especie <i>H. brasiliensis</i>	34
Tabla 7 Modelos ajustados de curvas de calidad de estación	36
Tabla 8 Ubicación geográfica estaciones meteorológicas	41
Tabla 9 Modelos evaluados para determinar el índice de sitio en plantaciones de <i>Hevea brasiliensis</i>	44
Tabla 10 Análisis de datos exploratorio para variables climáticas	51
Tabla 11 Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para variables climáticas	52
Tabla 12 Condiciones climáticas requeridas y encontradas en los sitios.....	56
Tabla 13 Condiciones edáficas, nutricionales requeridas y encontradas en los sitios	57
Tabla 14 Condiciones según las propiedades edáficas requeridas y encontradas en los sitios	58
Tabla 15 Análisis exploratorio para variables dendrométricas	60
Tabla 16 Prueba de normalidad para variables dendrométricas	60

Tabla 17	Alturas dominantes provenientes de parcelas temporales	62
Tabla 18	Parámetros de precisión de la estimación del modelo: RMSE y R^2	62
Tabla 19	Parámetros de las ecuaciones de altura dominante en función de la edad correspondiente a los modelos evaluados.	62
Tabla 20	Alturas dominantes estimadas para edades concernientes a la edad de los sitios.....	63

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Zonificación climática para Colombia de la zona de escape	29
Figura 2 Modelos de crecimiento evaluados para la altura dominante de calidad de sitio	37
Figura 3 Localización de plantaciones de H. brasiliensis en tres municipios del departamento de Casanare.....	40
Figura 4 Distribución de parcelas temporales en el área de estudio para el municipio de Paz de Ariporo, Aguazul y Villanueva.....	43
Figura 5 Gráficas box plot de variables climatológicas analizadas por sitio	51
Figura 6 Representación gráfica de T(°C) y PP(mm) mensual multianual (1996-2022).....	53
Figura 7 Climograma de Walter Lieth.....	54
Figura 8 Representación gráfica de T(°C y PP(mm) multianuales	55
Figura 9 Gráfico boxplot para variables dendrométricas analizadas por sitio.	59
Figura 10 Diferencias volumétricas comerciales y totales estimadas para los tres sitios plantados con H. brasiliensis.....	61
Figura 11 Curvas anamórficas al IS o Ho para sitios con edades de 8, 9 y 12 años.	65
Figura 12 Matriz de Correlación	66

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Localización de parcelas temporales

Apéndice B. Evidencia plantación de *H. brasiliensis* sitio 1

Apéndice C. Evidencia plantación de *H. brasiliensis* sitio 2

Apéndice D. Evidencia plantación de *H. brasiliensis* sitio 3

Apéndice E. Gráficas de temperatura máxima, media y mínima mensuales multianuales correspondiente a los sitios 1, 2 y 3

Apéndice F. Gráficas de humedad relativa máxima, media y mínima mensual multianual correspondiente a los sitios 1, 2 y 3

Apéndice G. Gráficas anuales multianuales de temperatura máxima, media y mínima correspondiente a los sitios 1, 2 y 3

Apéndice H. Gráficas anuales multianuales de humedad relativa máxima, media y mínima correspondiente a los sitios 1, 2 y 3

Apéndice I. Resultado análisis de suelos correspondiente a los sitios 1, 2 y 3

Apéndice J. Datos procesados referentes a correlación de altura dominante, variables edafoclimáticas

Resumen

Título: Calidad de sitio e influencia edafoclimática en plantaciones de *Hevea brasiliensis*. En tres municipios de Casanare*

Autor: Crithian David Hernández León, Angie Natalia Parra Lozano**

Palabras Clave: índice de sitio, altura dominante, clima, suelo

Descripción:

La calidad del sitio permite estratificar las productividades del sitio en diferentes rodales y predecir el patrón de crecimiento. Además, la capacidad de producción de varios sitios se ve afectada por las condiciones edafoclimáticas. En este estudio, se analizaron tres sitios con plantaciones forestales de *H. brasiliensis* ubicadas en los municipios de Paz de Ariporo, Aguazul y Villanueva, en Casanare, Colombia. Se realizó un muestreo sistemático estableciendo parcelas circulares temporales donde se midieron las variables de CAP, altura total y altura comercial. Se recolectaron tres muestras de suelo, una por cada sitio, para determinar sus propiedades físicas, químicas y biológicas. La información climática se obtuvo del portal del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), donde se descargaron datos de precipitación, temperatura y humedad relativa para el período comprendido entre 1996 y 2022. Se estimó el volumen total y comercial. Utilizando los datos de altura dominante y edad, se evaluaron tres modelos matemáticos para generar curvas de índice de sitio. Se aplicaron pruebas de estadística descriptiva y de normalidad para procesar las variables climáticas y dendrométricas. Los criterios estadísticos utilizados para evaluar los modelos fueron el coeficiente de determinación (R^2) y el menor error cuadrático medio (RMSE), y se utilizó el método de la curva guía para construir las curvas de índice de sitio (IS). Por último, se realizó un análisis de correlación de Spearman para determinar la asociación entre la altura dominante y las variables edafoclimáticas. Los resultados indican que los tres sitios presentan condiciones climáticas óptimas, pero no cuentan con la totalidad de condiciones edáficas adecuadas para el establecimiento de plantaciones de *H. brasiliensis*. Se desarrollaron curvas de IS anamórficas utilizando el modelo de Chapman-Richards. El sitio uno mostró mayor volumen y calidad de sitio. Se encontró relación significativa entre las variables edafoclimáticas y la altura dominante.

* Trabajo de Grado

** Instituto de proyección Regional y Educación a Distancia – IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia, M. Sc. Conservación y Uso sostenible de Sistemas Forestales. Ing. Forestal. Codirector: Jessica Lady Quintero, Ing. En Agroecología.

Abstract

Title: Site quality and edaphoclimatic influence in *Hevea brasiliensis* plantations. In three municipalities of Casanare*

Author(s): Cristhian David Hernández León, Angie Natalia Parra Lozano**

Key Words: Site index, dominant height, climate, soil

Description:

Site quality allows stratifying site productivities in different stands and predicting growth pattern. In addition, the production capacity of several sites is affected by edaphoclimatic conditions. In this study, three sites with *H. brasiliensis* forest plantations located in the municipalities of Paz de Ariporo, Aguazul and Villanueva, in Casanare, Colombia, were analyzed. A check was made using temporary circular plots and the variables of CAP, total height and commercial height were measured. Three soil samples were collected, one for each site, to determine their physical, chemical and biological properties. The climatic information was obtained from the portal of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), which obtained data on precipitation, temperature and relative humidity for the period between 1996 and 2022. The total and commercial volume was estimated. Using the dominant height and age data, three mathematical models were evaluated to generate site index curves. Descriptive and normality statistical tests will be applied to process the climatic and dendrometric variables. The statistical criteria used to evaluate the models were the coefficient of determination (R^2) and the least square mean error (RMSE), and the curve guide method was obtained to construct the site index (IS) curves. Finally, a Spearman connection analysis was carried out to determine the association between the dominant height and the climatic and edaphic variables. The results indicate that the three sites present optimal climatic conditions, but not adequate soil conditions for the establishment of *H. brasiliensis* plantations. Anamorphic type IS curves were developed using the Chapman-Richards model. Site one showed higher site volume and quality. A significant relationship was found between the edaphoclimatic variables and the dominant height.

* Trabajo de grado

** Instituto de proyección Regional y Educación a distancia – IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia, M. Sc. Conservación y Uso sostenible de Sistemas Forestales. Ing. Forestal. Codirector: Jessica Lady Quintero, Ing. En Agroecología.

Introducción

La especie *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss) Müll. Arg. es considerada la principal productora de caucho natural a nivel mundial, se conoce con diferentes nombres comunes en los distintos países donde se encuentra, en Colombia y Venezuela se conoce como caucho, mientras que en otros países se le atribuyen los nombres de hule, jeve y siringueira (Basto, 2019). Colombia registra sitios con suelos y climas óptimos para el desarrollo del caucho (Eraso & Toro, 2006). En el caso de la región de la Orinoquia (Meta, Vichada y Casanare) presenta mayor área plantada con el 53,75% del país, de este valor el Meta participa con el 46,2% y Casanare el 1,10%. El área de producción en Colombia fue de 60.000 ha en el año 2021 con aproximadamente 12.000 toneladas (t) de látex, siendo los departamentos de Meta y Santander pioneros en este producto (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2021; Confederación Cauchera Colombiana [CCC], 2022).

El Sistema para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA, 2021) menciona que el área con aptitud forestal para el cultivo de caucho en el Casanare es de 11,5%, descrita con valores de 3,9; 3,4 y 4,2 % para aptitudes forestales alta, media y baja, respectivamente. Aunque, el Casanare posee condiciones edafoclimáticas aceptables que permiten el establecimiento de la especie de *H. brasiliensis*, debe analizarse con detalle la situación específica del sitio para lograr un crecimiento óptimo. En la actualidad, una de las herramientas de manejo en las plantaciones forestales se denominan calidad de sitio, el método más utilizado consiste en la estimación del índice de sitio (IS), el cual permite hacer una interpretación holística del crecimiento y la capacidad productiva

de un sitio para una determinada especie (Caguasango, 2017), en función de las variables edad (años) y altura dominante (m) como respuesta a las condiciones climáticas de precipitación, temperatura, humedad relativa y edáficas tales como materia orgánica y pH y las propiedades químicas (N, P, K, Ca y Mg), además de las propiedades físicas como la textura (Tapiero et al., 2018).

Rojo et al. (2005) determinaron el IS para *H. brasiliensis* del clon IAN-710 en el norte de Chiapas utilizando el modelo de Chapman - Richards modificado por Payandeh y Wang. Otros autores como Oyebade et al. (2014) implementaron el modelo de Chapman - Richards para el desarrollo de curvas de IS para *Pinus caribaea* en el suroeste de Nigeria. Barrios et al. (2021) predijeron la altura dominante e IS para *Gmelina arborea* en Colombia utilizando la ecuación de Chapman - Richards, así mismo, correlacionaron IS con variables biofísicas.

La disponibilidad de estudios relacionados con el IS en plantaciones de *H. brasiliensis* para el Casanare es limitada. Por consiguiente, el presente proyecto de grado se plantea los siguientes cuestionamientos: 1. ¿Existen diferencias entre variables climáticas y edáficas, evaluadas entre sitios plantados con *H. brasiliensis* a escala local? 2. ¿Se presentan diferencias significativas entre los modelos empleados para IS en masas forestales disetáneas de *H. brasiliensis*? 3. ¿Cuáles variables edáficas y climáticas inciden en la altura dominante?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar la calidad de sitio y condiciones edafoclimáticas en plantaciones de *H. brasiliensis* en el departamento de Casanare.

1.2 Objetivos específicos

Describir las condiciones edáficas y climáticas en plantaciones forestales disetáneas de *H. brasiliensis*.

Estimar el volumen de madera total y comercial de árboles en pie en plantaciones de *H. brasiliensis*.

Validar métricas provenientes de modelos matemáticos aplicados a la calidad de sitio para la especie *H. brasiliensis*.

Evaluar la incidencia de las características climáticas y edáficas interespecíficas relacionadas con la altura dominante en *H. brasiliensis*.

2. Marco Referencial

2.1 Marco Conceptual

Altura comercial (m): Es la distancia vertical ente la base del tocón y la posición terminal de la última porción comercialmente aprovechable del árbol (Reynaga, 2013).

Altura total (m): Es la distancia vertical ente el nivel de suelo y la yema terminal más alta del árbol (Reynaga, 2013).

Área basal (m²): Es la superficie medida en metros cuadrados de la sección transversal de un árbol a la altura del pecho, referenciado a 1,30 m (Reynaga, 2013).

CAP (cm): La circunferencia a la altura del pecho es la longitud del perímetro de la sección. Se obtiene al medir el perímetro de la sección perpendicular al eje del tronco a la altura de 1.30 m. sobre el nivel del suelo (Juárez, 2014).

Correlación: La correlación se define en términos de la varianza (s^2) de las variables x e y, así como de la covarianza cov de x, y. Es por tanto una medida de la variación conjunta de ambas variables (cov (x, y)) (Vinuesa, 2016).

Clima: Síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo (valores medios, varianzas, probabilidades de valores extremos, desviación estándar, entre otras) de los elementos meteorológicos en dicho lugar (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2019).

Climatología: Es la ciencia que estudia la serie de estados atmosféricos que se suceden habitualmente en un determinado lugar (IDEAM, 2019).

DAP: Es una medida que proporciona datos sobre el crecimiento secundario del árbol y se conoce como diámetro a la altura pecho, dentro de la biometría forestal se ha convenido medir el diámetro del tronco a 1.30 m del suelo, debido a que esta es la altura promedio en la que se encuentra el pecho de una persona, la unidad de longitud es m o cm (Meza, 2018).

Dasometría: Estudia la medición de árboles y masas forestales, así como el estudio de las leyes métricas que rigen su evolución (crecimiento). Se divide en tres partes: Dendrometría, Estereometría, Epidometría (Juárez, 2014).

Dendrometría: Estudia la medición del árbol desde el punto de vista estático, así mismo, las técnicas de medición de los distintos componentes del árbol como el diámetro, altura, corteza, copa, y ramas, ya sea en pie o apeado (Juárez, 2014).

Disetánea: La edad de los individuos o entre sitios presentan diferentes edades (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura [FAO], 2020).

Edafología: Es la ciencia que se encarga de estudiar el suelo en todos sus aspectos; desde su morfología, su composición, las propiedades tanto físicas como químicas y biológicas, su formación y evolución, taxonomía y distribución, su utilidad, recuperación y conservación (Pereira et al., 2011).

Estimadores: Es una medida descriptiva que caracteriza a una muestra (Romahn de la vega & Ramírez, 2010).

Factor de forma: Se define como el cociente entre el volumen real del tronco y el volumen de un modelo que se toma como referencia (García et al., 2016).

Heveicultor: Persona natural o jurídica que tiene como actividades el establecimiento, el sostenimiento, el aprovechamiento de plantaciones de caucho y el beneficio de látex producido por los árboles. Este término es utilizado como sinónimo de cauchero (MADR, 2005).

Humedad relativa: Es el vapor de agua por masa de aire, expresado como un porcentaje de la cantidad total si el aire estuviese saturado a esta temperatura. Se expresa en unidades enteras que van de cero (0) hasta el 100% (IDEAM, 2019).

Materia Orgánica: Integra parte de la fracción sólida del suelo y está constituida, por compuestos orgánicos, que provienen de organismos muertos, tejidos vegetales, animales o complejos orgánicos (humus) sintetizados por actividad microbiana, o bien por una mezcla de ambos (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2022).

Parámetro: Es una medida descriptiva que caracteriza a una población (Romahn & Ramírez, 2010).

Piedemonte: Superficie inclinada situada al pie de las vertientes de montaña. Definido básicamente por su posición intermedia entre la montaña y la planicie (IGAC, 2022).

pH: Medida de la concentración de iones, hidrógeno en el suelo. Potencial que determina la acidez o alcalinidad, designación numérica de la reacción del suelo (IGAC, 2022).

Precipitación: La precipitación ocurre cuando el vapor de agua se condensa en el aire y cae como líquido o sólido a la superficie del suelo. La cantidad de precipitación se mide con un pluviómetro,

dispositivo que cuenta con una probeta graduada, o con el pluviógrafo, que tiene una banda registradora. (IDEAM, 2019).

Producción: Se define como el bosque donde el objetivo de gestión es la producción de madera, fibra, bioenergía y/o productos forestales no maderables (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020).

Productividad: La capacidad productiva del sitio (Prodan et al., 1997).

Rodal o masa forestal: Porción del bosque definida sobre la base de un conjunto de criterios asociados a uno o más objetivos de manejo (Corvalán & Hernández, 2006).

Silvicultura de plantaciones: Es la teoría y práctica sobre el establecimiento, desarrollo, composición, sanidad, calidad, aprovechamiento y regeneración de las masas forestales, esto, para satisfacer las diversas necesidades de la sociedad, de manera sostenible (Juárez, 2014).

Sitio: Está definido como la combinación entre factores del clima y del suelo en un área determinada de la superficie terrestre, con condiciones homogéneas para el desarrollo vegetal (Schlatter & Gerding, 2014).

Temperatura (°C): Magnitud física que caracteriza el movimiento aleatorio media de las moléculas en un cuerpo físico (IDEAM, 2019).

Textura: Composición física del suelo, definida en términos de proporciones relativas, por peso, de cada uno de los separados más finos de 2 mm: arena, limo y arcilla (IGAC, 2022).

Volumen (m³): Es la medida de la cantidad de madera sólida más ampliamente utilizada. En el árbol individual pueden identificarse diferentes categorías de volumen. El árbol completo, esto es considerando todos los componentes, constituye el volumen total (Cancino, 2012).

Volumen Comercial (m³): Todos aquellos componentes cuyas dimensiones son aceptables para el mercado (Cancino, 2012).

Variables: Se da el nombre de variable a una característica que adopta diferentes formas o modalidades, variables cuantitativas o cualitativas (Romahn & Ramírez, 2010).

Zona de vida: Es un conjunto de ámbitos específicos de los factores climáticos principales, grupo de asociaciones relacionadas entre sí a través de los efectos de la temperatura, la precipitación y la humedad (Holdridge, 1982).

2.2 Marco histórico

Los mayas y los aztecas utilizaban la goma del caucho que crece en climas cálidos para fabricar pelotas. Los españoles lo descubrieron y enviaron muestras del árbol del caucho a Europa, donde los habitantes de ese continente no hicieron más que intrigarse. El árbol del caucho es originario de la cuenca del río Amazonas, en los territorios de Brasil, Bolivia, Perú y Colombia (Eraso & Toro, 2006). El francés Charles Marie de la Condamine llevó muestras de esta goma a Europa en 1736 a través de una expedición a la que llamó "Caoutchou" (que traduce "cao" por "palo" y "chu" por "que llora") donde recorrió el río Amazonas (Zuleta, 2003). Tras el viaje, François Fresneau, botánico francés, describió el látex por primera vez en Francia, donde Fusée Aublet le asignó el género *Hevea* y J. Mueller-Argoviensis lo confirmó científicamente *Hevea brasiliensis* en 1862 (Servicio Nacional de Aprendizaje [SENA], 2006).

En Inglaterra se realizan los primeros descubrimientos prácticos, Priestly se refería a esta sustancia como "goma" y la utilizaba como borrador. Charles Macintosh empezó a impermeabilizar tejidos en 1823 tras enterarse de que era soluble en nafta (Bobadilla y García, 1999), mientras que Charles Goodyear creó la vulcanización en 1839 (una mezcla calentada de caucho y azufre) (Androustos & Marketos, 1994). Industrias europeas y norteamericanas viajaron a la Amazonia en busca de látex hasta 1860, cuando empezaron a talar árboles de *Castilloa elastica* para descortezarlos hasta su extinción. Se explotó en Colombia a lo largo de la costa del Pacífico, Bajos de San Jorge, Sinú y Piedemonte del Amazonas (Macarena). Finalmente, Thomson fabricó el primer neumático con látex de *H. brasiliensis* en 1845.

El inglés Henry Wickman visitó el Amazonas en 1876, recogió semillas de caucho y las transportó al Jardín Botánico Real de Kew (Inglaterra). Allí sobrevivieron 22 plántulas, que se trasladaron a Singapur y a las colonias inglesas. En Asia, estos árboles produjeron semillas viables para aumentar su población, y en las plantaciones industriales del sudeste asiático, la producción de caucho natural comenzó en 1899 (SENA, 2006). La explotación del caucho en Colombia se inició en la segunda mitad del siglo XIX y continuó durante la primera mitad del siglo XX (1880-1930), dando lugar a una revolución cultural, social y económica de la Amazonia colombiana (Mongua, 2018). El Decreto 645 de 1900, que permitía la explotación privada de predios "baldíos", permitió a los europeos expandir sus actividades extractivas en el piedemonte putumayense. (Sierra, 2017).

Los crímenes cometidos contra las poblaciones indígenas se convirtieron en los principales temas investigados en la historia de la Amazonia colombiana, en tanto que Julio César Arana logró obtener un importante margen de ganancia para la empresa emblemática de la región, la Peruvian

Amazon Company, a través de la esclavización de indígenas, principalmente Witotos, Andoques, Nonuyas y Boras (Sierra, 2017).

