Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Posgrado
Maestría en Ingeniería Geomática

ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL AÉREA Y CARBONO UTILIZANDO TELEDETECCIÓN EN PLANTACIONES DE CONÍFERAS (*Pinus maximinoi* Y *Cupressus lusitanica)* EN LA FINCA AGUA TIBIA, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA POR MEDIO DEL SATÉLITE SENTINEL-2

Ing. Agr. Alejandro Carrera Lemus
PhD. Edwin Guillermo Santos Mansilla

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL AÉREA Y CARBONO UTILIZANDO TELEDETECCIÓN EN PLANTACIONES DE CONÍFERAS (*Pinus maximinoi* Y *Cupressus lusitanica*) EN LA FINCA AGUA TIBIA, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA POR MEDIO DEL SATÉLITE SENTINEL-2

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. AGR. ALEJANDRO CARRERA LEMUS
ASESORADO POR EL PhD. EDWIN GUILLERMO SANTOS MANSILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Inga. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz Gonzáles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADORA	MSc. Licda. Sara Michelle Catalán Armas
SECRETARIO	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL AÉREA Y CARBONO UTILIZANDO TELEDETECCIÓN EN PLANTACIONES DE CONÍFERAS (*Pinus maximinoi* Y *Cupressus lusitanica*) EN LA FINCA AGUA TIBIA, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA POR MEDIO DEL SATÉLITE SENTINEL-2

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado, con fecha 28 de noviembre de 2020.

Ing. Agr. Alejandro Carrera Lemus

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.799.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL AÉREA Y CARBONO UTILIZANDO TELEDETECCIÓN EN PLANTACIONES DE CONÍFERAS (Pinus maximinoi Y Cupressus lusitanica) EN LA FINCA AGUA TIBIA, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA POR MEDIO DEL SATÉLITE SENTINEL-2,** presentado por: **Alejandro Carrera Lemus,** que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Geomática después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc

Guatemala, noviembre de 2022

LNG.EEP.OI.799.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

"ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL AÉREA Y CARBONO UTILIZANDO TELEDETECCIÓN EN PLANTACIONES DE CONÍFERAS (Pinus maximinoi Y Cupressus lusitanica) EN LA FINCA AGUA TIBIA, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA POR MEDIO DEL SATÉLITE SENTINEL-2"

presentado por **Alejandro Carrera Lemus** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Geomática** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
ESCUELA DE POSTGRADO

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, 13 de noviembre 2021.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **TRABAJO DE GRADUACIÓN** titulado: "ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL AÉREA Y CARBONO UTILIZANDO TELEDETECCIÓN EN PLANTACIONES DE CONÍFERAS (PINUS MAXIMINOI Y CUPRESSUS LUSITÁNICA) EN LA FINCA AGUA TIBIA, MUNICIPIO DE SAN JOSÉ PINULA, GUATEMALA POR MEDIO DEL STÉLITE SENTINEL-2" del estudiante **Alejandro Carrera Lemus** quien se identifica con número de carné **201310728** del programa de **Maestría en Geomática.**

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
Coordinador
Maestría en Tecnologías de la Información y la Comunicación
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, junio de 2022

Maestro
Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Álvarez Cotí:

Reciba un cordial y atento saludo, a la vez aprovecho la oportunidad para hacer de su conocimiento que en mi calidad como Asesor del Ingeniero en Carrera **Agronomía en Recursos Naturales Renovables Alejandro Carrea Lemus** quien se identifica con carnet **2946229500101**, he revisado la enmiendas solicitadas a los Documentos de Graduación, los cuales llevan como título: "**Estimación de Biomasa Forestal Aérea y Carbono Utilizando Teledetección en Plantaciones de coníferas (*Pinus maximinoi* y *Cupressus lusitanica*) en la finca Agua Tibia, municipio de San José Pinula, Guatemala por medio del Satélite Sentinel-2**", del programa de Maestría en **Ingeniería Geomática** de esta Escuela de Postgrado, **por lo cual el trabajo revisado cuenta con mi aprobación.**

Agradeciendo de antemano la atención a la presente, me suscribo.

Atentamente.

"Id Y Enseñad A Todos"

PhD. Edwin Guillermo Santos Mansilla

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por estar en mi vida y acompañarme en todo momento.
Mi mamá	Por su amor, apoyo y comprensión incondicional durante toda mi vida.
Mi papá	Por su amor, apoyo y consejos incondicionales.
Mis hermanos	Por su apoyo incondicional y ser parte importante de mi vida.
Mi novia	Por su amor, cariño y comprensión en los buenos y malos momentos.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser mi fortaleza en cada uno de los momentos de mi vida.
USAC	Por ser la casa de estudios que me ha permitido alcanzar algunas de mis metas profesionales.
Ing. Guillermo Santos	Por su apoyo brindado, durante el proceso de culminación de esta meta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES V
LISTA DE SÍMBOLOS IX
GLOSARIO XI
RESUMEN XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS XIX
OBJETIVOS XXIII
HIPOTESIS XXV
MARCO METODOLÓGICO XXVII
INTRODUCCIÓN XLI

1. ANTECEDENTES 1

2. JUSTIFICACIÓN 9

3. ALCANCES 11
   3.1 Resultados 11
   3.2 Técnicos 11
   3.3 Investigativos 11

4. MARCO TEÓRICO 13
   4.1. Silvicultura 13
   4.2. Dasometría 13
   4.3. Variables dasométricas 14
   4.4. Pino maximinoi (*Pinus maximinoi*) 15

4.5. Ciprés (*Cupressus lusitanica)* 17
4.6. Biomasa 18
4.7. Biomasa Forestal 19
4.8. Cambio Climático 20
4.9. Dióxido de Carbono 21
4.10. Teledetección Forestal 21
4.11. Teledetección 22
4.12. Radiación electromagnética 24
4.13. Sensores y plataformas 24
4.14. Imagen satelital 25
4.15. Resoluciones 25
4.16. Generalidades del satélite Sentinel-2 26
4.17. Resoluciones 26
4.18. Nivel de productos del satélite Sentinel-2 27
4.19. Nomenclatura de los Productos de Sentinel-2 29
4.20. Índices Espectrales 29
4.21. Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada 30
4.22. Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada Verde 30
4.23. Índice de Diferencia Normalizada de Humedad 31
4.24. Índice de Vegetación Verde 31

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 33
5.1. Correlación de datos de campo e índices espectrales año 2015 33
5.2. Correlación de Datos de Campo e Índices Espectrales año 2018 39
5.3. Correlación de Datos de Campo e Índices Espectrales año 2021 45
5.4. Modelos Estadísticamente Significativos 51
5.5. Evaluación de Modelos Estadísticos 52

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 57

CONCLUSIONES 65
RECOMENDACIONES 67
REFERENCIAS 69
APÉNDICE 77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Mapa base finca Agua Tibia XXVII
2. Distribución de parcelas por inventario forestal XXIX
3. Interfaz gráfica de usuario de la página web EarthExplorer-USGS ... XXX
4. Path/Row del área de estudio en función de la Grilla del satélite Sentinel-2 XXXI
5. Proceso para la adquisición de datos ópticos XXXIV
6. Proceso de la correlación de datos XXXVI
7. Parcelas permanentes de medición forestal INAB XXXIX
8. Elementos de la teledetección 23
9. Rangos de longitud de onda 24
10. Niveles de los productos de Sentinel-2 28
11. Puntos de entrenamiento 2015 34
12. Índices espectrales 2016 en época seca (abril) y época lluviosa (junio) 35
13. Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época seca 2015 37
14. Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época seca 2015 37
15. Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época lluviosa 2015 38
16. Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época lluviosa 2015 39
17. Puntos de entrenamiento 2018 40
18. Índices espectrales 2018 en época seca (diciembre) y época lluviosa (septiembre) 41

19. Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época seca 2018 43
20. Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época seca 2018 43
21. Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época lluviosa 2018 44
22. Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época lluviosa 2018 44
23. Puntos de entrenamiento 2021 45
24. Índices espectrales 2021 en época seca (marzo) y época lluviosa (septiembre) 46
25. Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época seca 2021 48
26. Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época seca 2021 48
27. Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época lluviosa 2021 49
28. Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época lluviosa 2021 50
29. Mapa de puntos de validación 52
30. Mapa de Resultados de la validación del modelo 1 (2015) 54
31. Mapa de Resultados de validación del modelo 2 (2018) 54
32. Mapa de Resultados de la validación del modelo 3 (2021) 55
33. Mapa de validación entre PPMF-INAB y Modelo No.3 56

TABLAS

I. Características de las imágenes del satélite Sentinel-2 del año 2016 XXXI
II. Características de las imágenes del satélite Sentinel-2 del año 2018 XXXII
III. Características de las imágenes satelitales Sentinel-2 del año 2021 XXXII
IV. Taxonomía del Pino 15
V. Descripción botánica del Pino 16
VI. Taxonomía ciprés 17
VII. Descripción botánica ciprés 18
VIII. Niveles de los productos de Sentinel-2 28
IX. Nomenclatura de una imagen de Sentinel-2 29
X. Índices espectrales utilizados 31
XI. Resultados de la correlación de Pearson año 2015 36
XII. Resultado de la correlación de Spearman año 2015 36
XIII. Resultados de correlación utilizando el coeficiente de Pearson 2018 .. 42
XIV. Resultados de correlación utilizando el coeficiente de Spearman 201842
XV. Resultados de correlación utilizando el coeficiente de Pearson 2021 .. 47
XVI. Resultados de correlación utilizando el coeficiente de Spearman 202147
XVII. Promedio de Biomasa área y carbono por año en función de parcelas de entrenamiento 50
XVIII. Coeficientes de correlación promedio por época y año 51
XIX. Coeficientes de correlación para el índice espectral NDVI 51
XX. Modelos de los índices con mayor correlación 52
XXI. Promedio de biomasa área y carbono por año en función de parcelas de validación 53
XXII. Valores de RSME por año 55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
h	Altura
cm	Centímetro
R^2	Coeficiente de Pearson
r_s	Coeficiente de Sperman
CO_2	Dióxido de carbono
ha	Hectárea
kg	Kilogramo
®	Marca registrada
m	Metro
m^2	Metro cuadrado
m^3	Metro cúbico
µm	Micrómetro
mg	Miligramo
mm	Milímetro
Π	Número de Pi
%	Porcentaje
T	Tonelada
v	Volumen

GLOSARIO

AOI	Hace referencia al área de interés, por sus siglas en inglés (*Area Of Interest*).
Banda	Componente de imagen satelital que presenta frecuencias o longitudes de onda en el espectro electromagnético.
Base de datos	Uno o más grupos que se componen de una determinada cantidad de elementos o atributos.
Biomasa	Cantidad de materia orgánica en función de una masa vegetativa.
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
Centroide	Se refiere al centro geométrico de un elemento.
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas.
Coordenadas	Representación de una posición donde intersecan tres ejes; x,y,z.
Correlación	Relación entre dos variables, que puede ser positiva o negativa.

DAP	Diámetro a la altura del pecho.
Datum	Representación matemática en función del elipsoide, utilizado comúnmente en los Sistemas de Información Geográfica.
DIP	Procesamiento de imágenes digitales, por sus siglas en inglés (*satellite image processing*).
Error RMSE	Medida de la diferencia entre una cantidad observada y una cantidad estimada.
ESA	Agencia Espacial Europea, por sus siglas en inglés (*European Space Agency*)
EVI	Índice De Vegetación Mejorado.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, por sus siglas en inglés (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*).
GEI	Gases de efecto invernadero.
Geoprocesamiento	Operación sobre un grupo de datos utilizada en los Sistemas de Información Geográfica.

GIMBUT	Grupo Interinstitucional de Monitoreo de los Bosques y Uso de la Tierra.
GNDVI	Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada Verde.
GPS	Sistemas de Posicionamiento Global (*Global Positioning System*).
GRVI	Índice de Vegetación Verde.
Herramienta	Comando o función que forma parte de la GUI.
IAF	Índice de área foliar.
ID	Identificador.
IE Índice espectral	Resultado de una operación matemática de valores numéricos de pixeles de dos o más bandas.
Imagen	Representación de una escena, comúnmente empleada en teledetección de tipo ráster (*tiff, img, grid, jgpg2,* etcétera).
INAB	Instituto Nacional de Bosques.
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

Latitud-longitud	Sistema referencial de un lugar o coordenadas geográficas que permiten representar una posición sobre la superficie terrestre.
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
Modelo	Conjunto de procedimientos para representar o predecir un resultado.
ND	Nivel Digital.
NDMI	Índice de Humedad de Diferencia Normalizada.
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
Parcela	Unidad de muestreo, en inventarios forestales (circulares o rectangulares).
PPMF	Parcelas permanentes de medición forestal.
Punto	Elemento geográfico definido por una coordenada X y una coordenada Y.
REDD+	Reducción de emisiones por deforestación evitada y degradación.

RVI	Índice de Vigor Relativo.
Satélite	Plataforma espacial que orbita sobre la tierra.
SAVI	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo.
Sensor	Dispositivo que forma parte del satélite que detecta la energía emitida o radiada.
Sentinel	Conjunto de satélites de radar y de imágenes ópticas, perteneciente al programa Copérnico de la Agencia Espacial Europea (*ESA*).
Shapefile	Archivo vectorial que almacena datos en tres tipos de entidades (punto, línea o polígono).
SIFGUA	Sistema de información forestal de Guatemala.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
SRC	Sistemas de Referencia de Coordenadas.
Teledetección	Técnica de análisis de datos de la superficie terrestre desde una plataforma espacial.
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala.
USGS	Servicio Geológico de Estados Unidos.

UVG	Universidad del Valle Guatemala.
WGS84	Sistema Geodésico Mundial de 1984.

RESUMEN

Con el transcurrir del tiempo el ser humano, ha provocado deterioro al medio ambiente, con el crecimiento demográfico y ambición en el aprovechamiento de los recursos, generando insuficiencia de los recursos naturales, tema de preocupación ya que representan una riqueza invaluable y limitada por lo que es importante su cuantificación.

En los últimos años la teledetección ha tomado auge en el tema de la cuantificación de los recursos naturales, debido a que permite el análisis de la dinámica de los mismos, mediante el procesado de datos e imágenes de satélite para adquirir información y estudiar los rasgos de los objetos de interés, dispuestos en la superficie terrestre, sin necesidad del contacto físico.

La estimación de biomasa para usos energéticos está directamente relacionada con la cuantificación de los recursos naturales, partiendo de esto, el siguiente trabajo presenta el desarrollo de un método indirecto para la estimación de biomasa aérea y carbono en plantaciones de coníferas (*Pinus maximinoi y Cupressus lusitanica*) haciendo uso de imágenes del satélite Sentinel-2, investigación realizada en el municipio de San José Pínula en la finca Agua Tibia.

La investigación contó con tres inventarios forestales de los años 2015, 2018 y 2021, cada uno de estos fue constituido por 200 parcelas de forma circular con un área de 1,000 m^2; 100 de ellas se utilizaron como puntos de entrenamiento para la generación de los modelos a evaluar y las 100 restantes se utilizaron como puntos de validación, las cuales fueron necesarias para el cálculo de biomasa en campo. Por otro lado, también se hizo uso de imágenes satelitales

Sentinel-2 tomando en consideración la época seca y lluviosa correspondientes al año de los inventarios, se generaron cuatro índices espectrales (NDVI, GNDVI, NDMI, GRVI) que fueron correlacionados con los datos de biomasa generados en campo, lo que permitió evidenciar que, sí existe correlación entre las variables biomasa e índices de espectrales, siendo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) quien presentó mayor correlación de Pearson (R^2=0.62) y Spearman (r_s=0.62) para el año 2021. Como resultado final de la presente investigación, con la finalidad de obtener un modelo que permita estimar biomasa aérea y carbono a partir de valores de pixel del índice espectral seleccionado (NDVI), que fue el que mejor predice la cantidad de biomasa usando una ecuación potencial, presentando así un RMSE promedio de 63.91 (T/ha).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

Los árboles, las plantaciones, los bosques y toda masa forestal existentes sin duda son una parte importante para el medio ambiente, ya que reducen los impactos de la erosión e inundaciones, absorben la contaminación del aire, proporcionan energía alternativa al uso de combustibles fósiles, beneficios económicos por medio de stocks de carbono, así mismo también ayudan en la mitigación del cambio climático a través de la generación de biomasa, energía renovable que disminuye las emisiones de CO_2.

La pérdida de masas forestales ha representado un impacto negativo al medio ambiente, actualmente se han realizado diversos estudios para la estimación de biomasa utilizando información geoespacial, partiendo de inventarios forestales, imágenes satelitales de mediana resolución y ecuaciones alométricas específicas para ciertas regiones y determinadas especies, mismas que si se quisieran replicar se tendría que realizar una selección acorde al área de estudio para obtener un resultado certero, siendo estos algunos de los factores a considerar en la estimación de carbono, se busca generar un aporte que permita estimar la biomasa aérea y carbono, haciendo uso de imágenes satelitales gratuitas mediante la generación de un método, que pueda ser replicable de manera práctica.

En nuestro país se cuenta con investigaciones acerca de la estimación de biomasa aérea y carbono almacenado en masas forestales, mismas que puede complementar con el paso del tiempo la presente puesta o algunas otras alternativas, en las cuales se pueda ir haciendo uso de nuevos productos espaciales o bien analizando nuevas áreas de interés y con ello ir fortaleciendo algunos puntos en las metodologías descritas.

Por otro lado, al no buscar nuevas alternativas para la estimación de biomasa, se podría enfrentar a efectos como: la continuidad de la aplicación de métodos directos, destructivos y costosos, no se aprovechan los servicios ambientales para generación de ingresos extra, no se contribuye en la mitigación de cambio climático en su totalidad y por último se podría hacer mención que no existe un avance de la implementación de nuevas tecnologías que permitan el monitoreo del ciclo forestal de manera remota.

Los Sistemas de Información Geográfica y cada una de sus disciplinas han traído con sigo una serie de recursos geoespaciales enorme y que cada vez van en aumento, lo cual genera expectativa en cada uno de estos recursos y hace que surja la necesidad de la exploración e implementación de estos para optimizar una tarea o método de interés, que a su vez sea práctico, eficaz y preciso, lo cual permitirá la toma de decisiones a distintos tipos de escala.

Mediante la presente investigación se plantea evaluar la correlación estadística existente y que mejor se ajuste entre la biomasa aérea calculada en campo e índices espectrales (NDVI, GNDVI, NDMI, GRVI) obtenidos de las combinaciones de bandas del satélite Sentinel-2, para luego generar un modelo estadístico que permita la estimación de biomasa aérea y carbono en plantaciones forestales de coníferas, y con esto contar con un método indirecto que pueda ser replicado haciendo uso de imágenes satelitales gratuitas para la

estimación de la misma y con ello aplicar a servicios ambientales, aporte de la recarga hídrica, evitar los métodos directos destructivos y contribuir con la mitigación del cambio climático.

Como se menciona anteriormente, es muy común el uso del método directo para la cuantificación de biomasa aérea forestal y carbono lo que conlleva a la pérdida de masas forestales y con esto el desinterés de recursos geoespaciales gratuitos que pueden ser empleados como métodos indirectos no destructivos, que reducen tiempo y costos, es por ello que, con base a esta problemática, se plantean la siguiente interrogante:

¿Es posible el establecimiento de un método que cuantifique biomasa a través del uso y aplicación de técnicas, insumos y análisis geoespacial de manera confiable utilizando imágenes satelitales de acceso libre y de mediana resolución (Sentinel-2) en plantaciones de coníferas (*Pinus maximinoi* y *Cupressus lusitanica*)?

Con las siguientes interrogantes secundarias:

- ¿Cuál es el índice espectral que mejor se ajusta para la estimación de biomasa por medio de las imágenes satelitales Sentinel-2?
- ¿Cuál es la cantidad de biomasa aérea y carbono a partir del año 2015, 2018 y 2021 en los rodales de (*Pinus maximinoi* y *Cupressus lusitanica)* a partir del modelo estadísticamente significativo?
- ¿Cuál es la precisión y la correlación estadística del modelo estadísticamente significativo en la estimación de biomasa aérea forestal y carbono resultante en la temporalidad de 2015, 2018 y 2021 de las plantaciones de (*Pinus maximinoi* y *Cupressus lusitanica*)?

