

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

*“Estructura forestal y reserva de carbono de la Finca  
Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos  
(FEIMA)”*

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de  
Biosistemas como requisito para optar por el grado de Licenciatura en  
Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Aldo Quesada Chacón

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2019

Trabajo Final de Graduación sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



Aldo Quesada Chacón

Estudiante



Carlos Rojas Alvarado, Ph.D.

Director de Tesis



Dra. Mariana Alfaro Santamaría

Miembro, Comité Asesor



Alejandra Rojas González, Ph.D.

Miembro, Comité Asesor



Ph.D. Marta Montero Calderón

Miembro Tribunal Examinador



Ph.D. Ronald Aguilar Álvarez

Miembro Tribunal Examinador

## **DEDICATORIA**

*A mi madre Greidin Quesada y toda mi familia, quienes me apoyaron durante todo mi proceso en la universidad y fueron mi motor para seguir adelante.*

*A mi abuela Blanca, que en paz descanse, quien fue un pilar fundamental para nunca rendirme a pesar de las dificultades.*

*A Dios por darme fuerzas y perseverancia en momentos difíciles, y a todas las personas que se preocuparon por mi avance en la universidad.*

## ***AGRADECIMIENTOS***

En primera instancia a Carlos Rojas Alvarado por la confianza depositada en mi persona, por apoyarme y ayudarme a culminar este proceso, por sus consejos y recomendaciones para ser mejor persona.

A Pedro Rojas y Shiori Nakajima, por ayudarme en la toma de datos en campo y por brindarme su ayuda cuando lo necesitaba. Al personal de la FEIMA, por su generosidad y su ayuda para realizar el trabajo en la finca.

A mis lectoras Marianela Alfaro y Alejandra Rojas, por su apoyo, asesoría y por siempre creer en el trabajo realizado y confiar en mi persona para desarrollar el presente estudio.

A la Escuela de Ingeniería de Biosistemas y la directora Marta Montero por brindarme su ayuda cuando lo necesitaba,

A mis compañeros de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas por su apoyo durante tantos años, por su amistad sincera, por ayudarme a ser mejor persona y por llenarme de lindos recuerdos.

A mis compañeros de Economía Agrícola y Agronegocios por su apoyo y entendimiento en los momentos difíciles.

## ÍNDICE GENERAL

---

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE CUADROS .....	X
RESUMEN .....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS .....	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos .....	5
JUSTIFICACIÓN .....	6
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO.....	8
CAPITULO 2. METODOLOGÍA .....	13
2.1 Área de estudio.....	13
2.2 Selección de variables estructurales.....	15
2.2 Muestreo general.....	16
2.3 Estructura horizontal .....	18
2.4 Estructura vertical .....	22
2.4.1 Procesamiento de imágenes en GLA .....	25

2.5	Captación de carbono en el suelo.....	26
2.6	Análisis de datos .....	27
2.6.1	Análisis estadístico.....	28
2.6.2	Análisis de componentes principales (PCA).....	29
CAPITULO 3. Resultados y análisis de resultados .....		30
3.1	Estadística descriptiva de las variables estructurales .....	30
3.2	Análisis estadístico.....	38
3.3.1	Reservas de carbono.....	44
3.4	Creación de mapas .....	45
3.4.1	Reservas de carbono.....	51
3.5	Implicaciones de los resultados para el manejo del bosque en FEIMA.....	53
CONCLUSIONES .....		56
RECOMENDACIONES.....		58
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....		59
ANEXOS .....		69

## *ÍNDICE DE FIGURAS*

---

<b>Figura 1.</b> Área delimitada correspondiente a la Finca Experimental de Modelos Agroecológicos (FEIMA).....	14
<b>Figura 2.</b> Imágenes ilustrativas de los usos de suelos presentes en la FEIMA.....	15
<b>Figura 3.</b> Imágenes ilustrativas de los usos de suelos presentes en la FEIMA.....	16
<b>Figura 4.</b> Esquemas de muestreo de bosque considerados en el presente estudio [43]......	17
<b>Figura 5.</b> Subdivisiones de la finca según los diferentes usos de suelo. El área en rojo (E) corresponde a la sección suroeste, el área morada (D) a la sección media y el área amarilla (B) a la sección noreste del bosque. El área azul (A) muestra el área agrícola y la verde (C) el potrero.....	18
<b>Figura 6.</b> Parcela de bosque ubicada en la FEIMA. ....	19
<b>Figura 7.</b> Área de potrero ubicada en la FEIMA. ....	19
<b>Figura 8.</b> Medición del diámetro a la altura de pecho en un árbol de Eucalyptus presente en la finca estudiada. ....	20
<b>Figura 9.</b> Plantas indicadoras de disturbio: A) Ortiga, B) Pastos, C) Guarumo y D) Palmas. ....	22
<b>Figura 10.</b> Equipo utilizado para capturar información fotográfica utilizada en la determinación de variables verticales.....	23
<b>Figura 11.</b> Detalle de una fotografía de dosel en la zona ganadera en la finca experimental en estudio. A la izquierda se observa un detalle de la imagen original tomada en campo y a	

la derecha se observa el mismo detalle de la imagen postprocesada, en blanco y negro, tras aplicar un threshold con valor de 98 (medio). .....	26
<b>Figura 12.</b> Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar del DAP en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.....	30
<b>Figura 13.</b> Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar del Índice de Disturbio en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica. ....	31
<b>Figura 14.</b> Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar de la distancia vecinal en el parche boscoso en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica. ....	32
<b>Figura 15.</b> Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar del área basal en el parche boscoso en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.....	33
<b>Figura 16.</b> Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar de la altura de los árboles en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica. ....	34
<b>Figura 17.</b> Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar de la apertura de dosel de los árboles en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica. ....	35
<b>Figura 18.</b> Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar del IAF en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.....	36
<b>Figura 19.</b> Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar de la radiación directa en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.	37

<b>Figura 20.</b> Biplot del PCA realizado con las variables estructurales registradas en este estudio para la totalidad de la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.....	40
<b>Figura 21.</b> Biplot del PCA realizado con las variables estructurales registradas en este estudio para el bosque de la FEIMA, Turrialba, Costa Rica. ....	41
<b>Figura 22.</b> Distribución espacial de la apertura de dosel en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio. ....	46
<b>Figura 23.</b> Distribución espacial del diámetro a la altura de pecho (DAP) de los árboles en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.....	47
<b>Figura 24.</b> Distribución espacial de la altura de los árboles en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.....	48
<b>Figura 25.</b> Distribución espacial del índice de área foliar (IAF) en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.....	49
<b>Figura 26.</b> Distribución espacial del Índice de Disturbio en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio. ....	50
<b>Figura 27.</b> Distribución espacial del Área Basal en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.....	51
<b>Figura 28.</b> Distribución espacial de las Unidades Equivalentes de CO <sub>2</sub> en el parche boscoso de la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.....	52

## *ÍNDICE DE CUADROS*

---

<b>Cuadro 1.</b> Variables estructurales seleccionadas en el presente proyecto.....	16
<b>Cuadro 2.</b> Prueba de Tukey para los promedios de los tres usos de suelo de la FEIMA, Turrialba, Costa Rica. ....	38
<b>Cuadro 3.</b> Valores porcentuales calculados de tres tipos de radiación incidente sobre FEIMA según sección de uso de la tierra en la misma.....	42
<b>Cuadro 4.</b> Valores obtenidos para las variables analizadas únicamente en el área de potrero de la FEIMA. ....	43
<b>Cuadro 5.</b> Valores promedio del estimador de reservas de carbono basado en árboles y desviaciones estándar calculadas para las secciones del bosque de la FEIMA. ....	44

## *RESUMEN*

---

La presente investigación documentó diferentes variables estructurales del bosque en la Finca Experimental de Modelos Agroecológicos (FEIMA), para las cuales no se contaba con información georreferenciada. La estructura forestal vertical y horizontal permiten conocer a fondo la distribución y el comportamiento de los árboles a lo largo de un parche boscoso. Lo anterior es importante documentarlo en el contexto actual del país, en el que se impulsan iniciativas que velan por el buen manejo de los sistemas forestales.

Para el presente trabajo se estudiaron las principales variables estructurales verticales (altura de los árboles, apertura de dosel, índice de área foliar y radiación solar) y horizontales (diámetros de los árboles, área basal, distancia vecinal, presencia de plantas indicadores de disturbio), así como las reservas de carbono asociadas con las secciones forestales de la finca. Con la información de dichas variables estructurales se realizaron mapas a través de sistemas de información geográfica y se realizaron diferentes análisis estadísticos para determinar cuál de ellas explicó la mayor variabilidad asociada con el bosque en el sitio de estudio.

Tras el análisis, se obtuvo que la apertura de dosel, así como el diámetro y la altura de los árboles, fueron las variables de mayor peso para comprender la dinámica forestal en FEIMA. Estas variables explicaron la estructura de los datos obtenidos en un porcentaje cercano al 90%. Al mismo tiempo se observó que la sección de la finca dedicada a la ganadería (sistema silvopastoril) presentó diferencias en su dinámica forestal con respecto

al parche boscoso, lo cual puede tener una implicación en el uso de la tierra que se le quiera dar a esta zona en un futuro. Además, a pesar de que el estudio se realizó considerando que el bosque estaba dividido en tres zonas diferentes (clasificación *a priori*), los datos obtenidos indicaron que no hubo diferencias significativas en la estructura del bosque entre las diferentes zonas y que, por lo tanto, toda el área forestal se puede considerar una única unidad funcional desde el punto de vista estructural.

Finalmente, con los datos obtenidos se ha podido calcular que las reservas de carbono de la sección de bosque de FEIMA oscilan entre 81 y 483 toneladas de carbono por hectárea para un total de entre 2331 y 13868 toneladas de carbono para toda la finca. Estos valores se encuentran en el rango normal para bosques tropicales húmedos y no son raros para parches boscosos con una historia no planificada de uso.

De esta forma, a pesar de que la sección de bosque de FEIMA no presenta características relevantes desde el punto de vista estructural, si es muy interesante desde el punto de vista de reservas de carbono. Así, es evidente que el aporte del parche boscoso hacia planes nacionales de carbono neutralidad es importante con respecto a las zonas de ganadería y de agricultura de la finca. Lo anterior por cuanto la atenuación de la radiación y los otros servicios ecosistémicos (p.e. control regional de temperatura) son significativamente más altos en el bosque que en las otras zonas aledañas.

## *INTRODUCCIÓN*

---

El bosque se puede definir como “una extensión territorial de más de 0.5 hectáreas dotada de árboles de una altura superior a 5 metros, con una cubierta de dosel superior al 10 por ciento, o de árboles capaces de alcanzar esta altura *in situ*, sin incluir la tierra sometida a un uso predominantemente agrícola o urbano” [1]. Según [2], los bosques son unidades integrales donde interactúan entre sí una gran cantidad de factores bióticos y abióticos, en los cuales la constante renovación de la masa arbórea hace de ellos sitios irregulares de gran complejidad y dinamismo, asociándose con cambios de composición florística y estructural.

La importancia de un bosque radica principalmente en los servicios ambientales mediados por el mismo, como el sostén de la biodiversidad, la fijación de carbono, el control parcial del ciclo hidrológico y la capacidad de fomentar la educación y el ocio. Los bosques además cumplen una función protectora de suelos y cuencas hidrográficas [3], lo cual hace que la caracterización y estudio detallado de los mismos sea de interés para la búsqueda de un mejor aprovechamiento de tierras y un manejo más inteligente de la planificación territorial integrada con elementos de desarrollo nacional.

La caracterización estructural de un bosque permite conocer la distribución de variables importantes del biosistema que están asociadas con los individuos que forman parte de este. Una buena determinación de estas características permite observar donde se encuentran las diferencias forestales (p.e. en términos de especies de árboles, capacidad de movilización de nutrientes, potencial de modificación en uso de la tierra) y darle seguimiento al progreso

de estas. Por lo tanto, y para efectos de manejo forestal (entendido más allá de su interpretación de aprovechamiento), la estructura de un bosque se puede definir como el grado de uniformidad y distribución de la complejidad de variables, con importancia ecológica y silvicultural [4].

Según [5], el análisis estructural de un bosque está conformado por dos componentes, el horizontal y el vertical. El primero consiste en el arreglo espacial de los árboles, en el cual las condiciones de suelo y del clima, las características y estrategias de las especies y los efectos de disturbios sobre la dinámica del bosque, son los componentes principales, y se ven reflejados en la distribución de los árboles por el diámetro [6]. Por otro lado, el análisis estructural vertical está determinado por la distribución de los organismos en el perfil elevacional del bosque y responde a las características de las especies que la componen y a las condiciones climáticas, presentes en las diferentes alturas del perfil [5].

Según [2], un análisis estructural debe cumplir al menos con cuatro requisitos para considerarse como funcional. Dichos requisitos son: (1) que se pueda aplicar a cualquier tipo de bosque, (2) que produzca resultados objetivos expresables en cifras y números, (3) que los análisis hechos en diferentes bosques sean comparables y (4) que los métodos estadísticos sean aplicables tanto para la interpretación como para la comparación de resultados.

El conocimiento del análisis estructural de un bosque permite determinar cuál es su aporte en la captación de CO<sub>2</sub> atmosférico, debido a que el almacenamiento de carbono tanto en la vegetación como en los suelos, tiene un papel muy activo en la dinámica de dióxido de carbono en la atmósfera [7]. Según [8], la biomasa forestal es uno de los más grandes y dinámicos sumideros de carbono en ecosistemas terrestres. De esta forma es importante

cuantificar esta biomasa, debido a la variabilidad que se ha observado en este parámetro en diferentes sistemas forestales. Por ejemplo, para bosques secos tropicales se han reportado valores de biomasa aérea de 39 t/ha en Chamela, México y de 334 t/ha en Guanacaste, Costa Rica y se ha visto que estos valores incrementan linealmente con un aumento en la precipitación [9].

La importancia de este tipo de datos es que con ellos se puede ofrecer una buena gestión de los bosques y con ello aumentar al máximo la contribución de estos a la adaptación al cambio climático. De la misma forma, una apropiada gestión forestal tiene implicaciones en la optimización de la producción de bienes, la conservación y uso apropiado del suelo, el agua y los otros servicios ambientales que los bosques pueden brindar [10]. En este contexto, es primordial también que los diferentes dueños de tierras con algún tipo de bosque se preocupen por una documentación apropiada de sus sistemas forestales.

Así, el presente proyecto se ha diseñado debido a la necesidad de caracterizar el área boscosa de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA) de la Universidad de Costa Rica. La idea ha sido cuantificar estructuralmente el bosque, horizontal y verticalmente, y calcular el carbono fijado por unidad de área utilizando una estrategia de partición del bosque en tres zonas para evaluar uniformidad en las variables estudiadas. Con ello, se han creado mapas digitales de diferentes variables estructurales del bosque y así proveer el material primario para el monitoreo en el marco de la adaptación al climático. El macroanálisis de estas variables en un contexto regional y temporal tiene el potencial de vincularse con iniciativas de desarrollo rural integrado y favorecer el mejoramiento de prácticas de manejo del bosque a nivel institucional y regional. De esta forma, el presente proyecto se ha visualizado como un aporte disciplinario de una unidad

académica hacia la institución administradora de las tierras, que debería de ser ejemplo regional de buenas prácticas de gestión funcional de los ecosistemas que administra.

## **OBJETIVOS**

---

### **Objetivo general**

Caracterizar el área boscosa de la FEIMA por medio del estudio de variables dendrológicas estructurales, tanto horizontales como verticales, y determinar la distribución espacial de las reservas de carbono en las diferentes secciones del bosque como medio para promover la implementación de un plan de manejo de este.

### **Objetivos específicos**

1. Elaborar mapas digitales de diferentes variables estructurales del área boscosa de la FEIMA que permitan darle seguimiento a su comportamiento a lo largo del tiempo.
2. Calcular, por medio de ecuaciones alométricas, las reservas de carbono asociadas con las diferentes secciones forestales presentes en la finca.
3. Analizar diferencias espaciales de las variables estructurales y de reserva de carbono en las diferentes secciones boscosas de la FEIMA.
4. Elaborar lineamientos generales para la zonación del bosque en FEIMA y recomendaciones para un potencial plan de manejo que permita un uso más eficiente del bosque en esta finca.

### **Anotación**

Los objetivos propuestos se enfocan en el estudio del parche boscoso pero para efectos comparativos, en la metodología y resultados se han incluido resultados de la zona silvopastoril y la zona agrícola de la finca estudiada.

## *JUSTIFICACIÓN*

---

Costa Rica ha sufrido cambios significativos en su cobertura forestal desde la década de los años 60 hasta llegar a un bajo histórico en la cobertura nacional alrededor del año 1986 con apenas un 26% [11] del territorio protegido por bosques. Posteriormente, el país tuvo un periodo de recuperación hasta el año 2015, donde la cobertura forestal aumentó hasta el 54% [12], disminuyendo de manera considerable la tasa de deforestación. Este proceso, el más efectivo de la región centroamericana [13], se puede atribuir en gran manera al programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA), que ha favorecido el proceso de recuperación del bosque.

Esta recuperación también ha sido fortalecida con el aprovechamiento de las nuevas tecnologías que permiten conocer de manera más fácil y eficaz la composición del bosque. Así, la documentación más rápida del mismo brinda la posibilidad de crear un plan de manejo eficiente que permita conservar sus especies y funcionalidad ecosistémica y con ello disminuir los efectos negativos producto de las presiones sobre estos biosistemas.

Este último proceso, sin embargo, requiere que los diferentes actores involucrados con la documentación técnica forestal faciliten los procesos de adquisición de información y utilicen la misma para toma de decisiones. En este sentido y tomando en cuenta que la Universidad de Costa Rica tiene una serie de estaciones experimentales y que una de ellas (FEIMA) ha sido sujeta a poco estudio, se considera primordial que su documentación se lleve a cabo. Debido a que esta estación experimental cuenta con una sección de bosque, el proceso de generación de información forestal llevado a cabo en este trabajo final de graduación puede tener efectos inmediatos en el plan de gestión del uso de la tierra de esta

estación y en su rol como sitio de monitoreo del efecto de cambio climático en la zona de Turrialba. Lo anterior debido a que los mencionados procesos de reforestación nacional han generado beneficios socioeconómicos a nivel local y regional, como es esperado en los objetivos del milenio, promovidos por las Naciones Unidas [14].

## *CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO*

---

La estructura de un bosque se puede determinar por medio de sus características horizontales y verticales, las cuales al analizarlas de manera conjunta permiten conocer el comportamiento del bosque y con ello generar algún tipo de planificación para su uso y conservación. La estructura horizontal permite evaluar el comportamiento de los árboles individuales y de las especies de plantas en la superficie del bosque. Lo anterior es posible determinarlo mediante algunas variables como la riqueza y distribución florística, distribución diamétrica y área basal o por medio de su importancia ecológica (abundancias, frecuencias y dominancias), las cuales sumadas generan el Índice de Valor de Importancia [15]. También, la estructura horizontal de un bosque permite conocer la posición de las copas de las especies que componen el bosque al observarlas desde el centro, es decir, como una proyección vertical o vista de planta [16].

Para determinar la estructura horizontal de un bosque se puede recurrir a la medición de algunas variables que explican su conformación y la distribución de los árboles, como, por ejemplo, el área basal, la distancia vecinal o el índice de disturbio, entre otros. El área basal o área basimétrica corresponde a la suma de la sección transversal del fuste o tronco a la altura del árbol donde se quiere realizar la medición [17]. Usualmente la medición del diámetro se realiza a la altura de pecho (dap), aproximadamente a 1.3 m.