En 1910 se intentó por primera vez plantar caucho en Colombia en el municipio de Tumaco, departamento de Nariño, pero no tuvo éxito. Hacia 1961 se creó el Instituto Colombiano de la Reforma Agraria (INCORA). En 1964, con la ayuda de expertos extranjeros, el INCORA empezó a realizar investigaciones ecológicas para crear un "Programa Heveicola en Colombia", seleccionando el departamento del Caquetá como el mejor lugar para su crecimiento y producción. En los predios del INCORA se sembraron 400 ha en 1968 y se empezaron a utilizar en 1980 (SENA, 2006). De esta manera se continuó con el establecimiento de plantaciones en el Meta, Guaviare, Vaupés, Tolima y Huila para el año de 1995 (Eraso & Toro, 2006).

FedECAUCHO se formalizó ante el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Rural (MADR), y obtuvo su personería jurídica mediante la resolución de reconocimiento N°02108 de diciembre 5 de 1995. Por otro lado, en el departamento del Caquetá, los caucheros se organizaron en los Comités Municipales de Caucheros, con el propósito de fortalecer la producción y comercialización del caucho en la región. Como resultado de esta iniciativa, en 1996 nació la Asociación de Reforestadores y Cultivadores de Caucho del Caquetá (ASOHECA), la cual agrupó a los productores de caucho en el departamento con el fin de impulsar el desarrollo sostenible de la actividad cauchera en la zona (SENA, 2006).

2.3 Marco Teórico

2.3.1 Descripción botánica

El caucho pertenece a la familia Euphorbiaceae, es un árbol monoico de fuste recto y casi cilíndrico, donde se ubican vasos conductores y laticíferos distribuidos en la corteza con una mayor

concentración hacia el cambium. La corteza es de color rosado a marrón oscuro, exuda un látex abundante, lechoso y de color blanco, la raíz es pivotante y ramificada. Los individuos silvestres pueden alcanzar hasta 40 m y cerca de 3m de diámetro a la edad de 35 años, árboles de 20 a 30 m presentan de 30 a 60 cm de diámetro (Basto 2019; Gutiérrez et al., 2022). Posee una arquitectura y filotaxía con copa redonda, globosa y amplia, las hojas son trifoliadas alternas. Flores unisexuales color amarillo dispuestas en panículas axilares (Acuña, 2019).

2.3.2 Fenología

La polinización es cruzada dominando la anemofilia y entomofilia. El fruto es una capsula de tres semillas, con dehiscencia explosiva y sujetos a la planta por largos pedúnculos, son verdes, maduran de cinco a seis meses y adquieren tonos marrones (Eraso & Toro, 2006; Acuña, 2019).

El caucho a partir del tercer o cuarto año presenta un periodo anual de defoliación, generalmente al inicio de la estación seca (Castro, 2011). El Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI, s.f), menciona que la floración perdura aproximadamente dos semanas y ocurre en la época seca tardía, entre los meses de enero a marzo y fructifica en épocas de lluvias en los meses de mayo a septiembre. El caucho requiere una época seca definida de tres meses, donde los árboles se defolian (Basto, 2019). Generalmente la mayor producción de látex se obtiene al final de la época de lluvias, cuando hay una mayor cantidad de agua almacenada en el suelo (Tapiero et al., 2018).

2.3.3 Clones

A nivel mundial, existen un sin número de clones. Colombia cuenta con un número cercano a los 100 materiales vegetales disponibles en el SINCHI, Cenicafe y Mavalle S.A entre otros (Quesada et al., 2011). Según su lugar de origen estos se clasifican en clones asiáticos y

americanos, siendo Brasil, quien tiene los principales programas de mejoramiento genético para el caucho en el continente americano (Tapiero et al., 2018). En la Orinoquia se encuentran disponibles diferentes clones, cuyo desempeño fue evaluado, ejemplo: los clones de las series IAN, FX, RRIM, AVROS, GT y PB (García et al., 2013).

Los clones más representativos en la Orinoquia son RRIM 600 (asiático) y FX 3864 (americano), en consecuencia, existe una baja diversidad genética con más del 85% del área con RRIM 600 (Tapiero et al., 2017; Rivano, 2016). Sin embargo, en el departamento del Meta se comenzaron a evaluar 22 clones asiáticos y africanos desde 2017 y 2018 en Campos Clonales a Gran Escala (CCGE), (Rivano, 2016).

2.3.4 Usos

2.3.4.1 Látex. Es un recurso renovable que se puede aprovechar de forma sostenible, el caucho natural es un derivado del látex; debido a su elasticidad, resistencia al agua, durabilidad y dureza, es un constituyente básico para la fabricación de más de 40.000 productos para la industria, principalmente en neumáticos, que representan más del 50% del uso del caucho natural y dispositivos médicos (Lim, 2012; Rojas et al., 2017). En Colombia existen más de 1500 empresas diversificadas, consumidoras y transformadoras de esta materia prima (CCC, 2022).

2.3.4.2 Madera. Es utilizada al final del ciclo de la producción de látex, se aprecia por su grano denso y mínima contracción, es liviana, de color crema y marrón claro con frecuentes tintes rosados, con veteados atractivos y aceptación de diferentes acabados. Se utiliza en la fabricación de muebles, molduras, juguetes, cajas de madera y pisos. También se procesa para celulosa por registrar características similares a las obtenidas del *Eucalyptus spp.* (Lim, 2012; SINCHI, s.f).

2.3.4.3 Semilla. En 100 g de semillas de caucho contiene los siguientes nutrientes, contenido de humedad de 3,99%, proteína 17,41 g, grasa 68,53 g, cenizas 3,08 g, calcio 85 mg, hierro 1 mg, magnesio 0,93 mg y ácidos grasos libres 4,4%. A partir del aceite de la semilla se fabrican productos como pinturas, jabones y biodiesel sin refinar podría considerarse una fuente para el animal, como son rumiantes y cerdos (Eka et al., 2001; Lim, 2012).

2.3.5 Aprovechamiento

El ciclo de vida de una plantación de caucho se divide en dos fases, la inmadura y madura, la primera inicia con el establecimiento hasta los 7 años cuando inicia la cosecha del látex mediante la sangría, y la segunda corresponde a la extracción del látex perdurando hasta los 30 años (Chotiphan et al., 2019).

2.3.5.1 Sangría. La sangría inicia cuando el 50% de los árboles por ha tienen una circunferencia superior a los 45 cm a 1.30 m de altura del suelo (SENA, 2006). La mejor época para iniciar la sangría esta al final de un periodo seco y no debe coincidir con lluvias, ni con la defoliación de los árboles (Eraso & Toro, 2006). La sangría comienza con la apertura del panel de sangrado y posteriormente el rayado. (Acuña, 2019).

2.3.6 Principal enfermedad del caucho

SALB, por sus siglas en inglés, hace referencia al Tizón suramericano de la hoja del caucho, una enfermedad fúngica causada por el hongo *Microcyclus ulei*, también conocido como mal suramericano de las hojas (*Pseudocercospora ulei* P.Henn). Se estima que una defoliación superior al 20% resulta en una reducción de más del 75% en la producción de látex. Según las investigaciones de Priyadarshan (2017), mencionadas por Córdoba et al. (2018), el cultivo en áreas designadas como zonas de "escape" ha demostrado ser el método más exitoso para reducir la

incidencia de SALB en América (García et al., 2006; Burgos & Moreno, 2006; Tapiero et al., 2018).

2.3.7.1 Zona de Escape al SALB. Se considera zona de escape aquellas áreas geográficas que presenten condiciones climáticas limitantes para la infección y desarrollo de la enfermedad durante los estados fenológicos. En sitios óptimos para el escape al SALB, con precipitación > 2000 mm, temperatura media anual entre 20 a 30°C (óptima 25°C) y vientos menores a 50 km/h, el patógeno (SALB) no encuentra condiciones ideales para germinar, desarrollar el proceso de infección y ocasionar daños como lesiones o caídas de folios (Fernández, 2014; Tapiero et al., 2018). La zonificación climática para la zona de escape en Colombia (Tabla 1; Figura 1) fue planteada por Rodríguez & Gutiérrez (2009), citado por Tapiero et al. (2018).

Tabla 1

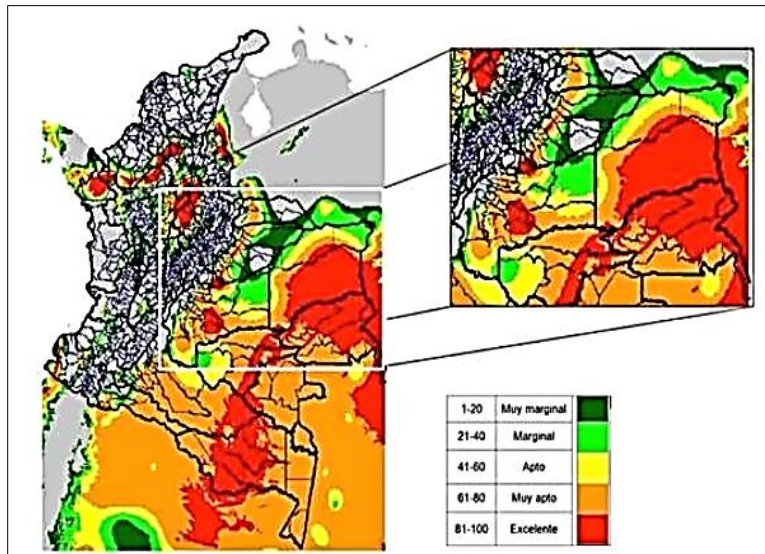
Parámetros generales para la determinación de zonas de escape al SALB

Estacionalidad del clima	Factor diagnóstico	Unidad	Calificación por factor		
			Óptimo	Moderado	Bajo
Estación seca	Precipitación <100 mm	Meses	4-6	3-4	< 3
	Precipitación <50 mm	Meses	3-4	1-2	0-1
	Humedad Relativa en meses secos	%	<75	75-80	> 80
	Humedad Relativa en meses muy secos	%	<70	70-80	> 80
Déficit hídrico	Humedad Relativa <75%	Meses	2	1	0
	Evapotranspiración	mm	>200	100-200	< 100

Nota. En la tabla se describen las condiciones climáticas que limitan el patógeno de SALB. Tomado de *Modelo Productivo para el cultivo de caucho Hevea brasiliensis* (Will. ex A. Juss.) Mull. Arg *En Colombia, con énfasis en la Orinoquia y el Magdalena Medio* (p.23), por Tapiero et al., (2018).

Figura 1

Zonificación climática para Colombia de la zona de escape



Nota. Muestra la zonificación climática para la estimación de áreas de cultivo de caucho en Colombia, basada en temperaturas entre 18 y 32°C y precipitaciones promedio anual para rangos entre 2.700 a 3.500 mm, a partir de la base de datos de WorldClim. Tomado de *Modelo Productivo para el cultivo de caucho Hevea brasiliensis* (Will. ex A. Juss.) Mull. Arg. *En Colombia, con énfasis en la Orinoquia y el Magdalena Medio* (p.27), por Tapiero et al., (2018).

2.3.8 Condiciones agroecológicas

Azabache (2012), señala que el caucho requiere una serie de condiciones ecológicas ideales para su rendimiento. El caucho crece en zonas de vida de bosque húmedo Tropical (bh-T), bosque seco Tropical (bs-T), bosque húmedo Premontano (bh-PM) y bosque seco Premontano (bs-PM), siendo el bh-T el más para la producción de látex.

2.3.9 Condiciones climáticas

La especie *H. brasiliensis* se cultiva en la región trópico - ecuatorial entre los 10° de latitud norte y sur, con mayor productividad a partir de los 6° de latitud Norte y Sur. Los cultivos deben estar localizados en áreas con temperaturas entre los 27 y 30°C para favorecer la producción de

látex ya que esta es un factor fundamental para el proceso de fotosíntesis (Tabla 2) (Escobar et al., 2004).

Tabla 2

Condiciones climáticas requeridas y clasificadas para el desarrollo de la especie Hevea brasiliensis

Parámetros técnicos	Condiciones óptimas	Condiciones intermedias	Condiciones severas bajo o sin potencial
Altitud (m s.n.m.)	0-800	800-1400	➤ >1400
Temperatura (°C)	25-28	20-25 y 28-30	<20 >30
Precipitación Anual (mm)	2000-3000	1500-2000 y 3000-4000	<1500 >4000
Déficit Hídrico (meses)	0-2	2-8	➤ >8
Días de Lluvia	125-150	90-125	<90>200
Humedad Relativa (%)	70-80	60-70 y 80-90	<60>90
Vientos Máximos (km/h)	0-10 km/h	10 a 12	➤ >12
Brillo Solar (horas/año)	1650	-	-

Nota. Descripción de condiciones climáticas necesarias para alcanzar un crecimiento y rendimiento idóneo. Tomado de *Modelo Productivo para el cultivo de caucho Hevea brasiliensis* (Will. ex A. Juss.) Mull. Arg (p.29); *Obtención y evaluación de láminas y enjebados de látex de Shiringa (Hevea brasiliensis), en el distrito de Chazuta –San Martín* (p.7) y *Modelo Productivo para el cultivo de caucho (Hevea brasiliensis) en el Bajo Cauca antioqueño y en el sur de Córdoba* (p.55), por (Tapiero et al., 2018, Acuña, 2019, Gutiérrez et al., 2022).

2.3.10 Condiciones edáficas

Colombia registra sitios con suelos y climas óptimos para el desarrollo del caucho, localizados en el pie de monte llanero (departamentos de Meta, Vichada, Guaviare y Casanare), pie de monte amazónico (Putumayo y Caquetá). Así como, en las regiones de mayor pluviosidad en el Magdalena Medio, Antioquia, Santander, Bolívar, Cesar, Caldas y Cundinamarca (Eraso & Toro, 2006). La clasificación de los suelos en la región de la Orinoquía corresponde a Oxisoles y

Ultisoles, las zonas del piedemonte y la altillanura poseen buenos drenajes. Sin embargo, los suelos del Piedemonte disponen de ventajas frente a la Altillanura, debido a la textura franco-arcillosa escasa en la Altillanura, otros beneficios del Piedemonte son la distribución de las lluvias y una mayor fertilidad natural (García et al., 2013).

El Departamento de Casanare presenta tres tipos de paisajes predominantes de acuerdo con su altitud: Montaña (1000 a 3800 m s.n.m.); Lomerío, Piedemonte y altiplanicie (transición entre llanura y cordillera oriental (300 a 1000 m s.n.m.) y Planicie o Llanura (100 a 300 m s.n.m.). Los suelos presentes son de clase agrológica 4, 5, 6, 7 y 8 (Tabla 3).

Tabla 3

Clases agroecológicas pertenecientes al departamento de Casanare

Clase	Características
4	Presenta limitaciones que restringen actividad agropecuaria, son susceptibles a inundaciones periódicas, con moderada profundidad, dispone de tierras que pueden ser usadas en agroforestería
5	Muestra limitaciones susceptibles de ser corregidas, baja fertilidad, susceptibles a inundaciones periódicas
6 y 7	Presentan limitaciones serias que restringen actividad agropecuaria y uso agrícola, susceptibles a inundaciones periódicas, fuertemente ácidos, moderada profundidad, solo para pastos y vida silvestre, son aptas para cultivos específicos semi perennes o perennes, semi densos y densos y sistemas agroforestales y forestales
8	No tienen capacidad para adelantar actividades agropecuarias ni forestales de producción.

Nota. Se describe las características de las clases agroecológica según la capacidad de uso. Tomado de *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso (P.4), Documento Evolución y Estado Actual del Ordenamiento Territorial, Subsistema Ambiental y Biofísico* (p.14), por (IGAC, 2014; Gómez, 2017).

Las propiedades físicas del suelo son determinantes para el adecuado desarrollo del cultivo, ya que la especie requiere de ciertas condiciones (Tabla 4). De igual manera, la especie demanda

de cierta cantidad de elementos químicos para suplir los sus requerimientos nutricionales (Tabla 5).

Tabla 4

Condiciones edáficas requeridas para la especie H. brasiliensis

Parámetros técnicos	Unidad	Condiciones optimas	Condiciones intermedias	Condiciones sin potencial
Textura		Franco (50% arcilla, 50% limo+arena)	Franco-arenoso (50-70% arena) Franco+arcillosos (50-70% arcilla)	Arcillosos (>70%) Arenosos (>70%)
Clase	Drenaje suelo	4	3-5	1-2-6
	Textura	4-5 -6	3-7-8 -9	1-2-10-11-12
Profundidad Efectiva	m	>1,50	0,8-1,50	<0,8
pH		4,5-5,5	4-4,5 y 5,5-6	<4 y >6
C.I.C	meq/100 g suelo	20-30	10-20	5 - 10
M.O	%	3-4	2-3	<1
Pendiente	%	0-7	7-25	>25
Pedregosidad	%	0-15	15-55	>55
Nivel freático máximo	m	2	1,5-2	<1,5

Nota. En la tabla se especifican las condiciones edáficas imprescindibles para un óptimo crecimiento y desarrollo de *H. brasiliensis*. Tomado de *Modelo Productivo para el cultivo del árbol de caucho natural en la Orinoquía Zonas de escape y no escape al Mal Suramericano de las Hojas del Caucho* (p.30), *Modelo Productivo para el cultivo de caucho Hevea brasiliensis* (Will. ex A. Juss.) Mull. Arg (P.29) y *Obtención y evaluación de láminas y enjebados de látex de Shiringa (Hevea brasiliensis), en el distrito de Chazuta – San Martín* (p.7), por (García et al, 2013; Tapiero et al, 2018; Acuña, 2019).

Tabla 5*Requerimientos nutricionales para la especie H. brasiliensis*

Nutriente	Alto	Medio	Bajo
Nitrógeno (%)	> 0,25	0,25 - 0,10	< 0,1
Fosforo (ppm)	> 30	30 - 15	< 15
Potasio (me/100 g)	> 0,30	0,30 - 0,15	< 0,15
Calcio (me/100 g)	> 6	6 a 3	< 3
Magnesio (me/100 g)	> 1	1 - 0,4	< 0,4
Manganeso (ppm)	> 1		< 1
Hierro (ppm)	> 4,5	4,5 - 2,5	< 2,5
Boro (ppm)	> 0,6		< 0,6
Molibdeno (Mo)	> 0,1		< 0,1
Zinc (ppm)	> 1	1 - 0,5	< 0,5
Cobre (ppm)	> 0,2		< 0,2

Nota. La tabla muestra los niveles de disponibilidad de nutrientes idóneos en el suelo para el óptimo crecimiento y desarrollo de la especie *H. brasiliensis*. Tomado de *Proyecto de factibilidad para la producción de caucho natural (Hevea brasiliensis) en el municipio de Carreño, Vichada* (p.41), por (Azabache, 2012).

2.3.11 Especies forestales comerciales óptimas para zona de vida bh-T

Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2018), el departamento de Casanare presenta un mayor desarrollo forestal con fines comerciales en la región de la Orinoquia, con especies forestales con fines comerciales y áreas con apoyo del Certificado de Incentivo Forestal (CIF) para zonas de aptitud forestal. Las especies vinculadas a dicho incentivo fueron, *Acacia mangium* 44.574 ha, *Pino caribaea* 44.800 ha, *Eucalyptus pellita* 28.760 ha y *Hevea brasiliensis* 26.418 ha (MADR et al., 2021), en condiciones agroecológicas similares a las del caucho en bh-T (Tabla 6).

Tabla 6

Requerimiento óptimo para especies que se desarrollan en condiciones agroecológicas similares a la especie H. brasiliensis

Especie	pH	Altitud m s.n m	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
<i>Pinus caribaea</i>	4 - 6,5	0 – 850	950 - 3500	20-27
<i>Acacia mangium</i>	4,5 - 5,5	100 - 800	1500 - 2900	22-29
<i>Eucalyptus pellita</i>	5 a 6	0 – 800	900 - 4000	4-37

Nota. Se describen los requerimientos ideales de especies que comparten la misma zona de vida que el caucho. Tomado de *Marco de Referencial Agroeconómico Eucalyptus pellita; Efecto del manejo silvicultural en el crecimiento y productividad de plantaciones de Pinus caribaea en Maderas del Orinoco, Edo. Monagas; Predicción de rendimientos para plantaciones de Acacia mangium en la altillanura plana a partir de variables biofísicas y Eucalyptus pellita Especie Multipropósito de la Ganadería en los llanos Orientales*, por (FINAGRO, 2020; Angulo y Rivas, 2018; Caguasango, 2017; Álvarez, 2007).