La presente investigación se llevó a cabo en plantaciones mixtas de coníferas ubicada en la finca Agua Tibia, municipio de San José Pinula, departamento de Guatemala, utilizando inventarios forestales del año 2015, 2018 y 2021, así mismo también se utilizaron imágenes satelitales de Sentinel-2, seleccionadas para los meses de época seca (diciembre a abril) y lluviosa (mayo a noviembre).

OBJETIVOS

General

Establecer un método indirecto en función de un índice espectral que permita el uso de imágenes satelitales de acceso libre y de mediana resolución (Sentinel-2) para la estimación de biomasa aérea forestal y carbono en plantaciones de coníferas (*Pinus maximinoi y Cupressus lusitanica*).

Específicos

1. Determinar un modelo estadístico con una correlación estadística significativa entre la biomasa obtenida mediante ecuaciones dasométricas e información obtenida a través de índices espectrales como producto de Imágenes Sentinel-2 para estimación de biomasa aérea y carbono.

2. Determinar y mapear la distribución espacial de la biomasa aérea y carbono en los rodales de *Pinus maximinoi y Cupressus lusitanica* a partir del modelo estadísticamente significativo.

3. Evaluar a través de una correlación y error medio cuadrático la cantidad de biomasa aérea forestal y carbono resultante en la temporalidad de 2015, 2018 y 2021 de las plantaciones de *Pinus maximinoi* y *Cupressus lusitanica* en función del modelo estadísticamente significativo.

HIPOTESIS

Con la presente investigación se busca demostrar si el uso de un método indirecto es factible para estimar la cantidad de biomasa aérea en plantaciones mixtas de coníferas (*Pinus maximinoi* y *Cupressus lusitanica*), mediante el uso de un índice espectral (NDVI, GNDVI, NDMI y GRVI), haciendo uso de imágenes satelitales de Sentinel-2.

MARCO METODOLÓGICO

Área de estudio

Finca Agua Tibia, propiedad de Industrias Agrícolas Centro Americanas, S.A., La finca Agua Tibia está ubicada en el municipio de San José Pínula del departamento de Guatemala, como se muestra en la figura 1. Se manejan especies como: pino, ciprés, café y ornamentales, además de contar con un bosque natural.

La finca tiene casi un siglo de existir y fue en 1976 cuando surgió como empresa forestal. Sus actividades están vinculadas a la utilización productiva del bosque por medio de los incentivos forestales.

Figura 1. **Mapa base finca Agua Tibia**

Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

La investigación realizada y presentada en este documento se considera de tipo cuantitativa, ya que busca encontrar una correlación estadística entre datos de campo e índices espectrales, para generar un método indirecto que permita estimar la biomasa aérea.

El diseño de la investigación es de tipo experimental, ya que consistió en la generación y evaluación de modelos para estimación de biomasa aérea, resultado de las correlaciones entre los datos de campo y datos ópticos de imágenes satelitales.

FASE 1. Revisión de Literatura

En esta primera fase se llevó a cabo la recopilación y síntesis de las referencias bibliográficas, utilizadas en el apartado de antecedentes y marco conceptual y así poder llevar a cabo la presente investigación.

FASE 2. Base de Datos (Datos de Campo y Datos Espaciales)

Datos de Inventarios Forestales

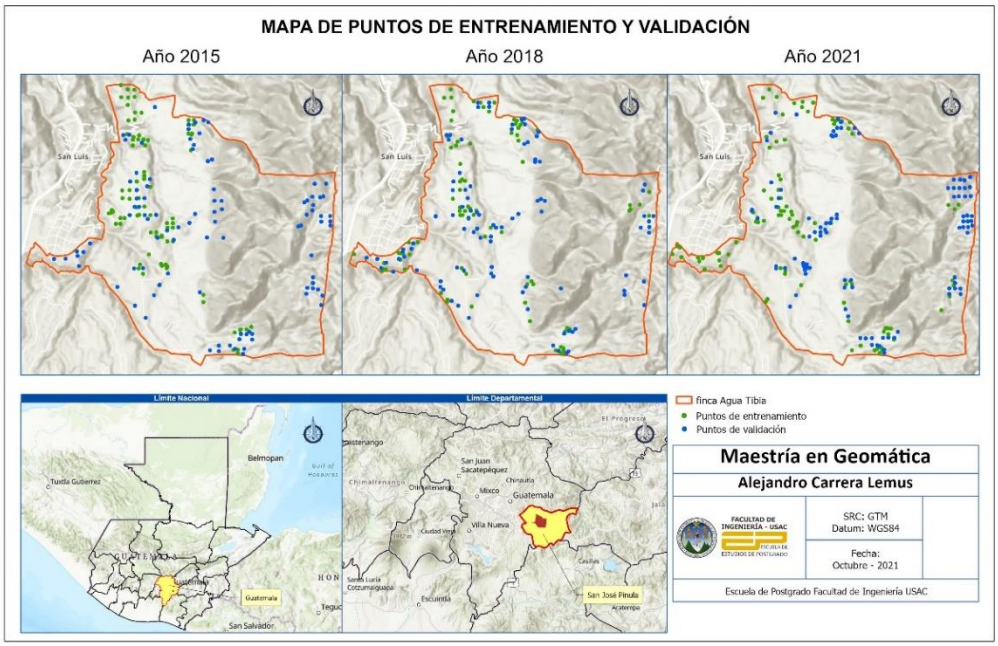
Para la investigación se usaron datos procedentes de inventarios forestales en áreas con plantaciones de pino y ciprés. Los inventarios forestales utilizados corresponden a los años 2015, 2018 y 2021. Cada uno, cuenta con un total de 200 parcelas, de las cuales 100 (50 %) se utilizaron como puntos de entrenamiento y las 100 (50 %) parcelas restantes como puntos de la validación.

El levantamiento de cada inventario forestal se hizo mediante parcelas circulares de 1,000 m^2 (r=17.85 m), donde se registraron las variables: altura (h), tomada con hipsómetro PM-5-1520 y pistola de haga; diámetro a la altura del pecho (DAP) tomada con cinta diamétrica; número de individuos marcados con

aerosol y registro de coordenadas centroides (XY) de las parcelas, capturadas con un GPS Garmin 64S.

A continuación, se presenta la distribución aleatoria tanto de las parcelas de entrenamiento como de validación por cada uno de los inventarios forestales.

Figura 2. **Distribución de parcelas por inventario forestal**



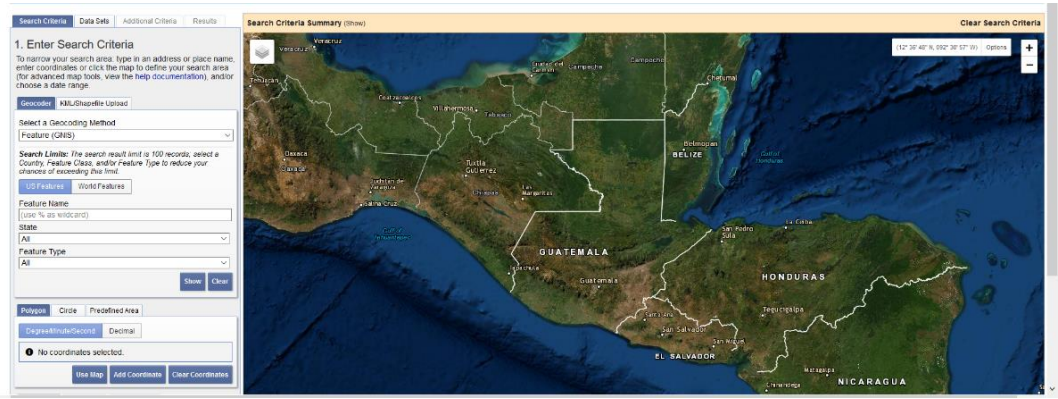
Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

Datos Espaciales

Las imágenes del satélite Sentinel-2 fueron descargadas del portal *EarthExplorer* de la USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) https://earthexplorer.usgs.gov/ como se muestra en la figura 3, cada imagen satelital fue seleccionada en base al año del inventario, a excepción del inventario 2015 el cual tomó en consideración el año 2016, debido a dos factores; el primero

se debe a la fecha de lanzamiento, ya que el satélite (Sentinel-2A) fue lanzado el 23 de junio de 2015 y el segundo, consiste en el alto porcentaje de cobertura nubosa presente en todas las escenas del resto del año 2015 (junio a diciembre) en el área de estudio.

Figura 3. **Interfaz gráfica de usuario de la página web EarthExplorer-USGS**



Fuente: EarthEplorer-USGS (2021).

La finca Agua Tibia se encuentra ubicada en la latitud 14°32'42.70"N y longitud 90°22'2.85"O, de acuerdo con la grilla del satélite Sentinel-2 las imágenes de empleadas en la investigación corresponden al Path/Row 15PYS, con se muestra a continuación:

Figura 4. **Path/Row del área de estudio en función de la Grilla del satélite Sentinel-2**

Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

En las tablas I, II y III, se presentan las características de las imágenes seleccionadas según su año:

Tabla I. **Características de las imágenes del satélite Sentinel-2 del año 2016**

Ítem	**Imagen abril 2016**	**Imagen junio 2016**
ID de la imagen	L1C_TL_MTI_T15PYS_20160410T164015	L1C_TL_MPS_T15PYS_20160629T164000
Path/row	T15PYS	T15PYS
Fecha de Captura	abril de 2016	junio de 2016
% Nubosidad	<5%	>25%
Nivel de imagen	Level_1C (TOA)	Level_1C (TOA)
Zona UTM	UTM 15 N	UTM 15 N
Día/ Noche	Día	Día
Datum	WGS84	WGS84
Sensor	MSI	MSI

Fuente: elaboración propia, partir de metadatos de las imágenes satelitales, realizado con Microsoft Excel.

Tabla II. **Características de las imágenes del satélite Sentinel-2 del año 2018**

Ítem	Imagen septiembre 2018	Imagen diciembre 2018
ID de la imagen	L1C_T15PYS_A009504_20181231 T163441	L1C_T15PYS_A016911_20180917 T163531
Path/row	T15PYS	T15PYS
Fecha de Captura	septiembre de 2018	diciembre de 2018
% Nubosidad	<5%	>25%
Nivel de imagen	Level_1C (TOA)	Level_1C (TOA)
Zona UTM	UTM 15 N	UTM 15 N
Día/ Noche	Día	Día
Datum	WGS84	WGS84
Sensor	MSI	MSI

Fuente: elaboración propia, a partir de metadatos de las imágenes satelitales, realizado con Microsoft Excel.

Tabla III. **Características de las imágenes satelitales Sentinel-2 del año 2021**

Ítem	Imagen marzo 2021	Imagen mayo 2021
ID de la imagen	L1C_T15PYS_A030067_20210325 T163554	L1C_T15PYS_A022088_20210529 T163342
Path/row	T15PYS	T15PYS
Fecha de Captura	marzo de 2016	mayo de 2016
% Nubosidad	<5%	>25%
Nivel de imagen	Level_1C (TOA)	Level_1C (TOA)
Zona UTM	UTM 15 N	UTM 15 N
Día/ Noche	Día	Día
Datum	WGS84	WGS84
Sensor	MSI	MSI

Fuente: elaboración propia, a partir de metadatos de las imágenes satelitales, realizado con Microsoft Excel.

.

Los cuatro índices espectrales generados mediante las imágenes seleccionadas anteriormente fueron; NDVI, GNDVI, NDMI y GRVI (tabla X).

FASE 3. Procesamiento de los datos

Datos de Inventarios Forestales

Para la cuantificación de biomasa aérea, se utilizaron fórmulas dasométricas convencionales para árboles en pie, la biomasa total será la suma de cada uno de los árboles presentes en las parcelas.

Como primer paso, se llevó a cabo la tabulación de cada registro de las variables dasométricas (DAP y altura) en cada inventario forestal, posteriormente se calcularon las variables secundarias; área basal (ab) y volumen (v), por último, se realizó el cálculo de la biomasa aérea (B) y carbono (C), para ello se utilizaron las siguientes fórmulas:

Ecuación 1. Fórmula de área basal

$$g(ab) = \pi/4 \times DAP^2$$

Donde:

g: Área basal (m^2 / árbol)

DAP: Diámetro a la altura del pecho (m)

(INAB,1999; Russo,2009; Andrade, 2010).

Ecuación 2. Fórmula de volumen

$$v = \pi/4 \times DAP^2 \times h \times ff$$

Donde:

v: Volumen (m^3)

DAP: Diámetro a la altura del pecho (m)

h: Altura total (m)

ff: Factor de forma del árbol (volumen real / volumen aparente)

(INAB,1999; Russo,2009; Andrade, 2010).

Ecuación 3. Fórmula de biomasa

$$B = v \times GE \times FEB$$

Donde:

B: Biomasa (T)

v: Volumen (m^3)

GE: Gravedad específica de la madera (T / m^3)

Pino = 0.415 (T / m^3) y ciprés 0.390 (T / m^3).

FEB: Factor de expansión de biomasa (1.5 equivalente a un 60% adicional contenido en ramas y follaje) (IPCC,2006; Russo,2009; Andrade, 2010).

Ecuación 4. Fórmula de carbono

$$C = B \times 0.5\ (50\%)$$

Donde: C: carbono (T)

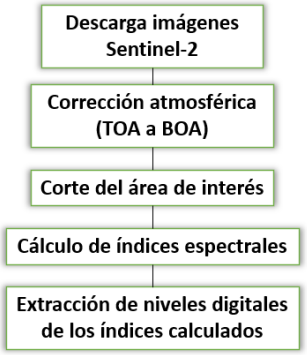
B: biomasa (T)

(IPCC,2006; Russo,2009; Andrade, 2010).

Datos Espaciales

Para la generación de los datos espaciales, se realizó el proceso indicado en la figura 5 en cada imagen satelital seleccionada.

Figura 5. **Proceso para la adquisición de datos ópticos**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft PowerPoint.

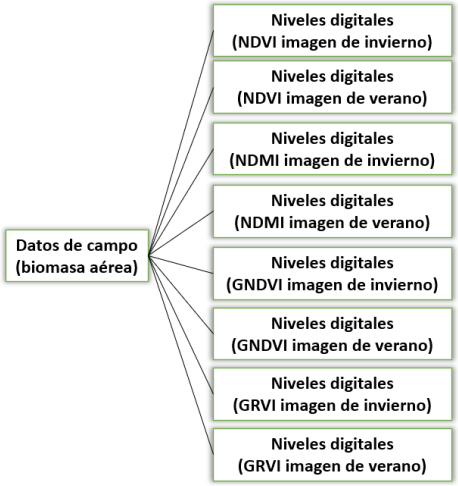
- Se seleccionaron y descargaron las imágenes satelitales.
- La corrección de las imágenes satelitales se llevó a cabo en el software Qgis (plugin *Semi-Automatic Classification*), en el cual se realizó la conversión de los niveles digitales (ND) de reflectancia con Tope de la Atmósfera (TOA) a imágenes de nivel 2C que corresponde a imágenes corregidas atmosféricamente a nivel del suelo (BOA).
- Posteriormente se realizó un corte a cada una de las bandas en función del área de interés (AOI), haciendo uso de la herramienta *Extract By Mask* del software ArcGIS.
- Se calcularon los índices espectrales planteados, mediante la herramienta *Raster calculator* del software ArcGIS, dentro de la cual se introdujo la respectiva ecuación de cada índice espectral propuesto.
- Por último, se extrajo el valor de cada índice, mediante la herramienta de *Extract Multi Values to Points* del software ArcGIS, en función del shapefile de los puntos o parcelas de cada inventario figura 2, los cuales contiene los registros de las variables de biomasa aérea calculada anteriormente.

FASE 4. Estimación y evaluación de modelos de regresión

Estimación de Modelos de Regresión

Para la generación de los modelos se llevó a cabo el análisis de correlación entre los datos de campo (biomasa y carbono) y datos espaciales (niveles digitales) obtenidos de cada índice espectral en las dos épocas del año figura 6. Para evaluar la correlación existente se utilizaron los siguientes coeficientes estadísticos en el software Infostat: Coeficiente de Pearson y Spearman.

Figura 6. **Proceso de la correlación de datos**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft PowerPoint.

Una vez evaluada la correlación existente, se seleccionó un modelo estadísticamente significativo por año, lo que permitió generar su respectivo mapeo y distribución espacial de la biomasa aérea y carbono en el área de estudio, los resultados serán representados en tres categorías en función de *Natural Breakes*.

A continuación, los parámetros utilizados para la correlación:

Coeficiente de Pearson: es una técnica que mide la relación que existe entre dos variables cuantitativas. Los resultados de la correlación se analizan de la siguiente manera:

- Correlación < 0: significa que es negativa, es decir, que las variables se relacionan inversamente.
- Correlación > 0: significa que es positiva perfecta, es decir, que las variables se correlacionan directamente.

- Correlación = 0: significa que no es posible determinar algún sentido de covariación, sin embargo, no significa que no exista una relación no lineal entre las variables.

Ecuación 5. Fórmula del Coeficiente de Pearson

$$P= COV (x,y) / \sigma x \sigma y$$

Coeficiente de Spearman: es una técnica de correlación entre dos variables aleatorias. Para calcular el coeficiente, los datos son ordenados y reemplazados por su respectivo orden. Este coeficiente solo toma valores entre -1 y 1. Los resultados de la correlación se analizan de la siguiente manera:

- r = 0 Ninguna correlación
- r = 1 Correlación positiva perfecta
- 0 < r < 1 Correlación positiva
- r = -1 Correlación negativa perfecta
- -1 < r < 0 Correlación negativa

Ecuación 6. Fórmula del Coeficiente de Spearman

$$r_s = 1 – (6 \Sigma d^2 / n (n^2 -1))$$

Evaluación de Modelos de Regresión

Una vez realizado el análisis de correlación y generados los mapas de biomasa en función de cada modelo de regresión estadísticamente significativo, los cuales corresponden a tres modelos, ya que se seleccionó uno por año. Para la evaluación de los modelos de regresión para la estimación de biomasa aérea

y carbono, se utilizaron los puntos o parcelas de validación, para evaluar las cantidades resultantes, se utilizó el Error medio cuadrático (RMSE).

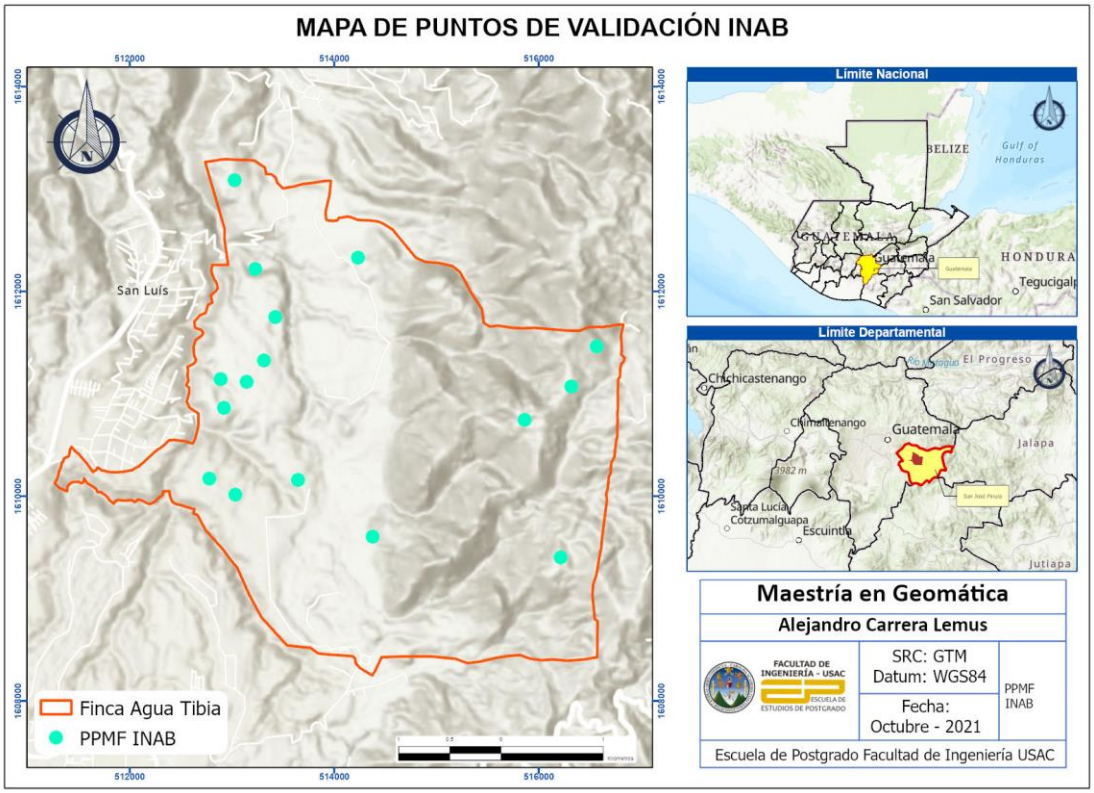
Error medio cuadrático (RMSE): es una técnica que mide la cantidad de error existente entre dos conjuntos de datos. Es decir, compara un resultado predicho y un resultado observado o conocido.