Cuanto mayor sea el número de árboles gruesos, mayor es el área basimétrica y, por lo tanto, mayor es la densidad. Si el número de árboles permanece constante, el área basimétrica se incrementa con el paso del tiempo, debido al crecimiento de los árboles [18].

Este valor se usa con frecuencia en conjunto con la densidad de árboles y la altura del árbol, con el fin de brindar un estimado del rendimiento en madera del bosque [19].

El área basal se puede ver afectada por la distancia a la que se encuentran los árboles, debido a la competencia por los nutrientes presentes en el suelo podría generar deficiencias en el ancho del tronco. La distancia vecinal entre los árboles es una variable que permite conocer la dinámica forestal del bosque, pues los espacios disponibles entre los árboles permiten el establecimiento de nuevos individuos [20]. Además, una distancia adecuada entre los árboles permite controlar la erosión de los suelos, tal y como lo menciona el Dictamen OJ-033-95 del 20 de septiembre de 1995 de la Procuraduría General de la Republica:

*“Cuando existe una masa arbórea suficiente, la lluvia que cae sobre el suelo lo hace en una forma más lenta y menos fuerte, al aminorar su caída las ramas y hojas de los árboles, que retienen una gran cantidad de agua, y la liberan paulatinamente en forma de gotas o bajando por el tronco. Esto permite que las aguas no discurran y erosionen las capas edáficas. También impide que la lluvia dañe el suelo el sinnúmero de hojas sueltas en el sotobosque”.*

Una distancia vecinal muy alta provoca grandes espacios internos dentro del bosque, donde la radiación ingresa de manera directa al sotobosque y provoca la proliferación de algunas plantas que no son usuales y pueden ser consideradas como indicadoras de disturbio. Según [21], el disturbio en un bosque se puede medir por varias formas de perturbación (ganadería, actividades humanas y degradación del hábitat), pero no todas las especies sufren el mismo tipo de perturbación. Las plantas que crecen en el sotobosque se pueden

considerar plantas indicadoras de disturbio porque demuestran que existe una modificación en la cobertura forestal en un área específica, generalmente explicado por un índice que es igual a cero si no hay presencia de plantas, o igual a uno si su presencia es abundante.

Por otro lado, la estructura vertical de un bosque indica la distribución de las especies en el área de estudio [16] y se ve afectada por variables microclimáticas como lo son la radiación, temperatura, viento, humedad relativa, evapotranspiración y concentración de CO<sub>2</sub> [6].

Según [22], la estructura vertical está determinada por la distribución de los organismos, tanto plantas como animales, a lo alto de su perfil, respondiendo a características de las especies que la componen y a las condiciones microambientales presentes en las diferentes alturas del perfil. Además, se dice que la estructura vertical se describe tomando en consideración los estratos del bosque y las especies dominantes observadas y/o registradas en cada uno de ellos [23].

Para determinar la estructura vertical de un bosque es necesaria la medición de algunos parámetros ambientales, así como algunas variables que explican la conformación del bosque en las alturas como el Índice de Área Foliar (IAF) o la apertura de dosel, las cuales mantienen una relación inversamente proporcional. El IAF es un indicador usado ampliamente para representar la arquitectura vegetativa de la parte aérea [24]. Esta variable está asociada con la mayoría de los procesos agronómicos, biológicos, ambientales y fisiológicos, que incluyen el análisis de crecimiento, la fotosíntesis, la transpiración, la interceptación de luz, la asignación de biomasa y el balance de energía. El IAF permite estimar la capacidad fotosintética de las plantas y puede ayudar a entender la relación entre la acumulación de biomasa, rendimientos bajo diferentes condiciones ambientales y manejo

de diferentes variedades de un cultivo [25]. Consiste en la cantidad de superficie foliar soportada ( $m^2$ ) por una determinada superficie de terreno ( $m^2$ ) [26], y sus métodos para estimarlos son *in situ* y son destructivos, o por medio del uso de relaciones alométricas y métodos ópticos [27].

Otra variable de importancia y que guarda una relación proporcional con la apertura de dosel es la radiación solar incidente en el bosque. La radiación solar es la principal fuente de energía disponible para los procesos que ocurren en los ecosistemas, y es uno de los principales factores que influyen en el establecimiento y desarrollo de vegetación bajo el dosel forestal [28, 29]. Según [29], la radiación alcanza la superficie terrestre a través de la radiación directa (radiación que llega sin interferencias a la superficie) y la radiación difusa (radiación solar dispersada por la atmósfera), lo cual se ve afectada por la distribución y la forma de los árboles dentro del bosque.

La radiación transmitida se define como la proporción de la radiación solar que alcanza un punto de muestreo en el interior del bosque respecto a la medida en el exterior del mismo o sobre el dosel arbóreo [30]. Esta luz transmitida bajo el dosel es complicada de medir, debido a que existe una distribución irregular de la radiación solar en el espacio y en el tiempo [31], además, solo una parte de la radiación solar incidente sobre el dosel de los árboles alcanza el suelo del bosque.

El análisis de la radiación solar hacia el suelo no es de importancia solo para los bosques, sino que toma gran importancia cuando se tiene una plantación agrícola, por el proceso de evapotranspiración, o un área dedicada a la ganadería, de la cual depende una alta producción de leche o de carne y que necesitan que los animales se desarrollen con bienestar y sin ningún tipo de estrés. Es por ello que la radiación es un parámetro

importante a determinar en un sistema silvopastoril, el cual se define como una combinación de árboles, arbustos forrajeros y pastos con la producción ganadera en la finca [32], como se muestra en la Figura 1; los cuales presentan oportunidades desde el punto de vista económico, productivo, social y ambiental [33].

Este tipo de sistema permite mejorar los sistemas de producción ganadera en los diferentes agroecosistemas, mitigar los efectos negativos ambientales generados por los sistemas tradicionales, mejorar el bienestar de los animales e incrementar la productividad animal [35].

La importancia a nivel ambiental de un sistema silvopastoril o forestal radica en la captación del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) llevada a cabo por los árboles por medio del proceso de fotosíntesis. Esta captación de carbono es fundamental para reducir los Gases de Efecto Invernadero (GEI) causantes del cambio climático global, siendo los bosques los que concentran el 90% de la biomasa acumulada en la tierra en forma de ramas, fustes, hojas, raíces y materia orgánica [36]. Una vez que los bosques fijan en sus estructuras vivas el dióxido de carbono atmosférico, lo acumulan en su biomasa. Parte de este elemento es transferido al mantillo y al suelo por descomposición, constituyendo las reservas de carbono [37] y otra parte se libera a la atmósfera por medio del proceso de respiración [38].

Existen factores que influyen en la capacidad de almacenaje de carbono en forma de biomasa aérea que tienen los ecosistemas forestales, entre los que cabe mencionar la composición florística, la edad y la abundancia de los árboles [37]. Por ello es necesario poder inferir la cantidad de biomasa a partir de ecuaciones alométricas que toman en cuenta las dimensiones de los árboles para determinar la cantidad de carbono almacenado en un

bosque [39], y además, poder indicar los montos de carbono por unidad de superficie y tipo de bosque [40].

## *CAPITULO 2. METODOLOGÍA*

---

### **2.1 Área de estudio**

La Finca Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA) está ubicada en La Suiza, Turrialba, Costa Rica. Forma parte de la Universidad de Costa Rica desde hace aproximadamente 36 años, por medio de un tratado realizado con el Instituto Costarricense de Electricidad.

La zona de Turrialba se encuentra a una altura de 616 msnm [41], una temperatura promedio de 21.9 °C, precipitación promedio mensual de 224.7 mm y una radiación solar promedio de 16.6 MJ/m<sup>2</sup> [42]. Para el caso específico de la finca (ver Anexo 1), la temperatura promedio se encuentra en 24.9 °C, la lluvia en 142.9 mm y la humedad relativa en 76.1%, lo cual nos indica que la finca presente condiciones similares

La actividad del proyecto 731-B8-034 del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (Línea base de monitoreo en cambio climático y sostenibilidad de biosistemas forestales en FEIMA) con apoyo técnico de JICA (Agencia de Cooperación Internacional de Japón) permitió el acceso al área de trabajo, facilitando los permisos y el apoyo logístico de la investigación. En la Figura 1 se muestra el área correspondiente a la finca, la cual se encuentra dividida por medio de una carretera principal, pero, para la realización de los mapas en el presente estudio, se trabajó el área como una sola extensión continua, sin tomar

en cuenta la pequeña área que corresponde a la sección de la carretera. Los caminos internos se presentan de color rojo y las calles públicas se muestran en amarillo. Cada celda mostrada equivale a una hectárea (100m\*100m) y cuenta con un código de identificación con el cual se trabajó en campo.



**Figura 1.** Área delimitada correspondiente a la Finca Experimental de Modelos Agroecológicos (FEIMA).

**Fuente:** Imagen modificada tomada de Google Maps.

En la Figura 2, se observa una imagen ilustrativa de cada uno de los usos de suelo presentes en la FEIMA (bosque, potrero y agrícola).



**Figura 2.** Imágenes ilustrativas de los usos de suelos presentes en la FEIMA.

### **2.2 Selección de variables estructurales**

Debido a la necesidad que presenta la Universidad de Costa Rica y el país en caracterizar el área forestal con la que cuentan, para este proyecto se han elegido una serie de variables estructurales, tanto horizontales como verticales para generar los mapas adecuados para una mejor interpretación de las características forestales, así como de su distribución y homogeneidad espacial.

La importancia de conocer las variables estructurales de un bosque natural se centra en que a partir de su caracterización se puede orientar de manera más eficiente la gestión y control de este tipo de biosistemas. Para efectos de este proyecto se estudiaron una serie de variables estructurales horizontales y verticales en los árboles, mostradas en el Cuadro 1, en los tres usos de suelo mostrados en la Figura 3.



**Figura 3.** Imágenes ilustrativas de los usos de suelos presentes en la FEIMA.

**Fuente:** Imagen tomada en campo.

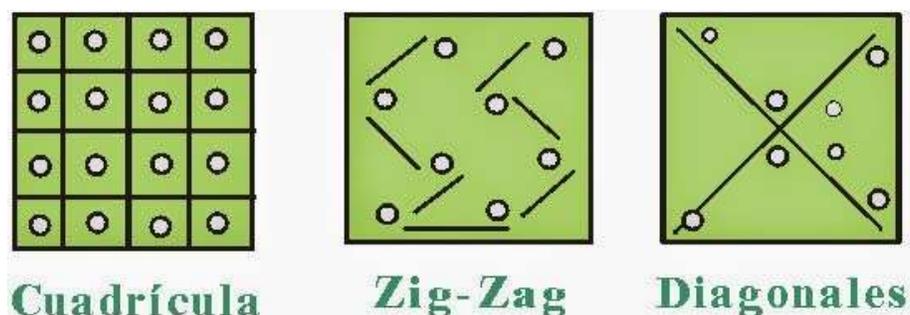
**Cuadro 1.** Variables estructurales seleccionadas en el presente proyecto.

<b>Variables estructurales horizontales</b>	<b>Variables estructurales verticales</b>
Diámetro a altura de pecho	Altura de los arboles
Área basal	Apertura de dosel
Distancia vecinal	Índice de área foliar
Presencia de plantas indicadoras de disturbio	Radiación solar y luz total transmitida

## 2.2 Muestreo general

Para evitar errores en la generación de los mapas digitales, se diseñó una metodología apropiada que minimizó la acumulación de sesgos desde la toma de datos en el campo según los esquemas mostrados en la Figura 4. Se escogió el sistema de cuadrícula debido a

que permite contar con un mayor número de puntos de muestreo para evaluar distribución espacial a partir de un modelo nulo de homogeneidad [43].



**Figura 4.** Esquemas de muestreo de bosque considerados en el presente estudio [43].

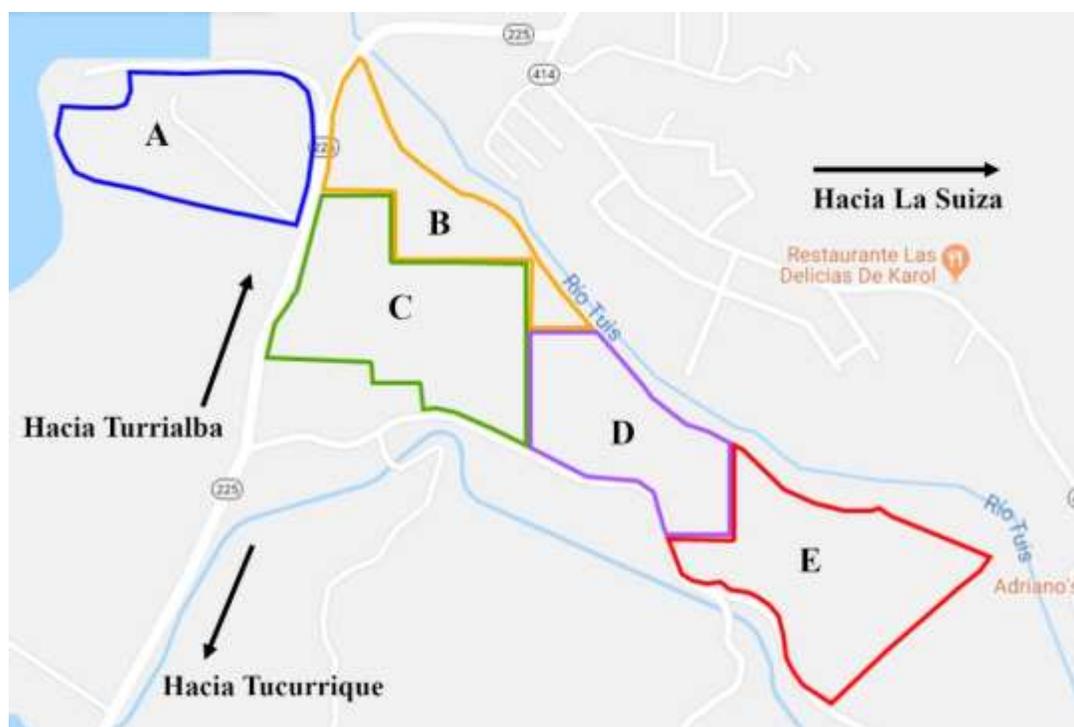
De esta forma, se utilizó un muestreo en forma de cuadrícula sistemática, el cual sirvió para llevar a cabo la toma de datos en el área, con un total de 33 muestras distribuidas en las 33 ha (aproximadamente) que conforman el bosque de la FEIMA. Este modelo es usado cuando se puede destinar tiempo y esfuerzo al muestreo de campo y cuando se desea tener más seguridad en el análisis espacial, ya que se basa en el hecho de que todas las celdas son equivalentes. Así, para el análisis estadístico, permite utilizar pruebas de hipótesis como base para evaluar diferencias.

De esta forma, la unidad muestral de este proyecto se diseñó espacialmente para que fuera cada una de las secciones de 100X100m aproximadamente, que corresponden a las celdas construidas (cuadrículas) y por ello los resultados fueron reportados a nivel de hectáreas. Lo anterior fue posible debido al tamaño del parche boscoso, que permitió la toma de datos masiva en todas las secciones dentro de la zona de trabajo, lo cual aumentó el grado de resolución final de análisis. A pesar de lo anterior, la metodología de caracterización del diámetro (principalmente para efectos del objetivo específico número dos) se llevó a cabo en un número reducido de parcelas, equivalente al 55% del espacio boscoso (18 parcelas),

para permitir un cálculo más detallado de los parámetros y dada su complejidad a la hora de la toma de datos.

### 2.3 Estructura horizontal

El diámetro a altura de pecho se calculó en primer lugar para todas las parcelas experimentales (33) y luego con mayor detalle para 18 parcelas localizadas geográficamente en tres posiciones diferentes del bosque, las cuales se muestran en la Figura 5. Las letras B, D y E denotan las tres secciones del bosque creadas a priori para efectos de este trabajo. En la Figura 6 y Figura 7 se ilustra una parcela de bosque y del potrero, respectivamente.



**Figura 5.** Subdivisiones de la finca según los diferentes usos de suelo. El área en rojo (E) corresponde a la sección suroeste, el área morada (D) a la sección media y el área amarilla (B) a la sección noreste del bosque. El área azul (A) muestra el área agrícola y la verde (C) el potrero.

**Fuente:** Imagen modificada tomada de Google Maps.



**Figura 6.** Parcela de bosque ubicada en la FEIMA.

**Fuente:** Imagen modificada tomada de Google Maps.



**Figura 7.** Área de potrero ubicada en la FEIMA.

**Fuente:** Imagen modificada tomada de Google Maps.

En ambos casos, para la determinación de esta variable se usaron secciones forestales de 0.02 ha (200 m<sup>2</sup>) en parcelas de 10x20 m a partir de la medición de cada árbol (individuos

con diámetro mayor a 10 cm y altura mayor a 3 m) con una cinta métrica forestal (Figura 8). En el caso de la determinación general se registró el diámetro una vez y en el caso de la determinación más detallada, se realizaron tres mediciones de diámetro por árbol y con ello se obtuvo un promedio para cada parcela. Con los primeros datos se construyó un mapa de distribución de valores de diámetro en toda la finca estudiada y con los segundos datos se calculó el área basal utilizando la ecuación (1), donde  $\emptyset$  es el diámetro del árbol en centímetros al cuadrado [44].

$$AB = 0.00007854 * \emptyset^2 \quad (1)$$

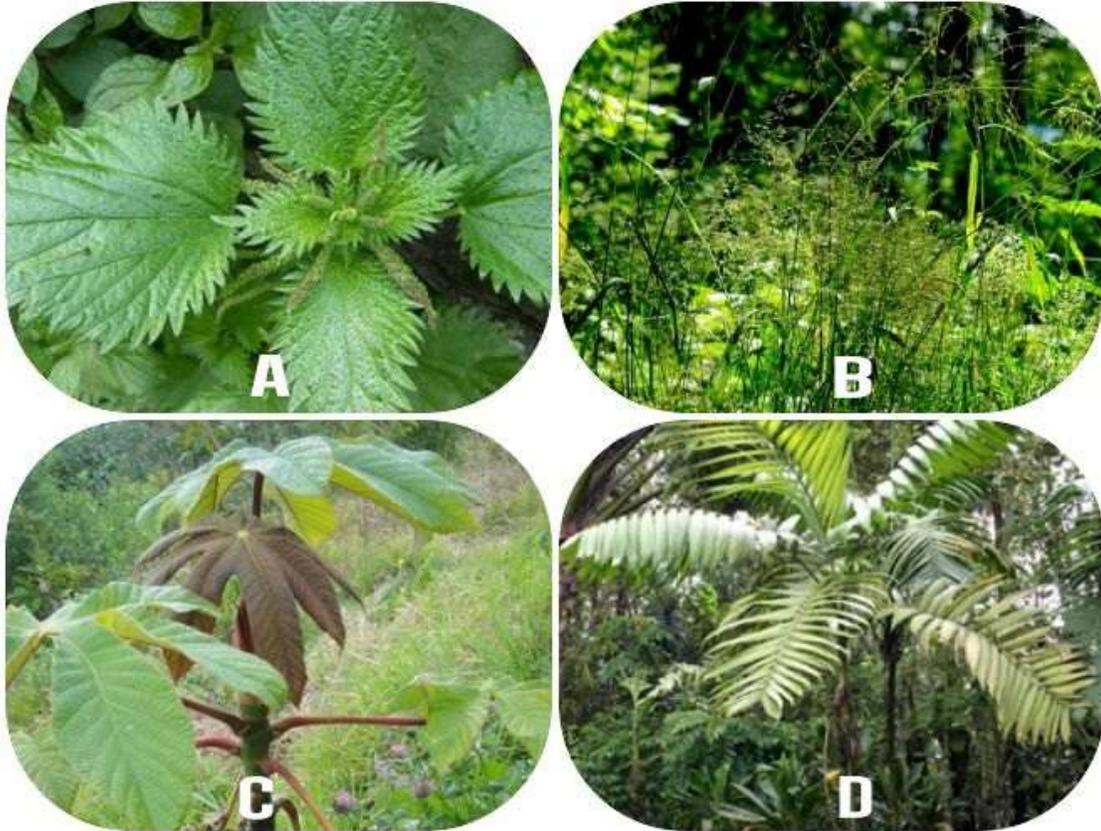


**Figura 8.** Medición del diámetro a la altura de pecho en un árbol de *Eucalyptus* presente en la finca estudiada.

**Fuente:** Imagen tomada en campo.

Para determinar la distancia vecinal, se seleccionaron en promedio 11 árboles por parcela, de forma aleatoria en las 18 parcelas anteriormente mencionadas y se midió la distancia de estos individuos con respecto a otros. Para ello, se hicieron cuatro mediciones de distancia vecinal del árbol bajo estudio en cuatro direcciones diferentes correspondientes a los cuatro puntos cardinales. Todas las mediciones se hicieron con una cinta métrica forestal y tras el proceso de campo, se realizó la determinación de los promedios para cada árbol y del promedio general para cada parcela.