2.3.12 Calidad de sitio

La calidad de sitio es el resultado de la interacción entre la genética de la especie, el suelo y el clima, por ende, es el equivalente a la capacidad de uso de la tierra en el área agrícola (Diéguez et al., 2009; Farrelly et al., 2011). La capacidad productiva de un rodal e incluida en la actualidad en los modelos de crecimiento es el índice de sitio (IS) (Rubilar et al., 2010; Lumbres et al., 2018). Este método se basa en la relación entre la altura dominante y la edad de los árboles (Antón et al., 2011).

La evaluación de la productividad del sitio es el soporte para identificar el potencial productivo y maximizar el rendimiento a través de especies adaptadas a condiciones específicas, así mismo, esta evaluación permite un diagnóstico correcto y la prescripción silvícola de planificación forestal y predicción del crecimiento y rendimiento de los recursos forestales (Burkhart & Tomé, 2012; Epron et al., 2013).

2.3.12.2 Determinación del Índice de Sitio de un Rodal.

2.3.12.2.1 *Altura Media Dominante.* La altura de los árboles dominantes y codominantes se prefiere como medida de la productividad forestal poco afectada por las densidades de los rodales o tratamientos de clareo (Bravo et al., 2008). La altura dominante de una masa se define como la altura de los 100 árboles con mayor DAP por ha (Wabo, 2002). Sin embargo, en una parcela circular de 5.64 m de radio resulta sencillo ubicar el árbol más alto, definida esta, como altura de parcela (Bengoa, 1999).

2.3.12.2.2 *Curvas de índice de sitio.* En la perspectiva de la modelación matemática forestal se han propuesto diferentes métodos para desarrollar funciones de sitio que pueden variar según la incidencia de algunos parámetros como el principio aplicado, el tipo de datos, el método de construcción y el modelo empleado (Prodan et al., 1997). Según la calidad de sitio, el sistema de curvas que representa la evolución de la altura dominante de rodales con respecto a la edad se divide en dos categorías, curvas anamórficas y polimórficas. Un sistema anamórfico, consiste en la relación de alturas entre dos curvas distintas, constante para todas las edades. Por el contrario, en un sistema polimórfico la forma de cada curva depende de la calidad de sitio que representa varias formas (Prodan et al., 1997; Wabo, 2002).

2.3.12.2.3 *Método de Construcción de Curvas.* Existen diferentes métodos basados en la construcción de curvas como el método de curva guía utilizado en la construcción de curvas anamórficas mediante el modelo de Schumacher, métodos paramétricos y de ecuación de diferencias para curvas polimórficas entre otros modelos matemáticos (Wabo, 2002). Se han empleado modelos matemáticos para representar de forma adecuada el crecimiento en altura

dominante e IS para diversas especies forestales comerciales (Tabla 7 – Figura 2) (Rojo et al., 2005; Barrios et al., 2021).

Tabla 7

Modelos ajustados de curvas de calidad de estación

Modelo	Ecuación	
Chapman - Richards Polimórfica (Payandeh y Wang, 1994)	$H_0 = (\beta_0) \cdot (IS^{\beta_1}) \cdot (1 - e^{(-\beta_2 \cdot t)})^{\beta_3}$ $K = \frac{\ln((IS^{\beta_1} - \beta_1) / \beta_0) / \ln(1 - e^{(-50 \cdot \beta_2)})}{\beta_3}$	[1]
Weibull polimórfica (Payandeh y Wang, 1994)	$H_0 = K \cdot (1 - e^{(-\beta_2) \cdot (t^{\beta_3} \cdot IS^{\beta_4})})$ $K = IS / (1 - e^{(-\beta_2) \cdot (50^{\beta_3} \cdot IS^{\beta_4})})$	[2]
Chapman - Richards anamórfica (Biging y Wensel, 1985)	$H_0 = K \cdot (IS^{\beta_1}) \cdot (1 - e^{(\beta_2 \cdot t)})^{\beta_3}$ $K = (IS / IS^{\beta_1}) \cdot (1 - e^{(\beta_2 \cdot 50)})^{\beta_3}$	[3]
Chapman - Richards polimórfica (Burhart y Tennent, 1977)	$H_0 = K \cdot (1 - e^{(-\beta_2 \cdot IS \cdot t)})^{\beta_3}$ $K = IS / (1 - e^{(-\beta_2 \cdot IS \cdot 50)})^{\beta_3}$	[4]
Weibull anamórfica (Bailey, 1980)	$H_0 = K \cdot (IS^{\beta_1}) \cdot (1 - e^{(-\beta_2 \cdot t^{\beta_3})})$ $K = (IS / IS^{\beta_1}) \cdot (1 - e^{(-\beta_2 \cdot 50^{\beta_3})})$	[5]

Donde: Edad de referencia; Ho: Altura dominante; β_0 , β_1 y β_2 : Parámetros ajustados.

Nota. Adaptada para el presente trabajo de grado. Tomado de *Modelos evaluados para clon IAN de H. brasiliensis en México* (p.11), por Rojo et al., 2005.

Figura 2

Modelos de crecimiento evaluados para la altura dominante de calidad de sitio

Modelo	Ecuación base de H	Ecuación IS	Ecuación H
Chapman-Richards	$H = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 A}\right)^{\beta_2}$	$IS = H \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 A_0}}{1 - e^{-\beta_1 A}}\right)^{\beta_2}$	$H = IS \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 A}}{1 - e^{-\beta_1 A_0}}\right)^{\beta_2}$
Korf	$H = \beta_0 e^{-\beta_1 / A^{\beta_2}}$	$IS = H e^{\beta_1 (\sqrt[\beta_2]{A^{\beta_2}} - \sqrt[\beta_2]{A_0^{\beta_2}})}$	$H = IS e^{-\beta_1 (\sqrt[\beta_2]{A^{\beta_2}} - \sqrt[\beta_2]{A_0^{\beta_2}})}$
Schumacher	$H = \beta_0 e^{-\beta_1 / A}$	$IS = H e^{\beta_1 (1/A - 1/A_0)}$	$H = IS e^{-\beta_1 (1/A - 1/A_0)}$
Weibull	$H = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 A^{\beta_2}}\right)$	$IS = H \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 A_0^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 A^{\beta_2}}}\right)$	$H = IS \left(\frac{1 - e^{-\beta_1 A^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 A_0^{\beta_2}}}\right)$

Donde: H: altura dominante; IS es el índice de sitio; A: edad y A0: edad base; β_0 , β_1 y β_2 : Parámetros ajustados

Nota. Adaptada para el presente trabajo de grado. Tomado de *Modelamiento de la productividad de Gmelina arborea* Roxb. con base en variables biofísicas y de rodal (p.75), por Barrio et al., 2021.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el departamento de Casanare, en plantaciones disetáneas forestales comerciales de caucho. Estas plantaciones se ubicaron en los municipios de Paz de Ariporo, específicamente en la vereda Las Mercedes, en el predio Las Mercedes (Localización espacial: 5°52'51.65"N-71°53'34.72"W); en el municipio de Aguazul, en la vereda El Rincón del Bubuy, en el predio Juan Martín (Localización espacial: 5°10'15.13"N-72°33'03.03"W); y en Villanueva, en las veredas El Triunfo y Aeropuerto la Bastilla, en el predio Nápoles (4°36'41,70"N-72°55'41.17"W) (Figura 3). En este estudio los sitios se denominan como uno (1),

dos (2) y tres (3) respectivamente; por otra parte, las variables bioclimáticas consignan que la distribución de las precipitaciones es monomodal con significancia entre abril a noviembre y una temporada seca que comprende los meses de diciembre a marzo (IDEAM, 2019).

3.1.1 Descripción de sitios

3.1.1.1 Paz de Ariporo, sitio 1. Registra una altitud de 270 m s.n.m., presenta dos unidades morfológicas, paisajes de lomerío y pie de monte hacía el oeste y otra plana en la mayor parte del municipio correspondiente a llanura o planicie al este (Barrera et al., 2018). El municipio registra una precipitación media anual de 2150 mm, temperatura promedio anual de 27°C y humedad relativa promedio anual de 76% (Medina & Ortiz, 2022).

El sitio, tiene un área de 2,1 ha, dividida en dos lotes, la densidad de siembra fue de 6x3m, con 550 individuos por ha. El sistema de rayado obedece a D2 (Cada dos días). Adicionalmente se recolectaron 2668,5 litros de látex por ha en los meses de junio a diciembre del año 2021, la plantación tiene 9 años. El clon plantado se denomina RIMM 600 (origen Asiático) (Apéndice B).

3.1.1.2 Aguazul, sitio 2. Se encuentra a una altitud de 290 m s.n.m., presenta dos unidades morfológicas, con paisaje de lomerío y pie de monte al oeste mientras que el paisaje de llanura o planicie se ubica al este del municipio (Barrera et al., 2018). La temperatura promedio anual es de 26,5°C y la humedad relativa promedio anual es de 78%. La precipitación media anual es de 2696 mm (Díaz et al., 2021).

El sitio, presenta un área de 5 ha, dividida en tres lotes, la densidad de siembra es de 6x3 m, con 550 individuos por ha, el sistema de rayado se denomina D3 (cada tres días). Además, se recolectaron 913 litros de látex por ha en los meses de junio a diciembre del año 2021, la edad de la plantación es de 8 años. Los clones plantados fueron RIMM 600 Y FX3864 (Apéndice C).

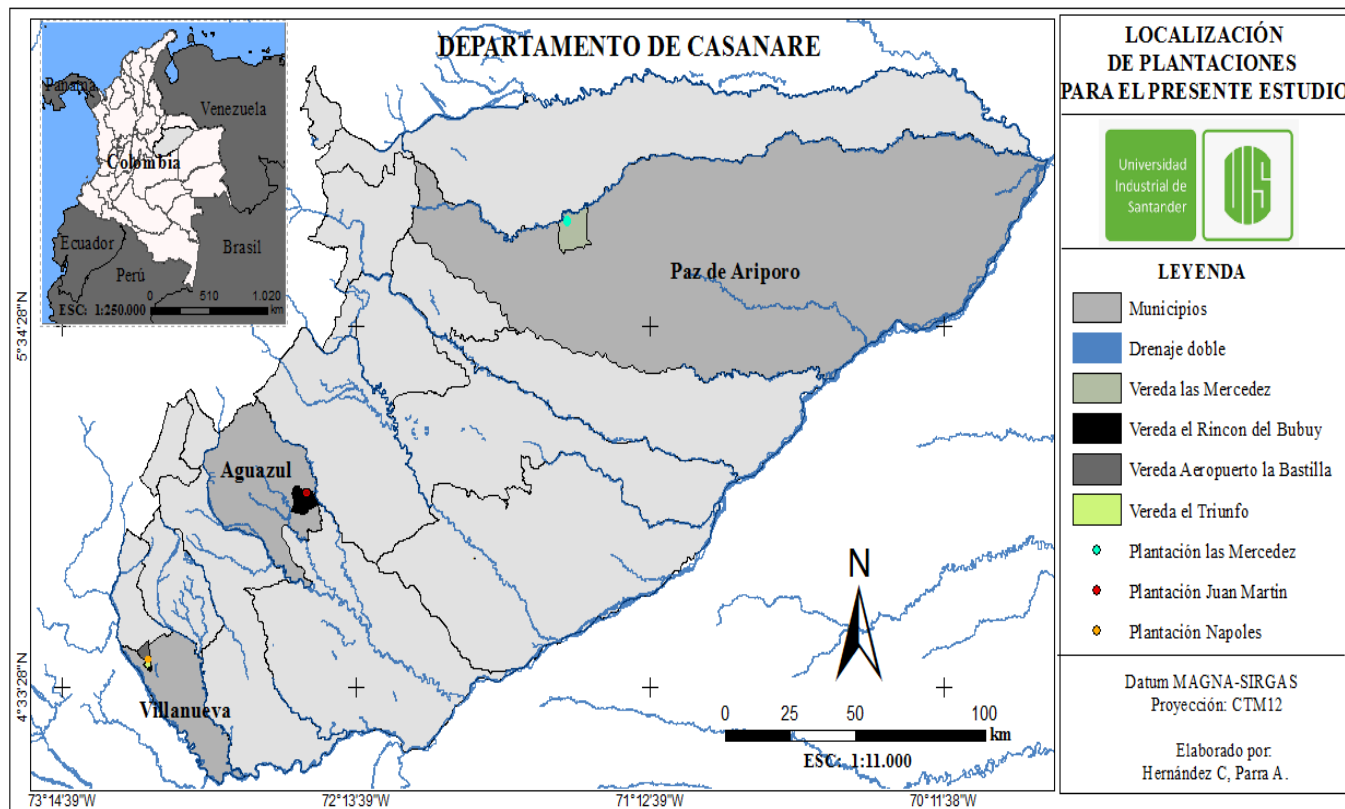
3.1.1.3 Villanueva, sitio 3. Se localiza a una altitud de 300 m s.n.m., con geoformas de Piedemonte, Altiplanicie, Lomerío, Planicie y Valle (Barrera et al., 2018). La temperatura promedio anual es de 25,8°C y la humedad relativa promedio anual es de 77%. La precipitación media anual es de 2.631 mm (EOT, 2009; Barrera et al., 2018).

El sitio, cuenta con un área de 8 ha, dividida en cuatro lotes, la densidad de plantación fue de 8 x 2,5 m, con 500 individuos por ha, el sistema de rayado corresponde a D4 (Cada cuatro días). Además, se recolectaron 1867,9 litros de látex por ha en los meses de junio a diciembre del año 2021, la edad de la plantación es de 12 años. Los clones plantados fueron RIMM 600 y FX3864. Cabe resaltar que la plantación fue abandonada en el año 2018 y se retomaron actividades de mantenimiento y aprovechamiento a partir de junio del año 2021 (Apéndice D).

Para los sitios 1, 2 y 3 los suelos se clasifican en las clases 4, 5, 6, 7 y 8 (IGAC, 2017), la clasificación climática según Holdridge (1982), corresponde a zona de vida bh-T y según Caldas Lang es clima cálido húmedo (IGAC, 2014). Las actividades de sangría inician desde abril hasta finales del mes de diciembre, teniendo en cuenta el periodo de defoliación - refoliación.

Figura 3

Localización de plantaciones de H. brasiliensis en tres municipios del departamento de Casanare



Nota. Distribución de plantaciones disetáneas de *H. brasiliensis* en los diferentes sitios localizados en los municipios de Paz de Ariporo, Aguazul y Villanueva del departamento de Casanare.

3.2 Recolección de datos

3.2.1 Describir las condiciones climáticas y edáficas en plantaciones forestales disetáneas de *H. brasiliensis*.

3.2.1.1 Climatología. Las bases de datos climatológicas comprendieron una ventana de tiempo entre 1996 hasta 2022, obtenidas desde el portal DHIME (Datos de Hidrología y Meteorología) del IDEAM, con valores total mensual de precipitación (PP mm) y valores diarios de temperatura máxima ($T_{max}^{\circ C}$) y mínima ($T_{min}^{\circ C}$) y humedad relativa máxima ($H_{rmax}\%$) y

mínima (Hrmin%), procedentes de las siguientes estaciones meteorológicas (Tabla 8) (IDEAM, 2022).

Tabla 8

Ubicación geográfica estaciones meteorológicas

Código	Nombre Estación	Municipio	Latitud (N)	Longitud (W)
36015010	Paz de Ariporo	Paz de Ariporo	5°52'42.7"	71°53'13.9"
35215020	Aeropuerto Yopal - AUT	Yopal	5°19'13.6"	72°23'15.0"
35190070	San José	Aguazul	5°05'30.9"	72°27'30.9"
35095110	Huerta la grande	Villanueva	4°39'18.3"	72°55'02.4"
35235040	Trinidad - AUT	Trinidad	5°25'08.5"	71°39'58.2"
35225030	Módulos - AUT	Orocué	4°54'37.7"	71°25'59.0"

Nota. Para asegurar la mayor disponibilidad de datos se seleccionó seis estaciones meteorológicas con un periodo (1996-2022). Tomado del portal DHIME, por IDEAM, 2022.

3.2.1.2 Muestreo de suelo. Se realizó la toma de una muestra de suelo, en cada predio se colectaron 10 submuestras a una profundidad de 40 cm, según la recomendación FAO para la producción forestal (FAO, 2018). Luego, se mezclaron las submuestras y se empacó 1 Kg en bolsa hermética (Pichimata & Pedraza, 2013).

Las muestras de suelos colectadas fueron enviadas al laboratorio de suelo Terrallanos en la ciudad de Villavicencio (Meta) para determinar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, análisis correspondiente al año 2022. También, se tuvo acceso a dos análisis de suelos que fueron suministrados por los propietarios de las plantaciones de los sitios 2 y 3 correspondientes a los años 2019 y 2014 respectivamente.

3.2.1.2.1 Pendiente. Se importaron las coordenadas de los sitios en Google Earth Pro, luego para cada sitio se trazó sobre el perímetro una línea vertical para medir la distancia, tomando en

cuenta la distancia se observó el perfil de elevación y se estimó la pendiente tomando el punto de elevación máximo menos el mínimo, dividido en la distancia (Cuevas, 2022).

3.2.2 Estimar el volumen de madera total y comercial de árboles en pie en plantaciones de *H. brasiliensis*

3.2.2.1 Sistema de muestreo. Se realizó un muestreo sistemático, con parcelas temporales circulares de 500 m², la distancia de muestreo se estimó con la expresión (1), el porcentaje de error relativo máximo admisible fue de 15% aplicando la ecuación (2) (Ibáñez, 2004; González et al., 2011).

$$a = \sqrt{\frac{\text{superficie}}{\text{número de parcela}}} \quad (1)$$

Donde: a: distancia de parcela de muestreo; s: superficie del rodal en (m²); n: número de parcelas de muestreo.

$$E (\%) = \frac{t \cdot CV}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{n}{N}} \quad (2)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} 100$$

Donde: E: error relativo máximo admisible; n: número de parcelas de muestreo en el rodal; t: t student (parámetro estadístico); CV: coeficiente de variación; N: número de parcelas de igual superficie que componen la población en el total de la superficie de muestreo; S: desviación estándar de la muestra; \bar{X} : media de la muestra de inventario.