Ecuación 7. Fórmula de error medio cuadrático

$$RMSE = \sqrt{\Sigma^{n}_{i=1}(P_i-O_i)^2 / n}$$

Para finalizar la fase de validación, se contó con una segunda comparación, la cual consiste en evaluar la correlación (R^2) existente de 16 PPMF proporcionadas por el INAB y los valores del modelo significativo, a continuación, se muestra la distribución de las PPMF.

Figura 7. **Parcelas permanentes de medición forestal INAB**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la biomasa junto con la energía solar han sido fuentes de energía utilizadas por la humanidad, con el transcurrir del tiempo ha llegado la revolución industrial y la biomasa pasa a estar en un segundo plano para resolver otras necesidades básicas de la vida cotidiana del ser humano.

La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. El uso de biomasa forestal provenientes de masas boscosas son una fuente de energía renovable que no provoca incremento en los niveles de CO_2 en la atmósfera, puesto que las emisiones que se producen son captadas nuevamente por los árboles una vez retirado en el ciclo de la fotosíntesis. Hoy en día los bosques son sin duda un pilar importante para conocer y comprender las funciones ecológicas que aportan al ser humano y al medio ambiente, así mismo también se considera que la biomasa forestal es un importante reservorio de carbono y que esto a su vez presenta relación en la mitigación del cambio climático.

En la actualidad, en el país se cuantifica la biomasa a través de métodos directos catalogados como destructivos en algunos sectores, así mismo también se cuenta con investigaciones que promueven la estimación de biomasa mediante el uso insumos espaciales.

Existen otras causas que están relacionadas a las alternativas anteriormente mencionadas, como por ejemplo la falta de conocimiento en técnicos de campo para llevar a cabo acciones de solución a través de los Sistemas de Información Geográfica, que a su vez está relacionado con la falta

de inversión proveniente del mismo desinterés o desconocimiento en los productos y subproductos que se pueden obtener con la teledetección.

Es por esto que, la presente investigación tiene como idea principal el aportar todos los elementos posibles que permitan replicar y hacer uso de sensores remotos de mediana resolución y acceso libre para la estimación de biomasa aérea en plantaciones forestales y con esto generar algunos beneficios como lo son: aporte investigativo para el país, contar con un método indirecto para la estimación de biomasa forestal, participación en servicios ambientales como los bonos de carbono, reducir la aplicación de métodos directos destructivos y sobre todo combatir en la lucha contra el cambio climático que son unos de los objetivos que se buscan alcanzar en el año 2,030 a nivel mundial, principalmente por ser una de las fincas que actúa como generador de oxígeno para el departamento de Guatemala.

La presente investigación aporta una metodología práctica y replicable con un enfoque geomático, que permita a los usuarios efectuar un análisis de la estimación de biomasa aérea en plantaciones forestales de coníferas.

En los primeros capítulos de esta investigación, se abordan los siguientes temas: antecedentes, justificación, alcances y marco teórico (silvicultura, biomasa, teledetección, generalidades del satélite Sentinel-2 e índices espectrales), los cuales dan un sustento tanto investigativo como técnico para llevar a cabo la metodología planteada.

En los capítulos finales de este documento, se abordan los resultados, discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones, en función del método indirecto planteado en la presente investigación.

1. ANTECEDENTES

En la actualidad el aprovechamiento del uso de la biomasa repercute en la transformación de la misma para obtener bienes de consumo, beneficio como fuente energética, disminución al efecto de gas invernadero, por lo que ha adquirido relevancia en temas ambientales, sociales y económicos, ante la lucha contra el cambio climático, debido a que juega un papel importante en la dinámica en áreas con bosques.

Los bosques desempeñan un rol fundamental en el ciclo del carbono a nivel global, dado que con el pasar de los años estos son los encargados de absorber parte de CO_2 de la atmósfera terrestre, lo que da lugar a que una porción de este carbono se almacene en forma de biomasa forestal, esta fuente de energía al ser aprovechada repercute en múltiples beneficios por lo que es importante abordar la forma en que es estimada.

En la actualidad, para el cálculo de biomasa es más común la aplicación de ciertas alternativas consideradas como destructivos y poco rentables, pero debido al deterioro que ha sufrido el medio ambiente y el aprovechamiento del crecimiento exponencial que ha tenido la tecnología implica una inminente transición al uso de métodos indirectos, más prácticos y económicos para estimar biomasa forestal, por lo que se recurre a la información geoespacial para generar información de interés.

Lo mencionado anteriormente se relaciona con la investigación en curso ya que con la misma se pretende estimar la biomasa aérea en plantaciones de coníferas (*Pinus maximinoi* y *Cupressus lusitanica*) ubicadas en una finca

agroforestal de Agua Tibia en el municipio de San José Pinula departamento de Guatemala, para ello se evalúa un método indirecto que pueda ser replicado de manera práctica y confiable mediante el uso de imágenes satelitales de acceso libre.

En Guatemala a nivel nacional Gómez (2017), se llevó a cabo el mapa de estratos de carbono como parte del proyecto REDD+, el cual tiene como objetivo principal estratificar áreas con contenidos de carbono en bosques naturales de acuerdo a precipitación y temperatura utilizando información de parcelas de inventarios forestales a nivel nacional. Para ello se utilizó, información de inventarios correspondientes a bosques naturales, datos de sensores remotos en cuanto a las variables de precipitación y temperatura e información de los estudios de *Guatecarbon y Bosques para la Vida* FDN-CONAP (2016), la clasificación de estratos fue en base a los límites de las zonas ombrótermicas (temperatura y precipitación). El cálculo de biomasa fue obtenido mediante tres ecuaciones alométricas (según el tipo de especie), dos de estas estandarizadas por la Universidad del Valle de Guatemala - UVG (2015) y William Arreaga (2002), la cuantificación de biomasa contempla tanto la proporción sobre el nivel del suelo como subterránea, posteriormente para el cálculo de carbono almacenado se utilizó el factor de expansión del IPCC (2006). Previo al proceso anterior se realizaron pruebas de normalidad y pruebas no paramétricas, como resultado final se obtuvieron cuatro estratos a nivel nacional; I:122.1 TC/ha, II:101.73 TC/ha, III:97.1 TC/ha y IV:125.2 TC/ha. Inmerso a este antecedente, con el apoyo de instituciones que conforman el GIMBUT y con el acompañamiento del proyecto REDD+, se realizaron actividades a nivel nacional como lo son: 1. Ejecución de los inventarios nacionales de cobertura forestal; 2. Mapeo de uso de la tierra y 3. Estimaciones de contenido de carbono; elementos que fueron gran apoyo para relacionar los datos de carbono obtenidos de acuerdo a su ubicación espacial y uso de la tierra.

De acuerdo a las referencias Escobar (2016); Orellana (2012); Marroquín (2017), se ha logrado identificar como han ido evolucionando las metodologías enfocadas al cálculo de biomasa y carbono, uno de los métodos que se ha empleado consiste en generar índices de vegetación para luego establecer parcelas y con ello calcular la biomasa existente en esas áreas de estudio, así mismo también se ha hecho uso de ecuaciones alométricas específicas para ciertas regiones en otras investigaciones como Aguas (2016); Martínez (2016); Acosta (2017) luego se lograron identificar algunas metodologías en las cuales se plantea el método de clasificación supervisada haciendo uso del satélite Landsat para clasificar un cierto número de categorías y calcular la biomasa por cada categoría, por último, se logró identificar las metodologías Mendoza (2018); Perea (2018); Tovar (2018); Valdivia (2020) que emplean las imágenes del satélite de mediana resolución en conjunto con ecuaciones alométricas, para correlacionar índices espectrales con los datos de variables registradas en los inventarios forestales.

En México Escobar (2016), realizó una investigación cuantitativa en el área de Sierra de San Miguelito, el objetivo fue evaluar los siguientes índices de vegetación; NDVI, IAF y SAVI, haciendo uso de imágenes Landsat 5 y 8 en los años 1987, 1996 y 2014, esto para la cuantificación de biomasa. Los resultados y conclusiones evidenciaron que la implementación de imágenes de *Satélite Landsat* es una opción viable para cuantificar biomasa utilizando como referencia el índice NDVI a nivel regional.

En el trabajo realizado por Orellana (2012), se planteó una investigación en la que se utilizó la teledetección empleando el método de *Clasificación supervisada*, con el objetivo de clasificar los principales usos de cobertura vegetal con el uso del software Erdas, para ello los insumos utilizados fueron imágenes Landsat TM al año 2011 y las unidades experimentales corresponden a 367,

obteniendo así 7 categorías resultantes en la zona núcleo del parque nacional en los cuales se calculó la cantidad de biomasa y carbono mediante modelos alométricos.

Haciendo énfasis en el uso de métodos indirectos, Marroquín (2017) llevó a cabo su investigación en las áreas de Saltillo, Coahuila, Cuauhtémoc y El Recreo, en el estudio se estimó biomasa aérea en las especies de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*, se utilizó el método indirecto *Adelaide*, el cual consiste en muestrear individuos representativos. Las unidades experimentales corresponden a 50 individuos por especie, las variables correlacionadas fueron diámetro y altura, para determinar el R^2. Los resultados evidenciaron que la variable que mejor predice la biomasa corresponde al diámetro, presentando así un R^2 de 0.86 para la especie del *Pinus cembroides* y un R^2 de 0.79 para la especie de *Pinus halepensis*.

En Antioquia Colombia, Aguas (2016) efectuó un estudio de tipo experimental correlacional en los bosques del altiplano norte y en bosques tropicales, para la estimación de biomasa se realizó una correlación entre la información recolectada de inventarios que contienen las principales variables dasométricas y de índices de vegetación (NDVI, SAVI y GEMI) generados a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI, para la determinación y validación del mejor modelo. Los resultados indican que no existe una correlación significativa de la biomasa aérea calculada con ecuaciones alométricas para bosques de robledales del altiplano norte de Antioquia.

Otro antecedente de importancia corresponde a Martínez (2016), quien realizo un trabajó en bosques con un rango de edad (5-60 años) en El Estado de Durango, México. En este trabajo se manejaron datos espectrales obtenidos del sensor Landsat TM para la cuantificación de biomasa/carbono arbóreo aéreo. Por

su parte, se utilizó una regresión lineal múltiple que analiza las variables de campo con los datos satelitales. El estudio confirmó que existe una correlación significativa entre las variables de campo e índices espectrales (NDVI), los modelos estadísticamente significativos presentan un RMSE = 54.74 mg/ha en cuanto a biomasa, y en cuanto a carbono un RMSE = 26.87 mg/ha.

Acosta (2017), quien realizó un análisis de la correlación existente entre las variables dasométricas de Área basal (ab), el Volumen (v) y la Biomasa (B) obtenidas de un Inventario Forestal y datos espectrales del sensor ETM de Landsat 7, el estudio se efectuó en la Región suroeste del río Balsas del estado de México. Según los resultados, demostraron que utilizando como variable predictora la banda infrarrojo medio, se obtienen las siguientes cifras de correlación; R^2 de 0.52 en área basal, 0.54 en volumen y 0.60 para biomasa.

El investigador Mendoza (2018) determinó carbono aéreo haciendo uso de imágenes satelitales Sentinel-2 e información del Diámetro (DAP) de 30 individuos Pino de edades de; 7, 10 y 20 años, esto en el Distrito de Luya Viejo, Amazonas, en el norte de Perú. Los datos fueron obtenidos en base a una ecuación alométrica. Posteriormente a través del software ENVI 5.3, se extrajeron los valores digitales registrados por cada pino correspondiente a la imagen, en la que se analizaron las bandas; azul, verde, rojo, e infrarrojo. Los resultados evidenciaron que el mejor modelo para estimar el carbono aéreo está en función del índice NDVI, presentado así un R^2 de 0.62.

En Boyacá, Colombia, Perea (2018) ejecutó una investigación en bosques *Alto Andinos del Santuario de Fauna y Flora Iguaque*. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 OLI, para la cuantificación de biomasa aérea y carbono. La muestra corresponde a 23 parcelas de muestreo con un área de 250 m^2, cada una registró la variable de diámetro ≥ 10 cm; la biomasa aérea se estimó

mediante una Ecuación alométrica desarrollada para el área de bosques anteriormente mencionados y se correlacionó con datos de tres índices espectrales (NDVI, EVI y SAVI), generados para la estación lluviosa y seca al año 2016; así mismo también se calculó el carbono en función de la fracción del 50%. Los resultados evidenciaron que existe relación significativa, si se utiliza el índice NDVI en la estación seca, el cual obtuvo un RMSE= 17 T/ha y un R^2 = 0.82.

El trabajo realizado por Tovar (2018), ejecutado en el departamento del Cauca, Colombia en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus grandis* y *Pinus spp*, tuvo como objetivo la cuantificación de biomasa aérea utilizando el algoritmo de Random Forest y regresiones no paramétricas para determinar si existía una relación entre las cantidades obtenidas de campo con los datos de radar (SAR). Los satélites utilizados fueron, Sentinel-1 y Sentien-2A. La muestra corresponde a 23 lotes inventariados. Los resultados indicaron que existe una relación significativa en el uso del algoritmo de Random Forest en función de índices de vegetación con la retrodispersión de Radar como variables predictoras, para la especie de *E. grandis*, se obtuvo con un coeficiente de valor de determinación de 0,273 y un RMSE de 346,62 T/ha y en cuanto a la especie de *P. spp* un R^2 = 0,617 y EMC = 9.025 T/ha.

El último antecedente presentado corresponde a Valdivia (2020), quien realizó una investigación en las fincas en Zihuateutla, Puebla, México, cuyo objetivo fue evaluar la correlación existente para la estimación de biomasa utilizando índices espectrales (NDVI, SAVI, RVI y EVI) y ecuaciones alométricas. La muestra estuvo constituida por 20 parcelas distribuidas en 6 fincas Agrosilvícolas, cada muestra fue geo posicionada mediante la tecnología Field Map, así mismo también se hizo uso de imágenes ópticas Sentinel-2 al año 2019 del mes de febrero, se establecieron. En síntesis, se concluye que el índice que

mejor se adapta corresponde al EVI presentando así un R^2= -0.53 y el índice NDVI con un R^2=0.66.

2. JUSTIFICACIÓN

La realización de la presente investigación se justifica en la línea de investigación de Teledetección aplicada a Medio Ambiente de la maestría en ingeniería geomática de la Escuela de Estudio de Postgrado, Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Debido a la poca importancia en el uso de métodos indirectos sobre la estimación de biomasa aérea y carbono de las masas forestales existentes en el país, se plantea la presente investigación en plantaciones de coníferas.

De acuerdo con datos del sistema SIFGUA del INAB el territorio nacional se divide en las siguientes categorías de proyectos; siendo Bosques Naturales la principal categoría, seguido de las Plantaciones voluntarias y Plantaciones Obligatorias y por último la categoría de Fuentes Semilleras, la biomasa aérea de toda masa forestal es una de las principales reservas de carbono en ecosistemas terrestres, su estimación es de suma importancia para monitorear los contenidos de carbono y así tener una idea de las emisiones que se generan por la deforestación, además de evaluar el potencial de los bosques en el almacenamiento del carbono.

A través de esta investigación se busca obtener un modelo con una correlación estadísticamente significativa mediante datos de campo y un índice espectral generado con las imágenes satelitales de mediana resolución para la estimación de biomasa aérea y carbono en plantaciones forestales.

Para la presente investigación se seleccionaron cuatros índices espectrales (NDVI, GNDVI, NDMI, GRVI) con base a los antecedentes revisados, ya que estos han sido evaluados en otras partes del mundo y han presentado resultados conservadores y alto potencial predictivo de la biomasa. Para el cálculo de área basal, volumen, biomasa aérea y carbono se utilizarán fórmulas dasométricas para árboles en pie según guías técnicas del INAB, así como los criterios aceptados por la IPCC (2006).

El presente método indirecto planteado bajo el contexto investigativo, tecnológico y forestal, permitirá contar con una metodología de acceso libre, además de generar un aporte más en cuanto a las investigaciones ya planteadas en el país, y continuar fomentado el uso de insumos tecnológicos gratuitos que sirvan para la toma de decisiones, tanto en instituciones públicas como privadas.

3. ALCANCES

El producto de la investigación consistirá en la generación de tablas resumen y mapas que caractericen la cantidad de biomasa determinada, a través de una modelo que permita el uso de un índice espectral generado con las imágenes satelitales de Sentinel-2.

3.1. Resultados

Los resultados que se obtengan en la presente investigación van dirigidos directamente a entidades del sector forestal, tanto públicas como privadas, los cuales servirán para la toma de decisiones en su estructura financiera.

3.2. Técnicos

Por otro lado, los resultados obtenidos servirán para la toma de decisiones a grupos técnicos que evalúan la dinámica y disponibilidad de los recursos naturales, así como actividades que incentiven la mitigación del cambio climático como lo son los bonos de carbono.

3.3. Investigativos

Con la elaboración del presente documento se pretende incentivar el uso de la teledetección utilizando imágenes de acceso libre para la estimación de biomasa aérea, así como otras variables que presenten relación con el sector forestal.

4. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hace referencia a la conceptualización y aspectos relevantes que intervienen en el procesamiento, generación y evaluación de un método indirecto para estimación de biomasa aérea.

4.1. Silvicultura

Es una disciplina encargada del manejo del establecimiento, inspección, sanidad, aprovechamiento y regeneración de las masas forestales, para retribuir las diversas necesidades de la corporación o comunidad de una forma sostenible (Juárez, 2014).

4.2. Dasometría

La dasometría es una disciplina que se enfoca en el estudio de mediciones de árboles individuales o masas forestales, así como el análisis de la dinámica que presenta el ciclo forestal, así mismo la dasometría se divide en tres partes:

- Dendrometría: se encarga del estudio de la medición forestal en los distintos componentes del árbol como lo es el diámetro, altura, copa, ramas, corteza y entre otros.
- Estereometría: se encarga del estudio de masas forestales que ocupan un espacio en común.
- Epidometría: se encarga del análisis de masas forestales a partir del punto de vista de crecimiento y producción (Juárez, 2014).

4.3. Variables dasométricas

- Diámetro (DAP): una de las variables más típicas en la dasometría, es el diámetro a la altura del pecho. Como regla general se estableció que el DAP debe ser medido a 1.30 m de altura del suelo (Andrade ,2010).

- Altura (h): la altura es una variable dendrométrica asociada con el diámetro, principalmente para calcular el volumen presente en un árbol tanto en pie como en trozas. Así mismo también es fundamental para el análisis y monitoreo de incrementos volumétricos (ICA, IMA e IPA) (Andrade ,2010).

- Área Basal o área basimétrica (AB): esta variable hacer referencia al área, superficie o extensión que presenta un árbol, se expresa como el área basal total en m^2.