Finalmente, para la determinación de los cuatro grupos de plantas indicadoras de disturbio, se realizó una evaluación de presencia/ausencia de 1) pastos, 2) plantas de ortiga, 3) árboles de guarumo y 4) palmas (Figura 9). Esta determinación se hizo en todas las parcelas de la finca experimental. Las anteriores plantas son buenos descriptores de disturbio forestal, por cuanto tienden a crecer en zonas en donde el bosque ha sido modificado drásticamente para permitir una entrada fuerte de luz hasta el sotobosque. De esta forma, con base en estudios previos (proyecto 731-B8-034 del Instituto de Investigaciones en Ingeniería) se utilizó un índice de disturbio, con rango total de valores de 0 a 1 (más bajo a más alto) asignando un valor de 0.3125 ( $2.5 \text{ veces} * 1/8$  de probabilidad de existencia) a la presencia de 1) y 2) y un valor de 0.1875 ( $1.5 \text{ veces} * 1/8$  de probabilidad de existencia) a la presencia de 3) y 4). El anterior cálculo asume que los pastos y plantas de ortiga tienen un 60% de probabilidad de presencia mayor que los árboles de guarumo y las palmas, que requieren condiciones más específicas de crecimiento.



**Figura 9.** Plantas indicadoras de disturbio: A) Ortiga, B) Pastos, C) Guarumo y D) Palmas.

**Fuente:** Imágenes tomadas en campo.

#### **2.4 Estructura vertical**

De forma similar a la caracterización horizontal, para el presente proyecto se desarrolló un sistema de determinación de características forestales en el eje vertical del bosque. Lo anterior se realizó principalmente con base en fotografías hemisféricas y análisis computacional utilizando el software GLA (Gap Light Analyzer). Para ello, se llevaron a cabo dos procesos de medición fotográfica espaciados temporalmente (época lluviosa vs época seca durante el año 2018) y con estos datos se determinó la dinámica de cambio del bosque en el mismo periodo de análisis.

Las fotografías fueron capturadas hacia el cielo, a un metro de altura, con un lente de ojo de pez de 180 grados y con dirección fija (modo horizontal con el punto superior de la

fotografía en dirección norte) utilizando un trípode y una brújula (Figura 10). En todos los casos, las fotografías fueron tomadas en condiciones climáticas de nubosidad para disminuir el sesgo de registro por alto reflejo de luz en condiciones climáticas no nubosas. De la misma forma, las fotografías fueron tomadas antes de las 8:00 am, para evitar que el sol se encontrara cerca del zenit.



**Figura 10.** Equipo utilizado para capturar información fotográfica utilizada en la determinación de variables verticales.

**Fuente:** Imagen tomada en campo.

Todas las imágenes fueron postprocesadas y analizadas en el software mencionado. Para lo anterior se realizó en primera instancia un fijamiento geográfico del raster primario (utilizando el norte como referencia), que fue luego binarizado en alto contraste (Figura 9). La imagen resultante fue analizada para calcular las variables verticales indicadas en el Cuadro 1. Sin embargo, de forma previa a lo anterior y para poder calibrar las ecuaciones se realizó un cálculo de 1) el índice de nubosidad, 2) la fracción espectral y 3) la fracción de rayos para la zona de la finca bajo estudio. Con estos parámetros, el cálculo de las variables

verticales se consideró más representativo para el punto geográfico estudiado. En el caso del índice de nubosidad se usó la ecuación:

$$K_t = H/H_o \quad (2)$$

Donde:

$K_t$ : índice de nubosidad

$H$ : radiación incidente en una superficie plana en la tierra

$H_o$ : radiación incidente en una superficie plana fuera de la atmósfera de la tierra.

Estos datos primarios fueron obtenidos de la estación meteorológica del CATIE para la zona de Turrialba, utilizando un promedio anual entre el año 2018 y 2019, y calculados utilizando el programa GLA.

Para obtener la fracción espectral, se utilizó la ecuación:

$$F_e = PAR/R \quad (3)$$

Donde:

$R$ : radiación total en la zona de estudio

$PAR$ : radiación total en el rango de 400-700 nm en la zona de estudio.

Para este cálculo, se utilizaron datos propios del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la UCR determinados a partir de sensores colocados en FEIMA. Los sensores son de la marca Onset S-LIA-M003, con rango de 400-700 nm y sensibilidad de 0 hasta 2500  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{segundo}$  y con resolución de 2.5  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{segundo}$ . Los datos fueron medidos

cada hora por el periodo completo del estudio (un año aproximadamente) y el sensor está colocado a 3 m de altura en una zona libre de interferencias físicas.

Finalmente, para obtener la fracción de rayos, se utilizó la ecuación:

$$Fr = [ 1 - \exp(-3.044Kt^{2.436})] \quad (4)$$

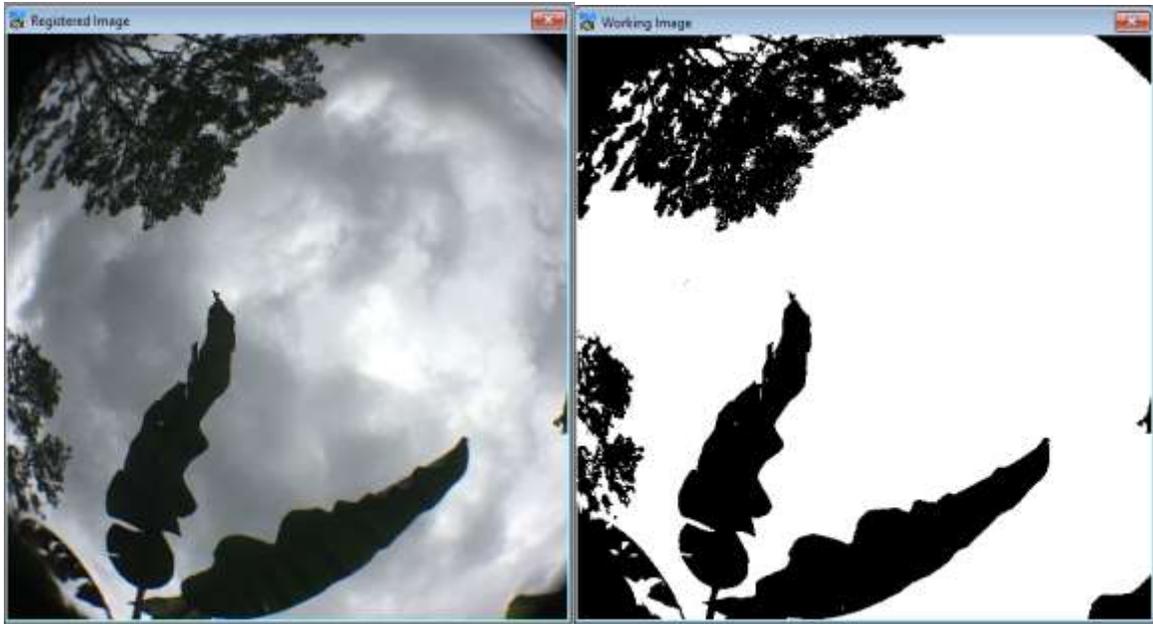
#### **2.4.1 Procesamiento de imágenes en GLA**

Una vez obtenidos los parámetros de calibración de las ecuaciones de cálculo, se realizó el análisis de las imágenes del dosel para todas las parcelas de estudio. Este análisis se realizó tomando en cuenta las coordenadas aproximadas de un punto en el FEIMA, redondeando el valor de la latitud a 9°0'00" Norte y la longitud 83°38'16" Oeste.

El valor calculado para el índice de nubosidad fue de 0.28, la fracción espectral de 0.44 y la fracción de rayos 0.13, los cuales son valores promedio para la zona y periodo de estudio. Estos valores fueron ingresados al programa para hacer referencia a las condiciones climáticas promedio de la zona de estudio.

A cada imagen se le realizó un procedimiento de post proceso mediante un “*threshold*” o umbral específico que permitió que la imagen original se transformara en una imagen binaria, en blancos y negros, donde los pixeles negros indican la presencia de hojas del dosel y los pixeles blancos la no presencia de hojas (Figura 11).

Posteriormente, se llevó a cabo el análisis para obtener el valor de las variables verticales de interés, de las cuales se utilizaron la apertura de dosel, la radiación transmitida y el índice de área foliar de 5 anillos concéntricos, el cual es el utilizado en zonas tropicales.



**Figura 11.** Detalle de una fotografía de dosel en la zona ganadera en la finca experimental en estudio. A la izquierda se observa un detalle de la imagen original tomada en campo y a la derecha se observa el mismo detalle de la imagen postprocesada, en blanco y negro, tras aplicar un *threshold* con valor de 98 (medio).

## 2.5 Captación de carbono en el suelo

Una vez determinadas las características horizontales y verticales de la sección de bosque en la finca bajo estudio, se determinaron las reservas de carbono, según el objetivo específico número tres. Para este procedimiento se utilizó la información primaria de las 18 parcelas estudiadas con mayor detalle, según el procedimiento explicado anteriormente. Particularmente, con la información del diámetro promedio de los árboles en un área definida se utilizó la siguiente ecuación alométrica generalizada [45]:

$$B^{\frac{2}{5}} = 0.1438 + 0.2051 * DAP + 0.3216 * DAP * \delta - 0.0744(DAP - 50) * X \quad (5)$$

Donde:

$B$  = biomasa (kg)

DAP= diámetro (cm) medido a 1.3 m de altura

$\delta$  = peso específico básico, equivalente a  $0.23 \text{ g/cm}^3$  [46].

$x$  = variable dicotómica (1 si  $dap \geq 50 \text{ cm}$  y 0 si  $dap < 50 \text{ cm}$ ).

Con los valores de diámetro determinados y con base en la fracción de carbono de la biomasa forestal sobre el suelo ofrecida por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus iniciales en inglés), cercana a  $0.49 \text{ ton C (d.m.)}^{-1}$  [46], se calculó el valor de carbono sobre el suelo con la siguiente ecuación.

$$\text{CSS} = B * 0.49 \quad (6)$$

Con base en la tasa de peso molecular de dióxido de carbono a carbono molecular (3.667) y según el valor obtenido para el carbono sobre el suelo, se calcularon las unidades equivalentes de carbono en el bosque.

$$\text{Uds. equivalentes de CO}_2 = \text{CSS} * 3.667 \quad (7)$$

Subsecuentes valores del IPCC fueron utilizados para calcular la biomasa sobre el suelo, por medio de relación entre la biomasa bajo el suelo y la biomasa aérea, el cual se ha determinado en  $0.37 \text{ ton (d.m.)}$  [46].

$$\text{BS} = B * 0.37 \quad (8)$$

## 2.6 Análisis de datos

Con toda la información recolectada en el proceso de trabajo en campo y en el postprocesamiento, se realizaron una serie de mapas digitales utilizando el software QGIS, que permite la manipulación de puntos tomados en campo y su transformación en mapas

digitales que fueron analizados por separado y en conjunto. Con lo anterior se desarrolló un análisis para observar si existieron o no, correlaciones entre las variables analizadas.

Finalmente, el análisis de variables para establecer correlaciones entre las mismas y estudiar el potencial de resumen de datos para ofrecer una caracterización espacial del bosque en FEIMA se llevó a cabo a partir de técnicas multivariadas de análisis, principalmente el Análisis de Componentes Principales (PCA por sus iniciales en inglés). Lo anterior se hizo en paquetes de software estadístico como InfoStat 2017, JMP 10 y PAST 3.14. La información de resumen con significancia estadística fue utilizada para determinar las variables de mayor importancia para explicar el comportamiento del bosque y con ello crear mapas digitales de FEIMA, con poder de establecer diferencias espaciales con base estructural y de reserva de carbono en la sección forestal de la finca en estudio.

### **2.6.1 Análisis estadístico**

Para analizar los datos se utilizaron técnicas de estadística descriptiva, inferencial y multivariada. En el caso de los primeros, se utilizó el promedio aritmético y la desviación estándar y en el caso del segundo el enfoque se centró en el concepto de correlación para la determinación de modelos lineares bivariados y en pruebas de hipótesis para la determinación de diferencias entre grupos de estudio. Estas últimas pruebas fueron analizadas con un valor de corte de rechazo (valor alfa) de la hipótesis nula de 0.05 y para ello se utilizó una subdivisión a priori del bosque en tres secciones (noroeste, media, sureste) que fueron analizadas a partir de análisis de varianza. En aquellos casos donde se encontraron diferencias, las respectivas pruebas post hoc de Tukey fueron llevadas a cabo.

### **2.6.2 Análisis de componentes principales (PCA)**

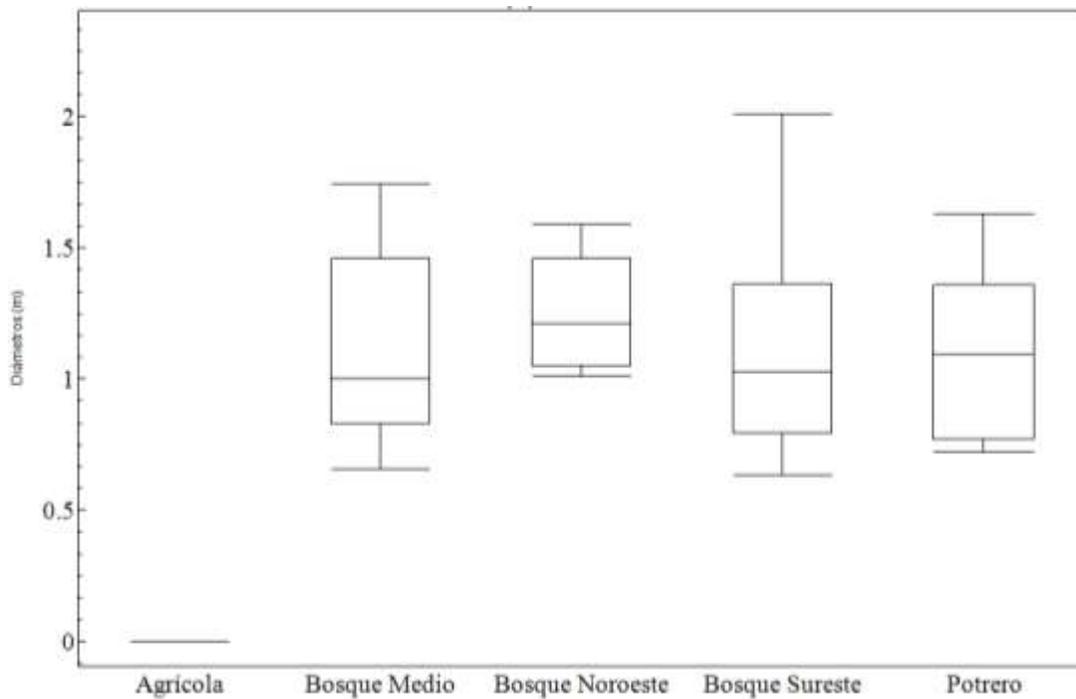
Este método fue utilizado para realizar una transformación lineal que diera como resultado un sistema de coordenadas (en este caso bidimensional) a partir del conjunto multidimensional original de datos [47]. Según [48] el propósito de este enfoque es a) reducir el conjunto de variables en unas pocas, construidas por transformaciones lineales de las originales, con la mínima pérdida de información, b) encontrar grupos en los datos si existen, c) clasificar nuevas observaciones en grupos definidos y d) relacionar dos conjuntos de variables.

Para construir la transformación lineal se construyó primero una matriz de correlación de los valores [49]. En este nuevo sistema de coordenadas la varianza de mayor valor del conjunto de datos es capturada por el primer eje, llamado primer componente, la segunda de mayor varianza es capturada por el segundo eje, llamado segundo componente, y así sucesivamente [50].

Este es un método utilizado ampliamente en el campo agropecuario, con el objetivo de establecer patrones de comportamiento en los sistemas agroecológicos de nutrición de cultivos [51] y para explicar la variabilidad relacionada con la morfometría de los animales, factores de producción animal, evaluación de pastos y forrajes, entre otros [50].

### **3.1 Estadística descriptiva de las variables estructurales**

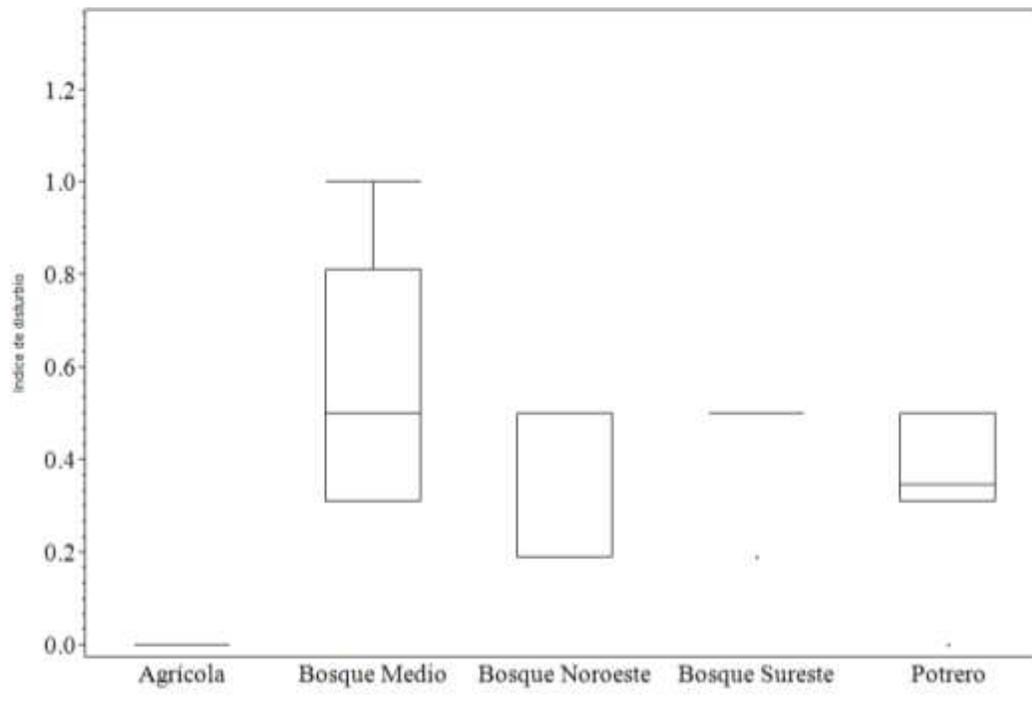
Las variables analizadas presentaron diferentes comportamientos y variabilidades en los tres diferentes usos de tierra de la finca (bosque, agrícola y potrero), lo cual se puede explicar por medio de las desviaciones estándar que presentó la media aritmética de los datos de cada variable. Para el caso de las variables horizontales, se observa en la Figura 12 que el diámetro a altura del pecho (DAP) presentó gran variabilidad en la sección media y la sureste del bosque presentando la mayor desviación de sus datos, con  $\pm 0.38$  m y  $\pm 0.40$  m, respectivamente, lo cual indica que sus valores estuvieron en un rango mayor al mostrado por el bosque en la zona noreste ( $\pm 0.22$  m) y por el potrero ( $\pm 0.34$  m).