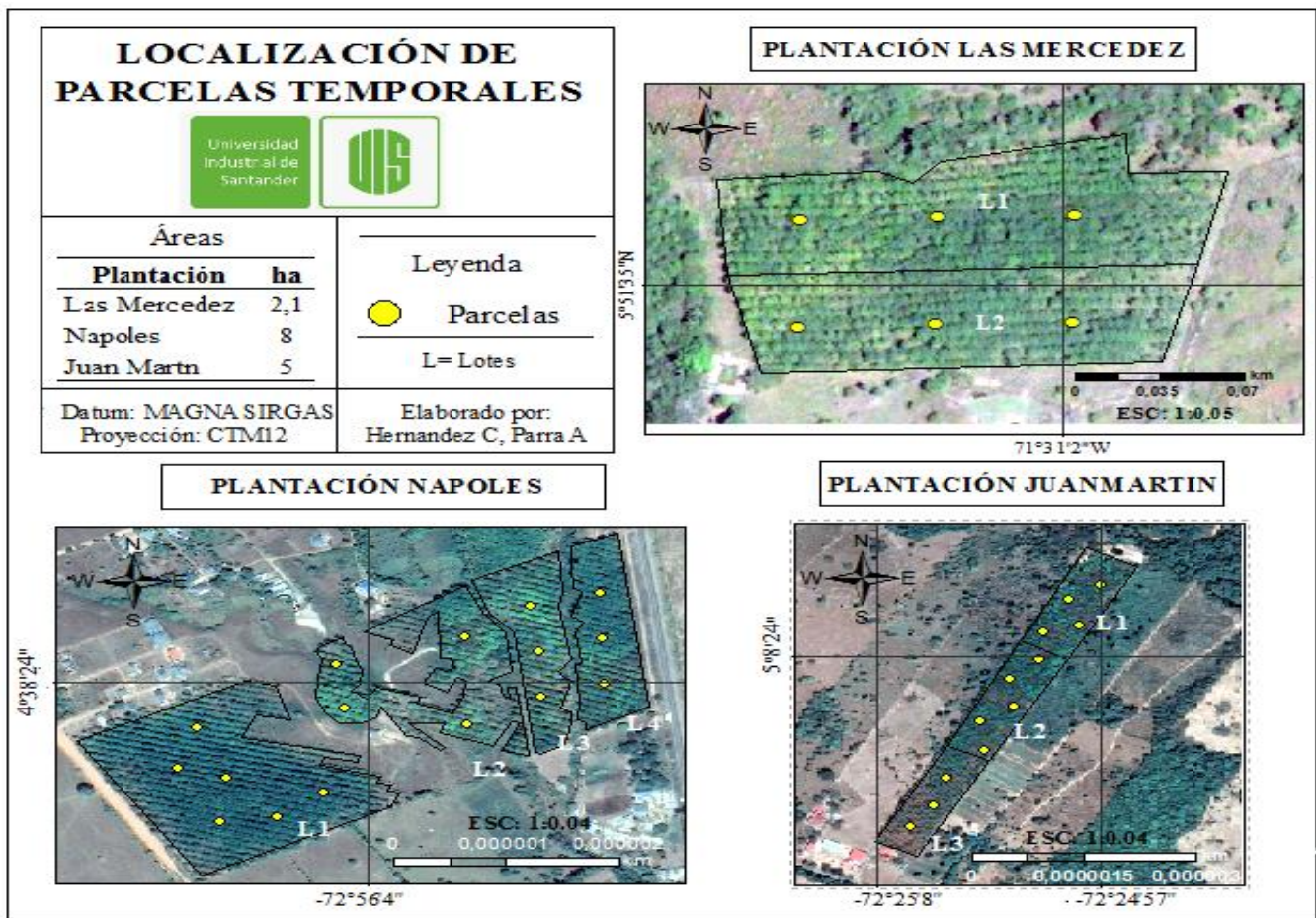
Para el error del muestreo se utilizó el área basal (g m²) que es la variable que mejor se ajusta porque se obtienen directamente de la medida de diámetros normales, en inventario forestal $t \approx 2$ con probabilidad del 95% (Ibáñez, 2004; González et al., 2011).

3.2.2.2 Establecimiento de parcelas temporales. Se establecieron 34 parcelas temporales distribuidas de la siguiente manera: seis (6) en el sitio 1; 12 en el sitio 2 y 16 para el sitio 3 (Figura

4). Cada parcela representó 500 m² de forma circular, georreferenciada en el centro, con equipo GPS Garmin (Apéndice A), una vez delimitada y marcada la parcela cada individuo arbóreo fue medido en el sentido de las manecillas del reloj (Fondo para el Financiamiento del sector Agropecuario [FINAGRO], 2018).

Figura 4

Distribución de parcelas temporales en el área de estudio para el municipio de Paz de Ariporo, Aguazul y Villanueva.



Nota. Localización de parcelas temporales distribuidas en el área de estudio. En el sitio 1 se registraron 2 lotes (L1, L2) con una distancia de 60 m entre parcelas. En el sitio 2, se registraron tres lotes (L1, L2, L3) con una distancia de 65 m entre parcelas. Por último, en el sitio 3, se contaron cuatro lotes (L1, L2, L3, L4) con una distancia entre parcelas de 70 m. Las escalas de las salidas gráficas fueron configuradas según la ampliación de la imagen en el mapa.

3.2.2.3 Mediciones de variables dendrométricas. Las mediciones dendrométricas fueron la circunferencia a la altura del pecho (CAP cm) medido a 1.30 m de altura, empleando cinta métrica, la altura total (H m) y altura comercial (h m) de los árboles se midió con la pistola haga, fijando una distancia de lectura a 20 m (Cancino, 2012).

3.2.3 Validar métricas provenientes de modelos matemáticos aplicados a la calidad de sitio para la especie *H. brasiliensis*

3.2.3.1 Alturas dominantes (Ho). Se seleccionaron cinco árboles con mayor altura por parcela como lo registra Bengoa (1999).

3.2.3.2 Construcción curvas de calidad de sitio. La construcción de curvas de calidad de sitio se obtuvo mediante el empleo del método de la curva guía o curva media (Olate, 2007), para la modelación de Ho en función de la edad (t) se evaluaron tres modelos matemáticos (Tabla 9), modelos generales y validados para predecir el crecimiento de árboles de diferentes rodales forestales (Martínez et al., 2015).

Tabla 9

*Modelos evaluados para determinar el índice de sitio en plantaciones de *Hevea brasiliensis**

Modelo	Ecuación	
Hossfeld I	$H_0 = (t^2) / (\beta_0 + \beta_1 \cdot t)^2$	(3)
Chapman - Richards	$H_0 = \beta_0 (1 - e^{(-\beta_1 t)})^{\beta_2}$	(4)
Schumacher	$H_0 = \beta_0 e^{(-\beta_1/t)}$	(5)

Donde: t: Edad; Ho: Altura dominante, β_0 , β_1 y β_2 : Parámetros ajustados, RMSE: Raíz del error medio cuadrático, R^2 : Coeficiente de determinación.

3.2.4 Evaluar la incidencia de las características climáticas y edáficas interespecíficas relacionadas con la altura dominante en H. brasiliensis

3.2.4.1 Generación base de datos. Los datos se obtuvieron tomando en consideración los años correspondientes a los cinco análisis de suelos, donde se tiene: tres análisis correspondientes a los sitios 1, 2 y 3 para el año 2022 y dos análisis para los sitios 2 y 3 para los años 2019 y 2014 respectivamente (Apéndice I).

La H_0 se estimó con base en la ecuación del modelo que presentó mejor bondad de ajuste y reemplazando la variable t en años, según el periodo de análisis de suelo y valores anuales del clima.

3.3 Procesamiento de datos

3.3.1 Describir las condiciones climáticas y edáficas en plantaciones forestales disetáneas de H. brasiliensis.

3.3.1.1 Climatología.

3.3.1.1.1 Datos climáticos faltantes. Los valores faltantes en las series de tiempo climatológicas fueron correlacionadas y aplicadas a regresiones lineales, este método consistió en el cálculo de datos faltantes entre dos estaciones por el ajuste, a través del método de los mínimos cuadrados, de una recta de regresión lineal (Ecuación 6), partiendo de la hipótesis “que entre dos series a comparar existe una correlación, de tal modo que las variaciones que se producen en ambas son similares” (Mercy et al., 2017). Se empleó el *software Excel* para las respectivas correlaciones y regresiones.

$$Y=a+bX \quad (6)$$

Donde: Y: precipitación estimada y X: precipitación de la estación completa que proporciona la variable independiente de la cual depende la anterior.

3.3.1.1.2 Estimación valores mensuales – anuales - multianuales. Teniendo los datos meteorológicos completos, en el *software RStudio*, se estimó la precipitación promedio mensual multianual; la sumatoria anual y el promedio multianual. Las variables de temperatura y humedad relativa fueron calculadas entre los valores máximos y mínimos con datos diarios hasta obtener promedio mensual anual, mensual multianual y promedio multianual (IDEAM, 2018). Se contó con datos del 90% equivalentes a 27 años de registro climatológico de los años que integraron el período de premediación.

3.3.1.1.3 Análisis de datos. Con el propósito de analizar el conjunto de datos para las variables PP(mm), T(°C) y Hr(%) se graficaron en el *software RStudio* versión 4.2.2 los diagramas boxplot y estimaciones de estadística descriptiva (media), desviación estándar (S) y coeficiente de variación (C.V)) (Martínez, 2012). Además, se aplicó la prueba de normalidad de *Shapiro Wilk* (Tapia et al., 2021).

3.3.1.1.4 Descripción de variables climáticas. Las descripciones climáticas se realizaron mediante el análisis de salidas gráficas por sitios. Además, se construyeron climogramas según Walter-Lieth (1967) a través del paquete *climatol* del lenguaje de programación *RStudio* a partir de los valores mensuales multianuales en PP mm y valores máximos y mínimos de T°C (Fernández, 2020).

3.3.1.2 Variables edáficas.

3.3.1.2.1 Análisis de variables. Se analizaron diversas variables químicas, incluyendo macronutrientes primarios (N, P y K) y secundarios (Ca, Mg), así como pH. También se analizaron propiedades físicas, como la textura del suelo y pendiente, y propiedades biológicas, como la materia orgánica (MO). Variables fundamentales para el óptimo crecimiento y desarrollo de la especie *H. brasiliensis* (Azabache, 2012, García et al., 2013; Tapiero et al., 2018; Acuña, 2019).

3.3.1.2.2 Descripción de variables edáficas. La descripción edáfica se realizó teniendo en cuenta los análisis de los suelos correspondientes al año 2022, valores que fueron tabulados en tablas.

3.3.1.3 Comparación de variables climáticas y edáficas.

Se realizó a través de la metodología propuesta por Bedoya (2014), las comparaciones de las características edáficas y climáticas requeridas para el óptimo desarrollo de *H. brasiliensis* y las encontradas en los sitios.

En cuanto a las variables edáficas se tuvo en cuenta los análisis realizados en el año 2022. Respecto a las variables climáticas se tuvo en cuenta la media multianual (1996 – 2022).

3.3.2 Estimar el volumen de madera total y comercial de árboles en pie en plantaciones de *H. brasiliensis*

3.3.2.1 Generación Bases de datos. En el *software Excel* versión 2302, se tabuló la información dasométrica de cada plantación forestal. Además, se calculó el DAP (diámetro a la altura del pecho en cm) y área basal (g m^2) por medio de las fórmulas geométricas:

$$\text{DAP} = \frac{CAP}{\pi} \quad (7)$$

El g m^2 se calculó empleando DAP en m:

$$g = \frac{\pi * DAP^2}{4} \quad (8)$$

3.3.2.1.1 Análisis de datos dendrométricos. En el *software RStudio* se llevó a cabo el mismo análisis estadístico utilizado para el análisis de las variables climáticas. La normalidad de los datos se estimó mediante la prueba de *Kolmogórov-Smirnov* (Tapia et al., 2021).

3.3.2.2 Estimación volumen (m³). Se estimaron los volúmenes totales (Vt) con la ecuación estándar (9) y la ecuación alométrica lineal generalizada ponderada (10) sugerida por Gallego (2021) para plantaciones de *H. brasiliensis*. Así mismo se estimó el volumen comercial (Vc) empleando la ecuación estándar (11), con factor de forma 0.66 propuesto por Rosa et al. (2007).

$$V_t = g * H * ff \quad (9)$$

$$V = -0.06399 + 0.009682 * DAP + 0.000026 * DAP^2 * H \quad (10)$$

$$V_c = g * h * ff \quad (11)$$

Donde: DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm); g: Área basal (m²); H: Altura total (m); h: Altura comercial (m); ff: factor de forma.

3.3.3 Validar métricas provenientes de modelos matemáticos aplicados a la calidad de sitio para la especie *H. brasiliensis*

3.3.3.1 Análisis de datos. Con el propósito de analizar el conjunto de datos para la variable altura dominante (H₀ m) se realizó un análisis estadístico descriptivo, desviación estándar (S) y coeficiente de variación (C.V)) en el *software RStudio* versión 4.2.2 (Martínez, 2012).

3.3.3.1.1 Evaluación de modelos matemáticos. A partir de la selección de los árboles dominantes, cada modelo fue ajustado por regresión no lineal empleando como valores la partida del proceso iterativo para β_0 y β_1 obtenidos en el ajuste lineal, se comprobó que las estimaciones

de los parámetros fueran significativamente distintas de cero a un nivel del 5%. Por último, se validaron los modelos mediante R^2 y RMSE con la versión 4.2.2 del programa *RStudio*.

3.3.3.1.2 Estimación altura dominante (H_o). Se seleccionó el modelo que presentó mayor ajuste y a partir de este se estimó la H_o (m) para cada sitio, teniendo en cuenta la edad (t) de las plantaciones (información suministrada por los propietarios de los predios).

3.3.3.1.3 Índice de sitio y construcción de curvas de calidad de sitio. Se seleccionó el modelo que presentó mayor ajuste y mediante la ecuación obtenida se comprobó gráficamente la diferencia entre la curva media obtenida con las estimaciones del modelo ajustado por regresión lineal y la curva ajustada por regresión no lineal. A partir de esta ecuación se determinó H_o respecto a t (años) de las plantaciones. Seguidamente, con la curva guía, se presentaron curvas de calidad de sitio de cada una de las familias, representadas a partir de seis curvas de IS con intervalo de 3 m con rango de 9 a 24 m. obtenidas a partir de dicha curva guía. Para ello se fijó la edad de referencia (T) de 12 años.

La edad de referencia se eligió en base a los siguientes criterios: Edad de turno, estabilización de la producción de látex y valor cercano a la media de las edades de las plantaciones (Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal [CONIF], 1997; Barrios et al., 2021). Esto teniendo en cuanto los criterios propuestos por Clutter et al. (1983) y Teshome y Petty (2000).

3.3.4 Evaluar la incidencia de las características climáticas y edáficas interespecíficas relacionadas con la altura dominante en *H. brasiliensis*

3.3.4.1 Correlaciones. Para evaluar la correlación de H_o respecto a las variables climáticas (PP mm, $T^{\circ}C$ y Hr%) y edáficas, con base en propiedades químicas (N, P, K, Mg, Ca, pH), físicas (pendiente) y biológicas (MO), se efectuó una normalidad multivariada de *ShapiroWilk* y la prueba

Spearman para medir la correlación de variables y su nivel de significancia. Los análisis se realizaron a través del programa *RStudio* utilizando las librerías de *mvnrmtest* y *corrplot* (Salazar, 2018).

4. Resultados

4.1 Climatología

4.1.1 Análisis de datos climáticos

Se observa los parámetros de estadística descriptiva para cada sitio (Figura 5), para el sitio 1, 2 y 3 los valores máximos de T°C fueron de 33; 34 y 33, mientras que la precipitación mínima fue de 22,2; 14,5 y 19,7 mm respectivamente, en el periodo de enero a febrero. La humedad relativa mínima fluctúa entre 34 a 36% para los tres sitios durante el periodo de febrero a marzo, los cuales se encuentran en el rango óptimo de crecimiento. En cuanto a la dispersión de datos, se obtiene que todas las variables analizadas presentan un coeficiente de variación $< 30\%$ indicando homogeneidad (menor variabilidad), por tanto, la media es representativa (Tabla 10). La prueba de *Shapiro Wilk* indica que la muestra de datos presenta una distribución normal (Tabla 11).

Figura 5

Gráficas box plot de variables climatológicas analizadas por sitio

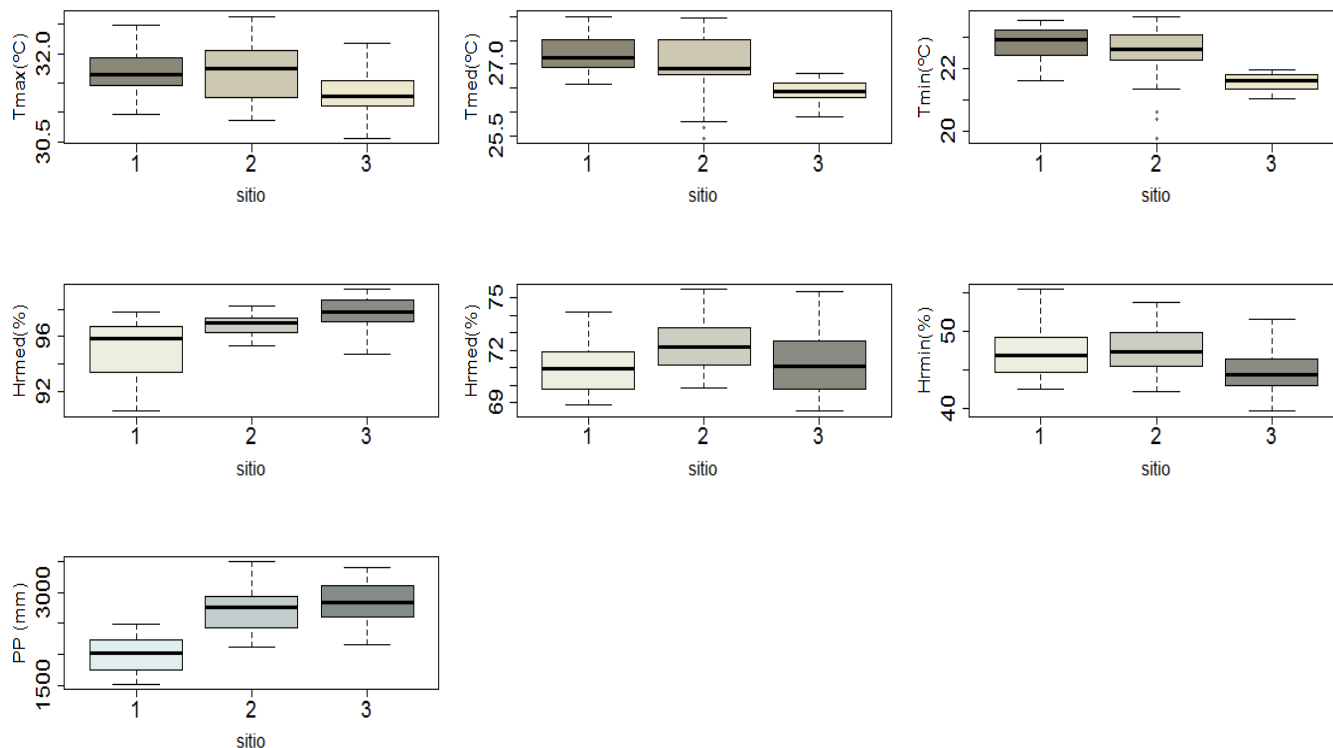


Tabla 10

Análisis de datos exploratorio para variables climáticas

Sitio	1996-2022	PP (mm)	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)		
			Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima
1	Media	2013,7	31,6	27,2	22,7	94,9	71,0	47,0
	S	288,0	0,35	0,38	0,53	2,47	1,51	2,97
	C.V (%)	14,3	1,1	1,3	2,3	2,6	2,1	6,3
2	Media	2745,6	31,6	27,0	22,3	96,9	72,2	47,6
	S	353,7	0,5	0,68	1,02	0,79	1,5	2,80
	C.V (%)	12,8	1,6	2,52	4,5	0,8	2	5,8
3	Media	2826,5	31,3	26,4	21,5	97,6	71,2	44,7
	S	317,6	0,37	0,23	0,28	1,17	1,84	2,79
	C.V (%)	11,2	1,2	0,9	1,34	1,2	2,5	6,2

Tabla 11*Prueba de normalidad de Shapiro Wilk para variables climáticas*

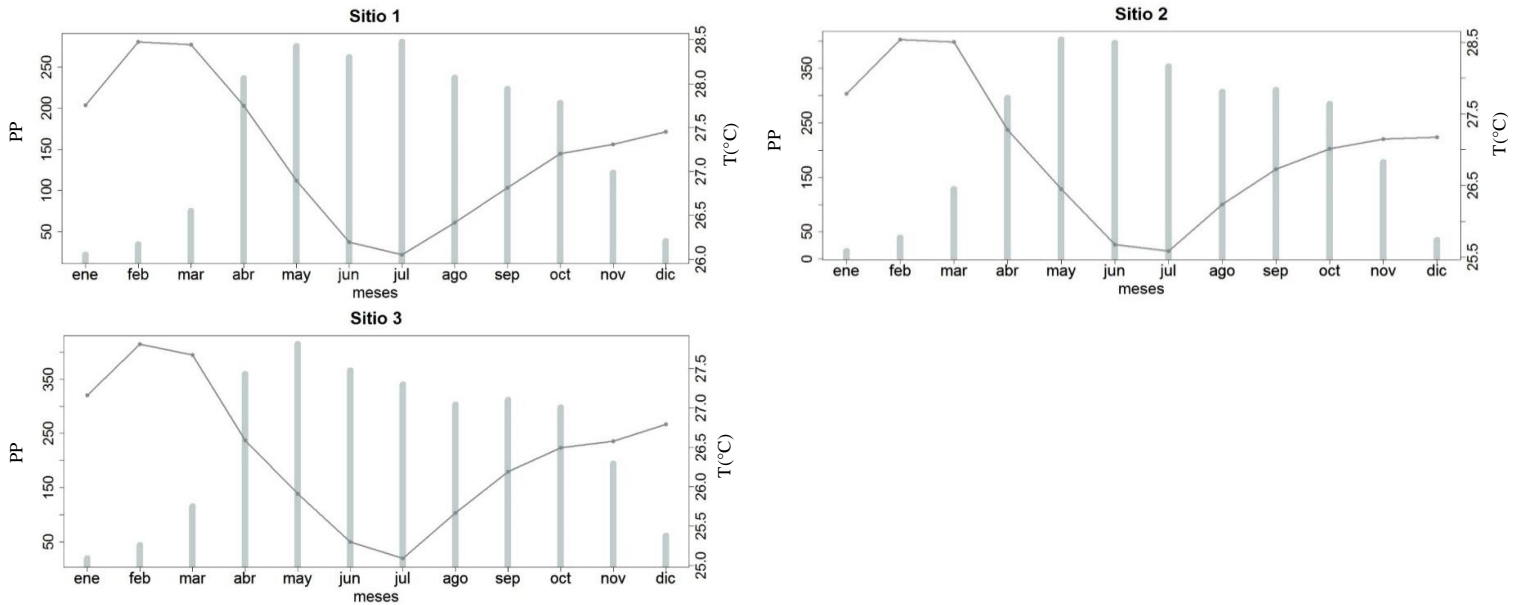
Sitio	PP(mm)	T(°C)	Hr(%)
1	0,30	0,28	0,24
2	0,75	0,05	0,81
3	0,44	0,35	0,56

4.1.1.1 Descripción de variables climáticas

4.1.1.1.1 Análisis de gráficas mensuales multianuales. La precipitación se distribuyó de forma monomodal con picos lluviosos entre mayo hasta julio. En contraste, bajas temperaturas en los sitios con un mínimo de 21 a 22°C respectivamente. Por otra parte, los picos máximos de temperatura fluctúan entre los meses de enero a marzo en los sitios (Figura 6). Los registros temporales de las variables PP(mm) y T(°C) máximos, medios y mínimos pertenecientes a cada municipio se presentan en los apartados (Apéndice E - F). Los picos máximos de Hr% fluctúan entre 98% y 99% para mediados del año. En contraposición decrece para enero a febrero, fenómeno que impide la proliferación de enfermedades, ya que se considera que el SALB no puede germinar en condiciones de Hr >65% durante el mes más seco (enero) (Apéndice F).