- Factor de forma (ff): el factor fórmico, se obtiene del cociente entre el volumen real y el volumen aparente, este relaciona altura y diámetro (Andrade, 2010).

- Factor de Expansión de Biomasa (FEB): es un factor que permite contabilizar la fracción de biomasa de los fustes, esta fracción corresponde a la biomasa de las hojas, ramas, y raíces (Encinas, 2011).

- Gravedad específica de la madera (GE): la gravedad específica básica o densidad de la madera, es un factor que relaciona la dureza y el peso de la misma, es decir la relación entre masa y volumen (Rodríguez, 2001).

4.4. Pino maximinoi (*Pinus maximinoi*)

A continuación, en la tabla IV se presenta la clasificación taxonómica del *Pinus maximinoi*.

Tabla IV. **Taxonomía del Pino**

Taxonomía	
Nombre científico:	*Pinus maximinoi* H.E. Moore
Nombre Común:	Pino candelillo, Pino llorón, Pino común
Reino:	Plantae
División:	Pinophyta
Clase:	Pinopsida
Orden:	Pinales
Familia:	Pinaceae
Género:	Pinus
Subgénero:	Pinus
Especie:	*P. maximinoi* H.E.MOORE,1966

Fuente: INAB (2017), realizado con Microsoft Excel.

En la tabla V se presentan una breve descripción botánica acerca del *Pinus maximinoi.*

Tabla V. **Descripción botánica del Pino**

Características	
Árbol:	35 m de altura con un diámetro de 40-90 cm
Copa:	Presenta una forma de domo, es densa, con ramas gruesas con un crecimiento verticilado
Corteza:	De color grisáceo café próximo a la copa y de color gris oscuro en la parte basal del árbol
Hojas:	Contiene un promedio de 5 acículas o agujas por fascículo, tienen un tamaño que va de 20-35 cm de longitud, la fase del fascículo es de color café un tamaño que va de 15-25 mm de longitud.
Estróbilos:	Los conos o estróbilos tienen un tamaño que va de 5-9 cm de longitud y un ancho de 4-7 cm

Fuente: INAB (2017), realizado con Microsoft Excel.

Distribución natural: en el país, se puede encontrar en los siguientes departamentos: Guatemala, Alta Verapaz, Baja Verapaz, Quiché, Huehuetenango, Sololá, Sacatepéquez, Santa Rosa, El Progreso, Jutiapa y Jalapa. Fuera de límites nacionales, puede tener presencia en: Honduras, El Salvador y México, hasta la latitud 12°N en Nicaragua.

Lugares de introducción: ha sido evaluada experimentalmente por CAMCORE, en países como: Colombia, México, Honduras, Sur-África, Venezuela, Brasil y Zimbabue (INAB, 2017).

4.5. Ciprés (*Cupressus lusitanica)*

A continuación, en la tabla VI se presenta la clasificación taxonómica del Ciprés.

Tabla VI. **Taxonomía ciprés**

Taxonomía	
Nombre Científico:	*Cupressus lusitanica* Miller
Nombres Comúnes:	Ciprés común, Quisís, Tsicap, Chinchac, Paxaque y Ksis
Reino:	Plantae
División:	Pinophyta
Clase:	Pinopsida
Orden:	Pinales
Familia:	Cupressaceae
Género:	Cupressus
Especie:	*C. lusitanica*
	MILL. 1768

Fuente: INAB (2017), realizado con Microsoft Excel.

En la tabla VII, se presentan una breve descripción botánica acerca del Ciprés.

Tabla VII. **Descripción botánica ciprés**

Características	
Árbol:	20-35 m de altura con un diámetro de 100-120 cm.
Copa:	Presenta una forma piramidal o estrecha de tamaño variable, con ramas pendulosas.

Continuación de la tabla VII.

Corteza:	De color pardo rojizo en la cara externa y de color blancuzca la cara interna.
Hojas:	Contiene hojas imbricadas y opuestas, cuentan con un tamaño que va de 1.3-2 mm de longitud, sus hojas terminales cuentan con un tamaño que va de 6-7 mm de longitud.
Estróbilos:	Las gálbulas o conos femeninos tienen un tamaño que va de 12-15 mm de diámetro, se tornan de color verdeazulado en su etapa de desarrollo y en su epata adulta se tornan rígidas y leñosas de un color café oscuro.

Fuente: INAB (2017), realizado con Microsoft Excel.

Distribución natural: se puede encontrar en los siguientes departamentos: Guatemala, San Marcos, Huehuetenango, Quetzaltenango, Chimaltenango, Sacatepéquez, Baja Verapaz, Alta Verapaz, Zacapa, El Progreso, Jalapa, Totonicapán y Quiché. “Fuera de limites nacionales puede tener presencia en países como: Honduras, El Salvador, Nicaragua, México, Estados Unidos”.
Lugares de introducción: esta ha sido evaluada experimentalmente en países como: Costa Rica, Colombia, Tanzania, Hawái y Nueva Zelanda (INAB, 2017).

4.6. Biomasa

La biomasa es también conocida como bioenergía o biocombustible, es la proporción biodegradable de los productos resultantes y residuos procedentes de

actividades agrícolas y forestales. En el contexto energético la biomasa es un tipo de energía renovable que incluye una parte orgánica de los desperdicios industriales, o bien, procedente del ciclo fotosintético.

Existen 4 tipos de biomasa:

- Biomasa natural: la biomasa natural se produce de modo espontáneo en el medio ambiente, sin la intervención humana. Como, por ejemplo: la acción de podas en bosques.
- Biomasa residual seca: la biomasa residual se obtiene a partir de actividades agrícolas y forestales, así como en las agroindustrias e instalaciones madereras. Como, por ejemplo: el aserrín.
- Biomasa residual húmeda: la biomasa residual húmeda se obtiene a partir de material biodegradable originado por aguas residuales industriales, urbanas y restos ganaderos. Como, por ejemplo: el guano.
- Cultivos energéticos: su principal propósito es generar biomasa transformable en combustible. Por ejemplo, acá se incluyen; las oleaginosas, los cereales, remolacha y los cultivos lignocelulósicos (Orgaz, 2018).

4.7. Biomasa Forestal

Cuando se habla de Biomasa forestal nos referimos a todos aquellos residuos originarios de varios tipos de acciones por parte del ser humano en el entorno del aprovechamiento de bosques, plantaciones y tareas silvícolas, como se menciona anteriormente. Para evadir confusiones y problemas de intereses, es preciso distinguir este tipo biomasa, que es capaz de ser aprovechada por industrias forestales (Agencia extremeña de la energía, 2013).

Los tratamientos silvícolas convencionales (cortas, podas, claras, desbroces, apertura de vías, acciones para la prevención de incendios, etcétera) crean unos residuos, de volumen y condiciones de extracción variables.

En función de las especies forestales existentes en un territorio, se darán restos forestales de uno u otro tipo. La evaluación de los residuos forestales dispersos efectúa anualmente, una cantidad de residuo (kg) por superficie forestal (ha) (Agencia extremeña de la energía, 2013).

Teniendo esto en cuenta, se contemplan las siguientes fracciones de biomasa:

- Fuste
- Ramas (diámetros variados)
- Hojas

4.8. Cambio Climático

El clima no ha sido estable con el paso del tiempo, al contrario, los antecedentes climáticos manifiestan notoriamente las diferenciaciones del clima en una vasta escala en función de una serie temporal. La dinámica del clima se puede analizar en dos escalas; La primera escala que está en función de un intervalo de tiempo relativamente pequeño, por ejemplo, en meses.

La segunda escala está en función de un intervalo de tiempo mayor, es decir de varios siglos, por ejemplo, las eras, lo que nos lleva hasta el siglo actual (XXI) en el que se manifiesta un periodo más cálido y es el que preside en nuestros días.

En la recta final del siglo XX y lo que va del siglo XXI se ha mostrado uno de los periodos más cálidos junto con una temperatura media de la Tierra, ha adquirido los registros más altos de los últimos 130,000 años. “Informes del IPPC (2007), valoran que la tasa de calentamiento promedio de los últimos 50 años es de 0,13ºC por década (siendo casi el doble al promedio de los últimos 100 años)” (Ballesteros,2007,1).

4.9. Dióxido de Carbono

El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los gases traza más usuales y notables tanto para el sistema atmósfera, océano y Tierra, uno de los más importantes en cuanto al efecto invernadero (GEI), asociado a las acciones del ser humano y el segundo más importante en cuanto al problema del Calentamiento global detrás del vapor de agua, principalmente se debe por acciones antropogénicas y naturales (Ballesteros, 2007).

En el ciclo original del carbono, el CO_2 adquiere un rol vital en un amplio número de procesos biológicos. Con relación a las actividades antropogénicas el CO_2 se emite esencialmente, por el uso de combustibles fósiles y sus derivados, entre otros como la leña para concebir energía, por acción de talas e ignición de bosques, según la FAO, la principal acción de deforestación en América Latina, se le atribuye al avance de la frontera agrícola (Ballesteros, 2007).

4.10. Teledetección Forestal

La preocupación por parte de un porcentaje de población mundial va en aumento con el trascurrir del tiempo, por la insuficiencia progresiva de los recursos naturales, así como el deterioro que ha perpetrado el ser humano en el medio ambiente a través de sus decisiones y actuaciones de manera irracional,

que trae consigo la indispensable necesidad de contar con un mejor panorama de su entorno en el cual se desarrolla.

El cuidado del medio ambiente debe ser mayor, ya que esta cualidad promoverá una disminución en los impactos resignados por el medio hasta la actualidad. Los antecedentes originados por parte de la disciplina conocida como Teledetección son de gran importancia en el cumplimiento de los objetivos inicialmente mencionados. (Sacristán, 2006).

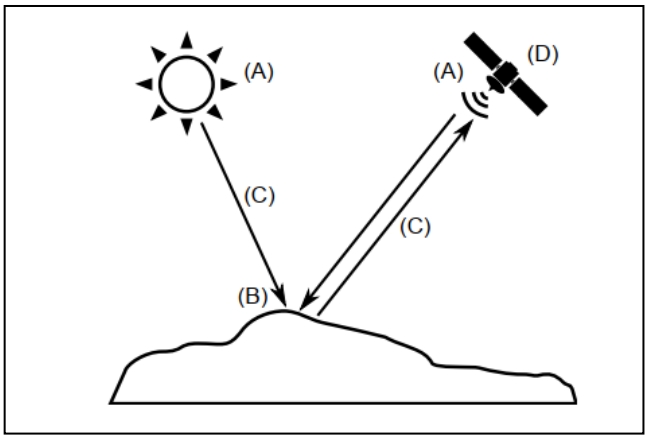
Una de las aplicaciones de importancia en la teledetección, consiste en la teledetección forestal, la cual lleva a cabo el monitoreo y estudio de masas forestales, lo que permite conocer el estado de degradación de los bosques, así como la dinámica de los bosques en cuanto sus emisiones de biomasa.

4.11. Teledetección

La teledetección es la disciplina que se encarga de adquirir información y estudiar los rasgos de los objetos de interés, dispuestos en la superficie terrestre, sin necesidad del contacto físico, es decir mediante la detección a distancia con la ayuda de una plataforma espacial (Chuvieco, 1995).

Existen algunos elementos fundamentales en la teledetección los cuales se definen en la figura 8:

Figura 8. **Elementos de la teledetección**



Fuente: Olaya (2020). *Sistemas de Información Geográfica.*

- Fuente de radiación (A): la fuente puede ser de origen natural o artificial. La función de la fuente es emitir la radiación hacia el terreno que a su vez sufre una transformación causada por los objetos existentes en la superficie, en donde dicha transformación es el ente de estudio de la teledetección (Olaya, 2020).

- Objetos (B): son los cuerpos que entran en contacto con la radiación o que también la emiten.

- Atmósfera (C): es el espacio en el que se dispersa e interactúa la radiación, esta recorre desde la fuente al objeto como del objeto hasta el receptor.

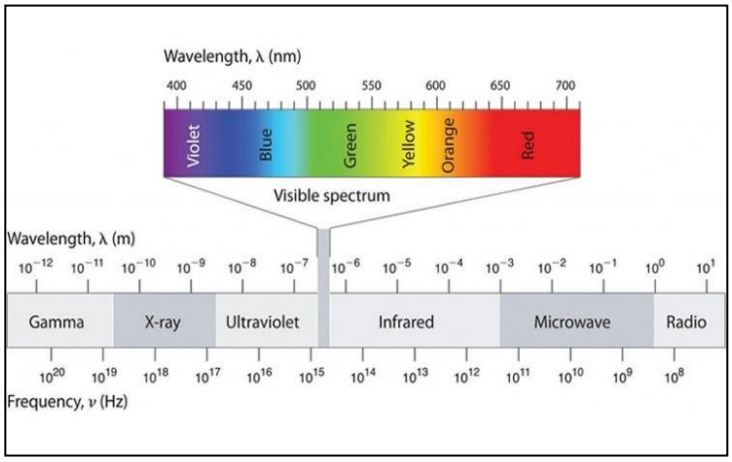
- **Receptor (D):** es el que almacena la radiación, después de ser emitida por los objetos. El receptor crea como producto final una imagen o también conocida como capa ráster, constituida por píxeles o celdas (Olaya, 2020).

4.12. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética procede del campo electromagnético, el cual está en función de las partículas cargadas eléctricamente y magnéticamente que se dispersan en el espacio.

Como se muestra en la figura 9, la radiación electromagnética puede representar de manera continua un vasto rango de valores de longitudes de onda (Olaya, 2020).

Figura 9. **Rangos de longitud de onda**



Fuente: Olaya (2020). *Sistemas de Información Geográfica.*

4.13. Sensores y plataformas

Dentro de la disciplina de la teledetección, existen dos elementos especializados que lo definen a la misma:

- La plataforma: es la base en la que se ubica el sensor y a partir del cual se efectúa la observación. Existen dos tipos importantes de plataformas; las que se utilizan en la atmósfera terrestre; aviones, globos aerostáticos,

entre otros y las que se encuentran en la atmósfera; satélites (Olaya, 2020).

- El sensor: es el dispositivo que integra la capacidad de leer y captar la radiación electromagnética y registrar su intensidad de acuerdo a su rango del espectro, estos se dividen en dos; sensores activos y pasivos (Olaya, 2020).

4.14. Imagen satelital

Puede ser definida como un producto resultante de la información registrada por un sensor colocado en una plataforma (satélite). Una imagen satelital está compuesta por un grupo de celdas de igual tamaño, denominados pixeles, que se encuentran constituidos por filas y columnas, que contienen un valor numérico o número digital (Olaya, 2020).

4.15. Resoluciones

Estas determinan el nivel de detalle con el que cuentan los productos resultantes o imágenes satelitales, las resoluciones varían en función de la plataforma y el sensor. Existen cuatro tipos de resoluciones, los cuales se detallan a continuación:

- Resolución espacial: hace referencia a la extensión del objeto más pequeño que puede diferenciarse en la imagen, es decir el tamaño del pixel.

- Resolución espectral: esta resolución es proporcional al número de bandas, es decir si la cantidad de bandas es alta, su resolución será alta,

ya que cada banda ocupará un rango de frecuencias de mínima amplitud por lo que cubrirá distintas longitudes de onda (Olaya, 2020).

- Resolución radiométrica: esta resolución está definida por el número de niveles digitales (grises) para expresar la información almacenada en cada una de las bandas que contempla un sensor.

- Resolución temporal: esta resolución específica el tiempo en el cual el satélite tarda volver a tomar una imagen de un mismo punto, específicamente en el caso de satélites orbitales, que trabajan por ciclos, que al finalizar estos vuelven a iniciar la adquisición de imágenes en un mismo punto (Olaya, 2020).

4.16. Generalidades del satélite Sentinel-2

La misión Sentinel-2 es producto de la ESA del programa Copérnico. La misión está diseñada para un ciclo de adquisición de 5 días. El satélite nombrado Sentinel-2A (lanzado el 23 de junio del 2015) y satélite nombrado Sentinel-2B (lanzado el 7 de marzo del 2017).

La misión abarca una posición de 180° entre satélites, con una cobertura de 290 km de ancho de franja, y provee un ciclo de adquisición de 5 días individualmente y 10 días de manera conjunta, esto en condiciones libres de nubes (Comisión Europea-Copernicus, 2018).

4.17. Resoluciones

A continuación, se muestra una breve reseña de las resoluciones correspondientes a la misión de Sentinel-2:

- Resolución temporal: el tiempo de adquisición (10 días) con dos satélites respectivamente y de manera individual un tiempo de adquisición de 5 días.

- Resolución espacial: tanto el satélite Sentinel-2A como Sentinel-2B, tiene incorporado un sensor óptico multiespectral (*MSI-Multispectral Instrument*) que almacena datos a través de 13 bandas espectrales. A continuación, se detalla su resolución espacial:
  Bandas a 10 m (4): b-2, b-3, b-4 y b-8.
  Bandas a 20 m (6): b-5, b-6, b-7, b-8a, b-11 y b-12.
  Bandas a 60 m (3): b-1, b-9 y b-10.

- Resolución radiométrica: en cuanto a la resolución radiométrica Sentinel-2, esta corresponde a 12 bits, lo que admite imágenes con una profundidad de pixel con valores (0 - 4,095).

- Resolución espectral: en cuanto a la resolución espectral, los satélites de Sentinel-2 contienen 13 bandas espectrales que a su vez presenta una longitud de onda central expresado en micrómetros (Comisión Europea-Copernicus, 2018).

4.18. Nivel de productos del satélite Sentinel-2

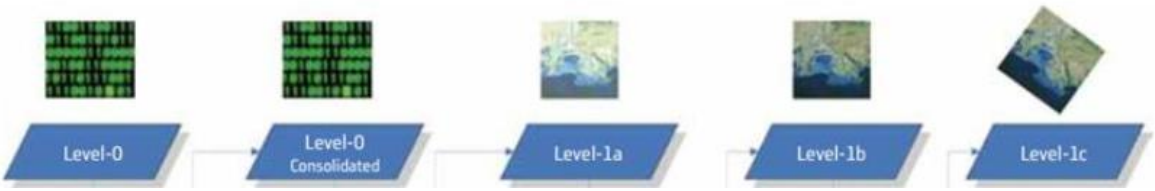
A continuación, en la tabla VII y figura 10 se detallan los productos de Sentinel-2 divididos en 5 niveles de procesamiento:

Tabla VIII. **Niveles de los productos de Sentinel-2**

Nivel del producto	Tipo de datos	Dimensión del producto	Peso de almacenamiento
0	Datos crudos (comprimidos)	-	-
1A	Datos crudos (sin comprimir)	-	-
1B	Dato con corrección radiométrica	25*23km	23 megabytes
1C	Datos con valores a tope de la atmosfera (TOA) y ortorectificados (proyección UTM-WGS84)	100*100km	600 megabytes
2A	Datos con corrección atmosférica (BOA) y ortorectificados (proyección UTM-WGS84)	100*100km	800 megabytes

Fuente: elaboración propia, a partir de nivel de productos de Comisión Europea-Copernicus, 2018.

Figura 10. **Niveles de los productos de Sentinel-2**



Fuente: Comisión Europea-Copernicus (2018). *El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial.*

4.19. Nomenclatura de los Productos de Sentinel-2

A continuación, la nomenclatura de los productos de Sentinel-2: MMM_MSILNN_YYYYMMDDHHMMSS_Nxxyy_ROOO_Txxxxx_<Product Discriminator>. SAFE (Comisión Europea-Copernicus, 2018).

Tabla IX. **Nomenclatura de una imagen de Sentinel-2**

Atributo	Significado
MMM	Identifica la misión-satélite (S2A / S2B).
MSI	Identifica el sensor
LNN	Identifica el nivel del producto (1C/2A).
YYYYMMDDHHMMSS	Identifica la fecha de adquisición y el año, mes, día y hora de apertura de la "detección del Datatake".
Nxxyy	Identifica el número de la línea de base de procesamiento.
ROOO	Identifica el número de órbita relativa (R001 - R143).
Txxxxx	Representa el código de identidad de la tile.
<Product Discriminator>	Permite diferenciar los productos para usuarios finales, este campo tiene preestablecido una longitud de 15 caracteres.
SAFE	Formato estándar del producto para Europa

Fuente: elaboración propia, a partir de nomenclatura de imágenes Sentinel-2.