**Figura 12.** Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar del DAP en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

Para el caso de la zona agrícola, se observa que los valores fueron nulos, debido a que por sus características en dicha zona no hay árboles de gran altura ni con diámetros mayores a 10 cm.

El Índice de Disturbio es otra variable horizontal que presentó mayor variabilidad de los datos en la zona media del bosque, donde también se encontró el mayor promedio (valor de 0.55), como se observa en la Figura 13. De forma interesante, la desviación asociada con los datos en la sección media del bosque fue un 69% mayor que en la zona noroeste y un 203% mayor que en la zona sureste.



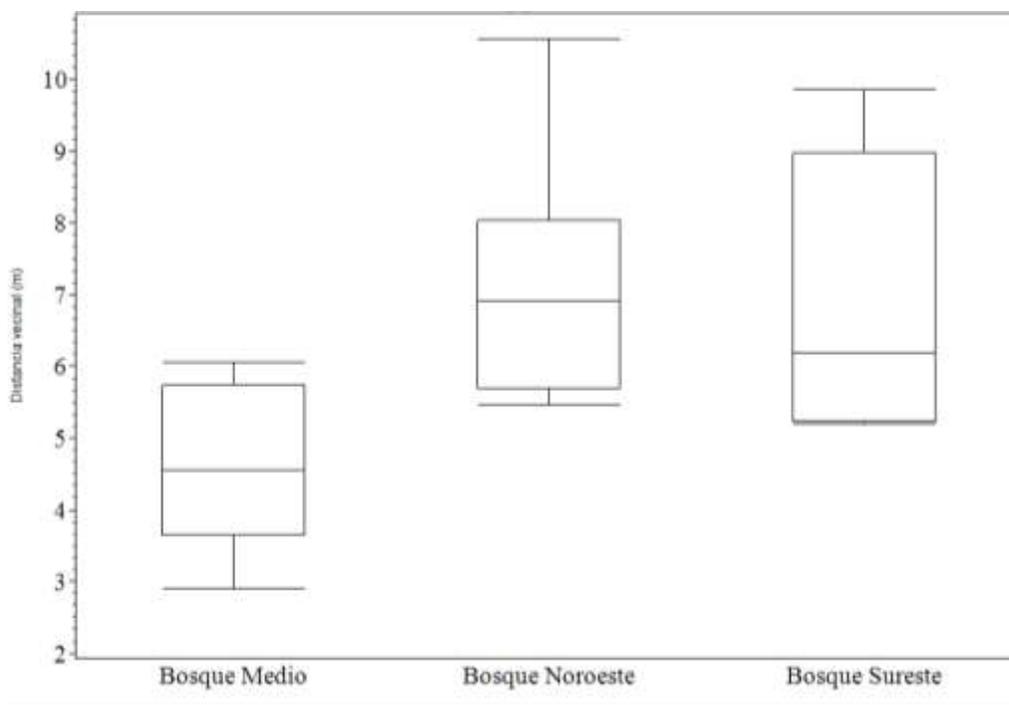
**Figura 13.** Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar del Índice de Disturbio en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

Para el caso del potrero los datos se mantuvieron muy cercanos al promedio e indica que el Índice de Disturbio fue similar al de la zona boscosa. Lo cual se explica por medio de que

en el potrero solo proliferan los pastos para la alimentación del ganado y no hay presencia de las otras plantas indicadoras de disturbio.

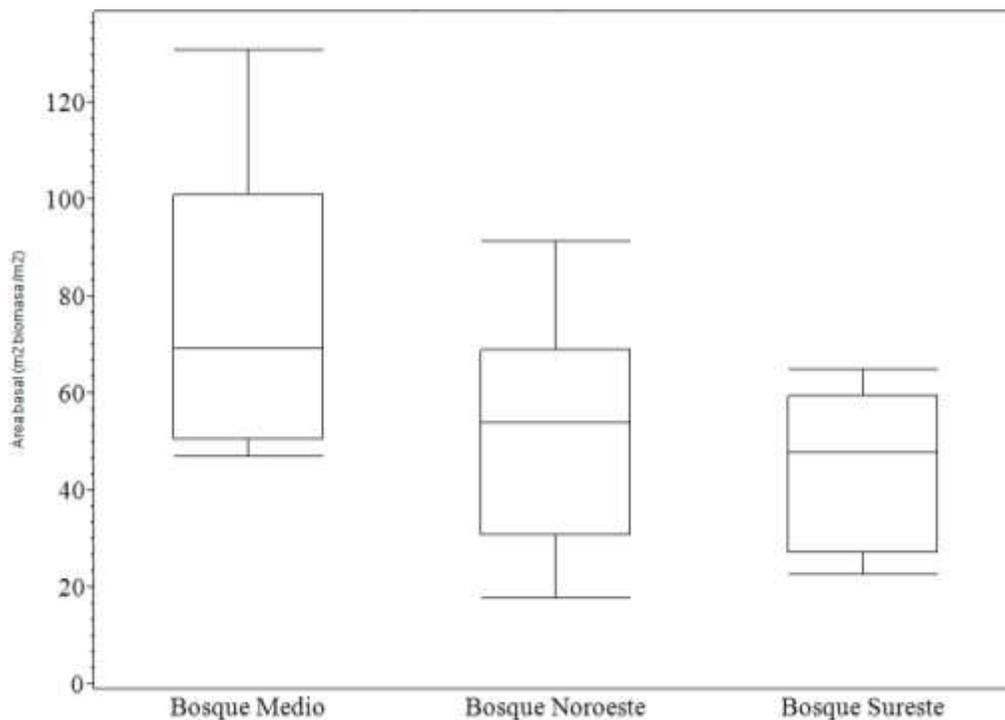
Las otras variables horizontales que se analizaron (distancia vecinal y área basal) fueron calculadas, exclusivamente, para las 18 parcelas seleccionadas del área boscosa. De esta forma no se cuentan con valores asociados con el área agrícola y con el área dedicada a la ganadería.

La distancia vecinal, como se observa en la Figura 14, presentó el máximo promedio en la zona boscosa ubicada al noroeste, con 7.14 m entre árboles, zona donde también se obtuvieron los valores más elevados de desviación estándar de los datos, aunque de manera inclusiva, las tres zonas boscosas presentaron una desviación cercana a  $\pm 1.8$  m. En general, la zona boscosa presenta un promedio de 6.21 m en la distancia entre los árboles.



**Figura 14.** Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar de la distancia vecinal en el parche boscoso en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

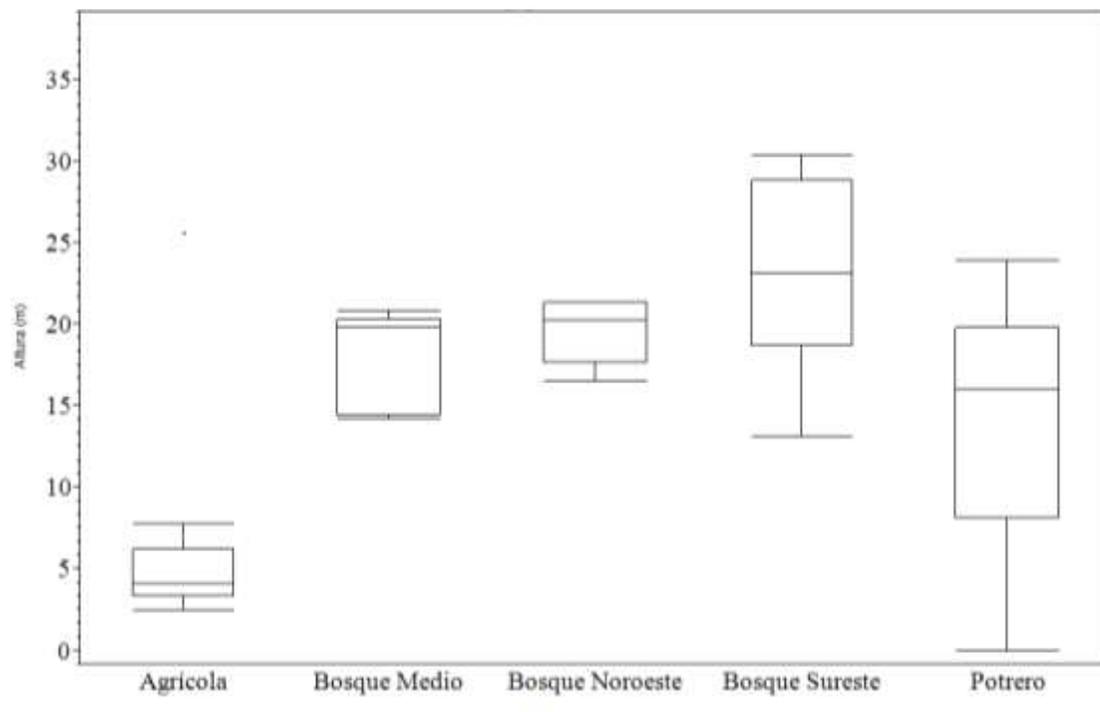
El área basal, ilustrada en la Figura 15, mostró un comportamiento diferente al de las otras variables horizontales, donde el valor menor se obtuvo para la zona sureste del bosque, con un valor de  $44.87 \text{ m}^2 / \text{ha}$ , lo que representó un 14% menos biomasa que la obtenida para la zona noroeste y un 41% menos que lo calculado para la zona media ( $76.58 \text{ m}^2 / \text{ha}$  para esta última). Respecto a la desviación de datos, se observa que para la zona sureste la desviación fue menor ( $\pm 16.58$ ) comparada con la zona noroeste y la media ( $\pm 31.18$  y  $\pm 22.80$ , respectivamente). En general, la zona boscosa presentó un promedio de  $57.90 \text{ m}^2 / \text{ha}$ .



**Figura 15.** Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar del área basal en el parche boscoso en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

Las variables verticales también mostraron comportamientos específicos en cada uno de los tipos de uso del suelo. Para el caso de la altura de los árboles, la mayor desviación de los

datos la presentó la zona de potrero, seguida de la zona agrícola y de la sección sureste del bosque (Figura 16), aunque los valores promedios más altos lo obtuvieron las tres secciones del bosque, con un promedio general de 20.83 m, siendo la zona sureste la que cuenta con el mayor promedio con 23.12 m de altura. Se observa que a pesar de que en la zona agrícola hay un valor elevado mayor a 25 m, el promedio y la desviación estándar es más pequeña que en las otras zonas.

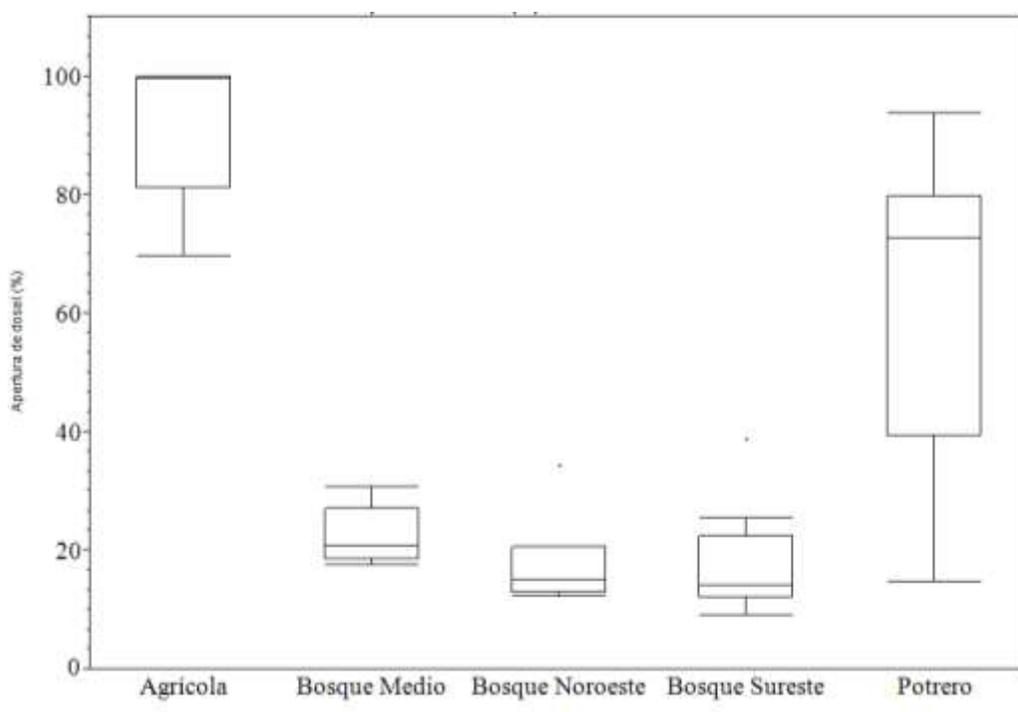


**Figura 16.** Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar de la altura de los árboles en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

Respecto a la apertura de dosel, en la Figura 17 se muestra como los valores más altos están asociados con la zona agrícola, con un valor de 91.76%, lo cual era de esperarse por la poca cobertura que presenta esta zona dedicada a la producción de cultivos de porte bajo. Caso similar lo ocurrido con el potrero, donde existen algunas áreas que cuentan con mayor

cobertura de árboles, lo cual hace que el promedio de la apertura de dosel sea menor en un 47% comparado con la zona agrícola. Además, el potrero fue el área donde se dio una mayor desviación estándar de sus valores, provocado por la irregularidad de la cobertura forestal en cada una de sus divisiones.

La zona boscosa, como era de esperarse, contiene árboles de mayor altura y, por ende, mantiene una apertura de dosel baja, la cual ronda el 19%, presentando sus valores más bajos en la zona media del bosque.

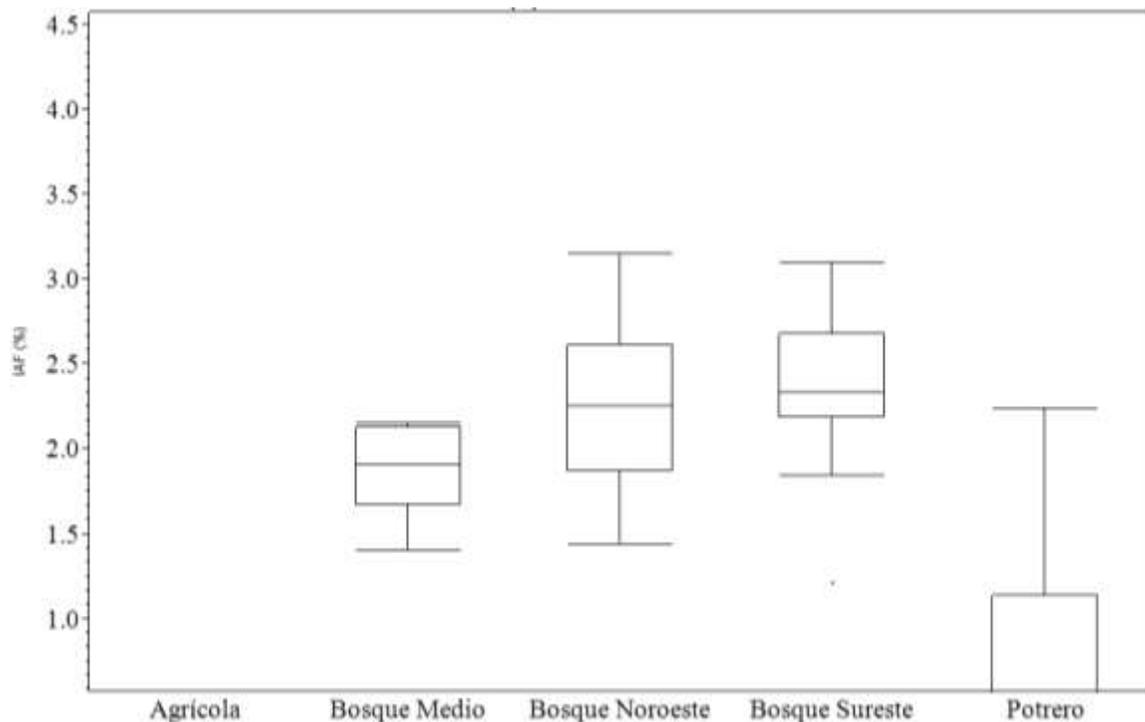


**Figura 17.** Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar de la apertura de dosel de los árboles en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

Para el caso del Índice de Área Foliar (IAF), mostrado en la Figura 18, se observa que el comportamiento es inversamente proporcional al mostrado por la apertura de dosel, donde al aumentar el IAF el valor de la apertura de dosel disminuye.

Para el caso de la zona boscosa, donde los valores de IAF son mayores, el promedio fue de 2.15 (se puede interpretar como capas de hojas superpuestas), mientras que para la zona agrícola fue de 0.09 y para la zona de potrero de 0.74, lo que demuestra que para estas últimas dos zonas no existe, en promedio, una capa de cobertura de hojas que proteja de la radiación directa a los cultivos y los animales.

La desviación de los datos fue mayor para el potrero, debido a las razones anteriormente explicadas, seguido de las tres secciones del bosque, donde la cobertura forestal no es regular en toda el área.

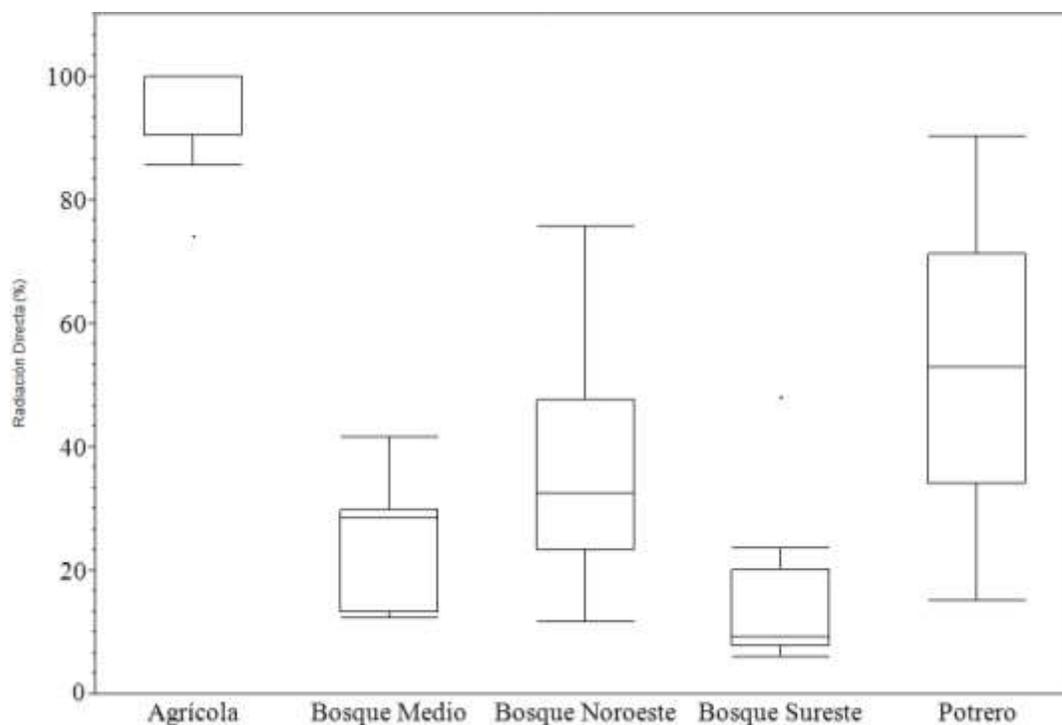


**Figura 18.** Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar del IAF en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

Para el caso de la radiación directa, el comportamiento mostrado por esta variable es proporcional a los valores mostrados por la radiación difusa y la radiación total, donde un

aumento de la total provoca un aumento de las otras dos variables. Para la sección boscosa la radiación presentó un promedio de 23.03%, manteniendo sus valores más elevados para la sección noroeste del bosque y los más bajos para la sección sureste. Para el área agrícola y el área de potrero, los valores de radiación fueron muy altos, con un 94.74% y 52.50%, respectivamente, lo que demuestra que estas zonas cuentan con muy poca cobertura de árboles, asociado con la alta apertura de dosel y el bajo IAF.