Figura 6

Representación gráfica de T(°C) y PP(mm) mensual multianual (1996-2022)

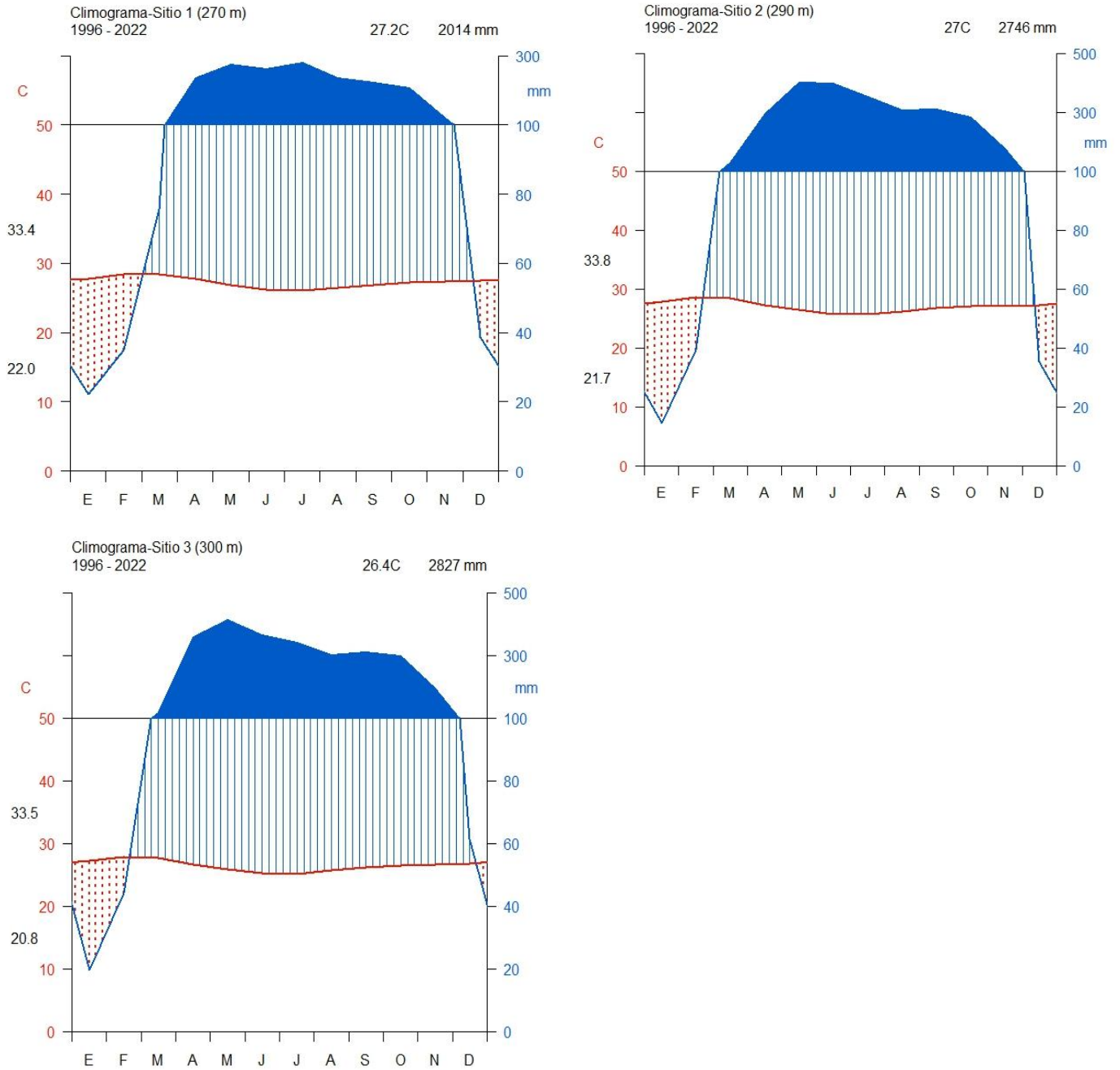


Nota. Las barras de color gris indican la distribución de la precipitación (mm) y la línea gris muestra la distribución de la temperatura (°C).

Según el registro mensual multianual, Villanueva denota mayor PP (2827 mm) y menor T°C (26,4), por el contrario, Paz de Ariporo presentó menor PP (2014 mm) y mayor T°C (27,2), por último, Aguazul presenta precipitaciones de (2746 mm) y T°C (27). Los meses de junio a julio son superhúmedos (zona azul oscuro), llegando a humedades relativas de 75 a 77% en los sitios. Así pues, el nivel de humedad disminuye desde agosto, logrando meses más secos entre enero, febrero y diciembre (zonas de color rojo), el climograma es representativo de bioma de sabana (Figura 7). Estos resultados se deben a que los municipios de Aguazul y Villanueva cuentan con mayor extensión de cobertura de pie de monte, lo que favorece el aumento de precipitaciones.

Figura 7

Climograma de Walter Lieth

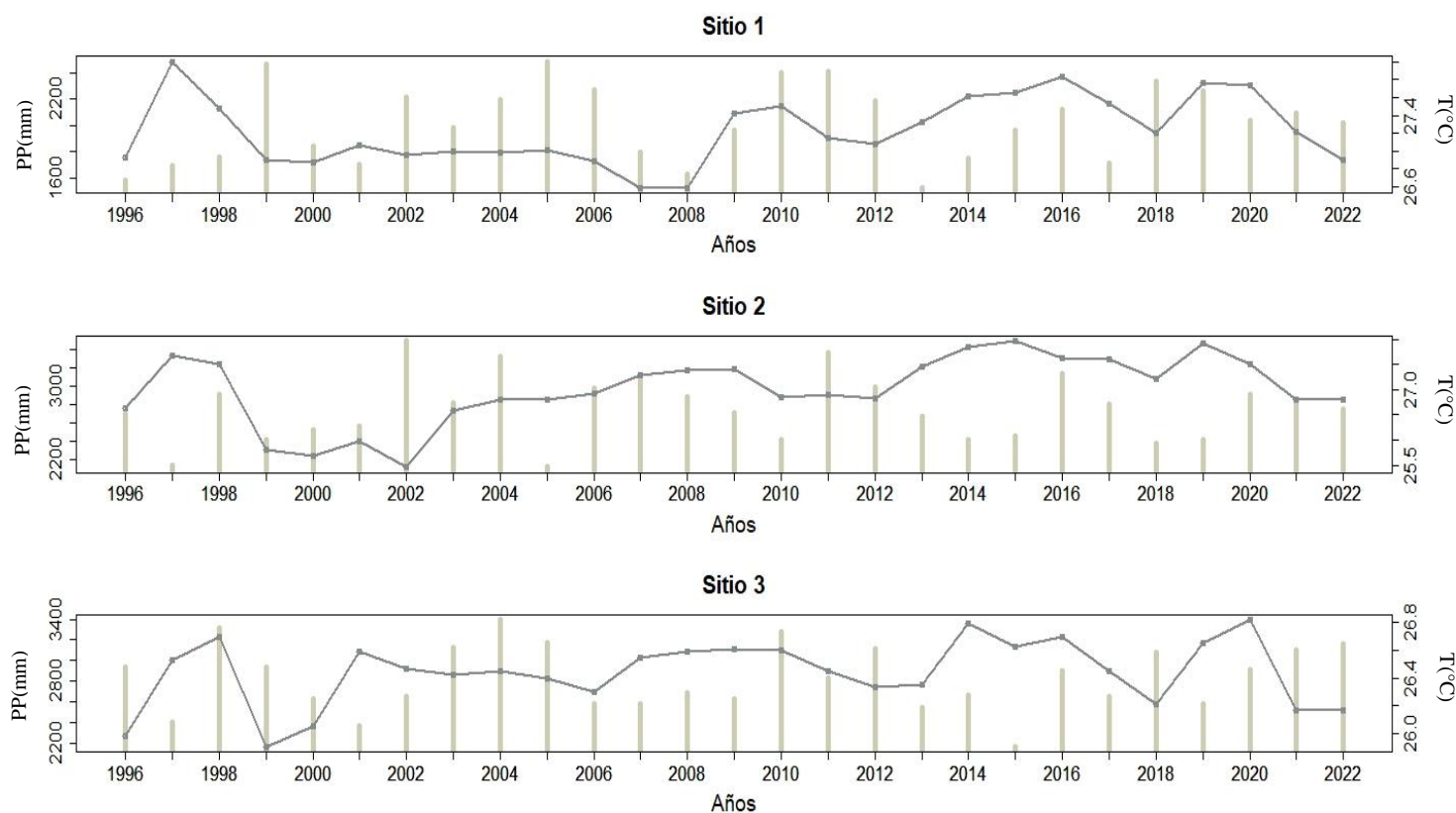


4.1.1.1.2 Análisis de gráficas anuales multianuales (1996 – 2022). La figura 8 muestra las fluctuaciones y la distribución de PP mm con respecto a T°C durante un periodo de 27 años.

Las secciones (Apéndice G - H) ofrecen registros temporales de las variables climatológicas T°C y Hr% para cada municipio.

Figura 8

Representación gráfica de T(°C y PP(mm) multianuales



Nota. Las barras de color gris indican la distribución de la precipitación (mm) y la línea gris denota el comportamiento de la temperatura (T°C).

4.1.1.2 Comparación de variables climáticas. Al comparar los datos climáticos encontrados en los sitios (valores multianuales) respecto a los valores climáticos óptimos para el establecimiento de la especie *H. brasiliensis*, se encontró que los tres sitios satisfacen los requisitos para la especie (Tabla 12).

Tabla 12*Condiciones climáticas requeridas y encontradas en los sitios*

Parámetros técnicos	Sitios			Condiciones óptimas
	1	2	3	
Precipitación Anual (mm)	2013,7	2745,6	2826,5	2000-3000
Temperatura (°C)	27,2	27,0	26,4	25-28
Humedad Relativa (%)	71	72,2	71,2	70-80
Altitud (m s.n.m.)	270	290	300	0-800

Nota. En la tabla se describe las condiciones climáticas requeridas para *H. brasiliensis* expuestas en la Tabla 2 y las encontradas en los sitios (información propia).

4.2 Variables edáficas

Según el análisis de suelo las variables de interés N, P, K, Ca y Mg son bajas para los tres sitios (Apéndice I). Se obtuvo una pendiente con rango entre 1 a 1.5% (Tabla 15).

4.2.1 Descripción y comparación de variables edáficas

Los resultados muestran diferencias en Mg, con el sitio 1 reflejando una disponibilidad media en comparación con los otros dos sitios, que indican una baja disponibilidad del elemento. En contraste, no se encontraron diferencias significativas entre los sitios para los otros elementos, sin embargo, el sitio 1 tiene mayor contenido de K y Ca en comparación con los otros sitios, no obstante, todos fueron clasificados como condición baja (Tabla 13).

Tabla 13*Condiciones edáficas, nutricionales requeridas y encontradas en los sitios*

Propiedades	Nutrientes	Sitios			Condiciones		
		1	2	3	Alto	Medio	Bajo
Químicas	N (%)	0,03	0,03	0,04	>0,25	0,25-0,1	<0,1
	P (ppm)	0,4	0,4	0,4	>30	30-15	<15
	K(meq/100g)	0,06	0,03	0,01	>0,30	0,30-0,15	<0,15
	Mg(meq/100g)	0,8	0,1	0,03	>1	1-0,4	<0,4
	Ca(meq/100g)	2	0,1	0,1	>6	6-3	<3

Nota. En la tabla se describe las condiciones nutricionales requeridas expuestas en la Tabla 4 y las encontradas en los sitios (información propia).

Se cree que el pH ácido y la alta saturación de aluminio (Al) >50% (Apéndice I), son la causa de la insuficiencia nutricional. La toxicidad de Al^{+3} puede inhibir el crecimiento de las raíces, lo que indica una menor absorción de agua y nutrientes. Sin embargo, el sitio 1 tiene un menor porcentaje de saturación de Al (50,76) en comparación de los sitios 2 y 3 (81,63% a 86,49%).

En cuanto a la clase textural, se observa que ningún sitio cuenta con el potencial necesario para el crecimiento ideal de *H. brasiliensis*, mientras que el porcentaje de pendiente es similar entre sitios y se encuentran dentro del rango óptimo. Por otro lado, el contenido de MO es mayor en el sitio 3, sin embargo, ningún sitio cuenta con el rango óptimo.

Tabla 14*Condiciones según las propiedades edáficas requeridas y encontradas en los sitios*

Propiedades	Parámetros	Unidad	Sitio 1			Sitio 2			Sitio 3			Óptimas		
			A	L	Ar	A	L	Ar	A	L	Ar	A	L	Ar
Físicas	Textura	%	30	30	40	60	24	16	70	20	10	50	50	
			Ar			FA			FA			F		
	Clase	Textura	4 - 5			5			4 - 5			4 - 5		
	Pendiente	%	1			1.3			1.5			0-7		
Biológica	M.O	%	0,5			0,6			0,8			3-4		
Química	pH		5,3			5			5			4,5-5,5		

Donde: A: Arena; L: Limo; Ar: Arcilla; F: Franco; FA: Francoarenosa; Ar: Arcillosa; M.O. Materia Orgánica.

Nota. En la tabla se describen las condiciones edáficas requeridas para *H. brasiliensis* expuestas en la Tabla 5 y las encontradas en los sitios (información propia).

Los resultados descritos demuestran que, si existen diferencias entre variables climáticas y edáficas evaluadas entre sitios plantados con *H. brasiliensis* a escala local. Esto apoya la hipótesis planteada.

4.3 Volumen (m³)

4.3.1 Datos tomados en campo

La plantación establecida en el sitio 1 registró 147 árboles, sitio 2, 304 individuos y 340 árboles en el sitio 3 para un total de 791 individuos muestreados. El porcentaje de error de muestreo fue menor al 15%, con porcentajes de 11%; 6% y 5% correspondiente a los sitios en su orden respectivamente.

4.3.1.1 Análisis de variables dendrométricas. Las variables H y DAP reflejan homogeneidad menor al 30%, según el coeficiente de varianza. Sin embargo, la h y g presentaron heterogeneidad entre el 30 al 70%, según la media, el sitio 1 representa los valores más altos de H, DAP y g, mientras que el sitio 3 tiene los valores más altos de h (Figura 9; Tabla 15). Una mayor variación en los datos de altura comercial podría indicar una gestión variada de las plantaciones, como el control de la poda. Por otra parte, las variables dasométricas no presentaron una distribución normal, excepto g de los sitios 1 y 2 (Tabla 16).

Figura 9

Gráfico boxplot para variables dendrométricas analizadas por sitio.