4.20. Índices espectrales

Los sistemas satelitales que observan la Tierra brindan imágenes multitemporales, estas se emplean para monitorear y evaluar las etapas de la vegetación. Para alcanzar esto, la información digital contenida en una imagen satelital, debe ser agrupada, categorizada y procesada, para distinguir una superficie con particularidades distintivas de otra, una manera de mostrar esta categorización es mediante el cálculo de índices espectrales (Muñoz, 2013).

Al discutir acerca de índices, nos referimos a un grupo de operaciones algebraicas realizadas sobre los niveles digitales de cada pixel, utilizando dos o más bandas correspondientes a un set de datos. Un índice espectral es un parámetro que está en función de la reflectancia, relacionada con la cubertura vegetal. La escala de cada uno de estos presenta valores tanto positivos como negativos, es decir que los valores mayores a cero significan que existe una mayor cobertura de vegetación mientras que por el contrario significa que no hay presencia de cobertura vegetal. Existen ciertos índices espectrales, que permiten distinguir entre vegetación, suelo y agua, a través determinación espectral de las distintas coberturas (Muñoz, 2013).

4.21. Índice de vegetación de la diferencia normalizada

NDVI: es un índice que relaciona la reflectancia entre las bandas de infrarrojo cercano (NIR) y la banda roja (RED), los valores altos corresponden a áreas que reflejan más en el infrarrojo cercano por lo que un mayor porcentaje de reflectancia indica una vegetación más densa y saludable. Su función está asociado a la cobertura vegetal es decir la densidad y salud de la vegetación existente, esto quiere decir que los valores altos incumben a áreas del espectro del infrarrojo cercano (GU, 2019).

4.22. Índice de vegetación de la diferencia normalizada verde

GNDVI: es un índice modificado del NDVI, relaciona la reflectancia entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y la banda verde (GREEN), ya que este índice es una modificación del NDVI, sus valores altos son más sensibles al contenido de clorofila los cuales corresponden a áreas que reflejan más en el infrarrojo cercano por lo que un mayor porcentaje de reflectancia en relaciona a la banda verde indica una mayor actividad fotosintética. Se utiliza para estimar el contenido de clorofila o la actividad fotosintética (Gitelson *et al.* 1996).

4.23. Índice de diferencia normalizada de humedad

NDMI: este índice se obtiene de la relación entre las bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR) y la banda del infrarrojo cercano (NIR), el área en el espectro del infrarrojo de onda corta es sensible al contenido de agua de la vegetación, mientras que la banda del infrarrojo cercano registra la reflectancia de la estructura interna de la hoja, por lo que, combinadas, la interpretación de los datos sobre el contenido de agua de la vegetación es mucho mayor. Principalmente se utiliza para estimar el contenido de agua de la vegetación (USGS, 2019).

4.24. Índice de vegetación verde

GRVI o GVI: este índice relaciona la reflectancia entre la banda verde (GREEN) e infrarrojo cercano (NIR), ya que ambas bandas presentan sensibilidad al estado de la vegetación la relación de ambas bandas permite registrar la reflectancia del verdor de la cobertura vegetal. Su función es analizar la densidad y estado de la vegetación (L3HARRIS GEOSPATIAL, 2021).

Tabla X. **Índices espectrales utilizados**

Índice	Ecuación	Fuente
NDVI	(NIR – RED) / (NIR + RED) (B8 – B4) / (B8 + B4)	GU, 2019
GNDVI	(NIR-GREEN) /(NIR+GREEN) (B8 – B3) / (B8 + B3)	Rahman, M. M, Robson. A. J, 2016
NDMI	(NIR – SWIR) / (NIR + SWIR) (B8 – B11) / (B8 + B11)	USGS, 2019
GRVI	(NIR) / (GREEN) (B8 / B3)	L3HARRIS GEOSPATIAL, 2021

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

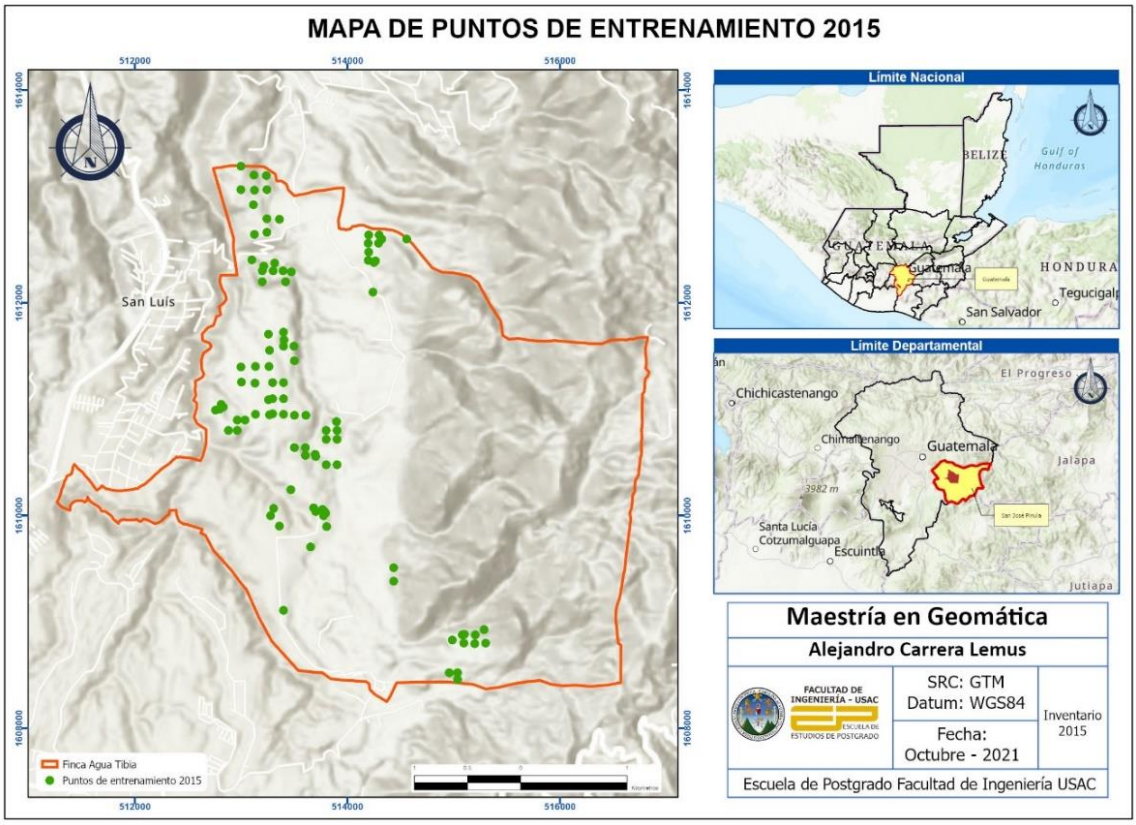
5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de los modelos estadísticamente significativos, generados para la estimación de biomasa aérea, en el cual se presentarán las correlaciones y evaluaciones realizadas.

5.1. Correlación de datos de campo e índices espectrales año 2015

En la figura 11 se presenta la localización espacial de los puntos de entrenamiento correspondientes al año 2015, los cuales contienen la cantidad de biomasa obtenida (T/ha) a partir de datos en campo.

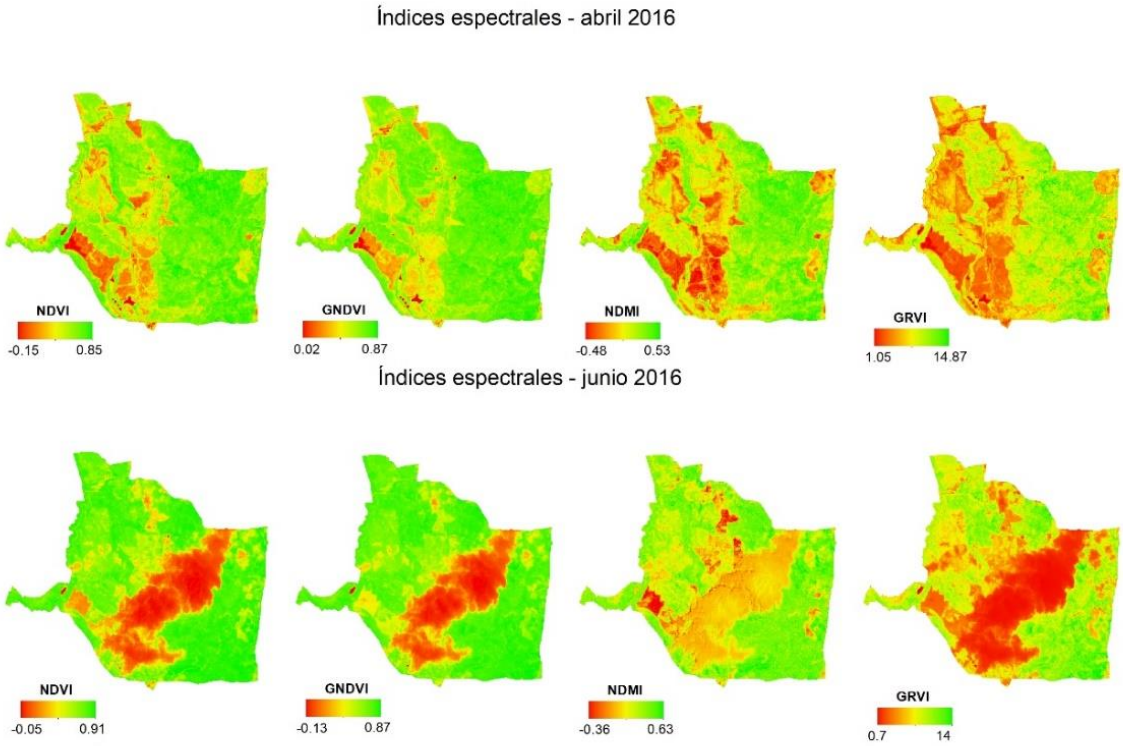
Figura 11. **Puntos de entrenamiento 2015**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

En la figura 12, se muestra el comportamiento de los índices espectrales (NDVI, GNDVI, NDMI y GRVI) tanto para época seca (abril) y época lluviosa (junio), como se puede observar en las escalas de cada uno de los índices se presentan valores superiores a cero en la mayoría de la superficie del área de estudio, lo que indica la presencia de cobertura vegetal, para el análisis del año 2015 fue necesario utilizar imágenes del año 2016, esto por la fecha de adquisición de las imágenes.

Figura 12. **Índices espectrales 2016 en época seca (abril) y época lluviosa (junio)**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

Para la generación y selección del modelo estadísticamente significativo fue necesario correlacionar los datos de campo y los valores de los niveles digitales extraídos de cada uno de los índices espectrales anteriormente mencionados, para ello se utilizaron los coeficientes de Pearson y Spearman, los resultados se detallan en las tablas XI y XII.

Tabla XI. **Resultados de la correlación de Pearson año 2015**

Época	Correlación	Seca					Lluviosa			
		Biomasa (T/ha)	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**
	Biomasa (T/ha)	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Seca	NDVI	0.62	1	-	-	-	-	-	-	-
	GNDVI	0.62	0.95	1	-	-	-	-	-	-
	NDMI	0.59	0.91	0.86	1	-	-	-	-	-
	GRVI	0.64	0.93	0.98	0.86	1	-	-	-	-
Lluviosa	NDVI	0.34	0.34	0.33	0.35	0.35	1	-	-	-
	GNDVI	0.32	0.33	0.33	0.35	0.35	0.98	1	-	-
	NDMI	0.42	0.55	0.54	0.59	0.55	0.83	0.78	1	-
	GRVI	0.45	0.46	0.49	0.48	0.52	0.92	0.93	0.83	1

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat y Microsoft Excel.

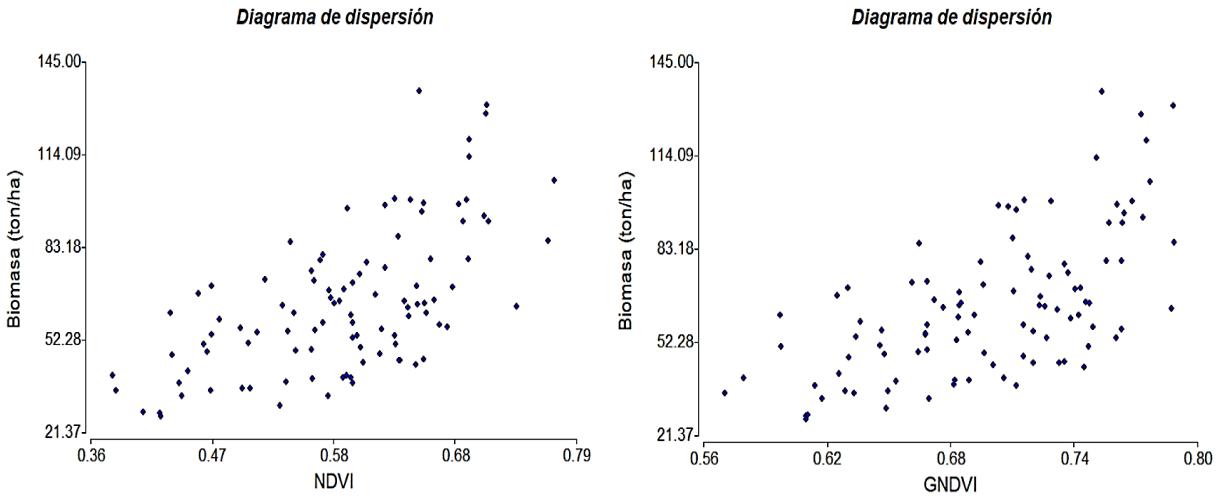
Tabla XII. **Resultado de la correlación de Spearman año 2015**

Coeficiente de Spearman										
Época	**Correlación**	**Seca**					**Lluviosa**			
		Biomasa (T/ha)	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**
	Biomasa (T/ha)	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Seca	NDVI	0.60	1	-	-	-	-	-	-	-
	GNDVI	0.60	0.94	1	-	-	-	-	-	-
	NDMI	0.58	0.9	0.85	1	-	-	-	-	-
	GRVI	0.60	0.94	1	0.85	1	-	-	-	-
Lluviosa	NDVI	0.43	0.43	0.45	0.42	0.45	1	-	-	-
	GNDVI	0.44	0.47	0.51	0.48	0.51	0.96	1	-	-
	NDMI	0.47	0.57	0.57	0.61	0.57	0.87	0.85	1	-
	GRVI	0.44	0.47	0.51	0.48	0.51	0.96	1	0.85	1

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat y Microsoft Excel.

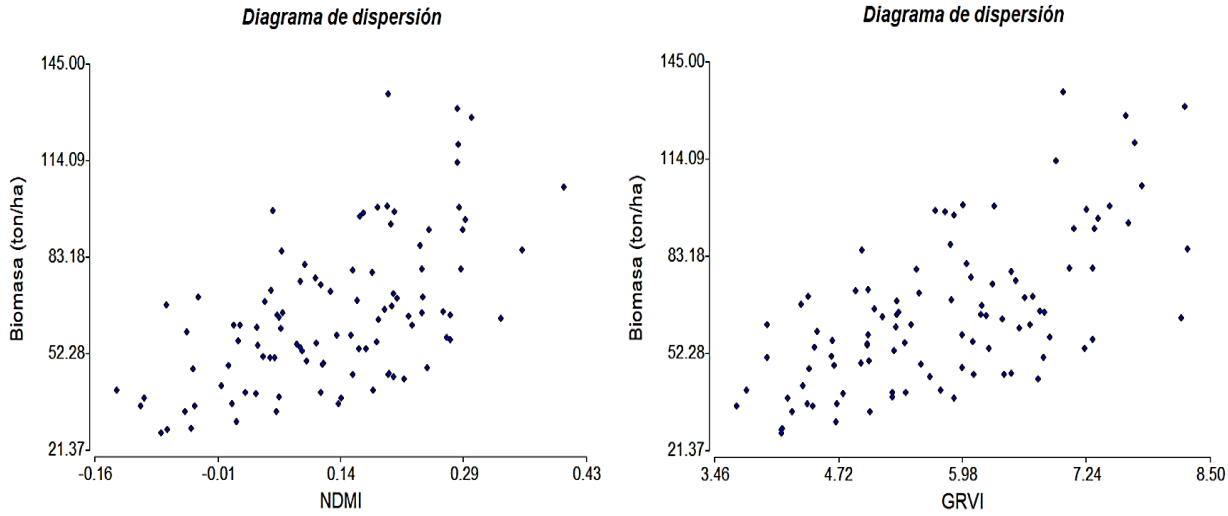
A continuación, en las figuras 13 y 14 se muestra la distribución y tendencia existente entre los datos de biomasa de campo y valores de los índices espectrales en época seca (abril).

Figura 13. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época seca 2015**



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

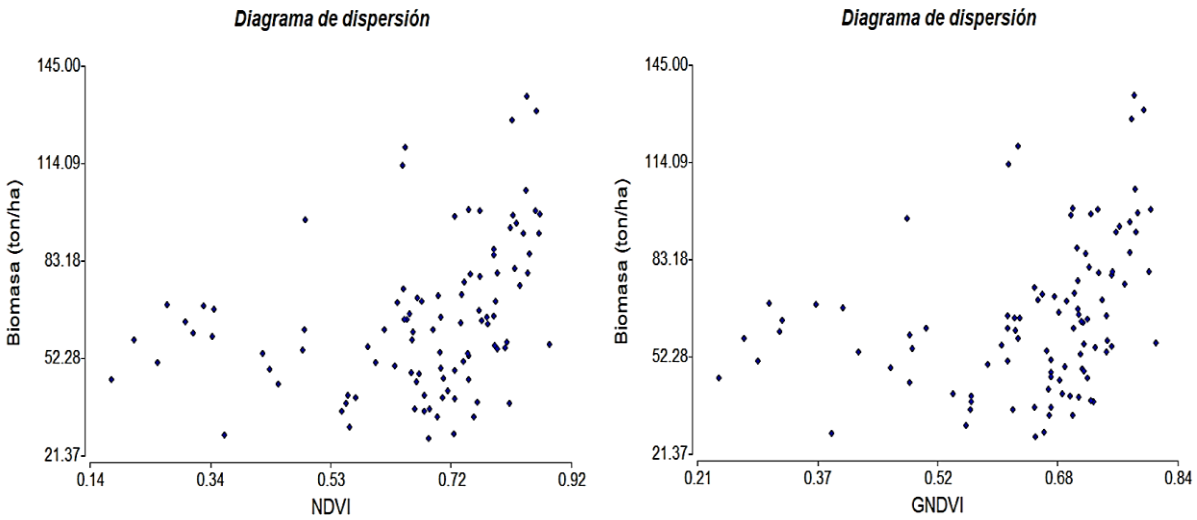
Figura 14. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época seca 2015**



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

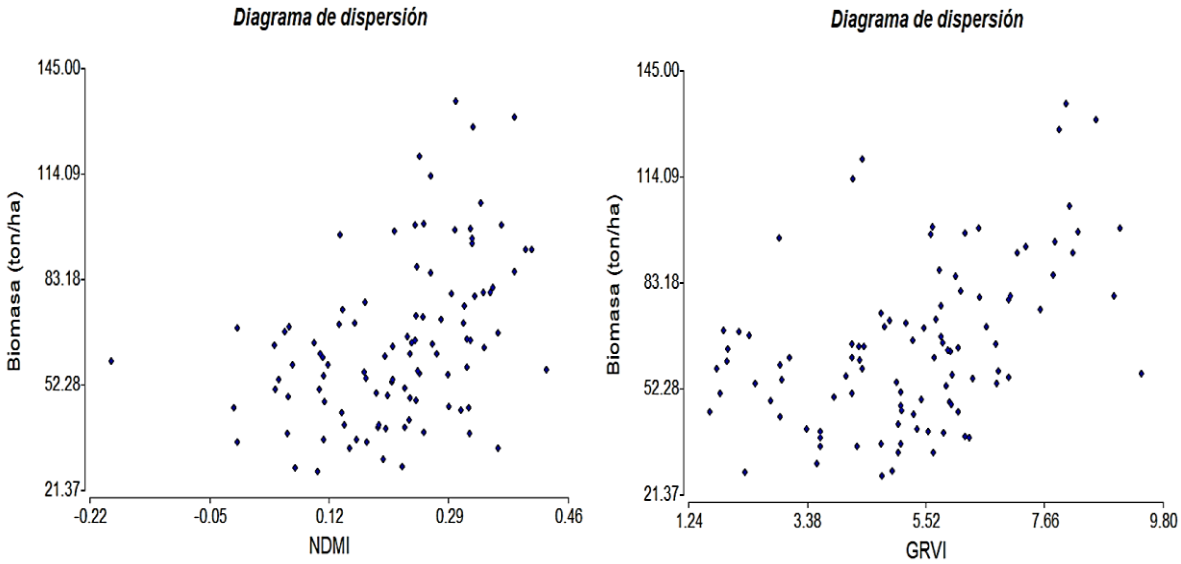
Posteriormente, en las figuras 15 y 16 se muestra la distribución y tendencia existente entre los datos de biomasa de campo y valores de los índices espectrales en época lluviosa (junio).