El mayor rango de valores fue presentado por el área de potrero, debido a la irregularidad de su cobertura arbórea. La zona agrícola presentó la menor variación de los datos comparada con los otros usos del suelo en la finca.



**Figura 19.** Gráfico de cajas (boxplot) con el valor promedio y desviación estándar de la radiación directa en los tres usos diferentes de suelo en la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

### 3.2 Análisis estadístico

El análisis estadístico se dividió en dos partes, una de ellas fue para la finca en general, considerando los tres usos de tierras que se presentan, y posteriormente se analizó la sección boscosa como sección independiente.

El análisis estadístico general de la finca, mostrado en el Cuadro 2, demostró que existe la suficiente información estadística para decir que las variables son significativamente diferentes (con dos grados de libertad y 45 datos) para la sección agrícola, el potrero y el bosque, principalmente para la apertura de dosel ( $F(2,45)=98.41$ ,  $p<0.0001$ ), IAF ( $F(2,45)=69.96$ ,  $p<0.0001$ ), altura de los árboles ( $F(2,45)=20.48$ ,  $p<0.0001$ ), y radiación directa ( $F(2,45)=64.88$ ,  $p<0.0001$ ). El DAP y el Índice de Disturbio fueron las únicas excepciones, los cuales no presentaron diferencias entre el potrero y el área boscosa.

**Cuadro 2.** Prueba de Tukey para los promedios de los tres usos de suelo de la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

Usos de suelo	Aper. de dosel (%)	IAF (%)	Altura (m)	DAP (m)	Índ. de disturbio	Rad. Directa (%)
Agrícola	91.76 <sup>A</sup>	0.09 <sup>A</sup>	6.50 <sup>A</sup>	0.00 <sup>A</sup>	0.00 <sup>A</sup>	94.47 <sup>A</sup>
Potrero	62.21 <sup>B</sup>	0.76 <sup>B</sup>	13.76 <sup>B</sup>	1.10 <sup>B</sup>	0.36 <sup>B</sup>	52.50 <sup>B</sup>
Bosque	18.54 <sup>C</sup>	2.19 <sup>C</sup>	20.83 <sup>C</sup>	1.15 <sup>B</sup>	0.48 <sup>B</sup>	23.03 <sup>C</sup>

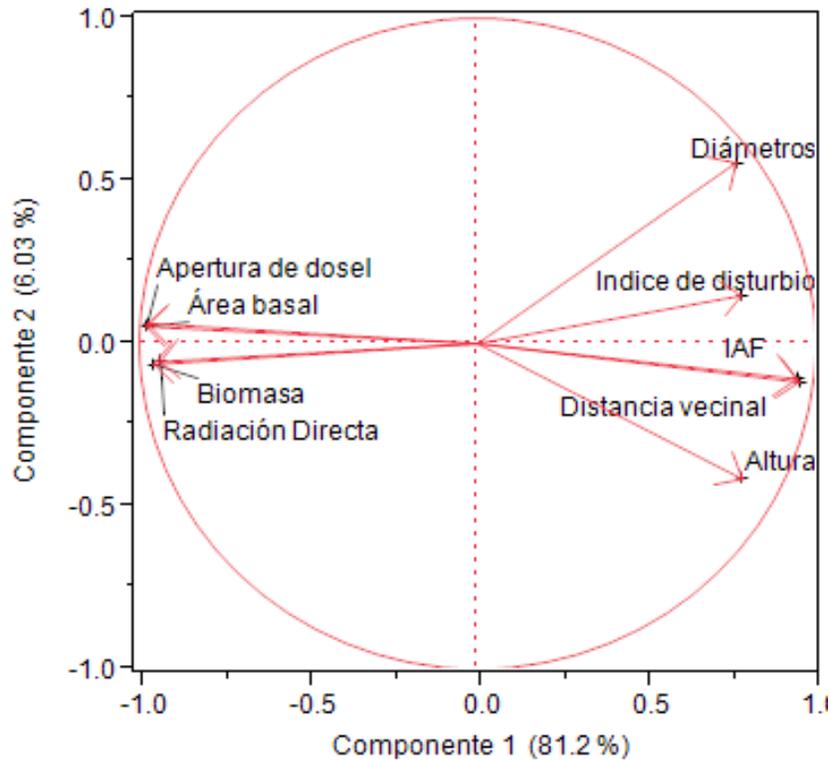
**Nota:** Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p>0.05$ )

Tanto las variables verticales como las horizontales se agruparon para realizar el análisis de los componentes principales, donde se obtuvo como resultado que la variabilidad estructural asociada con el eje vertical de la finca es explicada principalmente por la apertura de dosel y el DAP, con un porcentaje acumulado de la variabilidad total de un

87.21%. Sin embargo, específicamente para el bosque, a pesar de que la apertura de dosel es también el primer componente principal, su porcentaje fue más bajo (40.38%) en comparación con el análisis a nivel de la finca completa. En el caso del bosque, el segundo componente en importancia fue la altura de los árboles, y el porcentaje acumulado de variabilidad asociado con ambos componentes principales fue de 55.96%.

La disminución de la importancia de la apertura de dosel en el bosque es debido a que en esta área son muchas las variables las que tienen peso sobre la variabilidad de su estructura, lo que provoca que los dos principales componentes no sumen un porcentaje considerablemente alto (mayor a 75%). Caso contrario sucede con el área agrícola y el potrero, donde la apertura de dosel mantiene un 78.50% y un 53.84%, respectivamente, donde la cobertura arbórea es muy reducida.

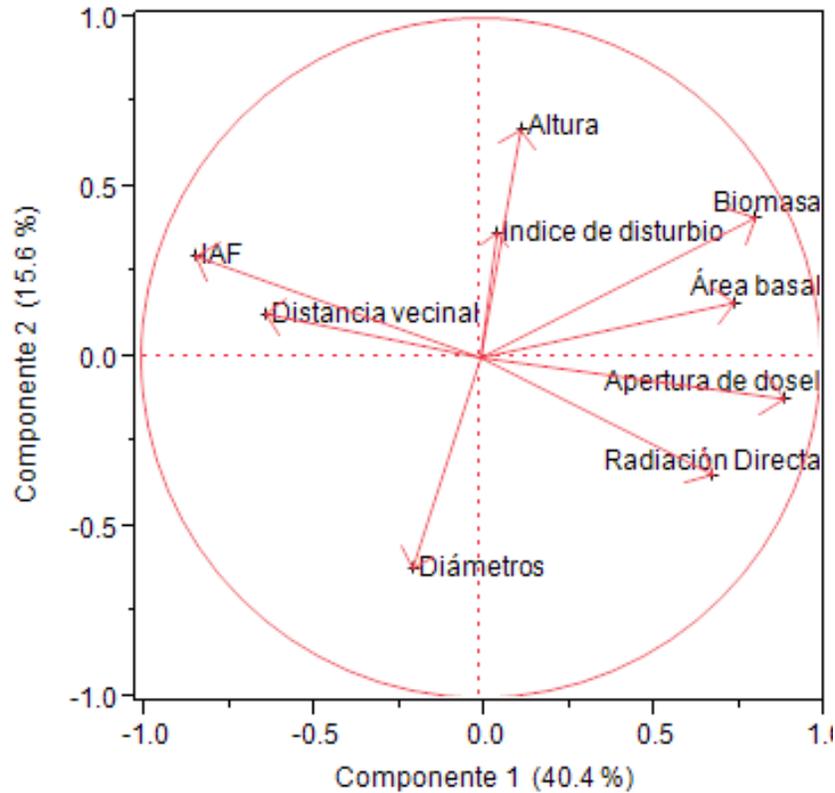
En la Figura 20 se observa el nivel de correlación de las variables en estudio para la totalidad de la finca, mostrando la dirección de estas en el hiperespacio construido con la matriz de correlación, en donde las variables de mayor importancia fueron la apertura de dosel y el DAP. Se observa que la biomasa, la apertura de dosel, el área basal y la radiación directa mantienen una correlación positiva muy alta entre ellas (mayor al 92%) y una correlación negativa muy alta con las demás variables. A nivel general, al aumentar la distancia vecinal entre los árboles, aumentó la altura ( $r^2= 0.78$ ) y el DAP ( $r^2= 0.68$ ), lo cual era de esperarse dado a que los árboles más altos no se encontraron a distancias muy cercanas (6.21 m, en promedio). Así, era de esperarse que en este caso no se diera una competencia alta por la captura de los nutrientes del suelo, lo cual tuvo un efecto de disminución en la biomasa por área, debido a la presencia de pastos y otras plantas entre los árboles. De forma concordante con esta observación, el Índice de Disturbio aumentó en estas zonas, y mostró una correlación positiva con el IAF en un 92%.



**Figura 20.** Biplot del PCA realizado con las variables estructurales registradas en este estudio para la totalidad de la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

Para el caso específico del bosque, tal y como se ilustra en la Figura 21, hay pocas correlaciones positivas altas, a excepción de la relación entre el área basal y la biomasa ( $r^2=0.84$ ), y la relación entre la apertura de dosel y la radiación directa ( $r^2=0.73$ ), donde al aumentar el valor de una variable se aumentaría el valor de la otra en dicha proporción.

A diferencia del análisis general de la finca, en este caso la distancia vecinal no mostró una correlación positiva alta con la altura ( $r^2=-0.27$ ), el DAP ( $r^2=-0.24$ ), o el Índice de Disturbio ( $r^2=-0.027$ ), lo cual pudo estar relacionado con el hecho de que la zona boscosa presentó una estructura homogénea y consolidada con árboles desarrollados y en el interior normalmente se encuentran plantas no consideradas como indicadoras de disturbio.



**Figura 21.** Biplot del PCA realizado con las variables estructurales registradas en este estudio para el bosque de la FEIMA, Turrialba, Costa Rica.

La radiación directa que impacta al área en estudio (ver Cuadro 3), presentó valores muy elevados para el sector dedicado a la agricultura, cercanos al 94%, lo cual demuestra que este sector no cuenta con ningún tipo de cobertura forestal que impida que la radiación ingrese de manera directa a las plantaciones y al suelo. Caso contrario sucedió en el área dedicada al potrero, donde se observó que la radiación disminuyó en un 42%, indicando que este sector mantiene mayor cobertura vegetal sobre el suelo. El bosque se comportó como un sector completamente diferente a los otros dos, mostrando que la radiación directa incidente sobre la superficie del suelo en esta zona es de tan solo un 23%.

Al interior del bosque se observó que la radiación directa fue mayor en la zona noroeste, siendo un 31.7% mayor que en la zona media y un 57.9% mayor que la zona sureste, lo cual tiene relación directa con la correlación positiva que tiene con la apertura de dosel ( $r^2= 0.65$ ).

**Cuadro 3.** Valores porcentuales calculados de tres tipos de radiación incidente sobre FEIMA según sección de uso de la tierra en la misma.

Sección	Rad. Trans Directa (%)	Rad. Trans. Difusa (%)	Rad. Trans. Total (%)
Agrícola	94.47	93.54	93.66
Bosque	23.03	20.46	20.80
Potrero	52.50	52.42	52.43

Al realizar el análisis estadístico para las parcelas que conforman el área de potrero, mostrado en el Cuadro 4, el fin era observar si todas las parcelas mantienen una cobertura de árboles similar, que le permite a los animales tener sombra durante el día. Se obtuvo que hay parcelas que mantienen poca cobertura forestal, las cuales se encuentran en el centro del área, a diferencia de otras áreas que cuentan con aperturas de dosel muy bajas y que son las que se encuentran más cercanas de la zona media del bosque.

Esto trae implicaciones negativas para el bienestar de los animales, debido al cambio en el microclima en cada una de las parcelas. Se observó que para las zonas con más cantidad de árboles (mostradas en **negrita** en el Cuadro 4), donde la apertura de dosel fue baja, los valores para el Índice de Disturbio y la radiación directa fueron un 192% mayor que en las otras parcelas. El Índice de Disturbio mantuvo la misma relación que tuvo la finca en general, donde al aumentar la radiación directa disminuyó el índice, debido a que, en

lugares muy secos las plantas no cuentan con la cantidad de agua necesaria para su desarrollo, sino que solo se reproducen pastos especiales para el consumo animal.

**Cuadro 4.** Valores obtenidos para las variables analizadas únicamente en el área de potrero de la FEIMA.

Zona	Apertura de dosel (%)	IAF (%)	Altura (m)	Diámetros (m)	Índice de disturbio	Radiación Directa (%)
6G	79.01	0.29	0.00	0.73	0.50	70.44
<b>5G</b>	<b>46.33</b>	<b>0.86</b>	<b>16.26</b>	<b>1.63</b>	<b>0.50</b>	<b>90.25</b>
5F	73.86	0.51	0.00	1.61	0.00	39.67
<b>5E</b>	<b>18.57</b>	<b>1.97</b>	<b>18.70</b>	<b>1.15</b>	<b>0.38</b>	<b>36.64</b>
<b>5D</b>	<b>14.81</b>	<b>2.24</b>	<b>23.07</b>	<b>1.03</b>	<b>0.50</b>	<b>67.09</b>
4G	82.08	0.25	15.75	0.72	0.31	26.47
4F	71.84	0.56	23.88	1.19	0.50	15.21
4E	73.47	0.45	10.77	1.27	0.31	44.39
4D	93.60	0.05	13.01	0.87	0.31	61.24
3E	68.53	0.44	16.16	0.79	0.31	73.56

**Nota:** Valores en negrita indican parcelas con mayor cantidad de árboles.

Posteriormente, se realizó el mismo análisis para las tres diferentes secciones del bosque. El análisis indicó que no se observaron diferencias significativas en ninguna de las variables de estudio (con dos grados de libertad y 25 datos), por lo cual, se observa que toda la extensión de bosque mantiene una estructura muy similar y homogénea. En general, las variables no presentaron valores distribuidos en rangos grandes, a excepción de la biomasa donde los valores en promedio oscilaron de 50 a 268 ton/ha pero estadísticamente insignificantes ( $F(2,25) = 0.50$ ,  $p = 0.614$ ); y de la apertura de dosel donde el rango de valores osciló de 17 a 22% sin diferencias entre las zonas del bosque ( $F(2,25) = 1.10$ ,  $p = 0.352$ ).

### 3.3.1 Reservas de carbono

Al analizar los parámetros ambientales (ver Cuadro 5), se observó que para las tres secciones del bosque estudiadas no se encontró con suficiente información estadística para rechazar la hipótesis nula de las no diferencias, por lo tanto, se observó que las secciones del área boscosa son equivalentes en los valores de la biomasa terrestre ( $F(2,18) = 0.05$ ,  $p = 0.614$ ), el carbono sobre el suelo, las unidades equivalentes de  $CO^2$  y la biomasa subterránea.

**Cuadro 5.** Valores promedio del estimador de reservas de carbono basado en árboles y desviaciones estándar calculadas para las secciones del bosque de la FEIMA.

Sección boscosa	BT	CSS	UE $CO^2$	BS
Noroeste	$130.80 \pm 60.56$	$64.09 \pm 29.67$	$235.03 \pm 108.81$	$48.40 \pm 22.41$
Medio	$107.24 \pm 36.99$	$52.55 \pm 18.13$	$192.69 \pm 66.47$	$39.68 \pm 13.69$
Sureste	$100.05 \pm 29.48$	$49.03 \pm 14.45$	$179.78 \pm 52.97$	$37.02 \pm 10.91$

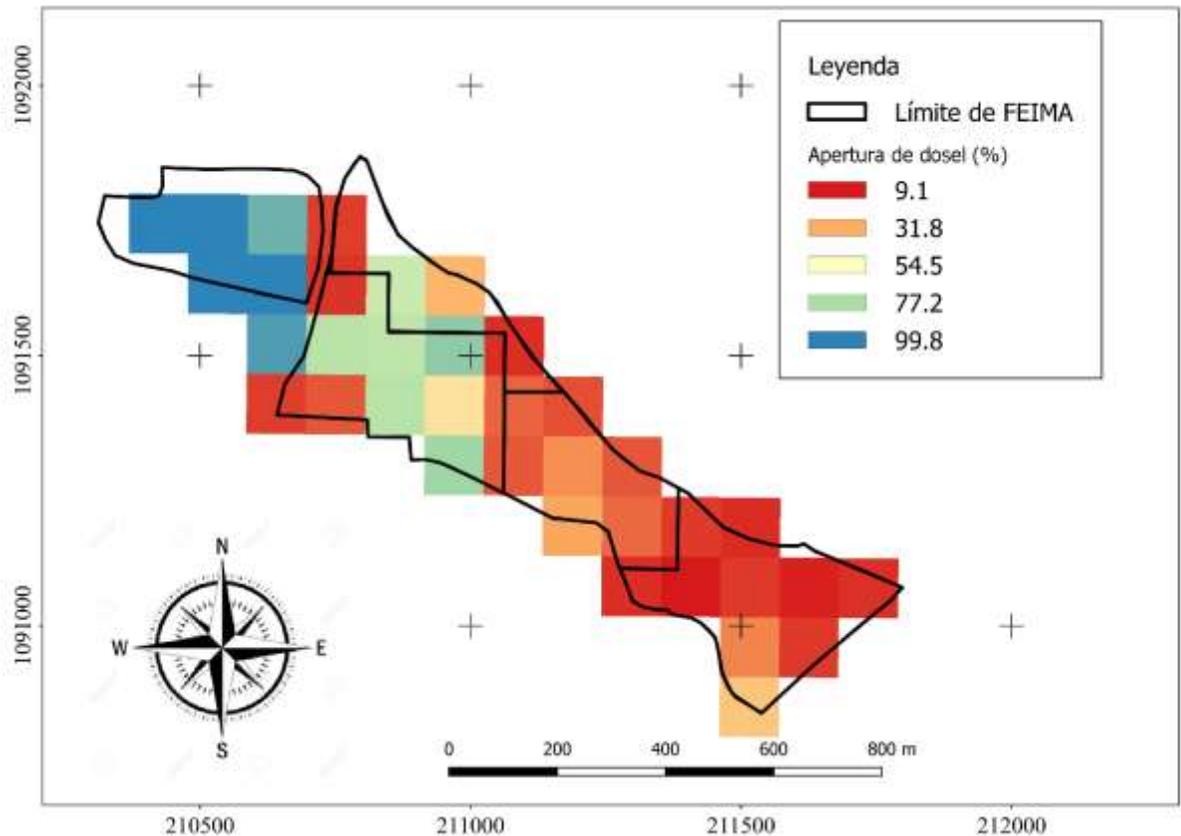
**Nota:** las abreviaturas corresponden a BT= biomasa forestal terrestre, CCS= carbono sobre el suelo, UE  $CO^2$ = unidades equivalentes de  $CO^2$  y BS= biomasa subterránea. Todos los valores se dan en toneladas por hectárea.