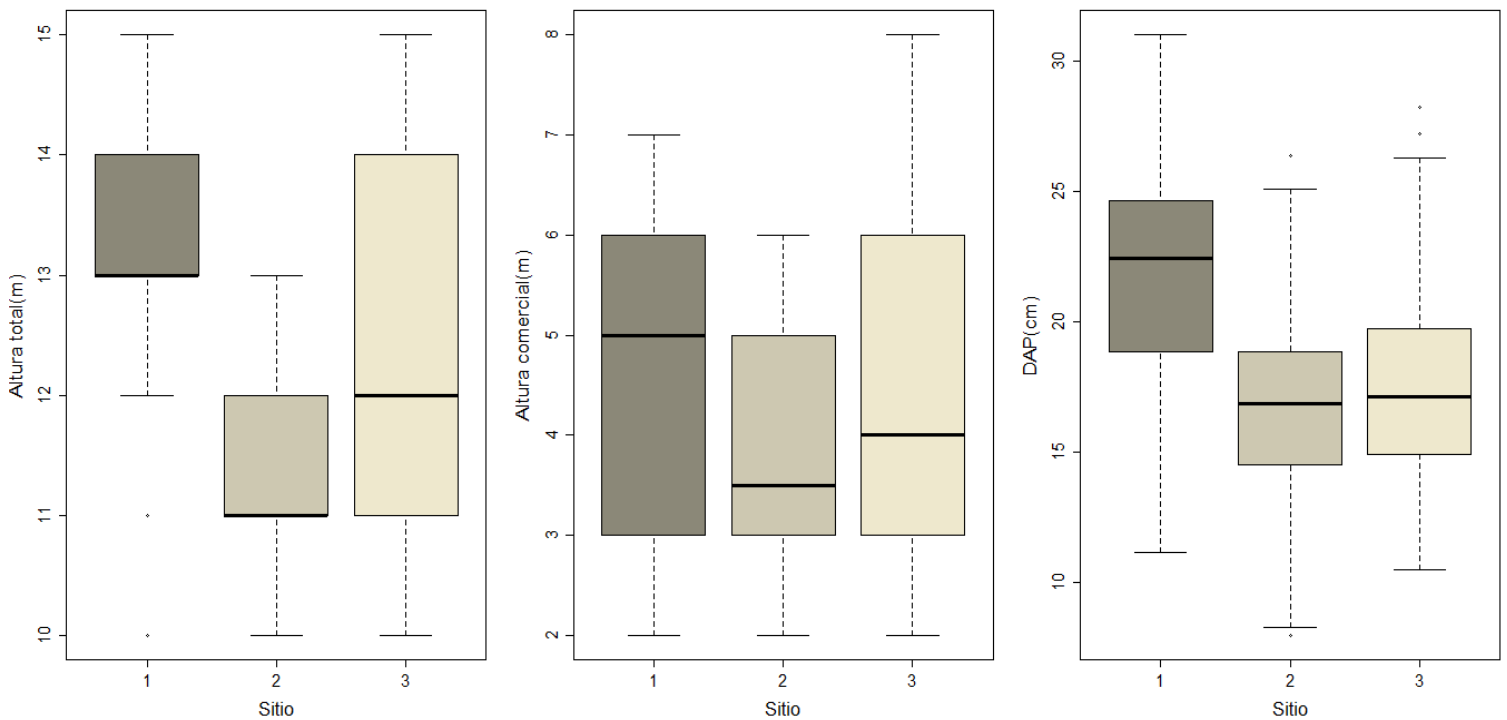


Tabla 15*Análisis exploratorio para variables dendrométricas*

Sitio	2021	DAP (cm)	H (m)	h (m)	g (m ²)
1	Media	21,7	13,1	4,4	0,038
	S	4,27	1,25	1,6	0,0139
	C.V (%)	19,6	9,5	37,6	36,2
2	Media	16,3	11,2	4	0,021
	S	3,50	0,91	1,24	0,0085
	C.V (%)	21,4	8,1	31,4	38,9
3	Media	17,3	12,5	4,7	0,024
	S	3,49	1,83	2,0	0,0097
	C.V (%)	20	14,6	42,4	39,6

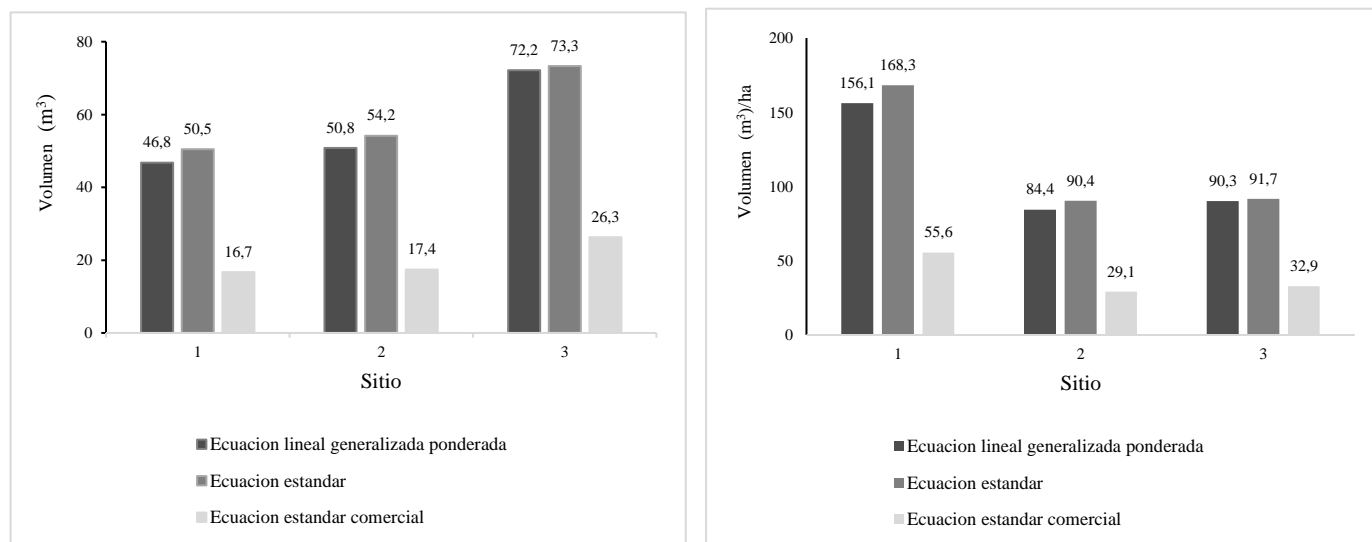
Tabla 16*Prueba de normalidad para variables dendrométricas*

Sitio	H (m)	h(m)	DAP (cm)	g (m ²)
P- value (Significancia)				
1	2.2e-16	6,281e-11	0,00047	0,11
2	2.2e-16	2.2e-16	0,00114	0,53
3	2.2e-16	2.2e-16	0,00070	2,76e-5

4.3.1.2 Cálculo de volumen (m³). El volumen calculado mediante las ecuaciones (generalizada y estándar) para cada sitio (Figura 10), indicaron que el sitio 1 tiene mayor volumen total y comercial (m³/ha), contrario al sitio 2 que representó menor volumen total y comercial (m³/ha).

Figura 10

Diferencias volumétricas comerciales y totales estimadas para los tres sitios plantados con H. brasiliensis

**4.4 Calidad de sitio****4.4.1 Modelos evaluados**

Se analizaron 170 alturas dominantes, distribuidas en 30, 60 y 80 individuos para los sitios 1, 2 y 3 respectivamente (Tabla 17), los criterios estadísticos de validación de modelos matemáticos RMSE y R^2 , arrojaron parámetros que permiten predecir el crecimiento de Ho en función de la edad (Tabla 18). Los parámetros de las tres ecuaciones son estadísticamente significativos (Tabla 19). Sin embargo, para efectos de este estudio se eligió el modelo de Chapman - Richards ya que es el que presenta menor RMSE y mayor R^2 , a partir de este modelo se estimaron los parámetros de la ecuación (3). En respuesta a la hipótesis planteada se muestra que las diferencias no son significativas entre los modelos empleados para IS en masas forestales disetáneas de *H. brasiliensis*, así mismo, todos los modelos se pueden emplear con la misma confiabilidad.

Tabla 17*Alturas dominantes provenientes de parcelas temporales*

Variable	Número	Media (m)	Mediana (m)	Máxima (m)	Mínima (m)	S (m)	C.V (%)
Ho	170	13,8	14	15	11	1,2	9,3

Tabla 18*Parámetros de precisión de la estimación del modelo: RMSE y R²*

Modelo	Ecuación	RMSE	R ²
Hossfeld I	$H_0 = (t^2) / (\beta_0 + \beta_1 \cdot t)^2$ (3)	0,8068	0,9758
Chapman-Richards	$H_0 = \beta_0 (1 - e^{(-\beta_1 t)})^{\beta_2}$ (4)	0,6567	0,9839
Schumacher	$H_0 = \beta_0 e^{(-\beta_1/t)}$ (5)	0,8054	0,9759

Donde: t: Edad; Ho: Altura dominante, β_0 , β_1 y β_2 : Parámetros ajustados, RMSE: Raíz del error medio cuadrático, R²: Coeficiente de determinación.

Tabla 19*Parámetros de las ecuaciones de altura dominante en función de la edad correspondiente a los modelos evaluados.*

Modelo	Parámetros	Estimaciones	P> t
Hossfeld I	β_0	0.5687	<2e-16
	β_1	0.2125	<2e-16
Chapman-Richards	β_0	16.1814	<2e-16
	β_1	0.30347	<2e-16
Schumacher	β_2	3.19400	<2e-10
	β_0	20.9225	<2e-16
	β_1	4.1750	<2e-16

Nota. La prueba de comparación de medias y valor significativo (P>|t|) comprueba que las estimaciones de los parámetros son significativamente distintas de cero a un nivel del 5%, puesto que p<0.05.

4.4.1.1 Estimación de alturas dominantes referente a la edad de los sitios. A partir del modelo de Chapman - Richards se obtuvo la expresión representada en la ecuación (12) y a partir de esta, se estimaron las alturas referidas en la Tabla 20.

$$H_0 = 16.1814(1 - e^{(-0.30347 * t)})^{3.19400} \quad (12)$$

Tabla 20

Alturas dominantes estimadas para edades concernientes a la edad de los sitios

t	Ho
8	12,1
9	13,0
12	14,7

4.1.1.1 Curvas anamórficas de índice de sitio. Teniendo en cuenta los rangos de IS 9 – 24 m con intervalos de tres metros, la ecuación que representó la mejor calidad de sitio (IS) es:

$$IS = 16.1814(1 - e^{(-0.30347 * t)})^{3.19400} \quad (13)$$

Se asume que el parámetro β_0 es específico de cada estación, el valor $\beta_{0(IS)}$ de la curva correspondiente se obtuvo de la ecuación 14, a partir de esta, se generaron las respectivas curvas anamórficas (Figura 11).

La calidad del sitio de varios rodales en plantación juvenil puede compararse y evaluarse para la aplicación de las curvas de IS desarrolladas en este estudio, por ejemplo, rodales con la misma edad de 10 años, el primer rodal con una altura media de los árboles dominantes de 8 m y el segundo rodal con una altura media de los árboles dominantes de 12 m. El IS del primer rodal al aplicar la ecuación 14 es de 9 m para una edad base de 11 años. Esto indica que se espera que este rodal siga el patrón de crecimiento IS de 9 m. El segundo rodal, por su parte, utiliza la misma edad de referencia y tiene un IS de 11 m. Esta postura es predecible.

$$IS \Rightarrow \beta_0(IS) = \frac{IS}{(1 - e(-0.30347 * T))^{3.19400}} \quad (14)$$

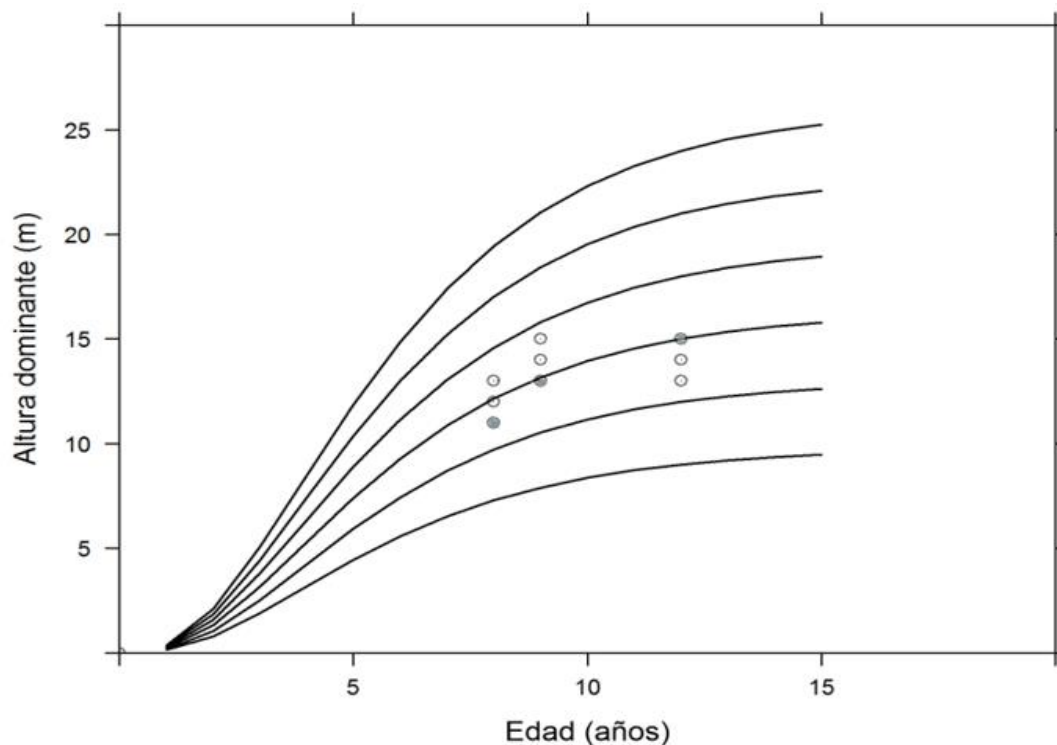
Con respecto a las curvas de IS se observó relación directa entre alturas dominantes y edades entre plantaciones de *H. brasiliensis*. No se dispone de datos de Ho a la misma edad, por tanto, no es posible comparar las plantaciones con exactitud, sin embargo, existe una amplia variabilidad en las Ho que difieren de la edad. Para el sitio 1, se encontró Ho de parcelas que abarcan curvas de IS con rangos de 15 y 18 m, para el sitio 2, la Ho se distribuye en curvas de IS de 12 a 18 m, y para el sitio 3, la Ho se distribuye en curvas de IS de 12 a 15 m.

Los sitios 1 y 2 se adhieren a una calidad de sitio buena, siendo el sitio 1 el que representa mayor calidad de sitio, mientras que el sitio 3 sugiere una calidad de sitio regular. Los resultados encontrados son atribuibles al manejo silvicultural de cada plantación y a las características edáficas encontradas, como las diversas texturas y el porcentaje de saturación de Al presente en los suelos, lo que repercute en la deficiencia de nutrientes.

Según información suministrada por el propietario del sitio 3 (calidad de sitio regular), durante aproximadamente tres años y medio no se eliminó ni se realizaron desbroces en ninguno de los lotes. Como resultado, las hierbas crecieron, compitiendo con los árboles por recursos como nutrientes, luz y agua y espacio. Además, cabe resaltar que las prácticas de gestión silvícolas implementadas en las plantaciones también pueden incidir en la amplia gama de variaciones en los patrones de crecimiento (DAP, área basal, altura y volumen) del rodal.

Figura 11

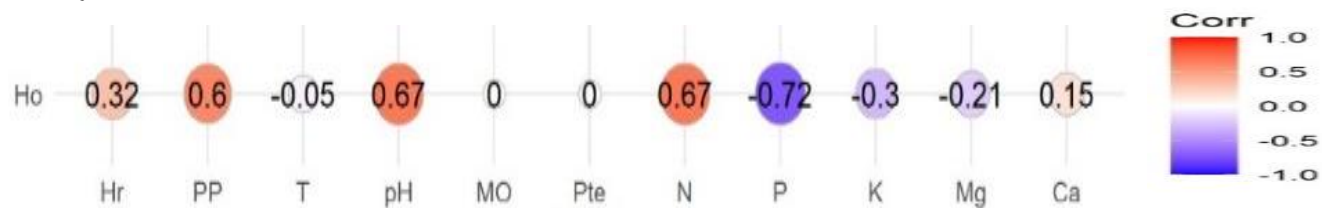
Curvas anamórficas al IS o Ho para sitios con edades de 8, 9 y 12 años.



Nota. Curvas de calidad de sitio para índices de sitio de 9, 12, 15, 18, 21 y 24 m a la edad de referencia de 12 años para *H. brasiliensis* mediante la metodología de la curva guía a partir del modelo de Chapman-Richards, la figura de color gris representa la Ho obtenido por la ecuación 17.

4.5 Correlación de altura dominantes respecto a variables edáficas y climáticas

Se obtuvo un total de 60 datos (Apéndice J), la prueba de normalidad multivariada presentó un p-value de $5.551e-15$, lo que indica que los datos no tienen una tendencia normal. Así mismo, de acuerdo con la hipótesis planteada, las variables edáficas y climáticas que inciden en la Ho son PP, pH, N y P. La matriz de correlación mostró una correlación positiva significativa para las variables de Ho con respecto a las variables del PP, pH y N (color rojo), por el contrario, el P fue la variable que mayor asociación sostuvo con la Ho con una relación inversa (color morado) (Figura 12).

Figura 12*Matriz de Correlación*

Nota. En el eje y se representa la altura dominante (m); en el eje x se representa las variables climáticas (Hr(%), PP(mm) y T(°C)) y variables edáficas como, propiedades químicas (N, P, K, Ca, Mg y pH), físicas (pendiente) y biológicas (MO).

5. Discusión

Martínez et al. (2013), indican que los valores de las variables climáticas pueden ser utilizadas para reclasificar modelos espaciales y definir sitios con diferente productividad. Castañeda et al. (1997) definieron la región de la Orinoquia con áreas sin potencial para el establecimiento del cultivo de *H. brasiliensis* por tener clima seco (precipitación 1.500 mm). Por el contrario, Correa et al. (2022) mediante modelación espacial identificaron que la Orinoquia (Arauca, Casanare, Meta y Vichada) cuenta con áreas óptimas para el desarrollo de la especie, así mismo, considera que el núcleo de la Orinoquia se caracteriza por altas precipitaciones y humedades relativas, lo que lo hace un núcleo óptimo a nivel climático.

En contraposición a lo mencionado por Castañeda et al. (1997) y concorde con Correa et al. (2022), el registro climático obtenido durante 27 años, reveló que los municipios cuentan con condiciones idóneas para el establecimiento de la especie, así mismo, se denota que los sitios se localizan en bh-T (precipitación 2000 – 4000 mm) y son representativos de bioma de sabana, lo que concuerda con los climogramas propuestos por Walter Lieth (1967) y con información descrita por Mora et al. (2013) quienes indican que las sábanas son biomas característicos del cinturón intertropical y las sábanas inundables de la Orinoquia cubren la mayor extensión de los departamentos de Arauca y Casanare.

En cuanto a las condiciones edáficas, se obtuvo que los elementos químicos (N, P, K, Mg y Ca) son deficientes para el óptimo desarrollo de la especie *H. brasiliensis*. Resultado que concuerda con la investigación de Fernández (2014), que en su hallazgo evidenció mayor número de áreas con deficiencia de nutrientes (Ca, Mg, K, P) en plantaciones de caucho localizadas en la región de la Orinoquia en el municipio de Puerto López, Meta. Según el informe de varios autores, las altas precipitaciones dan como resultado la lixiviación de nutrientes solubles, incluidos K, Na, Mg y N (Onweremadu & Uhuegbu, 2007; Yasiny et al., 2010). Igualmente, Ajiboye et al. (2015) mencionan que la lixiviación de bases solubles por altas precipitaciones conlleva al bajo pH.

Lo anterior converge con los resultados encontrados en la presente investigación, dado que, los sitios 2 y 3 con mayor precipitación presentaron mayor deficiencia de nutrientes, y bajo pH. En contraste con el sitio 1, donde existe menor precipitación y menos deficiencia de nutrientes. No obstante, el árbol de caucho es tolerante a altas concentraciones de Al en arena o condiciones de cultivo hidropónico (Ma et al., 2023). Rivera et al. (2016) consideran que la toxicidad por Al³⁺

es el factor más limitante del crecimiento y desarrollo puesto que reduce la absorción de agua y nutrientes en las plantas, sobre todo si el pH es $< 5,0$.

Yasin et al. (2010) deducen la probabilidad de que el pH del suelo, el fósforo disponible, los cationes básicos intercambiables, la capacidad de intercambio catiónico y la saturación básica disminuyan en plantaciones de 1 a 10 años y luego aumenten a los 20 años, fenómeno que podría atribuirse a la contribución de MO. Om Oku et al. (2012) relacionaron la cantidad de hojarasca acumulada con el contenido de MO, que a su vez estaba relacionado con la edad de las plantaciones. Los autores afirman que, en rodales de 7 y 16 años el nivel de MO disminuyó y aumentó a los 39 a 41 años, lo que indica que la MO tiene un impacto en el contenido de nutrientes. Hallazgos que concuerdan con lo encontrado en la presente investigación, puesto que, el sitio 3 con mayor edad tiene mayor contenido de MO, sin embargo, existe bajo contenido de MO para los tres sitios y, por ende, bajo contenido de nutrientes, lo que repercute con la edad de las plantaciones, estas son consideradas jóvenes (8 – 12 años).

Por otro lado, en cuanto a la clase textural, los sitios 2 y 3 con edades de 8 y 12 años respectivamente contienen mayor % de arena (60 – 70) y menor % de arcilla (16 – 10), contrario al sitio 1 con edad de 9 años que contiene mayor % de arcilla (40) y menor % de arena (30). Yasin et al. (2010), resaltan que el contenido de arcilla en plantaciones de caucho disminuyó con el aumento de la edad de 10 a 15 años y el contenido de arena era relativamente alto, estos resultados fueron atribuidos a que el dosel abierto conduce directamente al lavado de partículas de arcilla debido a lixiviación de las capas superiores a las inferiores. Luna et al. (2018) confirman que el aumento de arena se debe al lavado gradual de la arcilla que es la partícula más fina. De acuerdo con los resultados obtenidos en la actual investigación la edad no incide en la clase textural, lo que

posiblemente obedece a la ubicación geográfica de los diferentes sitios o porque no existe un amplio rango entre edades. Sin embargo, los sitios con mayor precipitación tienen mayor contenido de arena. Esto coincide con la justificación descrita por Yasin et al. (2010).