Figura 15. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época lluviosa 2015**



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Figura 16. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época lluviosa 2015**

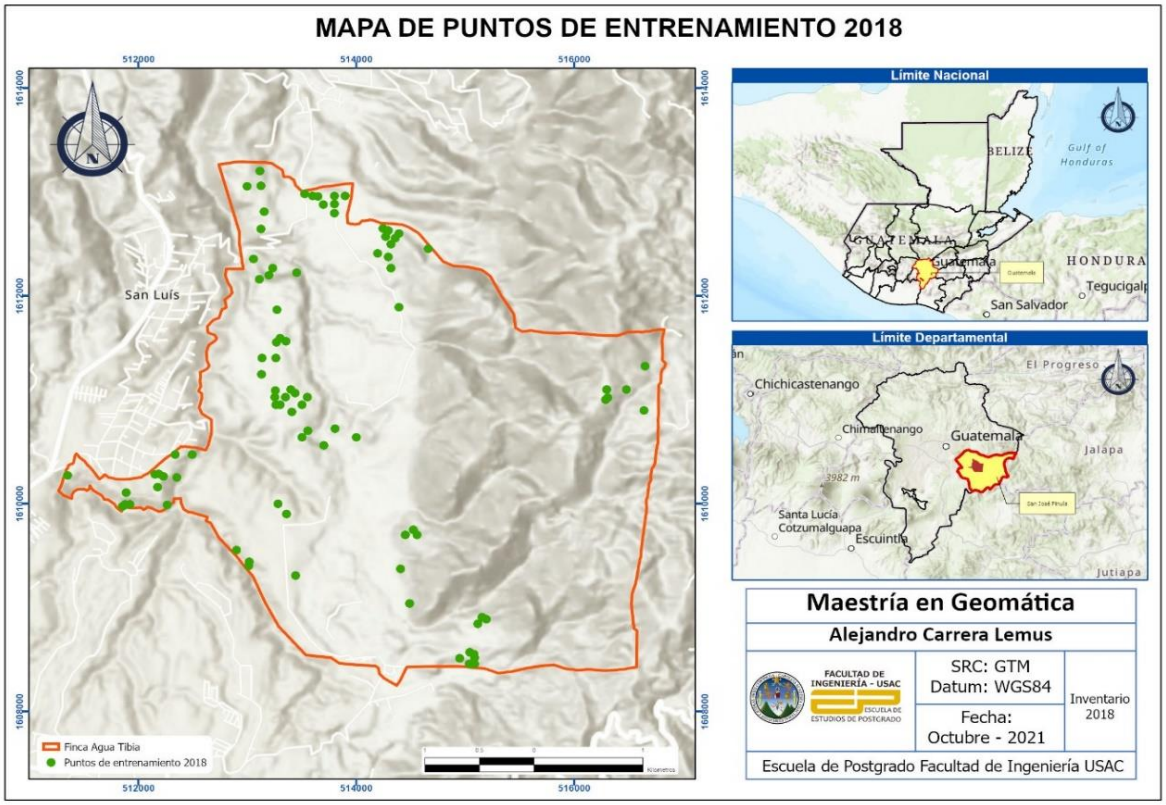


Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

5.2. Correlación de Datos de Campo e Índices Espectrales año 2018

En la figura 17 se presenta la localización espacial de los puntos de entrenamiento correspondientes al año 2018, los cuales contienen la cantidad de biomasa obtenida (T/ha) a partir de datos en campo.

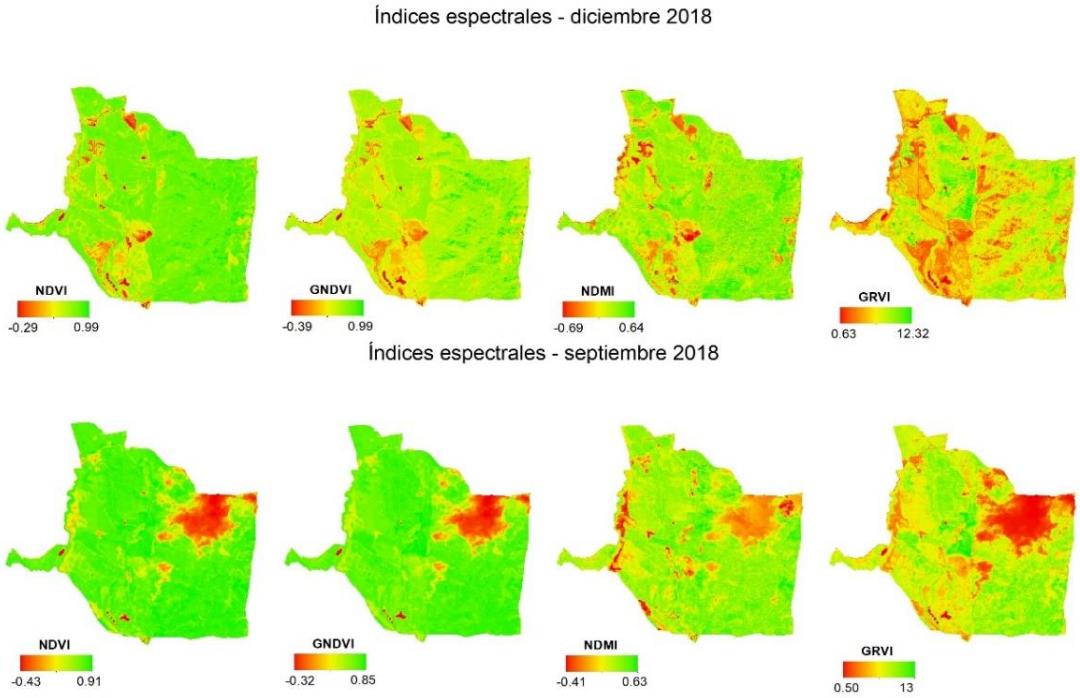
Figura 17. **Puntos de entrenamiento 2018**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

A continuación, en la figura 18 se muestra el comportamiento de los índices espectrales (NDVI, GNDVI, NDMI y GRVI) tanto para época seca (diciembre) y época lluviosa (septiembre) para el año 2018. cómo se puede observar en las escalas de cada uno de los índices se presentan valores superiores a cero en la mayoría de la superficie del área de estudio, a comparación del año anterior se cuenta con una mayor visualización de cobertura vegetal.

Figura 18. **Índices espectrales 2018 en época seca (diciembre) y época lluviosa (septiembre)**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

Al igual que el año anterior también se generó y seleccionó un modelo estadísticamente significativo, y para esto fue esencial correlacionar los datos de campo y los valores de los niveles digitales extraídos de cada índice espectral anteriormente mencionados, utilizando los coeficientes de Pearson y Spearman, los resultados se detallan en las tablas XIII y XIV.

Tabla XIII. **Resultados de correlación utilizando el coeficiente de Pearson 2018**

Coeficiente de Pearson										
Época	**Correlación**		**Seca**				**Lluviosa**			
		Biomasa (T/ha)	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**
	Biomasa (T/ha)	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Seca	NDVI	0.69	1	0	-	-	-	-	-	-
	GNDVI	0.64	0.86	1	-	-	-	-	-	-
	NDMI	0.63	0.88	0.76	1	-	-	-	-	-
	GRVI	0.62	0.68	0.78	0.69	1	-	-	-	-
Lluviosa	NDVI	0.35	0.38	0.39	0.44	0.49	1	-	-	-
	GNDVI	0.41	0.47	0.49	0.47	0.58	0.91	1	-	-
	NDMI	0.33	0.35	0.33	0.55	0.37	0.71	0.64	1	-
	GRVI	0.43	0.46	0.48	0.46	0.61	0.88	0.99	0.61	1

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat y Microsoft Excel.

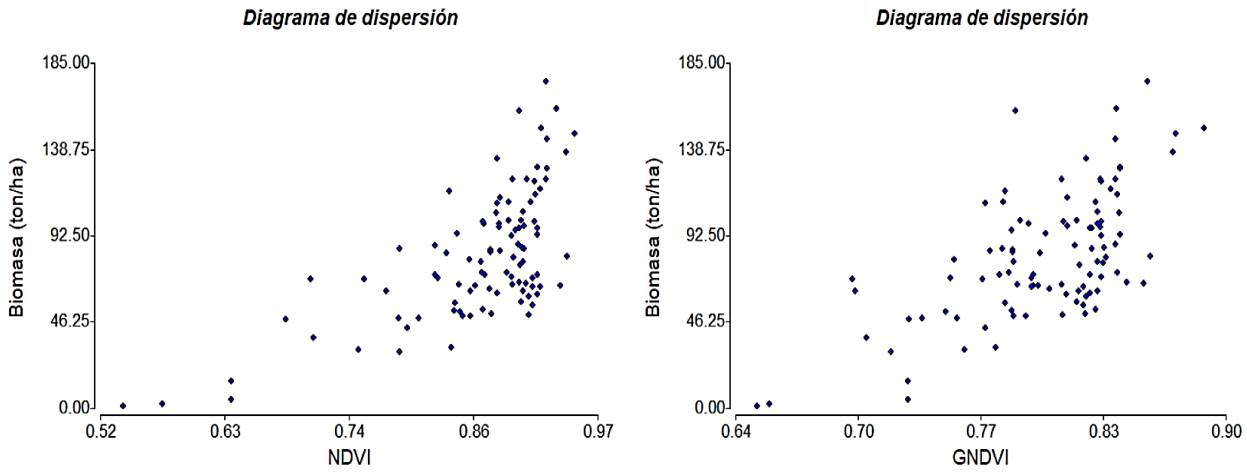
Tabla XIV. **Resultados de correlación utilizando el coeficiente de Spearman 2018**

Coeficiente de Spearman										
Época	**Correlación**		**Seca**				**Lluviosa**			
		Biomasa (T/ha)	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**
	Biomasa (T/ha)	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Seca	NDVI	0.57	1	-	-	-	-	-	-	-
	GNDVI	0.58	0.8	1	-	-	-	-	-	-
	NDMI	0.56	0.79	0.65	1	-	-	-	-	-
	GRVI	0.52	0.71	0.75	0.66	1	-	-	-	-
Lluviosa	NDVI	0.3	0.48	0.43	0.52	0.54	1	-	-	-
	GNDVI	0.38	0.57	0.5	0.53	0.6	0.89	1	-	-
	NDMI	0.41	0.49	0.41	0.65	0.4	0.72	0.63	1	-
	GRVI	0.38	0.57	0.5	0.53	0.6	0.89	1	0.63	1

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat y Microsoft Excel.

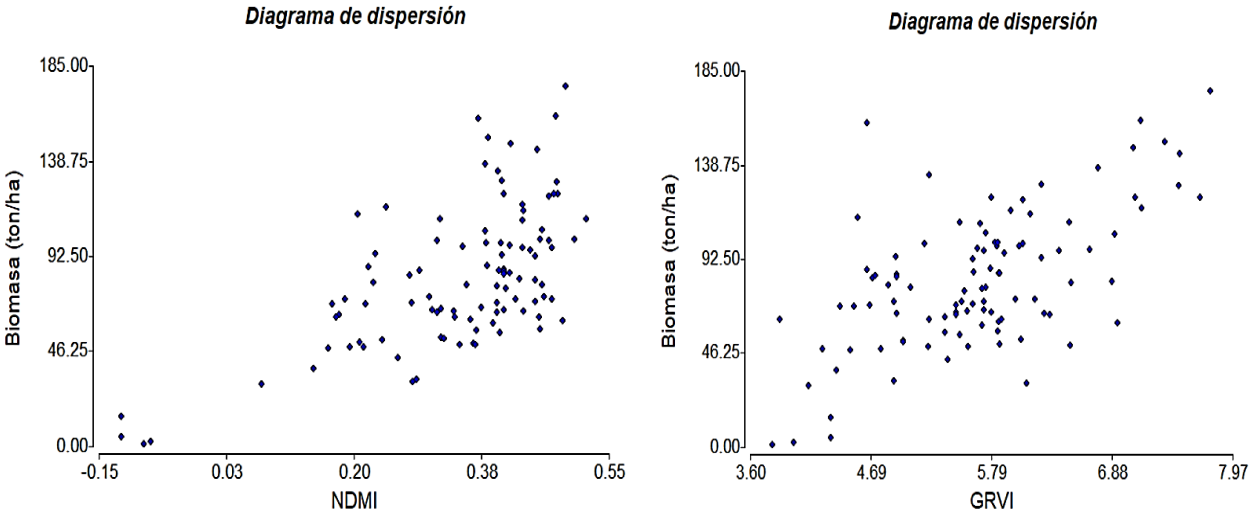
A continuación, en las figuras 19 y 20 se muestra la distribución y tendencia existente entre los datos de biomasa de campo y valores de los índices espectrales en época seca (diciembre).

Figura 19. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época seca 2018**



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

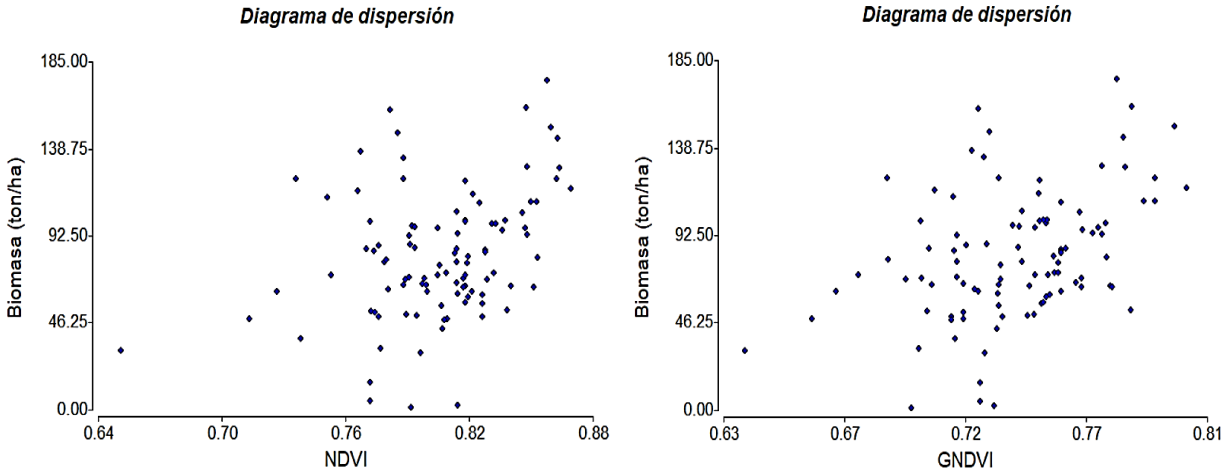
Figura 20. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época seca 2018**



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

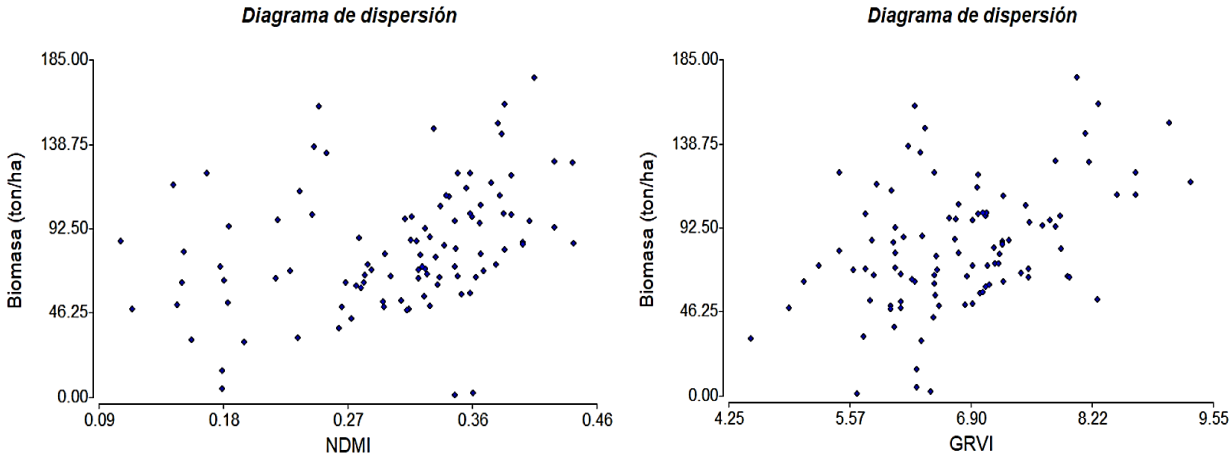
Posteriormente, se muestra la distribución y tendencia existente entre los datos de biomasa de campo y valores de los índices espectrales en época lluviosa (septiembre).

Figura 21. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época lluviosa 2018**



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Figura 22. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época lluviosa 2018**

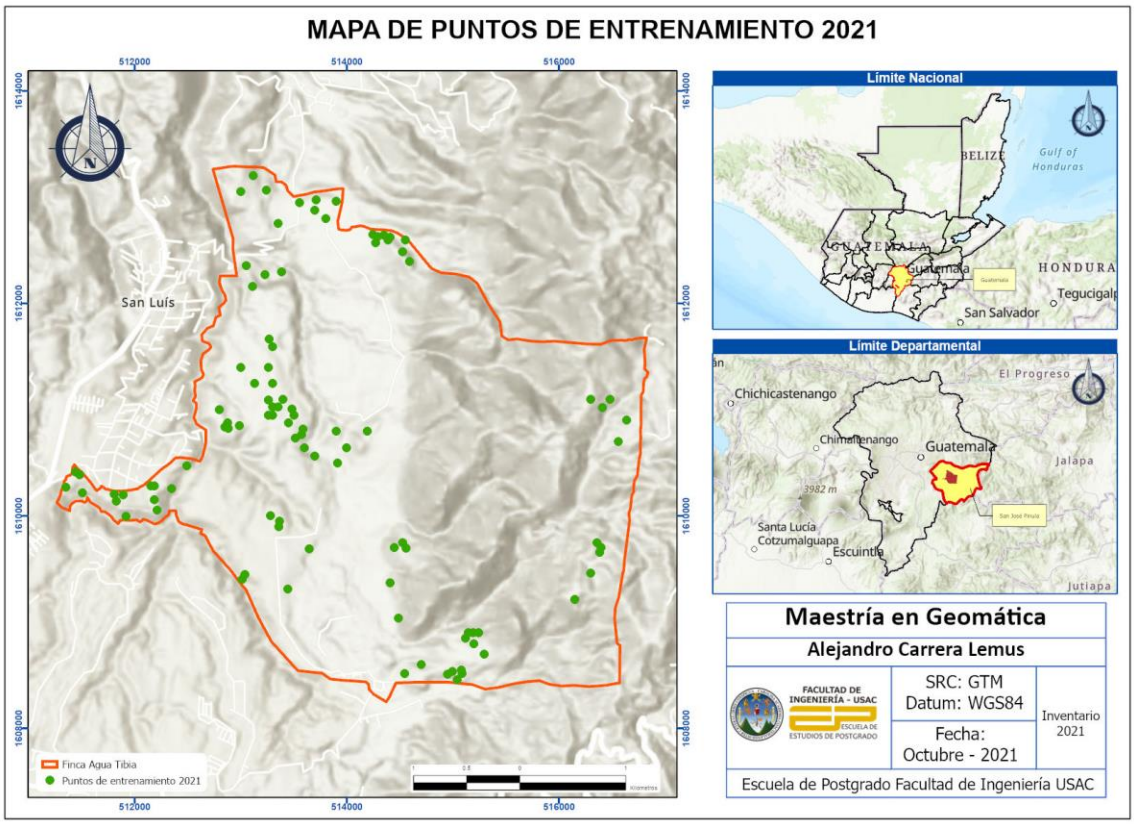


Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

5.3. Correlación de datos de campo e índices espectrales año 2021

En la figura 23 se presenta la localización espacial de los puntos de entrenamiento correspondientes al año 2021, los cuales contienen la cantidad de biomasa obtenida (T/Ha) a partir de datos en campo.