Los valores obtenidos para la biomasa forestal terrestre (112.70 ton/ha en promedio) se mantienen muy cercanos al valor inferior del rango dado por el IPCC para los bosques tropicales lluviosos en el continente americano, el cual va de 120-400 ton/ha [46]. Sin embargo, son muy similares a los valores comunicados por otros estudios regionales. Por ejemplo, según un estudio realizado en Costa Rica, los valores de biomasa promedio rondaron los 115 ton/ha para un bosque húmedo [52], al igual que en Colombia, donde para un bosque húmedo la biomasa sobre el suelo fue calculada en 111.41 ton/ha y para un bosque sub húmedo fue de 141.31 ton/ha [53].

### **3.4 Creación de mapas**

Los mapas realizados para las variables de estudio permiten observar el comportamiento espacial de dichas variables a lo largo de la finca. Estos mapas, creados tras el proceso de toma, limpieza y análisis de datos, son productos importantes para la visualización rápida de las características determinadas en este estudio. En la Figura 22, se observa el mapa para la apertura de dosel, la cual fue la principal variable que determinó el comportamiento de la finca según el análisis estadístico explicado anteriormente.

En el mapa se puede observar que los valores más altos para la apertura de dosel se encontraron en la zona agrícola, a diferencia de la zona boscosa donde los valores fueron los más bajos, concordando con las zonas donde se encuentran los árboles con mayor altura. Se observa que existió una transición entre el área de potrero con valores altos que se encuentran entre 80-50% de apertura con la zona media del bosque, donde se comienzan a dar valores un poco más bajos, cercanos al 20-30%.

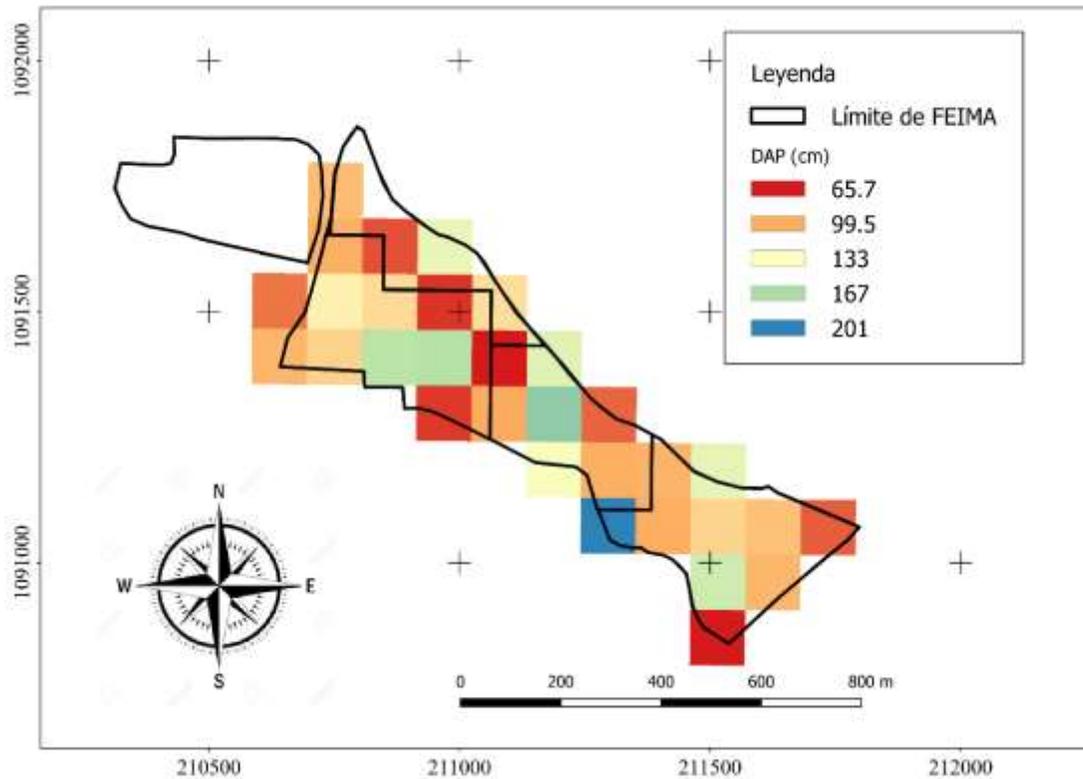


**Figura 22.** Distribución espacial de la apertura de dosel en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.

La segunda variable de importancia según el análisis estadístico fue el DAP de los árboles. En la Figura 23 se observa como esta variable presentó una distribución más homogénea a lo largo de la finca, manteniendo una mezcla de árboles de gran diámetro con árboles de diámetro pequeño.

Esta distribución se explica por medio del análisis de componentes principales realizado, donde se observó que para el bosque el DAP no fue un componente principal, sino que fueron las alturas de los árboles las que tomaron más importancia. Caso contrario sucedió con el potrero, donde el diámetro fue el segundo componente que explicó su variabilidad en

un 25%, lo que indica que los pocos árboles que hay en el área de potrero presentaron diámetros altos, poco mayores que un 1.0 m.

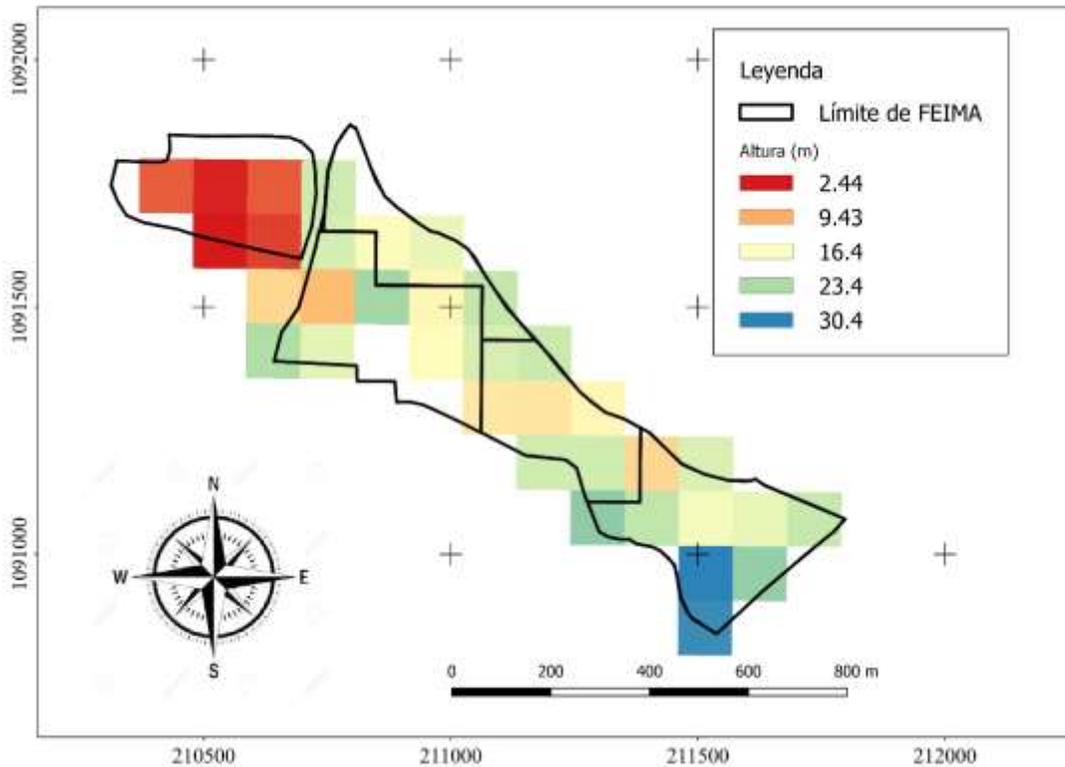


**Figura 23.** Distribución espacial del diámetro a la altura de pecho (DAP) de los árboles en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.

Para el caso de la altura de los árboles, se observa en la Figura 24 que los valores más elevados se encontraron en la zona boscosa, tal y como se determinó en el PCA, donde esta variable permitió explicar en casi un 16% el comportamiento del área. La zona agrícola presentó valores pequeños de alturas, y, aun así, esta variable explicó cerca de un 21% la variabilidad de esa zona.

Para el caso del potrero se observa que los valores fueron muy similares a los del bosque, tanto de altura (13.76 m) como de DAP (110 cm), lo cual podría significar que los árboles presentes en el potrero tienen características similares o son de la misma especie que los del

bosque. Esta hipótesis se podría comprobar realizando un inventario forestal en toda la finca en un estudio posterior.



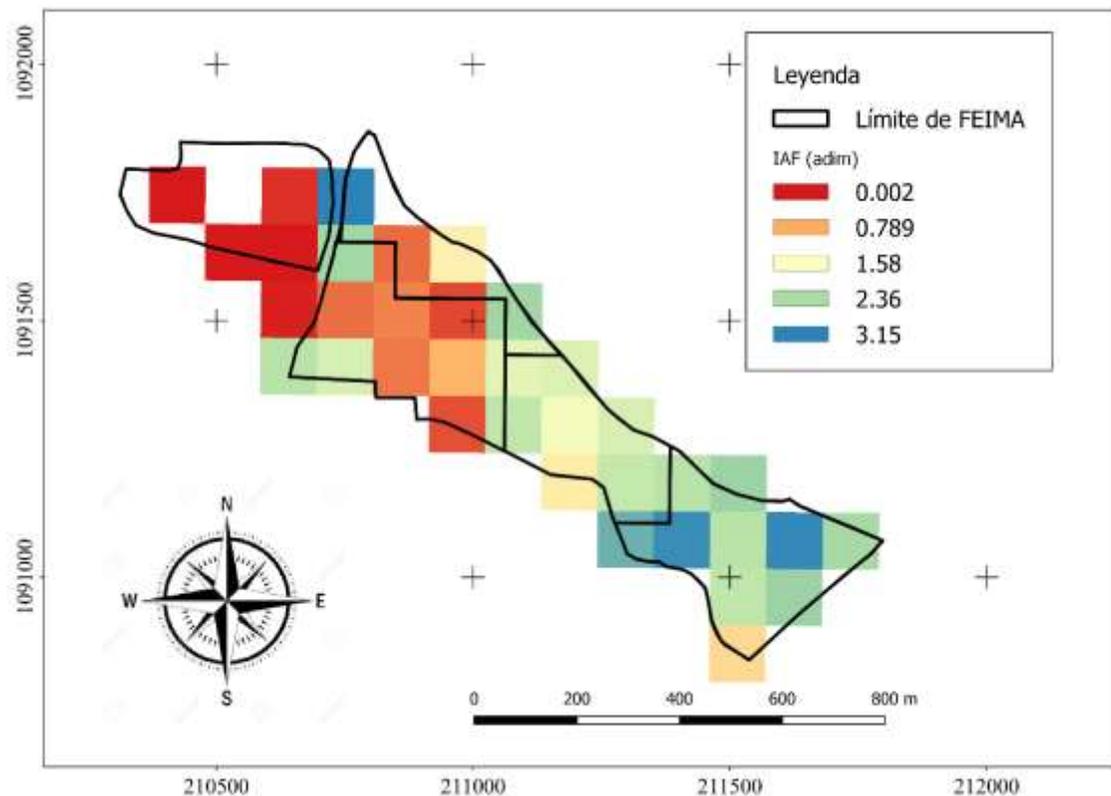
**Figura 24.** Distribución espacial de la altura de los árboles en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.

A pesar de que el IAF y el Índice de Disturbio no fueron significativamente importantes para explicar el comportamiento de los usos de suelo de la finca por su similitud, es necesario observar su distribución para comprender la relación con las otras variables.

Los mapas para estas variables se muestran en las Figuras 25 y 26, respectivamente. Para el primero se puede observar cómo los valores más altos oscilaron alrededor de un valor de 3 y se encontraron en las zonas boscosas, en las cuales se obtuvo que la apertura de dosel era menor. Esta observación se ajusta con lo obtenido por otros autores en bosques de Argentina [54] y en México ( $r^2=-0.88$ ) [28], donde además los valores del IAF mantuvieron correlaciones negativas con la luz transmitida difusa y con la luz transmitida directa. Para el

presente estudio la correlación con la radiación transmitida directa y difusa fue de -0.63 y de -0.69, respectivamente.

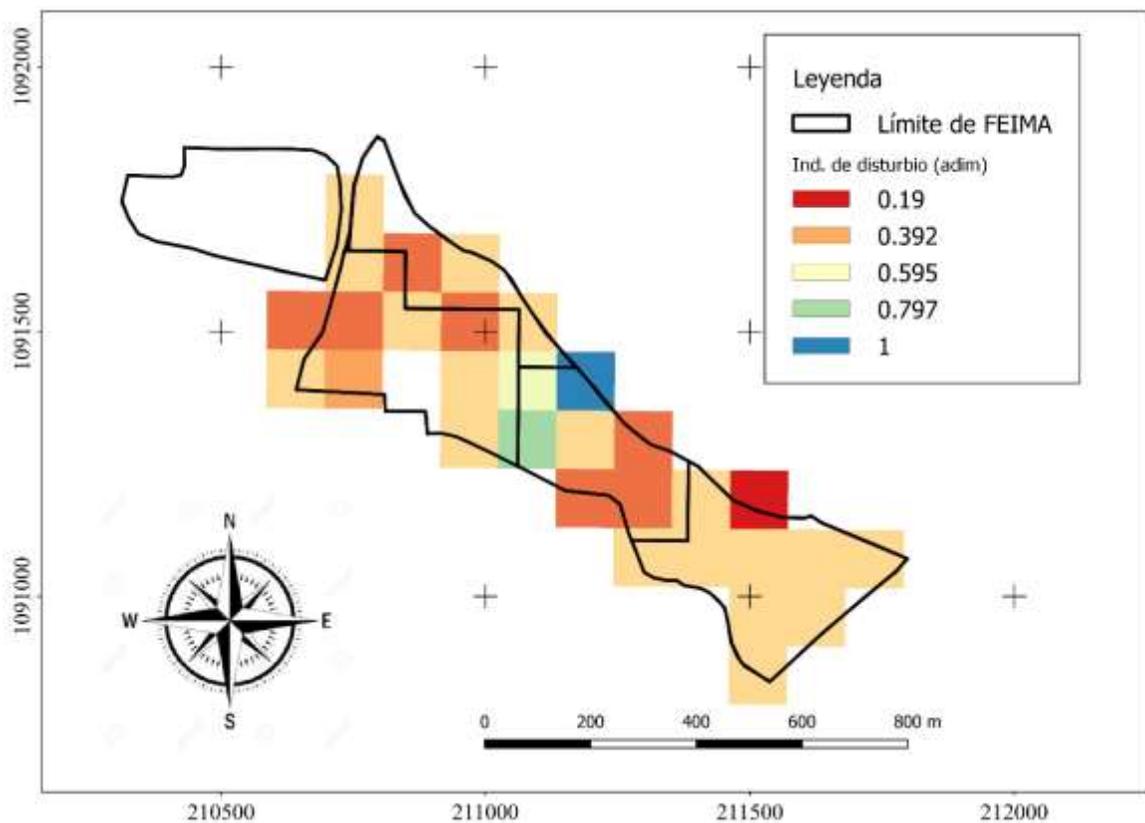
Se observa que los valores del IAF oscilaron de 0.0002 a 3.15 en la FEIMA, lo cual concuerda con otros estudios realizados en España, con un valor de 2.37 [55] o en México (0.87 a 1.89) [28], ambos para bosques tropicales.



**Figura 25.** Distribución espacial del índice de área foliar (IAF) en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.

Para el caso del Índice de Disturbio se observa que los valores mayores se encontraron en la zona boscosa media y sureste. El área destinada a la producción de cultivos agrícolas y el área destinada para la actividad ganadera mantuvieron índices de disturbio muy bajos, los cuales no superaron el valor de 0.4.

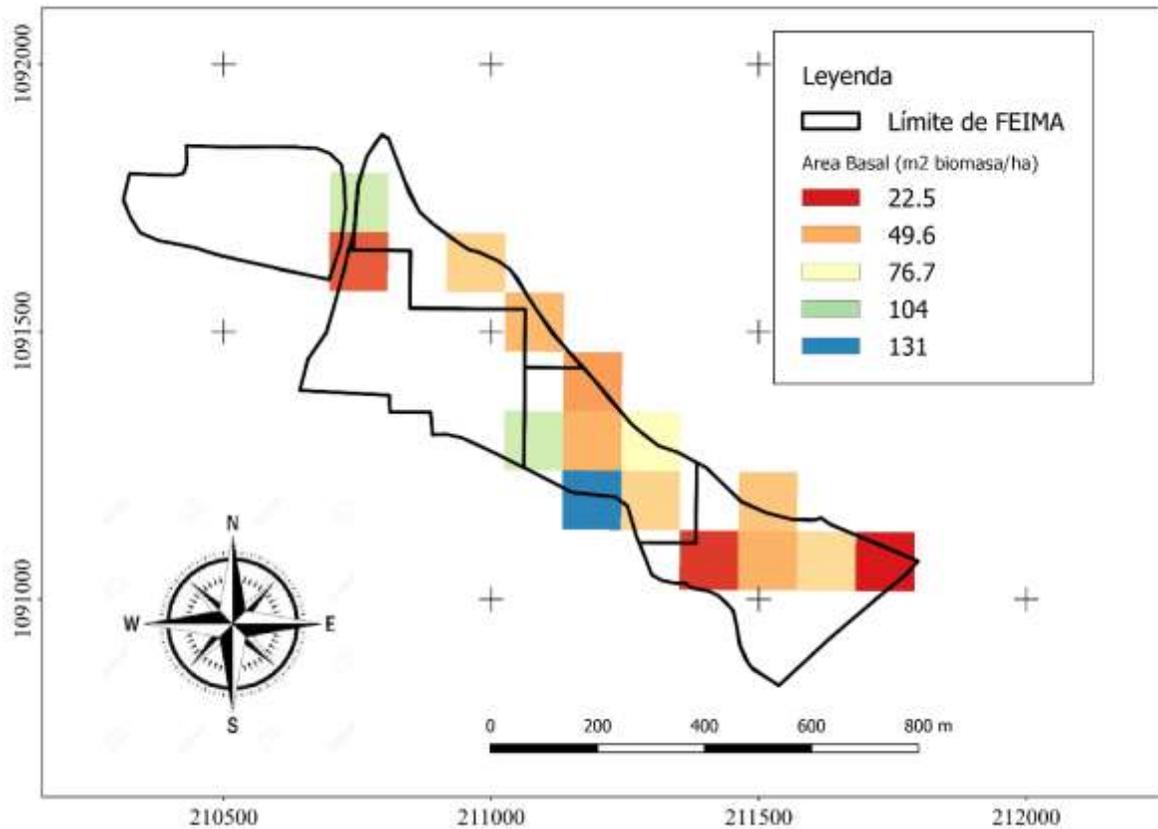
Se observó que (ver Anexo 4), de las cuatro plantas indicadoras de disturbio analizadas, la más predominante para el área boscosa fueron las ortigas con un 44.68%, seguidas de las palmas con 38.30%, y finalmente los pastos y guarumos con 8.51% cada una. Un caso diferente se observó en el área de potrero, en la cual las plantas predominantes fueron los pastos (42.86%) y el guarumo (28.57), y en menor cantidad las ortigas y las palmas con 14.29% cada una.