De este modo, se encontró que los tres sitios cuentan con las condiciones climáticas idóneas, pero no cuenta con las condiciones edáficas adecuadas, resultado que respalda el estudio de Correa et al. (2022), que señala que las plantaciones de *H. brasiliensis* de altillanura tienen mejores condiciones edáficas debido a que los suelos son más fértiles, en contraste con el núcleo cauchero de la Orinoquia, que tiene suelos que van de moderados a no aptos. Sin embargo, resalta que la Orinoquia posee excelente clima para el establecimiento de *H. brasiliensis*.

Las condiciones edafoclimáticas encontradas en los sitios repercuten en el crecimiento de los árboles, el sitio 1 que presentó las mejores condiciones en el componente edáfico, tiene mayores dimensiones de DAP, área basal (g m^2), altura total (m) y por ende volumen (m^3), lo que se atribuye a que el sitio 1 contiene menor % de saturación de Al, posibilitando mayor absorción de agua y nutrientes; además, este sitio presentó mayor producción de látex. Lo que coincide con Antón et al. (2011) y Gonzáles et al. (2013), que informaron que los rodales de mayor rendimiento tendrían mayor altura, relacionando dichos rendimientos con las ecuaciones área basal, diámetro y altura del rodal. Por otro lado, el volumen total m^3/ha del sitio 1 es similar al encontrado por Monroy et al. (2006), que reportaron un volumen de $172,3 \text{ m}^3/\text{ha}$ en plantaciones de *H. brasiliensis* a la edad de 10 años.

Nattharom et al. (2020) predijeron el crecimiento de árboles de caucho y árboles forestales intercalados en el sur de Tailandia situados por debajo de los 100 m s.n.m., con edades de 8; 9 y 12 años, valores medios de DAP 15,4; 16,3 y 18,6 cm; alturas totales con 10,1; 10,7 y 12,3 m; y

altura comercial de 6,1; 6,3 y 6,7 m respectivamente. Con respecto a la presente investigación, este estudio subestima los resultados para las variables DAP y altura total a las edades de 8 y 9 años, pero a partir de los 12 años presenta un valor comparable (Tabla 10). Sin embargo, los valores de altura comercial encontrados por Nattharom y compañía son superiores. Esto se debe a que la principal causa de variación geográfica en el crecimiento de los árboles es el clima (Toledo et al., 2011). Como resultado, los factores de crecimiento arbóreo de diversas áreas con diferentes suelos y climas pueden dar resultados inexactos o exagerados.

En cuanto a las curvas de índice de sitio se encontró que el modelo matemático de Chapman - Richards presentó estadísticos de ajuste y validación aceptables para predecir el crecimiento en altura dominante para plantaciones de *H. brasiliensis*. Así mismo fue el modelo que proporcionó mayor ajuste en comparación con los modelos de Schumacher y Hossfeld I. De igual manera, Martínez et al. (2015) utilizaron el modelo basado en Chapman - Richards modificado por Payandeh y Wang para determinar el índice de sitio de la especie *H. brasiliensis* del clon IAN-710 en el norte de Chiapas, México. Del mismo modo, Barrios et al. (2021) seleccionaron el modelo de Chapman - Richards para predecir la H_o e IS de *Gmelina arborea* en rodales ubicados en Colombia en los departamentos de Tolima, Magdalena, Atlántico, Cesar, Bolívar, Sucre y Chocó. La presente investigación difiere con Hernández et al. (2020) que evaluaron el crecimiento para tres especies de pino en México con los modelos de Chapman - Richard, Schumacher y Hossfeld I e indicaron que el modelo de Schumacher predice mejor el crecimiento en diámetro, altura, área basal y volumen.

Las curvas IS generadas en la actual investigación son comparables a las creadas por Lumbres et al. (2018) para plantaciones de *Acacia mangium* y *Eucalyptus pellita* en Indonesia

donde utilizaron el modelo Chapman - Richards. Así mismo, estimaron una altura dominante de 28,8 m con IS de 24 m a los 10 años para *Acacia mangium*. Este resultado es similar a la Ho estimado por la ecuación 13 en el presente estudio, al reemplazar los valores a una altura de 28 m tiene como resultado un IS de 24 m a los 10 años. Este método permite comparar y evaluar la calidad de sitio de varios rodales.

Si bien las condiciones edafoclimáticas son factores que inciden en la capacidad productiva de los sitios, como se reflejó en los resultados encontrados, otro factor importante para tener en cuenta es el manejo silvicultural, factor que repercutió en la calidad de sitio catalogada como regular en el sitio 3, sitio al que no se le realizó un adecuado manejo silvicultural. Zhao et al. (2016) llaman la atención sobre el potencial de optimización de las prescripciones silvícolas para lugares concretos si la intensidad silvícola se ajusta en función de la calidad del lugar. Por otra parte, el sitio 1 obtuvo la mejor calidad de sitio, dato relevante para la actual investigación, dado que, en el último censo realizado por la CCC (2015), no se registran plantaciones de caucho en el municipio de Paz de Ariporo.

Otras investigaciones (Zapata, 2013; Barrios, 2021) han empleado la Ho como variable indicadora para examinar la relación entre el crecimiento y las características climáticas y edáficas. En el presente estudio la Ho mostró una asociación positiva significativa con el pH y el N y una correlación negativa significativa con el P. Lo que coincide con el estudio de Watanabe et al. (2010) donde encontraron una fuerte correlación positiva de IS con N a un nivel del 5%, en plantaciones de teca en Ghana. Anasrullah et al. (2023) menciona que el N destaca un papel importante en el crecimiento de la altura en los árboles de *H. brasiliensis* y la deficiencia de N puede disminuir la actividad fotosintética y crecimiento.

Según Nazeri et al. (2021), el crecimiento de *Acacia mangium* se asoció negativamente con el pH y el P, teniendo la acidez del suelo un impacto en la rapidez con la que crece la planta en altura. Estos resultados apoyan los hallazgos del presente estudio con respecto al P en relación con Ho, mientras que contradicen la relación encontrada de pH con Ho. Teniendo en cuenta los resultados de la correlación la Ho tiende a aumentar con el aumento de pH, dato que concuerda con lo expuesto por Gutiérrez et al. (2022) que señalan que el pH óptimo del suelo para el cultivo se encuentra en un rango de 6,1 a 7,7, pero, sin embargo, puede tolerar un rango de pH de 4,5 a 8,4.

Tapiero et al. (2018) y Acuña (2019) indican que la especie *H. brasiliensis* tiene un potencial de crecimiento superior en pH ácidos (4,5 a 5,5). Lo que contradice lo mencionado por Gutiérrez et al. (2022). Sin embargo, la Orinoquia por poseer suelos ácidos se consideran rangos óptimos el rango de pH expuesto por Tapiero et al. (2018) y Acuña (2019).

A pesar de que *H. brasiliensis* es una especie considerada acidófila, Gutiérrez et al. (2022) menciona que se debe neutralizar el Al intercambiable hasta un nivel de saturación que sea tolerado por el caucho y de esta manera aumentar el contenido de nutrientes. De forma similar, Cristancho et al. (2011) recomiendan disminuir el contenido de Al³⁺ y mantener un equilibrio de nutrientes en el suelo teniendo en cuenta los niveles de referencia recomendados para la especie.

Para finalizar se obtuvo una relación significativa positiva entre Ho y precipitación. Resultado comparable con el estudio de Guzmán (1988) que relacionó el IS de *Gmelina arborea* con variables fisiográficas, edáficas y climáticas en Filipinas y descubrió asociaciones positivas significativas con la precipitación. De forma similar, Montero et al. (2001) encontraron una correlación positiva entre la precipitación media anual y el IS de *Tectona grandis*. Según Bravo et al. (2010) y Sharma et al. (2015), los factores biofísicos en los modelos permiten comparar los

patrones de desarrollo bajo diversas condiciones climáticas futuras o los cambios en los patrones de crecimiento entre varios sitios con diversas condiciones climáticas.

6. Conclusiones

Conocer las condiciones edafoclimáticas de un sitio en particular es importante ya que a nivel local las condiciones pueden variar, por ejemplo, en Paz de Ariporo no se registran plantaciones de *H. brasiliensis* y según las descripciones edafoclimáticas es el sitio con mayor potencial para el establecimiento de la especie, sin embargo, los tres sitios cuentan con condiciones climáticas óptimas, pero no cumplen con la totalidad de las condiciones edáficas catalogadas como idóneas, no obstante, mediante manejo silvicultural como planes de fertilización se mejora las condiciones del suelo. Además, es una especie con usos múltiples, lo que permite a los propietarios de las plantaciones diversificar sus fuentes de ingresos, permite recuperar y restaurar suelos degradados y contribuye a la mitigación del cambio climático, por tanto, las plantaciones de caucho se pueden considerar como alternativa sostenible para estos municipios.

La calidad de los sitios para *H. brasiliensis* se determinó mediante el modelo de Chapman – Richards a partir de la construcción de seis curvas anamórficas de IS a una edad de referencia de 12 años. El empleo de las curvas de IS es designado a plantaciones juveniles, y es aplicable a los municipios de Paz de Ariporo, Aguazul y Villanueva en el departamento del Casanare. Cualquier aplicación fuera de esta área podría resultar en una evaluación sesgada. El sitio 1 con edad de 9 años presentó mejor calidad de sitio, mayores dimensiones de altura (m), DAP (cm), g (m²),

volumen (m³/ha)) y mayor producción de látex. Lo que se relacionó con las condiciones edafoclimáticas encontradas y el manejo silvicultural.

Es importante conocer y comprender la calidad de sitio y las condiciones edafoclimáticas en plantaciones de *H. brasiliensis* por varias razones como son, el manejo de las plantaciones, la optimización del crecimiento y la producción, la eficiencia en el uso del recurso disponible, reducción de costos, toma de decisiones en la planificación y promover la sostenibilidad ambiental en la industria del caucho. Así mismo, Las curvas de IS son una herramienta que suministra valores numéricos simples que pueden medirse y entenderse fácilmente, también es un instrumento útil para lograr un mejor desarrollo e incrementar la productividad de las plantaciones.

Correlacionar las variables edáficas y climáticas en relación con el IS permite conocer las variables que tienen mayor incidencia en el crecimiento. Adicionalmente, se pueden desarrollar modelos en función de variables edáficas o climáticas que posibiliten comparar las variaciones de crecimiento entre diferentes sitios.

7. Recomendaciones

Existen muy pocos estudios sobre la especie *H. brasiliensis* en Colombia y en general sobre la capacidad productiva de los sitios. Por consiguiente, se recomienda realizar más estudios sobre la especie, que permitan conocer la calidad de diferentes sitios.

Para optimizar la absorción de agua y nutrientes y equilibrar el contenido de nutrientes, se considera relevante disminuir el porcentaje de saturación de Al. También es importante la aplicación de prácticas de gestión silvícola, como el uso de fertilizantes y enmiendas.

Para futuras investigaciones, se sugiere ampliar el número de análisis de suelo y la cantidad de mediciones de variables dendrométricas por sitio con el fin de realizar un análisis estadístico más detallado.

Replicar la presente investigación evaluando modelos matemáticos aplicados para cada sitio específico con el fin de comparar el IS a la misma edad.

Referencias Bibliográficas

- Acuña, F. (2019). *Obtención y evaluación de láminas y enjebados de látex de Shiringa (Hevea brasiliensis), en el distrito de Chazuta –San Martín.* <https://tesis.unsm.edu.pe/handle/11458/3667?show=full>
- Ajiboye, G., Jaiyeoba, J., Olaniyan, J., & Olaiya, A. (2015). The characteristics and suitability of the soils of some major cocoa growing areas of Nigeria: Tung Iga of Cross River. *Agrosearch*, 15(1), 101. <https://doi.org/10.4314/agrosh.v15i1.7>
- Álvarez, M. (2007). *Eucalyptus pellita* (F. Muell) *Especie Multiproposito de la Ganadería en los llanos Orientales.* <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/20608?locale-attribute=en>
- Alzate, D. (30 de abril de 2018). Manejo de datos climáticos con R: promedios mensuales multianuales, anomalías y gráficas [Archivo de video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=40Ge0JHNWRA>
- Anasrullah, A., Sajjaphan, K., Rattanapichai, W., Kasemsap, P., Nouvellon, Y., Chura, D., Chayawat, C., & Chotiphan, R. (2023). The Dynamics of Immature Rubber Photosynthetic Capacities Under Macronutrients Deficiencies. *Trends in Sciences*, 20(5), 4527. <https://doi.org/10.48048/tis.2023.4527>
- Androustos, G., & Marketos, S. (1994). L’histoire du préservatif. *Andrologie*, 4(4), 492–504. <https://doi.org/10.1007/BF03034736/METRICS>

- Angulo, M., & Rivas, K. (2018). *Efecto del manejo silvicultural en el crecimiento y productividad de plantaciones de Pinus caribaea var. hondurensis en Maderas del Orinoco, Edo. Monagas*. <https://www.researchgate.net/publication/329001567>
- Antón, C., Burkhart, H., Strub, M., & Amateis, R. (2011). *Effects of Initial Spacing on Height Development of Loblolly Pine*. <https://academic.oup.com/forestscience/article/57/3/201/4604497>
- Azabache, L. (2012). Proyecto de factibilidad para la producción de caucho natural (*hevea brasiliensis*) en el municipio de Carreño, Vichada. Universidad de La Salle, Bogotá. <https://ciencia.lasalle.edu.co/>
- Barrera, J., Molino, J., Martínez, H., Valdivia, J., & González, H. (2018). *Boletín estadístico de Casanare*. 15–1. <https://www.casanare.gov.co/Dependencias/Planeacion/BoletinesEstadisticasSIIC/Bolet%C3%A4Dn%20Estad%C3%ADstico%202018.pdf>
- Barrios, A., López, M., & Báez, C. (2021). Modelamiento de la productividad de Gmelina arborea Roxb. con base en variables biofísicas y de rodal. *Colombia Forestal*, 24(1), 71–87. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15345>
- Barrios, A., Segura, M., Andrade, Equipo consultor., Universidad del Tolima. (2021). *Establecimiento de factores de emisión para plantaciones forestales de Colombia y en particular de la región Orinoquia*. <https://biocarbono.org/wp-content/uploads/2023/01/Establecimiento-de-factores-de-emision-para-plantaciones-forestales-de-Colombia-y-en-particular-de-la-region-Orinoquia-22.12.22.pdf>

- Barrios, A., López, A., & Báez, C. (2021). Modeling the productivity of *Gmelina arborea* Roxb. using biophysical and stand variables. *Colombia Forestal*, 24(1), 71–87.
<https://doi.org/10.14483/2256201X.15345>
- Basto, M. (2019). *Zonas de vida en el departamento del Caquetá, Colombia, basado en los escenarios de emisión de cambio climático para el periodo 2011-2100 y estrategias educativas de adaptación para el manejo de las plantaciones de Hevea brasiliensis*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=287714>
- Bedoya, N. (2014). *Modelación calidad de sitio en plantación juvenil de Teca*.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/52220/32542260.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bengoa, M. (1999). *Estimación de la altura dominante de la masa a partir de la “altura dominante de parcela”. ventajas frente a la altura dominante de Assman*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=165008>
- Bobadilla, I., & García, F. (1999). *La Madera del Caucho*. 13–14.
https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_3702_11859.pdf
- Bravo, A., Gallardo, C., Del Río, M., & Montero, G. (2010). *Regional changes of *Pinus pinaster* site index in Spain using a climate-based dominant height model*.
- Bravo, A., Tomé, M., Bravo, F., Montero, G., & Del Río, M. (2008). Dominant height growth equations including site attributes in the generalized algebraic difference approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(9), 2348–2358.

- Burgos, J., & Moreno, J. (2006). *Estudio preliminar de prevalencia de Microcyclus ulei en jardines clonales, de Hevea brasiliensis en Cundinamarca, Meta, Santander y Tolima.* <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/download/3350/4880?inline=1>
- Burkhardt, H., & Tomé, M. (2012). Modeling forest trees and stands. (Vol. 9789048131709). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>
- Caguasango, S. (2017). *Predicción de rendimientos para plantaciones de Acacia mangium Willd. en la altillanura plana a partir de variables biofísicas.* 29. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59575>
- Cancino, J. (2012). *Dasometría básica.* <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/407>
- Castañeda, T. (1997). *Zonas aptas para el cultivo de caucho en Colombia, Santafé de Bogotá.*
- Castro, O. (2011). *Caracterización de los patosistemas foliares de importancia económica en caucho (Hevea brasiliensis Müll. Arg) en la Altillanura estructural plana del Meta (Colombia).* <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7898>
- Chotiphan, R., Vaysse, L., Lacote, R., Gohet, E., Thaler, P., Sajjaphan, K., Bottier, C., Char, C., Liengprayoon, S & Gay, F. (2019). Can fertilization be a driver of rubber plantation intensification? *Industrial Crops and Products*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111813>
- Confederación Cauchera Colombia. [CCC]. (2015). *Infografía Censo Nacional 2015.* <https://www.confederacioncauchera.com/estadisticas2>
- Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal [CONIF]. (1997). *Zonas Aptas para el cultivo de caucho en Colombia.* <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005027/caucho%2039.pdf>

- Córdoba, O., Gil, J., Huertas, R., & Guerra, J. (2018). Calendarios Preliminares del Comportamiento Fenológico de Árboles Francos de caucho (*Hevea brasiliensis*) en San Roque, Antioquia. *AGROSAVIA*, 1–251. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54506-6>
- Correa, D., Gil, J. P., Martínez, J., & Córdoba, O. de J. (2022). Agroecological and South American leaf blight escape zones for rubber cultivation in Colombia. *Agronomy Journal*, 114(5), 2830–2844. <https://doi.org/10.1002/agj2.21068>
- Corvalán, P., & Hernández, J. (2006). *Estructura de rodal*. https://www.u-cursos.cl/forestal/2010/1/MF004/1/material_docente/bajar?id_material=483202
- Clutter, J., Fortson, J., Pienaar, L., Brister, G. & Bailey, R. 1983. Timber Managment: A Quantitative Approach. Editorial John Wiley & Sons. P. 1-140.
- Cuevas, L. (18 de marzo de 2020.). *06 Obtener Perfil de Elevación en Google Earth*. [Archivo de video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=GCAIGwYhUuk>
- Decreto 1731 de 2020. Por la cual se sustituye el Capítulo 13 del Título 3 de la Parte 10 del Libro 2 del Decreto 1071 de 2015, Único Reglamentario del Sector Administrativo Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural, en lo relacionado con la reglamentación de la Ley 686 de 2001, modificada por la Ley 1758 de 2015, que establece la Cuota de Fomento Cauchera. Diciembre 2022. <https://www.leyex.info/documents/leyes/14cfc9a149fdd2f5e4679adb4c481705.htm>
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2018). *Planes de negocios de dos clústeres forestales en Orinoquia –Meta y Vichada, Colombia*. <https://2022.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Ejes-estrategicos/Paginas/Econom%C3%ADa-forestal.aspx>

- Díaz, M., Martínez, H., Monroy, F., Velandia, J., & Chala, J. (2021). *Plan Departamental de extensión agropecuaria PDEA Casanare 2020-2023*. <https://www.adr.gov.co/wp-content/uploads/2021/07/PDEA-Santander-2020-2023.pdf>
- Diéguez, U., Alboreca, A., Castedo, D., Barrio, M., Crecente, F., González, J., Pérez, C., Soalleiro, R., López, C., Balboa, M., Gorgoso, J., & Sánchez, F. (2009). *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. <https://www.researchgate.net/publication/305443573>
- Eka, H., Aris, T., & Nadiah, W. (2010). Potential use of Malaysian rubber (*Hevea brasiliensis*) seed as food, feed and biofuel. *International Food Research Journal*, 17, 527–534. [https://www.semanticscholar.org/paper/Potential-use-of-Malaysian-rubber-\(Hevea-seed-as-Aris-Nadiah/fe1cb143e30cc1a09be42c6c7a20612d6b7263cd](https://www.semanticscholar.org/paper/Potential-use-of-Malaysian-rubber-(Hevea-seed-as-Aris-Nadiah/fe1cb143e30cc1a09be42c6c7a20612d6b7263cd)
- EOT. (2009). *Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Villanueva- Parte II diagnóstico físico biótico*. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/9863/3219-14.pdf?sequence=13&isAllowed=y>
- Epron, D., Nouvellon, Y., Mareschal, L., Moreira, R., Koutika, L., Geneste, B., Delgado, J., Laclau, J., Sola, G., Gonçalves, J & Bouillet, J. (2013). Partitioning of net primary production in Eucalyptus and Acacia stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. *Forest Ecology and Management*, 301, 102–111.
- Eraso, H., & Toro, C. (2006). *Manual técnico de cultivo de caucho (Hevea brasiliensis)*. 2006. <https://www.academia.edu/41629016>
- Escobar, C., Yasnó, C., Trochez, J., & Cárdenas, C. (2004). *El cultivo del caucho (Hevea brasiliensis Muell.) con enfoque agroforestal*. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/2118>

- Espinosa, J., & Molina, E. (1999). Acidez y encalado de los suelos. International Plant Nutrition Institute.
- Farrelly, N., Ní Dhubháin, Á., & Nieuwenhuis, M. (2011). Site index of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) in relation to different measures of site quality in Ireland. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(2), 265–278.
- Fernández, D. (02 de abril de 2020). *Climadiagrama*. RPubs. Retrieved February 9, 2023, from <https://rpubs.com/dsfernandez/571765>
- Fernández, J. (2014). *Parámetros productivos del caucho (Hevea brasiliensis) y su relación espacial con las propiedades físicas y químicas del suelo*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52476>
- Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario [FINAGRO]. (2020). Agro guía *Marco de Referencial Agroeconómico Eucalyptus pellita*. <https://fedemaderas.org.co/wp-content/uploads/2022/01/AGROGUIA-Eucalyptus-pellita-Vichada-y-Meta.pdf>
- Gallego, F. (2021). *Aplicación de cinco modelos alométricos para obtención de volumen total en plantación de Hevea brasiliensis*. 1–13. <https://scholar.google.com/citations?user=nQmAC5QAAAAJ>
- García, I., Ancízar, F., & Montoya, D. (2006). Revisión sobre el Hongo *Microcyclus ulei*, Agente Causal del Mal Suramericano de la Hoja del Caucho. In *Rev. Colomb. Biotecnol.* <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/515/955>
- García, I., Peraza, R., Pinzón, Y., Santacruz, O., Martínez, A., & Anibal, T. (2013). *Modelo Productivo para el cultivo del árbol de caucho natural en la Orinoquía Zonas de escape y no escape al Mal Suramericano de las Hojas del Caucho*.

https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/36994/Ver_Documento_36994.pdf?sequence=4&isAllowed=y

García, J., García, G., Hernández, J., Muñoz, H., García, X., & Hernández, A. (2016). Precisión de los coeficientes y cocientes de forma en la estimación del volumen de *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 19–36.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000300019

García, S., De los Santos, M., Ángeles, G., René, J., Corral, J., Rodríguez, G., & García, S. (2015). Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus patula*. *Madera y bosques*, 21(3), 95–110. <https://www.researchgate.net/publication/309139555>

Gómez, J. (2017). *Documento Evolución y Estado Actual del Ordenamiento Territorial, Subsistema Ambiental y Biofísico*.