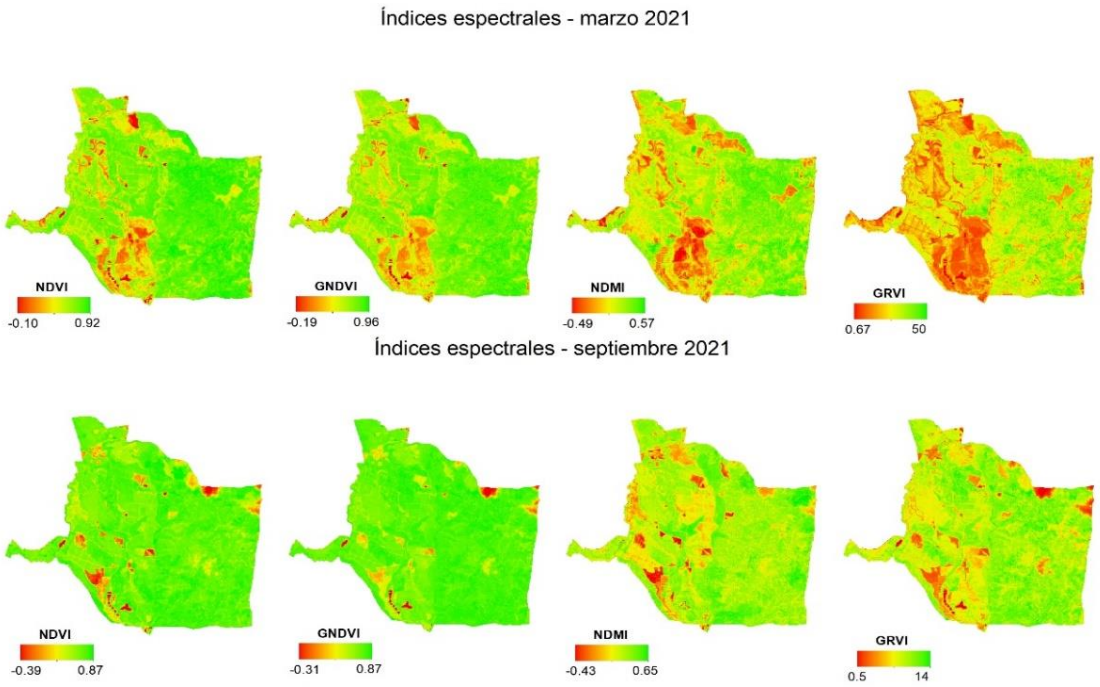
Figura 23. **Puntos de entrenamiento 2021**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

A continuación, se muestra el comportamiento de los índices espectrales (NDVI, GNDVI, NDMI y GRVI) tanto para época seca (marzo) y época lluviosa (septiembre) para el año 2021.

Figura 24. **Índices espectrales 2021 en época seca (marzo) y época lluviosa (septiembre)**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

Por último, respectivamente para el año 2021 también se generó y seleccionó un modelo estadísticamente significativo, para ello fue necesario correlacionar los datos de campo y los valores de los niveles digitales extraídos de cada índice espectral, utilizando los coeficientes de Pearson y Spearman, los resultados se detallan en las tablas XV y XVI.

Tabla XV. **Resultados de correlación utilizando el coeficiente de Pearson 2021**

Coeficiente de Pearson										
Época	**Correlación**	**Seca**					**Lluviosa**			
		Biomasa (T/ha)	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**
	Biomasa (T/ha)	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Seca	NDVI	0.62	1	-	-	-	-	-	-	-
	GNDVI	0.58	0.95	1	-	-	-	-	-	-
	NDMI	0.56	0.81	0.78	1	-	-	-	-	-
	GRVI	0.55	0.89	0.97	0.78	1	-	-	-	-
								-		-
Lluviosa	NDVI	0.35	0.59	0.63	0.44	0.61	1	-	-	-
	GNDVI	0.45	0.73	0.76	0.57	0.74	0.89	1	-	-
	NDMI	0.4	0.65	0.69	0.75	0.69	0.76	0.77	1	-
	GRVI	0.41	0.69	0.73	0.54	0.73	0.87	0.99	0.75	1

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat y Microsoft Excel.

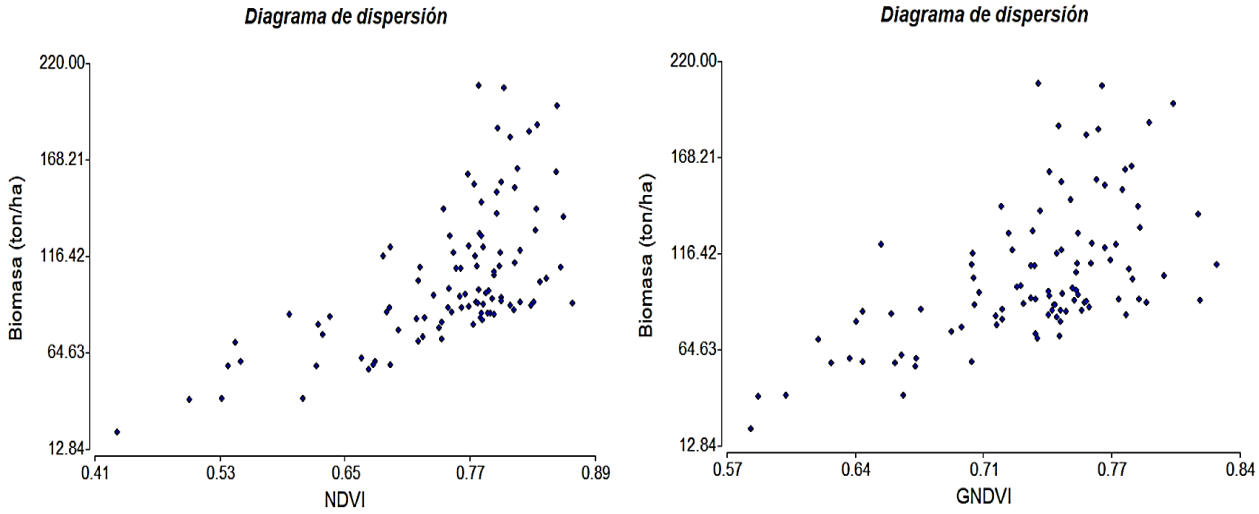
Tabla XVI. **Resultados de correlación utilizando el coeficiente de Spearman 2021**

Coeficiente de Spearman										
Época	**Correlación**	**Seca**					**Lluviosa**			
		Biomasa (T/ha)	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**	**NDVI**	**GNDVI**	**NDMI**	**GRVI**
	Biomasa (T/ha)	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Seca	NDVI	0.62	1	-	-	-	-	-	-	-
	GNDVI	0.58	0.93	1	-	-	-	-	-	-
	NDMI	0.6	0.86	0.79	1	-	-	-	-	-
	GRVI	0.58	0.93	1	0.79	1	-	-	-	-
Lluviosa	NDVI	0.31	0.51	0.57	0.39	0.57	1	-	-	-
	GNDVI	0.44	0.67	0.71	0.5	0.71	0.87	1	-	-
	NDMI	0.43	0.68	0.68	0.71	0.68	0.77	0.76	1	-
	GRVI	0.44	0.67	0.71	0.5	0.71	0.87	1	0.76	1

Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat y Microsoft Excel.

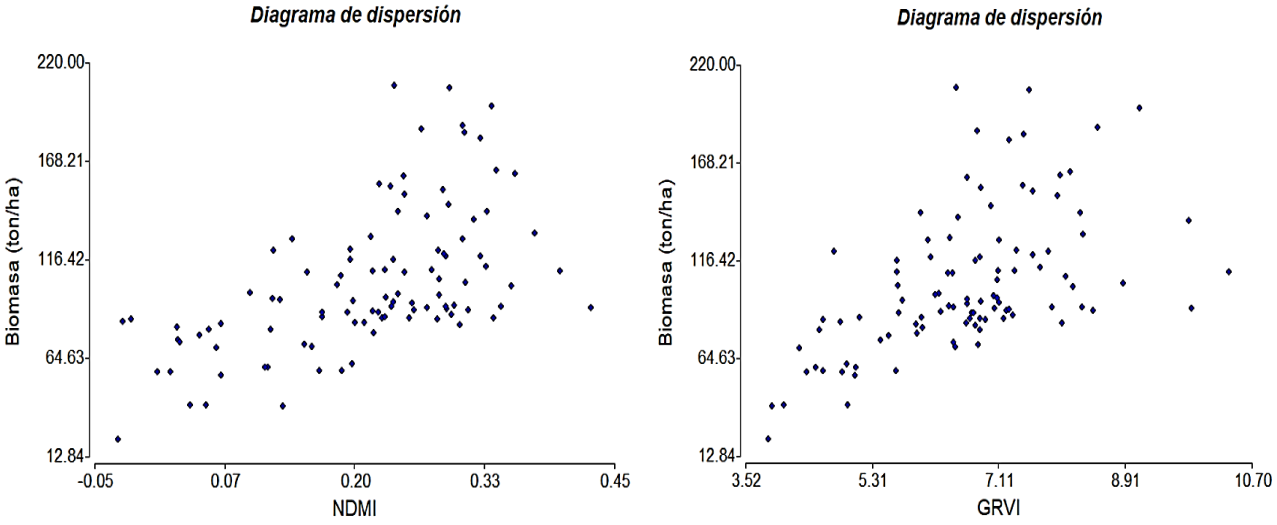
A continuación, en las figuras 25 y 26 se muestra la distribución y tendencia existente entre los datos de biomasa de campo y valores de los índices espectrales en época seca (marzo).

Figura 25. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época seca 2021**



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

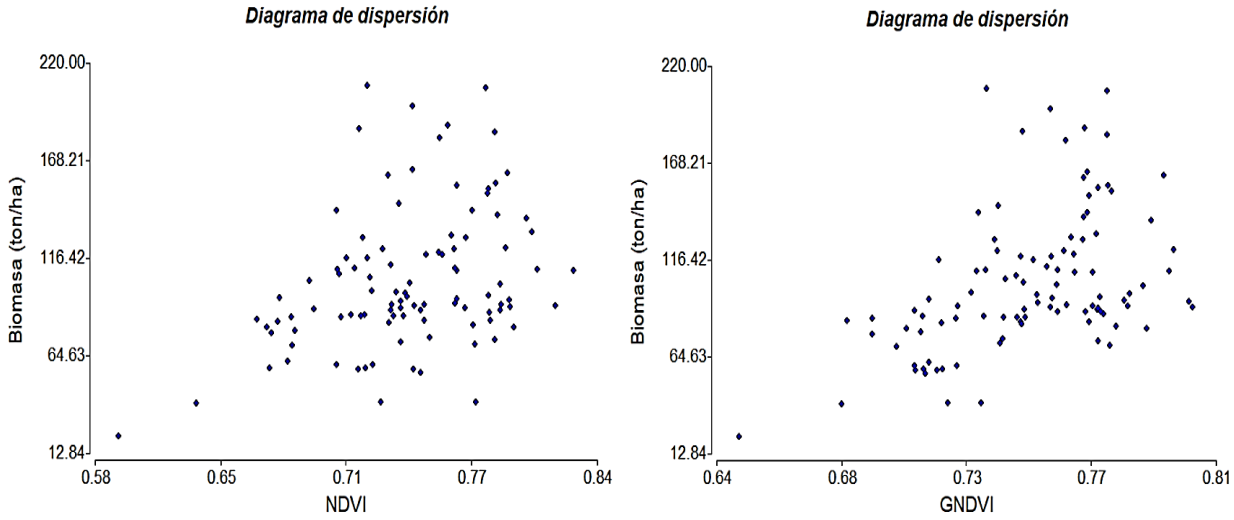
Figura 26. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época seca 2021**



Fuente: Elaboración propia, realizado con InfoStat.

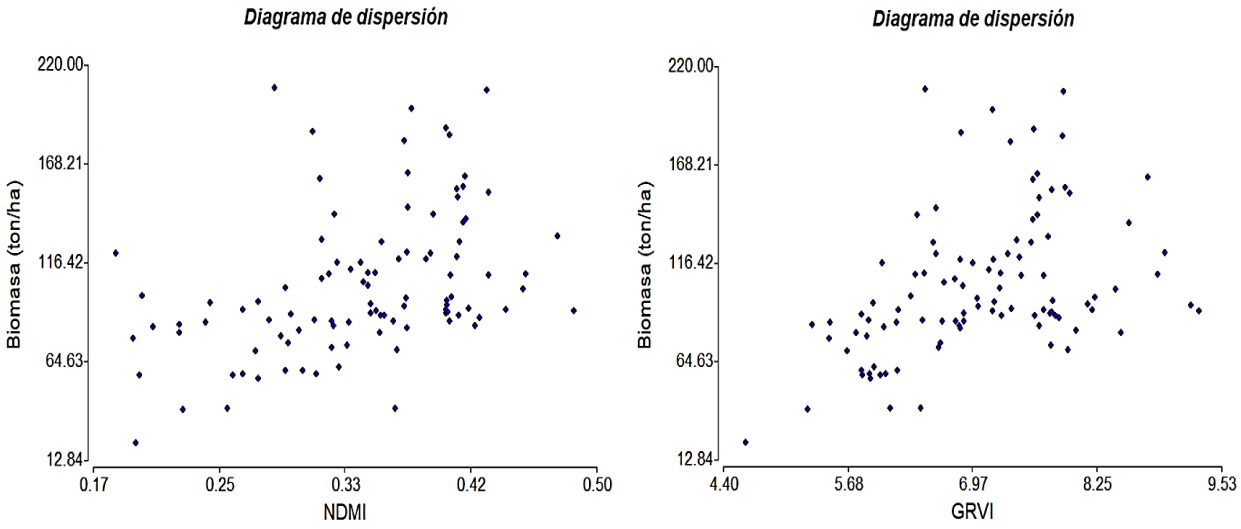
Posteriormente, se muestra la distribución y tendencia existente entre los datos de biomasa de campo y valores de los índices espectrales en época lluviosa (septiembre) en las figuras 27 y 28.

Figura 27. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDVI y GNDVI en época lluviosa 2021**



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Figura 28. **Diagrama de dispersión del índice espectral NDMI y GRVI en época lluviosa 2021**



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

A continuación, se detalla la cantidad promedio de biomasa área y carbono por año en las parcelas de entrenamiento.

Tabla XVII. **Promedio de Biomasa área y carbono por año en función de parcelas de entrenamiento**

Año	Biomasa (T/ha)	Carbono (T/ha)
2015	64.45	32.22
2018	81.76	40.88
2021	104.26	52.13

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la tabla XVIII se muestra el promedio tanto para el coeficiente de Pearson como el coeficiente de Spearman por época seca y año.

Tabla XVIII. **Coeficientes de correlación promedio por época y año**

Época	Año	Coef. Pearson	Coef. Spearman
Seca	2015	0.61	0.60
	2018	0.64	0.53
	2021	0.57	0.59
Lluviosa	2015	0.38	0.44
	2018	0.38	0.36
	2021	0.40	0.40

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la tabla XIX se muestra el promedio tanto para el coeficiente de Pearson como el coeficiente de Spearman en relación al NDVI en época seca.

Tabla XIX. **Coeficientes de correlación para el índice espectral NDVI**

índice	Época	Año	Coef. Pearson	Coef. Spearman
NDVI	Seca	2015	0.62	0.60
		2018	0.69	0.57
		2021	0.62	0.62

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

5.4. Modelos estadísticamente significativos

Una vez correlacionados los dos conjuntos de datos por época y año, se seleccionaron y ordenaron en función de los valores más altos de correlación por año, tanto para el coeficiente de Pearson como Spearman. Como se observa en la tabla XX, se presentan los modelos generados:

Tabla XX. **Modelos de los índices con mayor correlación**

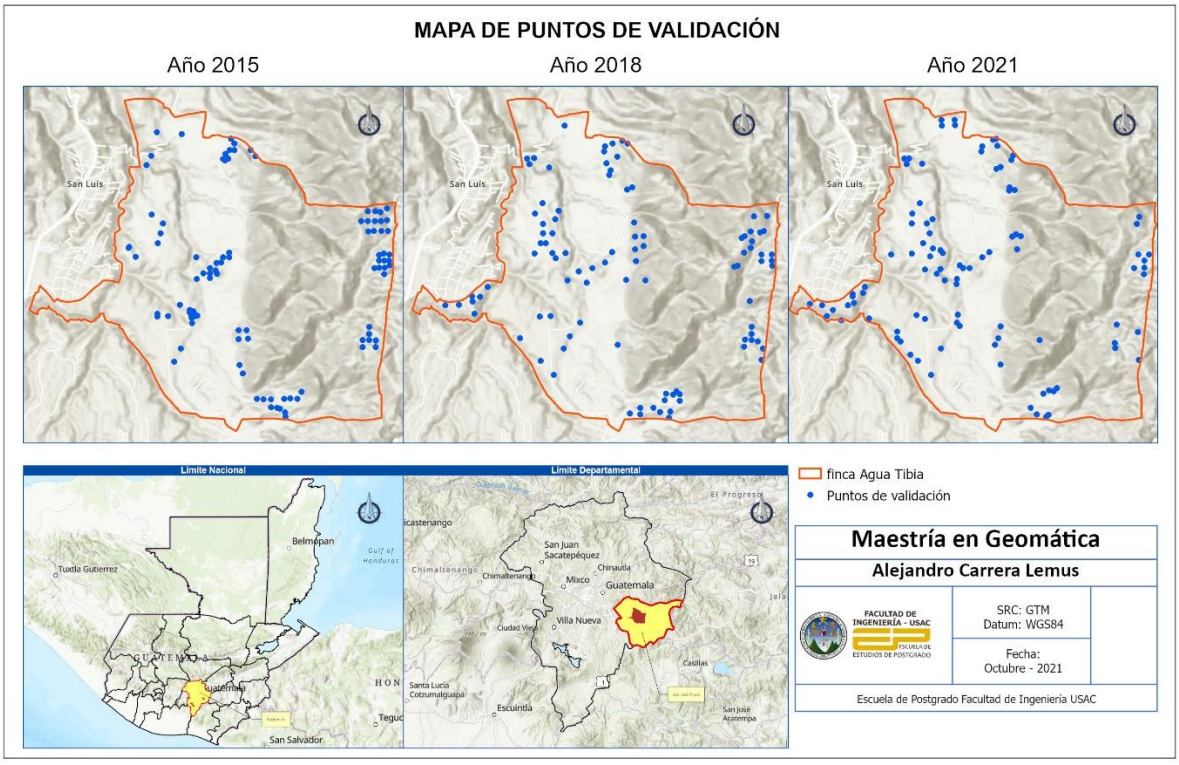
No.	Índice	Modelo	Año	Época
1	NDVI	$y = 134.99x^{1.4644}$	2015	Seca
2	NDVI	$y = 182.44x^{6.3313}$	2018	Seca
3	NDVI	$y = 191.14x^{2.2706}$	2021	Seca

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

5.5. Evaluación de Modelos Estadísticos

En la figura 29 se muestra la localización espacial de las 100 parcelas o puntos de validación correspondientes a los años 2015, 2018 y 2021, los cuales contienen la cantidad de biomasa estimada (T/ha) a partir de datos en campo.