**Figura 26.** Distribución espacial del Índice de Disturbio en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.

El área basal en la FEIMA presentó un patrón de distribución muy parecido al observado para la apertura de dosel, manteniendo una correlación del 60% y una relación alta con la biomasa terrestre que contiene el bosque, con una correlación del 84%.

Se observó además que el valor promedio obtenido para el área basal de la finca fue de 57.90 m<sup>2</sup>/ha, superior a los valores encontrados en otros estudios realizados en México con un valor de 30.33 m<sup>2</sup>/ha [56] y 35 m<sup>2</sup>/ha [57], y en Costa Rica de 31.38 m<sup>2</sup>/ha [6], todos para bosques tropicales; aunque en este estudio hubieran parcelas de bosque que mantuvieron valores similares.

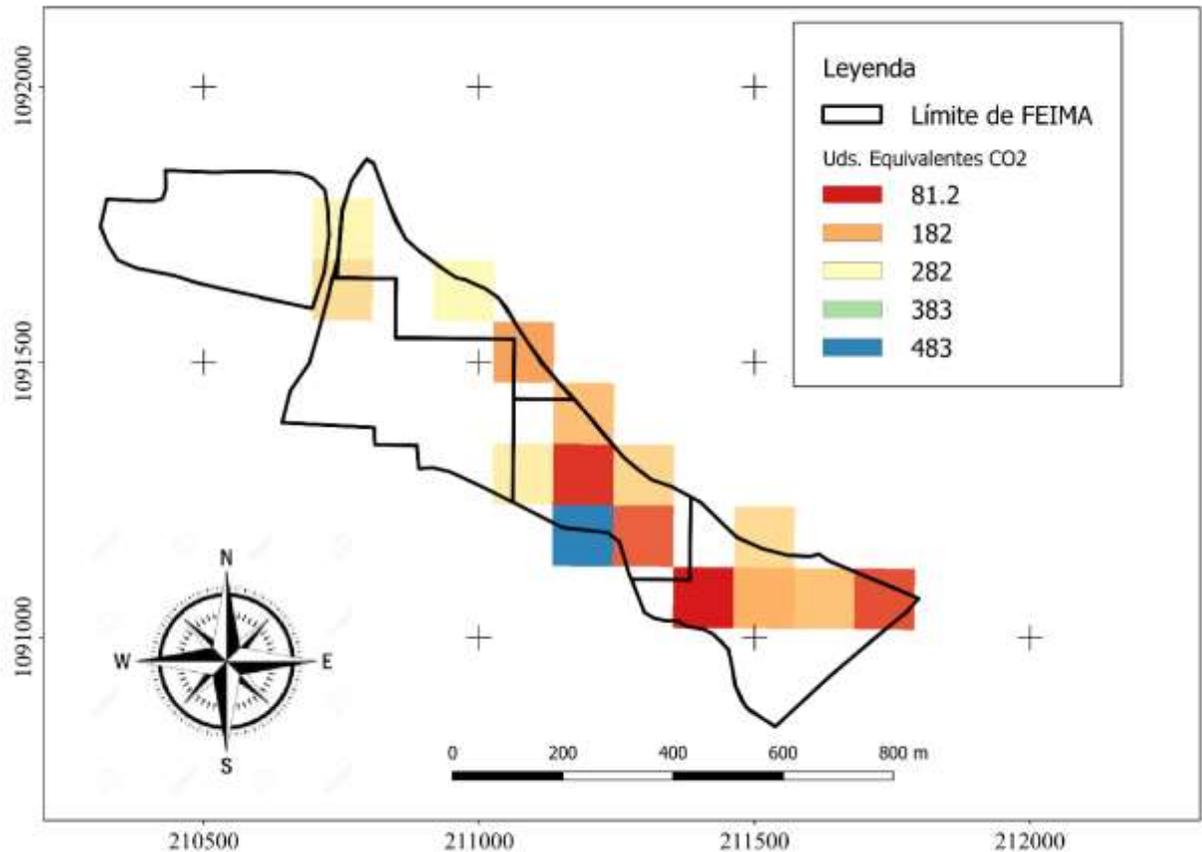


**Figura 27.** Distribución espacial del Área Basal en la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.

### 3.4.1 Reservas de carbono

El cálculo de las reservas de carbono en el área boscosa, mostrado en la Figura 28, se observa que existen un valor máximo cercano a 500 unidades equivalentes en la zona media

del bosque, pero en general, la finca mantuvo una reserva de carbono promedio de  $202.50 \pm 96.68$  unidades equivalentes de  $\text{CO}_2$ . En la figura solo se muestran 15 parcelas, esto debido a la interpolación realizada por el software para interpretar los valores de las 18 parcelas de bosque estudiadas.



**Figura 28.** Distribución espacial de las Unidades Equivalentes de  $\text{CO}_2$  en el parche boscoso de la FEIMA, acomodados según categoría y con base en los datos registrados en el presente estudio.

Las unidades equivalentes de  $\text{CO}_2$  mantuvieron una correlación del 60% con la apertura de dosel, mostrada en la Figura 22, y de un 80% con el área basal, mostrada en la Figura 27. Se observó un patrón similar, donde los valores más bajos se presentaron en la zona sureste del bosque y valores de medios a altos a lo largo de la zona media y la zona noreste.

### **3.5 Implicaciones de los resultados para el manejo del bosque en FEIMA**

Desde el punto de vista estructural, tanto horizontal como vertical, el bosque en la FEIMA se comporta como una sola unidad funcional, donde no existen diferencias mayores en ningunas de las tres secciones espaciales analizadas por separado. En este trabajo no se incluyeron datos sobre las especies de los árboles que se encuentran en la finca (inventario forestal), y esto puede haber disminuido el poder de resolución de los análisis. Sin embargo, según las variables analizadas se puede determinar que existen diferencias claras entre los diferentes usos de tierra ya existentes en la finca, y que, con base en ello, el área forestal podría gestionarse por medio de un manejo adecuado dependiendo del uso o de los usos secundarios que se le quiera dar. Es decir, si se determinara que se quiere que el bosque sea usado para estudios científicos, para recreación, para proyectos académicos con estudiantes, o para usos mixtos, una zonificación previa tendría lógica. Al ser el bosque tan homogéneo desde el punto de vista estructural, no había mayor problema con la delimitación de las zonas, al menos desde este punto de vista.

Es por ello por lo que se mencionan algunos lineamientos generales que permitan a futuro el buen manejo de la finca y un aprovechamiento eficiente de sus recursos, así como una mejora del bosque en cuanto a su composición, estructura y función. Algunos lineamientos son:

- a) Planificar el uso al que se destinará el bosque, ya sea educativo, de recreación o para investigaciones científicas. Esto con el fin de especificar reglamentos para la entrada del personal autorizado por los administradores de la FEIMA y mantener un control de la finca.

- b) Planificar la gestión que se quiere dar al área ocupada por el bosque, considerando los costos ambientales, económicos y sociales que puede conllevar el control y la regulación de las actividades en la finca.
- c) Zonificar el área boscosa para determinar cuáles zonas quedan prohibidas o reguladas para el ingreso de personas particulares y cuales zonas quedan disponibles para el ingreso y la intervención del personal autorizado.
- d) Mantener los caminos internos de la finca en buen estado e identificados con rótulos o guías para la comodidad de los visitantes y de los encargados, y con ello una facilidad en la movilidad para las actividades de mantenimiento del bosque.
- e) Mantener un sistema de parcelas semipermanentes para estudios a largo plazo, que comiencen a partir de este estudio y que permitan darles seguimiento a variables forestales de interés. En las zonas destinadas para uso de potrero se recomienda que siembren árboles para disminuir la radiación directa que incide sobre el suelo y que afecta el comportamiento de los animales de producción por el estrés calórico que les provoca.
- f) Proteger el área boscosa para regular el crecimiento de los árboles y con ello el valor de biomasa y las unidades equivalentes de CO<sup>2</sup> captadas.
- g) Dar seguimiento al estudio de la apertura de dosel y a los diámetros de los bosques a largo plazo, con el fin de analizar la variabilidad de la finca por medio de las variables más importantes.
- h) Complementar este estudio forestal con un inventario de las especies, su densidad y su frecuencia, con el objetivo de generar una base de datos confiable que permita ofrecer mayor robustez al monitoreo del bosque en el tiempo.

- i) Complementar este estudio con un análisis del dosel forestal para observar el impacto positivo del bosque en la mitigación del cambio climático a nivel regional y nacional y su bienestar para especies vegetales y animales.
- j) Realizar un inventario de la fauna presente en la FEIMA con el objetivo de generar información útil para tomar acciones concretas de conservación y de manejo del bosque.
- k) Planificar un estudio de flujo genético en FEIMA para estudiar el efecto del cambio climático sobre migración de especies y/o variabilidad genética.
- l) Desarrollar sistemas agroforestales, con el cultivo de cacao o café y generar un mayor aprovechamiento del área destinada para la producción agrícola.
- m) Desarrollar sistemas silvopastoriles en el área destinada a la ganadería, con el fin de generar un ambiente más cómodo para los animales y contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero.
- n) Integrar a las comunidades cercanas en la divulgación de información sobre FEIMA, con el fin de incentivar a los habitantes de otras zonas a visitar la finca, a incrementar su conocimiento de los servicios ecosistémicos ofrecidos por el bosque y con ello impulsar el desarrollo de la zona de Turrialba.

## *CONCLUSIONES*

---

- Se caracterizó el área boscosa de la FEIMA por medio del estudio de variables dendrológicas y se analizaron las diferencias espaciales de las variables estructurales. A partir de estos elementos se desarrollaron lineamientos de manejo del bosque.
- Se elaboraron los mapas propuestos originalmente y se estudiaron las reservas de carbono asociadas con las diferentes secciones de la finca. Con base en esta información se determinó que, a este nivel, no hay diferencias entre las secciones de bosque.
- La apertura de dosel y el DAP se pueden considerar como las variables de mayor importancia para entender la variabilidad asociada con los árboles en la finca, al explicar el 87.21% de la misma.
- El IAF y la distancia vecinal son variables que mantuvieron una alta correlación positiva, cercana al 90%, lo cual demuestra que los valores aumentan o disminuyen de manera casi proporcional.
- La cobertura forestal reduce cerca de un 70% la radiación transmitida directa que ingresa al biosistema forestal, en comparación con una zona sin árboles de gran altura, tal y como sucede en el área dedicada a la agricultura.
- Para el caso de parámetros forestales, ni la biomasa terrestre, ni el carbono sobre el suelo, ni las unidades equivalentes de CO<sub>2</sub>, ni la biomasa subterránea, presentaron diferencias significativas para las tres secciones diferentes del bosque; por lo que se

concluye que las tres zonas mantienen un valor de reservas de carbono muy similar con un 95% de confianza y 5% de error.

- La altura de los árboles, el índice de disturbio y el IAF, los cuales mostraron una correlación positiva, presentaron un comportamiento similar para toda la zona de estudio, donde los valores más elevados se encontraron distribuidos a lo largo de la zona boscosa de la finca, y los valores más bajos en la zona dedicada a la agricultura.
- La apertura de dosel y los diámetros fueron las únicas variables con un comportamiento diferente, el primero con valores más elevados en la zona agrícola, mientras que el segundo con un patrón homogéneo a lo largo de toda la zona de estudio, sin mostrar una tendencia hacia algunas de las secciones de la finca.

## ***RECOMENDACIONES***

---

- Se recomienda realizar un monitoreo de la estructura vertical y horizontal de la finca, en un periodo de tres años, dentro del marco de un plan de manejo para lograr la buena implementación de un plan de gestión forestal.
- Se recomienda continuar con la utilización del sistema de cuadrículas utilizado en este estudio con el fin de mantener una metodología de trabajo comparable en el futuro.
- Se recomienda la utilización de otras ecuaciones alométricas, específicas de las especies presentes en FEIMA, para que una vez hecho el inventario forestal, el cálculo realizado en este estudio pueda ser evaluado.
- Se recomienda combinar los resultados de la estructura vertical y horizontal forestal con un estudio de suelos de la finca, en un metaanálisis, con el fin de determinar más finamente las variaciones espaciales en FEIMA.
- Se recomienda establecer nuevos puntos de medición de variables ambientales (temperatura, humedad relativa y precipitación) en el interior de la finca, por medio de sensores colocados en diferentes puntos seleccionados al azar.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

---

1. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. Programa de Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010: Términos y Definiciones. 2010.
2. Castillo M, Alvarado J. Monitoreo de la calidad del agua y caracterización de los bosques de la cuenca del Río Carbón. Instituto Tecnológico de Costa Rica; 2011.
3. Ruiz M, García C, Sayer J. Los servicios ambientales de los bosques. Ecosistemas [Internet]. 2007;16(3):81–90. Recuperado a partir de: <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=509&I>
4. Wadsworth FH. Producción forestal para América Tropical [Internet]. Washington DC; 2000. 563 p. Recuperado a partir de: [https://www.fs.fed.us/research/publications/producci%F3n\\_forestal\\_para\\_am%E9rica\\_tropical/portada.pdf](https://www.fs.fed.us/research/publications/producci%F3n_forestal_para_am%E9rica_tropical/portada.pdf)
5. Valerio J, Salas C. Selección de prácticas silviculturales para bosques tropicales. Santa Cruz, Bolivia; 1998.
6. Ávila M. Caracterización de la flora y estructura de un bosque transicional húmedo a seco, Miramar, Puntarenas, Costa Rica. Tesis. 2010.
7. Ajete A, Mercadet A, Álvarez A, Toirac W, Conde F. Estimación del contenido de carbono en los bosques de la Empresa Forestal Integral Guantánamo. For Baracoa [Internet]. 2012;31(2):3–7. Recuperado a partir de: [http://www.inaf.co.cu/Revista Baracoa/RFBaracoa 2012 No. 2 ok/PDF2 2012/ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO](http://www.inaf.co.cu/Revista_Baracoa/RFBaracoa_2012_No.2_ok/PDF2_2012/ESTIMACIÓN_DEL_CONTENIDO)

## DE CARBONO EN LOS BOSQUES.pdf

8. Houghton RA. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Glob Chang Biol* [Internet]. 2005;11(6):945–58. Recuperado a partir de: <http://whrc.org/wp-content/uploads/2015/09/HoughtonGCB.05.pdf>
9. Becknell JM, Kissing L, Powers JS. Forest Ecology and Management Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests : A literature review and global synthesis. *For Ecol Manage*. 2012;276:88–95.
10. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. La gestión de los bosques ante el cambio climático. [Internet]. 2010. Recuperado a partir de: <http://www.fao.org/docrep/014/i1960s/i1960s00.pdf>
11. Sánchez A. Análisis de la cobertura forestal de Costa Rica entre 1960 y 2013. *Ambient Cober For Costa Rica* [Internet]. 2015;253:4–11. Recuperado a partir de: <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/ambientico/253.pdf>
12. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. El Estado de los bosques del mundo. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Organizaci. Roma; 2016. 115 p.
13. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. Costa Rica evidencia un aumento del 54% en su superficie forestal [Internet]. Costa Rica. 2012 [citado el 22 de mayo de 2018]. Recuperado a partir de: <http://www.fao.org/costarica/noticias/detail-events/es/c/426096/>
14. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. Objetivos de Desarrollo del Milenio . III Informe país. 2015 [Internet]. Primera. Barboza K, Warren Ortega,

- editores. San José, Costa Rica; 2015. 220 p. Recuperado a partir de:  
[www.mideplan.go.cr](http://www.mideplan.go.cr)
15. Melo O, Vargas R. Evaluación ecológica y silvicultural de ecosistemas boscosos. Ibagué; 2003.
  16. Gordo JA. Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayán. *Fac ciencias Agropecu* [Internet]. 2009;7(1):115–22. Recuperado a partir de: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v7n1/v7n1a13.pdf>
  17. Cancino J. Dendrometría Básica [Internet]. 2007. Recuperado a partir de: [http://www.sibudec.cl/ebook/UDEC\\_Dendrometria\\_Basica.pdf](http://www.sibudec.cl/ebook/UDEC_Dendrometria_Basica.pdf)
  18. Gadow K, Sánchez Orois S, Álvarez González JG. Estructura y Crecimiento del Bosque [Internet]. 2007. 147 p. Recuperado a partir de: [https://www.researchgate.net/publication/265270198\\_Estructura\\_y\\_Crecimiento\\_del\\_Bosque](https://www.researchgate.net/publication/265270198_Estructura_y_Crecimiento_del_Bosque)
  19. Matteucci SD, Colma A. Metodología para el estudio de la vegetación [Internet]. Buenos Aires: Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico; 1982. 168 p. Recuperado a partir de: <https://www.researchgate.net/publication/44553298>
  20. White PS. Pattern , process , and natural disturbance in vegetation. *Bot Rev* [Internet]. 1979;45(3):229–99. Recuperado a partir de: <https://www.researchgate.net/publication/256328130>
  21. Peters E, Martorell C. Conocimiento y conservación de las mamilarias endémicas del Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. R166

- [Internet]. Mexico D.F; 2001. Recuperado a partir de:  
<http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfR166.pdf>
22. Louman B, Quirós D, Nilsson M. Silvicultura de Bosques Latifoliados Húmedos con Énfasis en América Central. Serie Técnica. Manual Técnico N°46 [Internet]. Turrialba; 2001. 265 p. Recuperado a partir de:  
[https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2692/Informe\\_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2692/Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
23. Jimenez A. Evaluación de la composición y estructura del bosque semideciduo en la región montañosa de Soroa . Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario [Internet]. Vol. 29, Revista Forestal Baracoa. Cuba; 2010. Recuperado a partir de:  
[https://www.researchgate.net/publication/316359722\\_Evaluacion\\_de\\_la\\_composicion\\_y\\_estructura\\_del\\_bosque\\_semideciduo\\_en\\_la\\_region\\_montanosa\\_de\\_Soroa\\_Reserva\\_de\\_la\\_Biosfera\\_Sierra\\_del\\_Rosario](https://www.researchgate.net/publication/316359722_Evaluacion_de_la_composicion_y_estructura_del_bosque_semideciduo_en_la_region_montanosa_de_Soroa_Reserva_de_la_Biosfera_Sierra_del_Rosario)
24. de la Casa A, Ovando G, Bressanini L, Rodríguez Á, Martínez J. Uso del índice de área foliar y del porcentaje de cobertura del suelo para estimar la radiación interceptada en papa. *Agric Técnica*. 2007;67(1):78–85.
25. Acosta E, Acosta J, Amador M, Padilla J. Relación entre índice de área foliar y rendimiento en frijol bajo condiciones de sacano. *Agric Técnica en México* [Internet]. 2008;34(1):13–20. Recuperado a partir de:  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0568-25172008000100002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172008000100002)
26. Aguirre C, Valdez J, Ángeles G, de los Santos H, Aguirre A. Mapeo del Índice de

Área Foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos SPOT 5 HRG: regresión y k-nn. *Agrociencia* [Internet]. 2011;45(1):105–19. Recuperado a partir de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952011000100010](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000100010)

27. Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys B, Coppin P, Weiss M, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I . Theories , sensors and hemispherical photography. *Agric For Meteorol.* 2004;121:19–35.
28. Plateror P, Reyes H, Velázquez A, Hernández P, Campos G. Disponibilidad de luz bajo dosel en rodales de *Abies religiosa*. *Madera y Bosques.* 2018;24(3):1–21.
29. Huber A, Oyarzun C, Alvarez L, Araya E. Características de la radiación solar en un bosque de *Pinus radiata* , en Valdivia , Chile. *Bosque* [Internet]. 1988;9(2):115–21. Recuperado a partir de: <http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v9n2/art08.pdf>
30. Comeau P. *Measuring Light in the Forest.* British Columbia. Ministry of Forests. Victoria, Canada; 2000.
31. Geiger R. *The climate near the ground* [Internet]. Cambridge, Massachusetts: Harvard University; 1950. 482 p. Recuperado a partir de: <https://ia800300.us.archive.org/11/items/climatenearthegr032657mbp/climatenearthegr032657mbp.pdf>
32. IICA, Ministerio de Agricultura de República Dominicana, Ministerio de Economía P y D de RD. *Establecimiento y uso de Sistemas silvopastoriles en República Dominicana* [Internet]. Santo Domingo; 2016. Recuperado a partir de: <https://www.iica.int/es/publications/establecimiento-y-uso-de-sistemas->

silvopastoriles-en-república-dominicana

33. Iglesias J, Funes F, Odalys T, Simón L, Milera M. Diseños agrosilvopastoriles en el contexto de desarrollo de una ganadería sustentable . Apuntes para el conocimiento Agrosilvopastoral designs in the context of developing a sustainable livestock production . Notes for knowledge. Pastos y Forrajes, [Internet]. 2011;34(3):241–58. Recuperado a partir de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269121083001%0D>
34. Russo RO. Reflexiones sobre los sistemas silvopastoriles Reflections on silvopastoral systems. Pastos y Forrajes [Internet]. 2015;38(2):157–61. Recuperado a partir de: <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v38n2/pyf01215.pdf>
35. Navas A. Importancia de los sistemas silvopastoriles en la reducción del estrés calórico en sistemas de producción ganadera tropical. Rev Med Vet (Bogota) [Internet]. 2010;19:113–22. Recuperado a partir de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rmv/n19/n19a10.pdf>
36. Razo Zárate R, Gordillo Martínez AJ, Laguna RR, César C, Morales M, Arturo O, et al. Coeficientes de carbono para arbustos y herbáceas del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico. Rev Mex Ciencias For [Internet]. 2015 [citado el 27 de mayo de 2019];6(31):58–67. Recuperado a partir de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v6n31/v6n31a5.pdf>
37. Schulze E-D, Wirth C, Heimann M. Managing Forests After Kyoto. Science (80- ) [Internet]. el 22 de septiembre de 2000 [citado el 27 de mayo de 2019];289(5487):2058–9. Recuperado a partir de: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.289.5487.2058>

38. Gower ST. Patterns and Mechanisms of the forest carbon cycle. *Annu Rev Environ Resour.* 2003;28:169–204.
39. Escuela Nacional de Agricultura (Mexico). Colegio de Postgraduados. MA, Hernández JV, Martínez AV, Barra JDE. *Agrociencia.* [Internet]. Vol. 36, *Agrociencia.* Colegio de Postgraduados; 2002 [citado el 27 de mayo de 2019]. 725-736 p. Recuperado a partir de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30236610&iCveNum=1171>
40. Snowdon P, Raison J, Keith H, Ritson P, Grierson P, Adams M, et al. Protocol for Sampling Tree and Stand Biomass. National Carbon Accounting System. Technical Report No. 31 March 2001 [Internet]. 2002 [citado el 27 de mayo de 2019]. Recuperado a partir de: <http://www.greenhouse.gov.au/ncas>
41. Gaviria L, Pino M, Soto S. Evaluación del saneamiento ambiental sostenible en las zonas atendidas por ASADAS en el cantón de Turrialba [Internet]. 2016. Recuperado a partir de: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/7018>
42. CATIE. CATIE | Estación meteorológica CATIE [Internet]. 2019 [citado el 20 de mayo de 2019]. Recuperado a partir de: <https://www.catie.ac.cr/productos-y-servicios/estacion-meteorologica/estacion-meteorologica-catie.html>
43. Sosa DA. Técnicas de toma y remisión de muestras de suelos. 2012.
44. Carrasco ES. Elaboración de modelos de biomasa forestal a partir de datos LiDAR [Internet]. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA; 2016. Recuperado a partir de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68526/SAIZ - Elaboración de modelos de biomasa forestal a partir de datos LiDAR.pdf?sequence=1>

45. Chou SW, Gutiérrez-Espeleta E. Ecuación para estimar la biomasa arbórea en los bosques tropicales de Costa Rica. *Tecnol en Marcha*. 2013;26(2):41–54.
46. Aalde H, Gonzalez P, Gytarsky M, Krug T, Kurz WA, Ogle S, et al. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Directrices del IPCC 2006 para los Inventar Nac gases Ef invernadero [Internet]. 2006;4:1–93. Recuperado a partir de: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4\\_Volume4/V4\\_04\\_Ch4\\_Forest\\_Land.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf)
47. Plazas L, Torres A. PCA/DFT como herramienta de pronóstico para series temporales de absorbancia registradas mediante captosres UV-Vis en sistemas de saneamiento urbano. *Tecnura*. 2015;19(44):47–57.
48. Peña D. Análisis de Datos Multivariantes [Internet]. University Carlos III de Madrid; 2002. 516 p. Recuperado a partir de: <https://www.researchgate.net/publication/40944325>
49. Shlens J. A Tutorial on Principal Component Analysis [Internet]. San Diego: University of California,; 2014. 13 p. Recuperado a partir de: <https://arxiv.org/pdf/1404.1100.pdf>
50. Restrepo L, Posada S, Noguera R. Application of the principal-component analysis in the evaluation of three grass varieties  $\alpha$ . *Rev Colomb Ciencias Pecu* [Internet]. 2012;25:258–66. Recuperado a partir de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v25n2/v25n2a11.pdf>
51. Torriente D, Torres V. El Análisis de Componentes Principales en la interpretación

de Sistemas agroecológicos para el manejo de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el cultivo de la caña de azúcar. IDESIA (Chile) [Internet]. 2010;28(1):23–32. Recuperado a partir de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/idesia/v28n1/art04.pdf>

52. Rojas C, Calvo E. Forest Biomass , Carbon Stocks , and Macrofungal Dynamics : A Case Study in A Case Study in Costa Rica. *Int J For Res.* 2014;2014:1–6.
53. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Nivel de Referencia de las Emisiones Forestales por Deforestación en la República del Paraguay para pago por resultados de REDD + bajo la CMNUCC [Internet]. Asunción, Paraguay: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC); 2015. 85 p. Recuperado a partir de: [http://redd.unfccc.int/files/paraguay\\_2016\\_frel\\_submission\\_modified.pdf](http://redd.unfccc.int/files/paraguay_2016_frel_submission_modified.pdf)
54. Cabrelli D, Rebottaro S, Efron D. Caracterización del dosel forestal y del microambiente lumínico en rodales con diferente manejo, utilizando fotografía hemisférica. *Rev Ciencias For – Quebracho* [Internet]. 2006;13:17–25. Recuperado a partir de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48101302>
55. Polanco M, Silva FJ, Rozados JM, Díaz M, Rodríguez P, Duo I. El índice de área foliar (LAI) en masas de Abedul (*Betula celtibérica* Rothm. et Vasc.) en Galicia. *Cuad la Soc Española Ciencias For* [Internet]. 2005;20:111–6. Recuperado a partir de: [https://www.researchgate.net/publication/40836639\\_El\\_indice\\_de\\_area\\_foliar\\_LAI\\_en\\_masas\\_de\\_abedul\\_Betula\\_celtiberica\\_Rothm\\_et\\_Vasc\\_en\\_Galicia](https://www.researchgate.net/publication/40836639_El_indice_de_area_foliar_LAI_en_masas_de_abedul_Betula_celtiberica_Rothm_et_Vasc_en_Galicia)

56. Benavides HM, Young D, Grandizo F. Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera y Bosques* [Internet]. 2012;18(2):51–71. Recuperado a partir de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v18n2/v18n2a4.pdf>
57. López JF, Valdez JI, Ángel M, Víctor P. Composición y estructura arbórea de un bosque tropical estacionalmente seco en la Reserva de la Biósfera la Sepultura, Chiapas. *Rev Mex Ciencias For* [Internet]. 2012;3(12):43–56. Recuperado a partir de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v3n12/v3n12a5.pdf>

## ANEXOS

---

### Anexo 1. Datos meteorológicos específicos de la FEIMA.

Mes	Lluvia (mm)		Radiación PAR ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )		Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )		Humedad relativa (%)	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Enero		16.45		321.81		23.17		76.51
Febrero	23.33	42.09	374.82	341.82	23.68	23.86	75.59	73.16
Marzo	21.28	41.57	401.60	309.06	24.96	23.40	72.87	75.89
Abril	59.37	72.83	379.59	408.76	25.20	25.18	75.39	74.28
mayo	189.64	219.58	442.94	341.01	26.52	25.35	73.68	75.75
Junio	269.66	119.27	361.38	351.32	25.77	25.51	77.66	75.95
Julio	509.27	166.34	318.61	334.38	24.99	24.67	79.70	77.10
Agosto	200.12	232.82	351.64	324.03	25.51	24.85	77.78	77.39
Setiembre	212.81	109.71	399.58	321.49	26.15	25.10	74.98	77.26
Octubre	211.24	115.02	373.82	324.03	25.81	24.99	75.57	77.85
Noviembre	136.33		318.22		25.13		77.11	
Diciembre	62.46		330.20		23.81		75.86	

**Anexo 2.** Recolección de datos de variables verticales y horizontales en la FEIMA.

Clasificación	ID	Biomasa (ton/ha)	Uds. Equiv. C02	Aper. de dosel (%)	IAF	Altura (m)	DAP (m)	Índ. de dist.	Dist. vecinal (m)	Área basal (m <sup>2</sup> biomasa/ha)	% Rad. Directa
Agrícola	1A			99.96	0.00	3.56	0.00	0.00			100.00
Agrícola	1B			99.96	0.00	3.86	0.00	0.00			100.00
Agrícola	1C			81.73	0.20	25.61	0.00	0.00			85.61
Agrícola	1D			69.59	0.36	3.46	0.00	0.00			74.05
Bosque	1E	52.88	95.01	16.12	2.01	16.46	1.59	0.19	7.06	54.08	27.39
Agrícola	2A			79.59	0.19	7.72	0.00	0.00			91.90
Agrícola	2B			99.84	0.00	5.69	0.00	0.00			100.00
Agrícola	2C			99.83	0.00	2.95	0.00	0.00			100.00
Agrícola	2D			88.02	0.13	5.49	0.00	0.00			93.19
Bosque	2E	151.17	271.63	14.76	3.15	20.53	1.07	0.50	10.57	91.38	32.07
Bosque	2F	54.56	98.04	15.29	2.08	21.34	1.23	0.19	6.77	17.62	38.38
Agrícola	3C			99.37	0.01	2.44	0.00	0.00			99.99
Agrícola	3D			99.74	0.00	4.27	0.00	0.00			100.00
Potrero	3E			68.53	0.44	16.16	0.79	0.31			70.44
Bosque	3F	154.17	277.02	34.24	1.44	18.09	1.42	0.50	5.47	61.67	75.76
Bosque	3G	133.95	240.69	13.24	2.42	19.92	1.01	0.50	7.20	35.12	11.70
Potrero	4D			93.60	0.05	13.01	0.87	0.31			90.25
Potrero	4E			73.47	0.45	10.77	1.27	0.31			39.67
Potrero	4F			71.84	0.56	23.88	1.19	0.50			36.64
Potrero	4G			82.08	0.25	15.75	0.72	0.31			67.09
Bosque	4H	96.71	173.77	12.31	2.43	21.34	1.20	0.50	5.76	53.62	32.88
Potrero	5D			14.81	2.24	23.07	1.03	0.50			26.47
Potrero	5E			18.57	1.97	18.70	1.15	0.38			15.21
Potrero	5F			73.86	0.51	0.00	1.61	0.00			44.39
Potrero	5G			46.33	0.86	16.26	1.63	0.50			61.24
Bosque	5H			20.70	1.84	19.82	0.66	0.63			28.36
Bosque	5I	113.21	203.42	17.51	1.91	20.83	1.46	1.00	6.06	47.00	28.36
Potrero	6G			79.01	0.29	0.00	0.73	0.50			73.56
Bosque	6H	146.00	262.34	18.83	2.15	14.43	0.99	0.81	2.90	91.37	12.22
Bosque	6I	55.97	100.57	27.14	1.67	14.23	1.75	0.50	4.93	51.59	20.03
Bosque	6J	128.34	230.60	18.64	1.96	15.75	0.83	0.31	4.19	76.07	29.93
Bosque	7I	268.92	483.20	30.72	1.40	20.33	1.36	0.31	3.90	130.85	41.58

**Anexo 2.** Continuación.

<b>Clasificación</b>	<b>ID</b>	<b>Biomasa (ton/ha)</b>	<b>Uds. Equiv. C02</b>	<b>Aper. de dosel (%)</b>	<b>IAF</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>DAP (m)</b>	<b>Índ. de dist.</b>	<b>Dist. vecinal (m)</b>	<b>Área basal (m<sup>2</sup> biomasa/ ha)</b>	<b>% Rad. Directa</b>
Bosque	7J	72.36	130.03	21.56	2.13	20.33	1.00	0.31	5.64	62.59	13.40
Bosque	7K			14.29	2.24	13.11	1.02	0.50			15.96
Bosque	7L	132.98	238.94	12.05	2.45	19.41	1.44	0.19	5.24	57.78	9.58
Bosque	7M	135.98	244.33	14.37	2.28	29.17	0.64	0.50	6.90	43.76	19.47
Bosque	8J			12.31	2.75	24.90	2.01	0.50			8.08
Bosque	8K	45.21	81.23	9.10	3.07	21.65	1.00	0.50	9.86	28.79	6.01
Bosque	8L	104.21	187.25	14.05	2.23	17.38	1.16	0.50	8.68	51.51	23.62
Bosque	8M	115.69	207.88	10.40	3.10	18.39	1.08	0.50	5.20	64.92	7.64
Bosque	8N	66.24	119.02	12.57	2.39	21.04	0.81	0.50	5.47	22.48	8.04
Bosque	9K			25.02	1.84	27.74	0.79	0.50			20.51
Bosque	9L			25.52	2.17	30.39	1.53	0.50			9.04
Bosque	9M			14.11	2.46	24.59	1.03	0.50			7.78
Bosque	10L			38.76	1.21	29.67	0.66	0.50			48.06

**Anexo 3.** Coordenadas geográficas de los datos de las variables verticales y horizontales (UTM) en la FEIMA.

<b>ID</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
1A	Agrícola	9.8663194	-83.64073333	210372.8002	1091776.613
1B	Agrícola	9.8665333	-83.63982222	210472.9809	1091799.496
1C	Agrícola	9.8665167	-83.63883611	210581.1911	1091796.804
1D	Agrícola	9.8664944	-83.63793889	210679.6395	1091793.558
1E	Bosque	9.8665111	-83.63691944	210791.5443	1091794.523
2A	Agrícola	9.8656944	-83.64076389	210368.8952	1091707.468
2B	Agrícola	9.8656778	-83.63981111	210473.4511	1091704.805
2C	Agrícola	9.8656389	-83.63881944	210582.2567	1091699.64
2D	Agrícola	9.8656528	-83.63794722	210677.9932	1091700.423
2E	Bosque	9.8656306	-83.63690556	210792.2898	1091697.063
2F	Bosque	9.8653889	-83.63601389	210889.9432	1091669.541
3C	Agrícola	9.8650972	-83.63883333	210580.2578	1091639.7
3D	Agrícola	9.8646556	-83.63794722	210677.122	1091590.059
3E	Potrero	9.8646389	-83.63592778	210898.738	1091586.462
3F	Bosque	9.8645806	-83.63501111	210999.2954	1091579.216
3G	Bosque	9.8646722	-83.63690833	210791.1565	1091590.996
4D	Potrero	9.8636694	-83.63789444	210682.0554	1091480.866
4E	Potrero	9.8636694	-83.63694444	210786.3189	1091480.044
4F	Potrero	9.8636361	-83.635925	210898.1699	1091475.476
4G	Potrero	9.8636139	-83.63498889	211000.8884	1091472.209
4H	Bosque	9.8636111	-83.63395	211114.9061	1091471
5D	Potrero	9.8629944	-83.63790278	210680.5439	1091406.169
5E	Potrero	9.8629139	-83.63698611	210781.0826	1091396.466
5F	Potrero	9.8626778	-83.63600278	210888.7949	1091369.485
5G	Potrero	9.8626	-83.63498333	211000.6184	1091359.992
5H	Bosque	9.8626111	-83.63400833	211107.6355	1091360.377
5I	Bosque	9.8625472	-83.6331	211207.2666	1091352.52
6G	Potrero	9.8620056	-83.634975	211001.0108	1091294.2
6H	Bosque	9.8617056	-83.63398056	211109.8859	1091260.138
6I	Bosque	9.8616306	-83.63301944	211215.3135	1091251.007
6J	Bosque	9.861575	-83.63203333	211323.4909	1091244.001
7I	Bosque	9.8611306	-83.63301111	211215.7886	1091195.663
7J	Bosque	9.8607472	-83.63203333	211322.7696	1091152.386
7K	Bosque	9.8606556	-83.63104722	211430.9158	1091141.396
7L	Bosque	9.8605889	-83.63004722	211540.6092	1091133.151
7M	Bosque	9.8604444	-83.62913056	211641.0816	1091116.367

**Anexo 3.** Continuación.

<b>ID</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
8J	Bosque	9.8599083	-83.63204167	211321.1168	1091059.549
8K	Bosque	9.8598028	-83.63104444	211430.4804	1091047.012
8L	Bosque	9.8597639	-83.63008611	211535.6216	1091041.879
8M	Bosque	9.8597111	-83.62909444	211644.4164	1091035.18
8N	Bosque	9.8597889	-83.62821111	211741.4277	1091043.028
9K	Bosque	9.8589139	-83.63069722	211467.8122	1090948.335
9L	Bosque	9.8587472	-83.63008889	211534.4293	1090929.36
9M	Bosque	9.8588611	-83.62914722	211637.8819	1090941.153
10L	Bosque	9.8580111	-83.6301	211532.5703	1090847.903

**Anexo 4.** Plantas indicadoras de disturbio encontradas en cada una de las parcelas de la FEIMA.

<b>Parcela</b>	<b>Ortigas</b>	<b>Pastos</b>	<b>Guarumo (<i>Cecropia</i>)</b>	<b>Palmas</b>
1A	No	No	No	No
1B	No	No	No	No
1C	No	No	No	No
1D	No	No	No	No
1E	No	No	No	Si
2A	No	No	No	No
2B	No	No	No	No
2C	No	No	No	No
2D	No	No	No	No
2E	Si	No	No	Si
2F	No	No	No	Si
3C	No	No	No	No
3D	No	No	No	No
3E	No	Si	No	No
3F	Si	No	No	Si
3G	Si	No	No	Si
4D	No	Si	No	No
4E	No	Si	No	No
4F	Si	No	No	Si
4G	No	Si	No	No
4H	Si	No	No	Si
5D	Si	No	Si	No
5E	No	No	Si	Si
5F	No	No	No	No
5G	No	Si	Si	No
5H	Si	Si	No	No
5I	Si	Si	Si	Si
6G	No	Si	Si	No
6H	Si	Si	Si	No
6I	Si	No	Si	No
6J	Si	No	No	No
7I	Si	No	No	No
7J	No	Si	No	No
7K	Si	No	No	Si
7L	No	No	No	Si
7M	Si	No	No	Si
8J	Si	No	Si	No

**Anexo 4.** Continuación.

<b>Parcela</b>	<b>Ortigas</b>	<b>Pastos</b>	<b>Guarumo (Cecropia)</b>	<b>Palmas</b>
8K	Si	No	No	Si
8L	Si	No	No	Si
8M	Si	No	No	Si
8N	Si	No	No	Si
9K	Si	No	No	Si
9L	Si	No	No	Si
9M	Si	No	No	Si
10L	Si	No	No	Si