<https://www.casanare.gov.co/Dependencias/Planeacion/Documentos%20POTDCAS/1.2%20Subsistema%20Ambiental.pdf>

González, E., Barrero, H., & Carrasco, Y. (2013). Evaluación de las clases de calidad de sitio de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la Empresa Forestal Integral Macurije (Pinar del Río, Cuba). *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 22(3), 46–51.

<https://www.redalyc.org/pdf/540/54029508007.pdf>

González, J., Piqué, M., & Vericat, P. (2011). *Manual de ordenación por rodales: gestión multifuncional de los espacios forestales*. Organismo Autónomo Parques Nacionales.

<https://www.researchgate.net/publication/264536504>

Gutiérrez, A., Correa, D., Gil, J. P., Monsalve, J., Martínez, J., Córdoba, O., Álvarez, M., Gómez, J., Tapiero, A., & Amado, G. (2022). Modelo productivo para el cultivo de caucho natural (*Hevea*

brasiliensis) en el bajo Cauca antioqueño y en el sur de Córdoba. AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7405828>

Hernández, F., Aragón, J., Larreta, B., & Luna, J. (2020). Diameter, height, basal area and volume growth of three pine species from Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(60). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.711>

Holdridge, L. (1982). Ecología basada en zonas de vida. In *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura*. <http://www.cct.or.cr/contenido/wp-content/uploads/2017/11/Ecologia-Basada-en-Zonas-de-Vida-Libro-IV.pdf>

Instituto Amazónico de Investigación Científica [SINCHI]. (s.f.). *Caucho Hevea brasiliensis Euphorbiaceae*. https://www.sinchi.org.co/files/PUBLICACIONES%20DIGITALES/Fichas%20Tecnicas%20agroforestal/Fichas%20Tecnicas%20de%20Especies%20de%20uso%20Forestal%20y%20Agroforestal%20de%20la%20Amazonia%20Colombiana_14%20CAUCHO.pdf

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2014). *Metodología para la clasificación de las tierras por su capacidad de uso*. <http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/instructivos/2014/M40100-02%2014V2%20Para%20la%20clasificacion%20de%20las%20tierras%20por%20su%20capacidad%20de%20uso.pdf>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (21 de diciembre de 2017). Datos Abiertos Agrología / *Geoportal*. Retrieved September 9, 2022, from <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (7 de septiembre 2022). *Glosario*. <https://www.igac.gov.co/es/contenido/glosario>

Ibáñez, V. (2004). *Manual de redacción de Planes técnicos de gestión y mejora forestal (PTGMF) y planes simples de gestión forestal (PSGF). Instrucciones de redacción e inventario forestal.*

https://cpf.gencat.cat/es/detalls/Article/03_Manual-de-redaccio-de-plans-tecnics-de-gestio-i-millora-forestal

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [IDEAM]. (2007). *Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia.*

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+-+La+Ni%C3%B1a.pdf/232c8740-c6ee-4a73-a8f7-17e49c5edda0>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [IDEAM]. (2014). *Instructivos códigos para los levantamientos de suelos.*

<http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/instructivos/I40100-06-14.V1Codigos%20para%20los%20levantamientos%20de%20suelos.pdf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [IDEAM]. (2018). *documento metodológico estadísticas variables meteorológicas metodología de la operación estadística variables meteorológicas Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM Subdirección de Meteorología.*

<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Documento+metodologico+variables+meteorologicas.pdf/8a71a9b4-7dd7-4af4-b98e-9b1eda3b8744>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [IDEAM]. (2019). *Glosario Meteorológico.*

<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Anexo+10.+Glosario+meteorol%C3%B3gico.pdf/6a90e554-6607-43cf-8845-9eb34eb0af8e>

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (10 de abril 2022). *DHIME Datos hidrológicos y meteorológicos*. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Juárez, Y. (2014). *Dasometría apuntes de clase y guía de actividades prácticas*. 8. <https://www.academia.edu/35493332/DASOMETRÍA>
- Lim, T. (2012). *Hevea brasiliensis*. In *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants* (Vol. 2, pp. 476–483). Springer Netherlands.
- Lumbres, R., Seo, Y., Son, Y., Doyog, N., & Lee, Y. (2018). *Height-age model and site index curves for Acacia mangium and Eucalyptus pellita in indonesia.*, 14(2), 91–96. <https://doi.org/10.1080/21580103.2018.1452798>
- Luna, L., Vignozzi, N., Miralles, I., & Solé, A. (2018). Organic amendments and mulches modify soil porosity and infiltration in semiarid mine soils. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1019–1030. <https://doi.org/10.1002/LDR.2830>
- MADR, UPRA, & IDEAM. (2021). *Boletín Estadístico Forestal*. https://fedemaderas.org.co/wp-content/uploads/2021/11/BOLETIN_FORESTAL_SEPTIEMBRE_WEB1.pdf
- Mamá, X., Cheng, L., Peng, W., Xie, G., Liu, Z., & Yang, Z. (2023). Comparative Transcriptome and Metabolome Analysis of Rubber Trees (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) Response to Aluminum Stress. *Forests* 2023, Vol. 14, Page 568, 14(3), 568. <https://doi.org/10.3390/F14030568>
- Martínez, C. (2012). *Décima tercera edición Estadística y muestreo*. https://www.academia.edu/39626329/Estad%C3%ADstica_y_muestreo_Ciro_Mart%C3%ADnez_Bencardino_13ED

- Martínez, P., Domínguez, M., Juárez, A., López, L., De la cruz, V., & Álvarez, J. (2015). *Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de Gmelina arborea en Tabasco, México*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000400010
- Martínez, R., Rojo, G., & Jasso, J. (2007). Análisis del crecimiento y producción de látex en plantaciones forestales comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.) en el estado de Oaxaca, México. *Ra Ximhai*, 3(2), 572. <https://doi.org/10.35197/rx.03.03.2007.06.rm>
- Medina, S., & Ortíz, M. (2022). *Estimación de la ubicación óptima de las líneas clave y embalses de infiltración como mecanismos de adaptación a la sequía en la cuenca alta del río Ariporo, municipio Paz de Ariporo, Casanare*. <https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/7833>
- Mercy, C., Fonseca, K., Quichimbo, A., Lara, R., & Tiche, J. (2017). Estimación de datos faltantes de precipitación en la subcuenca del río Patate. In *Publicación Cuatrimestral* (Vol. 2). <https://www.researchgate.net/publication/332237436>
- Meza, M. (2018). Medición del diámetro (DAP) de un árbol. https://arquitectura.unam.mx/uploads/8/1/1/0/8110907/ppt_medici%C3%B3n_del_di%C3%A1metro_de_un_%C3%A1rbol.pdf
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2021). *Cadena Caucho Indicadores Generales*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Caucho/Documentos/2021-06-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf?ID=224>
- Mongua, C. (2018). Caucho, frontera, indígenas e historia regional: un análisis historiográfico de la época del caucho en el Putumayo–Aguarico. *Boletín de Antropología*, 33(55), 15–30. <https://doi.org/10.17533/udea.boan.v33n55a02>

- Monroy, C., Aguirre, O., & Jiménez, J. (2006). Productividad maderable de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. In *CIENCIA UANL* (Vol. 3). <https://www.researchgate.net/publication/237689542>
- Montero, M., Ugalde, L., & Kanninen, M. (2001). Relación del índice de sitio con los factores que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L.F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. *Revista Forestal Centro Americana*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10035>
- Mora, C., Peñuela, L., & Castro, F. (2013). *Estado del conocimiento de los ecosistemas de las sábanas inundables en la Orinoquia Colombiana*. <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v19n2/v19n2a12.pdf>
- Nazeri, A., Josoh, I., & Wasli, E. (2021). Growth of *Acacia mangium* at Different Stand Ages and Soil Physicochemical Properties in Sarawak, Malaysia. In *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science* (Vol. 44, Issue 4, pp. 713–743).
- Olate, V. (2007). *Análisis de Curvas de índice de sitio/altura dominante para un bosque siempre verde de Nothofagus dombeyi (Mirb.), en Valle Mirta, XI Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo*.
- Om Oku, E., Iwara, A., & Ekukinam, E. (2012). Effects of Age of Rubber (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.) Plantation on pH, Organic Carbon, Organic Matter, Nitrogen and Micronutrient Status of Ultisols in the Humid Forest Zone of Nigeria. In *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* (Vol. 46, Issue 5). <https://www.researchgate.net/publication/286381014>
- Onweremadu, E., & Uhuegbu, A. (2007). Pedogenesis of calcium in degraded topical rangeland soil. *The Journal of American Science*, 3(2), 1545–1003. <http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/0302/04-0250-onweremadu-calcium-am.pdf>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2020). Términos y Definiciones *FRA 2020*. 188, 1–33. <https://www.fao.org/documents/card/es/c/ca9825es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2014). *Manual de Campo Procedimientos para la planificación, medición y registro de información del Inventario Forestal Nacional del Paraguay*. http://www.infona.gov.py/application/files/6214/7405/3766/Manual_de_Campo_IFN_2015.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la FAO. (2018). *Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en área rurales*. <https://www.fao.org/3/i8864es/I8864ES.pdf>
- Oyebade, B. A., Osho, J. S. A., & Adesoye, P. O. (2014). Development of Site Index Equation and Curves for Site Quality Assessment of *Pinus caribea* Monoculture Plantations in Southwestern Nigeria. *Journal of Forest and Environmental Science*, 30(4), 315–321. <https://doi.org/10.7747/jfes.2014.30.4.315>
- Pereira, C., Maycotte, C., Restrepo, B., Mauro, F., Montes, A., & Velarde, M. (2011). *Edafología I*. <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf>
- Pichimata, M., & Pedraza, R. (2013). Diagnóstico de fertilidad de suelos y de disponibilidad y calidad de forrajes del municipio de municipio de Monterrey, departamento de Casanare. 1–10. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/1958>
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). *Mensura Forestal*. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/15038>
- Quesada, I., Barrera, L., Aristizábal, F., & Acuña, O. (2011). Evaluación de la variabilidad genética de clones de caucho natural presentes en la colección clonal del Instituto SINCHI, mediante el uso de

descriptores morfológicos. *Colombia Forestal*, 14(1), 69–79.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/3551/0>

Reynaga, M. (2013). *Situación del Perú a nivel mundial en relación al bosque natural*. 1–38.
<http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/Tallares/6-Criterios-medicion-arbol-en-Pie.pdf>

Rivano, F. (2016). *Investigación en caucho, clones promisorios para Colombia Otros temas de interés*.
<https://agritrop.cirad.fr/584624/1/RIVANO%20Congreso%20Caucho%20Bucaramanga%2013-15%20oct%202016-Investigacion.pdf>

Rivera, Y., Moreno, Y., Herrera, L., & Romero, &. (2016). *La toxicidad por aluminio (Al 3+) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite*.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11696>

Rojas, M., Rueda, G., Suárez, Y., & Furtado, E. (2017). Efecto de sistemas de sangría sobre la productividad de *Hevea brasiliensis* en el Magdalena Medio Santandereano. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 184–192.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S201121732017000100184&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Rojo, E., Jasso, J., Vargas, J., Velasquez, H., & Palma, D. (2003). *Predicción de la producción de látex en plantaciones comerciales de hule (Hevea brasiliensis Müll. Arg.) en Oaxaca, México*.
<https://www.researchgate.net/publication/26476609>

Rojo, G., Jasso, J., Zazueta, X., & Porras, C. (2005). Modelos de índice de sitio para *Hevea brasiliensis* Müll. arg. del clon ian-710 en el norte de Chiapas. *Revista Ra Ximhai*, 1(1).
<https://www.researchgate.net/publication/28097703>

- Rojo, G., Martínez, R., Jesús, R., & Mata, J. (2011). *El cultivo del Hule en México*. <http://www.uaim.edu.mx/Documentos/CultivoDelHule.pdf>
- Romahn de la vega, C., & Ramirez, H. (2010). *Dendrometría*. <https://vdocuments.mx/dendrometria-romahn-y-ramirez-2010.html?page=22>
- Rubilar, R. A., Allen, H. L., Alvarez, J. S., Albaugh, T. J., Fox, T. R., & Stape, J. L. (2010). Silvicultural manipulation and site effect on above and belowground biomass equations for young *Pinus radiata*. *Biomass and Bioenergy*, 34(12), 1825–1837. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2010.07.015>
- SENA, (Servicio Nacional de Aprendizaje). (2006). *Caracterización Ocupacional El Caucho Natural*. 57–64. <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/2101>
- Sharma, M., Subedi, N., Ter-Mikaelian, M., & Parton, J. (2015). Modeling Climatic Effects on Stand Height/Site Index of Plantation-Grown Jack Pine and Black Spruce Trees. *Forest Science*, 61(1), 25–34. <https://doi.org/10.5849/FORSCI.13-190>
- Sierra, G. (21 de julio de 2017). *La fiebre del caucho en Colombia. Sobre el autor*. Banrepcultural. Retrieved September 20, 2022, from <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-262/la-fiebre-del-caucho-en-colombia>
- Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria. Retrieved September 7, 2022, from <https://sipra.upra.gov.co/nacional>
- Sun, R., Wu, Z., Lan, G., Yang, C., & Fraedrich, K. (2021). Effects of rubber plantations on soil physicochemical properties on Hainan Island, China. *Journal of Environmental Quality*, 50(6), 1351–1363. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20282>
- Tapia, F., Ernesto, C., Cevallos, F., Carlos, K. L., Flores Tapia, E., & Lissette, K. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner,

- Shapiro-Wilk y Kolmogórov-Smirnov. *Periodicidad: Semestral*, 23(2), 2021–2087.
<http://portal.amelica.org/ameli/journal/341/3412237018/3412237018.pdf>
- Tapiero, A., Guevara, Y., López, M., & D, H. (2017). Índices de crecimiento, desarrollo y comportamiento fitosanitario de 7 materiales evaluados en campos clonales en Colombia. V *Congreso Brasileiro de Heveicultura.*, 7.
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/35502>
- Tapiero, A., Martínez, A., León, G., Argüello, O., Garcia, F., & Garcia, I. (2018). *Modelo Productivo para el cultivo de caucho (Hevea brasiliensis) (Will. ex A. Juss.) Mull. Arg. en Colombia, con énfasis en la Orinoquia y el Magdalena Medio.*
<https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/book/66>
- Teshome, T & Petty, J. (2000). Site index equation for *Cupressus lusitanica* stands in Munessa forest, Ethiopia. *For Ecol Manage.* 126:339–347.
- Thanh, T., Nhan, N., Truong, V. Van, & Minh, T. D. (2022). Effects of Planting Density on Growth and Yield Attributes of Rubber Trees (*Hevea brasiliensis*). *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 45(1), 245–256. <https://doi.org/10.47836/pjtas.45.1.14>
- Toledo, M., Poorter, L., Peña-Claros, M., Alarcón, A., Balcázar, J., Leño, C., Licona, J. C., Llanque, O., Vroomans, V., Zuidema, P., & Bongers, F. (2011). Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. *Journal of Ecology*, 99(1), 254–264.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01741.x>
- Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos y Desastres [UNGRD]. (2016). *Fenómeno El Niño, Análisis Comparativo 1997-1998//2014-2016.*

https://www.academia.edu/32509144/Fen%C3%B3meno_El_Ni%C3%B1o_An%C3%A1lisis_comparativo_1997_1998_2014_2016

Wabo, E. (2002). *Tema 15: Calidad de sitio e Índice de Sitio*. <https://docplayer.es/94513057-Tema-15-calidad-de-sitio-e-indice-de-sitio-por-enrique-wabo.html>

Watanabe, Y., Buri, M. M., Oladele, O. I., Rastilantie, M., Owusu-Sekyere, E., Masunaga, T., Idowu Oladele, O., & Wakatsuki, T. (2010). Teak (*Tectona grandis*) growth as influenced by soil physicochemical properties and other site conditions in Ashanti region, Ghana. In *Agriculture & Environment* (Vol. 8, Issue 2). <https://www.researchgate.net/publication/266009286>

Yang, Z., Zhao, P., Peng, W., Liu, Z., Xie, G., Ma, X., An, Z., & An, F. (2022). Cloning, Expression Analysis, and Functional Characterization of Candidate Oxalate Transporter Genes of HbOT1 and HbOT2 from Rubber Tree (*Hevea brasiliensis*). *Cells*, 11(23), 3793. <https://doi.org/10.3390/CELLS11233793/S1>

Yasin, S., Adrinal, ., Junaidi, ., Wahyudi, E., Herlena, S., & Darmawan, . (2010). Changes of Soil Properties on Various Ages of Rubber Trees in Dhamasraya, West Sumatra, Indonesia. *Journal of Tropical Soils*, 15(3), 221–235.

Zapata, C. (2013). *Influencia edafoclimática en el desarrollo de plantaciones juveniles de Eucalyptus grandisen el suroccidente colombiano*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/20076/7011003.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zhao, D., Kane, M., Teskey, R., Fox, T. R., Albaugh, T. J., Allen, H. L., & Rubilar, R. (2016). Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United

States. *Forest Ecology and Management*, 375, 105–111.

<https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2016.05.035>

Zuleta, J. (2003). *Cultivo del caucho Manual para inversionistas asociaciones técnicas*. 1–23.