Figura 29. **Mapa de puntos de validación**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

A continuación, se detalla la cantidad promedio de biomasa área y carbono por año en las parcelas de validación.

Tabla XXI. **Promedio de biomasa área y carbono por año en función de parcelas de validación**

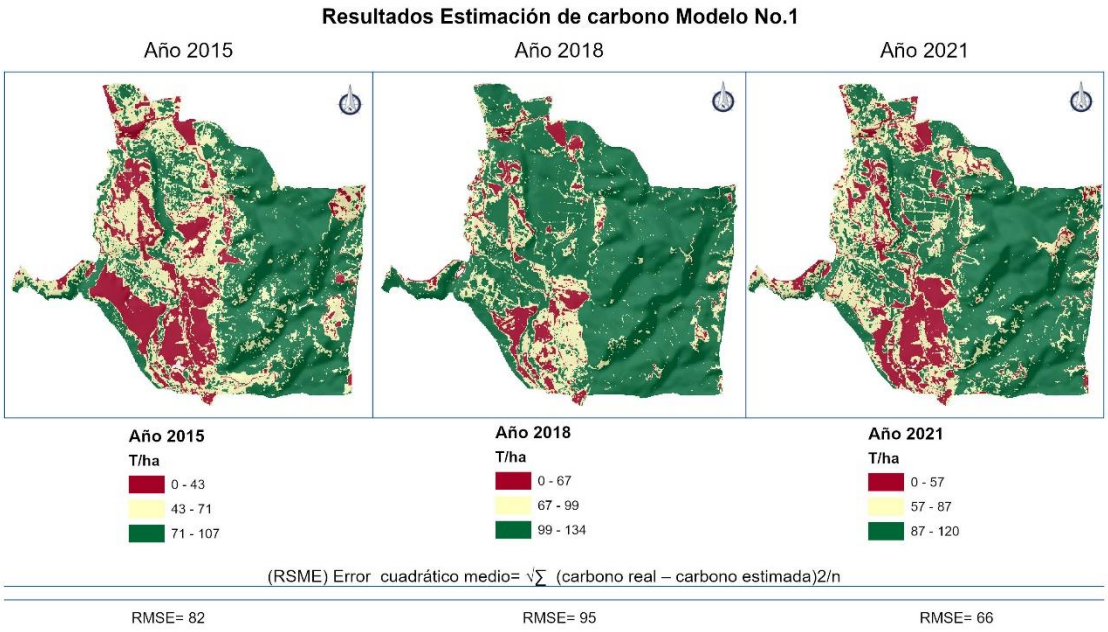
Año	Biomasa (T/ha)	Carbono (T/ha)
2015	42.13	21.06
2018	64.53	32.26
2021	79.52	39.76

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

De acuerdo con la metodología planteada, para la validación de cada uno de los modelos se utilizó la fórmula del error medio cuadrático (RMSE), el cual consiste en medir la cantidad de error existente entre dos conjuntos de datos, es decir, compara una cantidad observada contra una cantidad predicha.

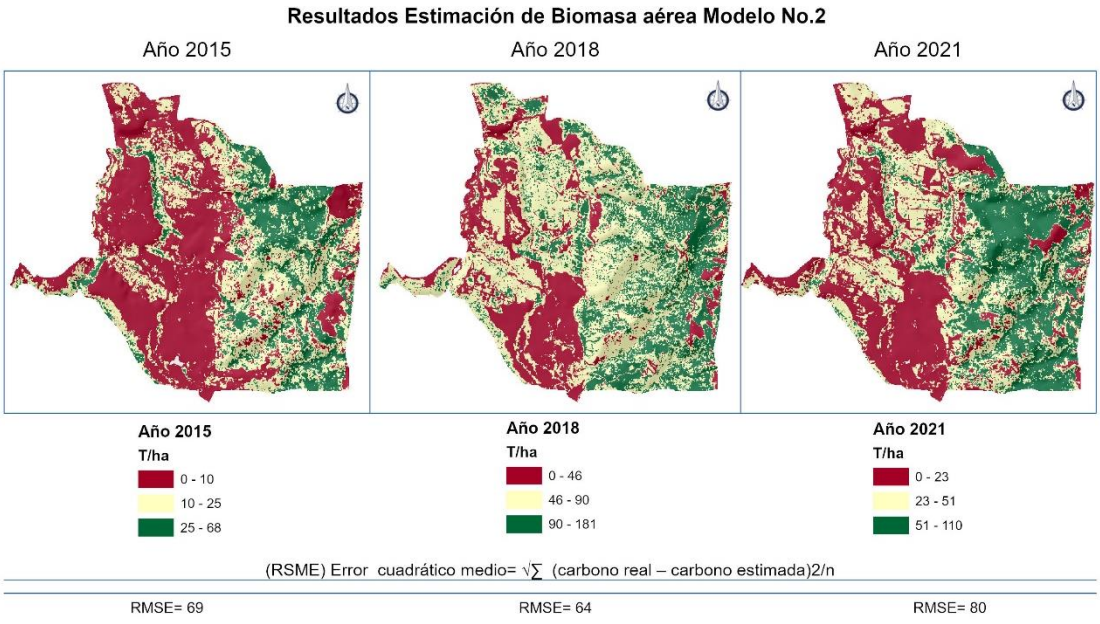
Cada modelo fue evaluado en cada uno de los tres años (2015, 2018 y 2021) es decir una validación cruzada, como se muestra en las figuras 30, 31 y 32, se presenta el error medio cuadrático en (T/ha) obtenido para cada modelo.

Figura 30. **Mapa de Resultados de la validación del modelo 1 (2015)**



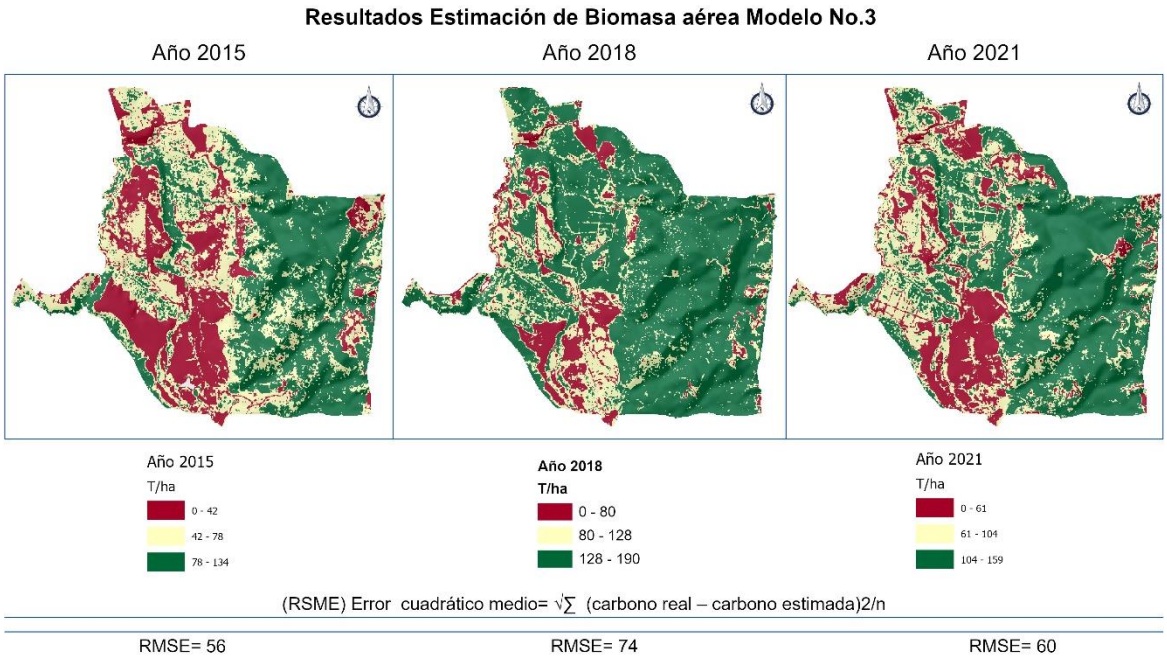
Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

Figura 31. **Mapa de Resultados de validación del modelo 2 (2018)**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

Figura 32. **Mapa de Resultados de la validación del modelo 3 (2021)**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

A continuación, se muestra el resumen de los valores de RSME obtenidos por cada modelo.

Tabla XXII. **Valores de RSME por año**

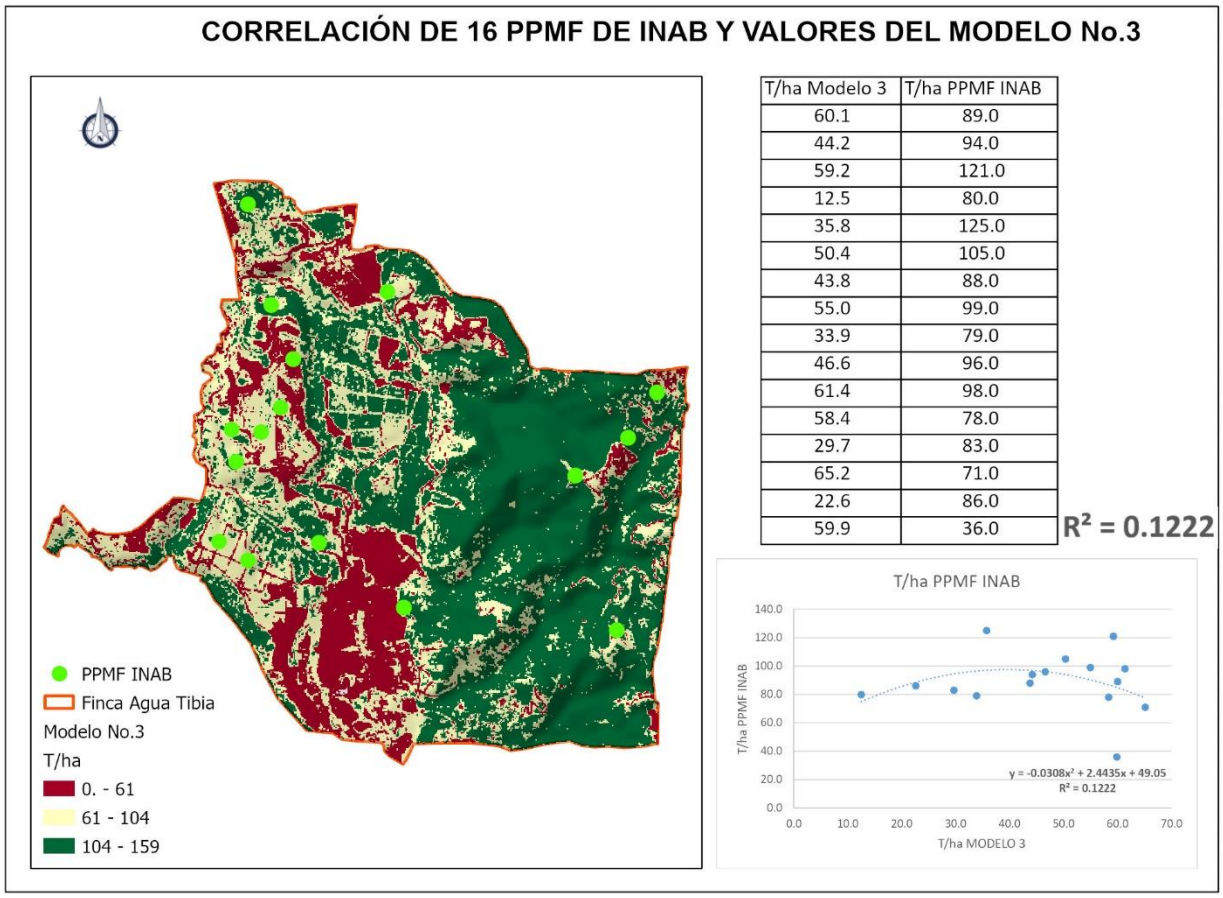
	2015		2018		2021			
Modelo	**Biomasa (T/ha)**	**Carbono (T/ha)**	**Biomasa (T/ha)**	**Carbono (T/ha)**	**Biomasa (T/ha)**	**Carbono (T/ha)**	**Promedio Biomasa**	**Promedio Carbono**
M1	66.92	33.46	95.74	47.87	82.65	41.325	**81.77**	**40.89**
M2	80.7	40.35	64.1	32.05	69.9	34.95	**71.57**	**35.78**
M3	60.26	30.13	74.65	37.325	56.82	28.41	**63.91**	**31.96**

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la figura 33 se presenta una evaluación de 16 PPMF proporcionadas por el INAB, estas parcelas corresponden al estudio del mapa de estratos de carbono, mismas que se encuentran en el área de estudio y que fueron

correlacionas con el modelo 3 que corresponde al año 2021, en cuanto a la cantidad biomasa aérea y carbono.

Figura 33. **Mapa de validación entre PPMF-INAB y Modelo No.3**



Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGIS Pro.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se muestra la discusión de resultados, mismos que fueron obtenidos durante la elaboración de la presente investigación.

El contenido del presente documento abarca desde la recopilación y procesamiento de datos de campo como los datos espaciales, en cuanto a los datos de campo, se contó con tres inventarios forestales en plantaciones de pino y ciprés que corresponde a los años 2015, 2018 y 2021.

La distribución de los puntos de entrenamiento fue totalmente aleatoria como se muestra en las figuras 11, 17 y 23.

La tabla XVII permite comparar la cantidad de biomasa aérea y carbono promedio por año, esto en base a los puntos de entrenamiento, así mismo nos indica la dinámica que han tenido las plantaciones de coníferas en relación al contenido de biomasa y carbono, es decir que de acuerdo al ciclo forestal las cantidades van gradualmente en aumento por su constante desarrollo y crecimiento a comparación de bosques adulto en donde las cantidades de biomasa y carbono llegan a una fase de estancamiento.

Para el año 2016, las imágenes de época seca corresponden al mes de abril, los valores máximos registrados por índice en orden descendiente fueron los siguientes: (14.87) GRVI, (0.87) GNDVI, (0.85) NDVI y (0.53) NDMI. Sucesivamente para las imágenes de época lluviosa se consideró el mes de junio, registrando los siguientes valores máximos por índice en orden descendente: (14) GRVI, (0.91) NDVI, (0.87) GNDVI y (0.63) NDMI. En este año

es posible notar las diferencias entre los valores de época lluviosa y seca, uno de los factores que pueden generar estas diferencias, se le atribuye a la humedad persistente en los árboles lo que da paso a contar con valores un poco más alto que sobreestiman el vigor de la vegetación, esto se puede observar en cada una de las imágenes en cuanto a la cobertura nubosa que cubre el área de estudio.

En cuanto al año 2018, las imágenes de época seca corresponden al mes de diciembre, los valores máximos registrados por índice en orden descendente fueron los siguientes: (12.32) GRVI, (0.99) NDVI, (0.99) GNDVI y (0.64) NDMI. Repetidamente para las imágenes de época lluviosa se consideró el mes de septiembre, registrando los siguientes valores máximos por índice en orden descendente: (13) GRVI, (0.91) NDVI, (0.85) GNDVI y (0.63) NDMI.

Por último, se presenta el año 2021, las imágenes para época seca corresponden al mes de marzo, los valores máximos obtenidos por índice en orden descendente fueron los siguientes: (50) GRVI, (0.96) GNDVI, (0.92) NDVI y (0.57) NDMI. Posteriormente se presentan las imágenes de época lluviosa las cuales pertenecen al mes de septiembre, registrando los siguientes valores máximos por índice en orden descendente: (14) GRVI, (0.87) NDVI, (0.87) GNDVI y (0.65) NDMI. Los índices espectrales que mayor similitud presentaron en cuanto a su distribución espacial durante los tres años planteados fueron el NDVI, GNDVI y NDMI, esto también se puede observar en los diagramas de dispersión de cada uno de estos, es decir que se puede observar un comportamiento relativamente lineal en la mayoría de las curvas de las dos variables, ya que a medida que aumenta la cantidad de biomasa representada en toneladas por hectárea los valores de los índices espectrales aumentan, sin embargo se pueden observar ciertos cambios en la pendiente de las curvas esto debido a que los índices ya no responden de manera tan directa al aumento de la biomasa, lo que significa que los índices no pueden relacionar esos aumentos de la cantidad

de biomasa, esto quiere decir que da alguna manera los índices presentan ciertas restricciones como por ejemplo; cuando existe vegetación abundante (pastos o maleza) sobre la superficie de estudio como es en el caso de la época lluviosa, otra restricción puede ser el valor de reflectancia de la superficie esto quiere decir que algunos casos las cantidades de biomasa puede ser subestimados y por último se puede hacer mención de la presencia de nubes presentado así valores atípicos. Tomando en consideración estas variaciones y restricciones en cada uno de los índices espectrales, el NDVI fue uno de los índices en los que se logró observar un mejor a ajuste en relación a cada uno de estos factores.

Respecto al análisis de correlación, se consideraron dos coeficientes, los cuales corresponde al coeficiente de Pearson y Spearman. En relación a los resultados obtenidos del análisis de correlación, como se muestran en las tablas XI, XII, XIII, XIV, XV y XVI, se denota una mayor correlación entre los datos de campo con los valores digitales de las imágenes en época seca tanto para el coeficiente de Pearson como de Spearman, una de las causas se debe a que algunos de los pixeles de las imágenes en época lluviosas presentaron una fracción de nubosidad en su área y por ende extrae valores mínimos.

Para el año 2015 se cuenta con un coeficiente de Pearson promedio de 0.61 de todos los índices en época seca y un coeficiente promedio de 0.38 en época lluviosa. Así mismo también se pudo observar una tendencia similar para el coeficiente de Spearman, un coeficiente promedio de 0.6 en época seca y 0.44 en época lluviosa.

Sucesivamente para el año 2018, se cuenta con un coeficiente promedio de Pearson de 0.64 en época seca y 0.38 en época lluviosa. Acá nuevamente se pudo observar la tendencia positiva para el coeficiente de Spearman, registrando los siguientes valores promedio; 0.55 en época seca y 0.36 en época lluviosa.

Al igual que los años anteriores la tendencia se repite para el año 2021, obteniendo así los siguientes valores promedio; para el coeficiente de Pearson 0.57 en época seca y 0.40 en época lluviosa, y para el caso del coeficiente de Spearman 0.59 en época seca y 0.40 en época lluviosa., como se muestra en la tabla XVIII.

Posteriormente de evaluar las correlaciones de forma tabular, también fue necesario realizar un análisis de manera gráfica con el objetivo de observar la dispersión de los datos. Como se muestra en las figuras 13,14,15,16, 19, 20, 21, 22, 25, 26 27 y 28 se pudo observar que existe una correlación positiva en todos los índices y años, sin embargo, se pudo observar una similitud en la dispersión de datos de los índices del NDVI y GNDVI, al igual que en los índices del NDMI y GRVI tanto en época seca como lluviosa, lo que indica que los índices espectrales responde en ambas épocas con la diferencia que en la época seca se sobreestiman los valores por la presencia de humedad.

Una vez realizado en análisis de correlación para cada uno de los índices espectrales, se logró determinar el índice que mejor ajuste presentó con relación a los datos de biomasa calculada, como se ve en la tabla XIX, el índice espectral NDVI presentó los mayores valores correlación sobre todo en época seca, además de presentar un equilibrio en sus valores para el año 2021.

Con el índice espectral seleccionado, se procedió a generar los modelos estadísticamente significativos, los cuales se detallan en la tabla XX, los modelos generados fueron de tipo potencial debido a que presentaron un mejor ajuste en la relación de los datos.

Como se muestra en la tabla XXI, las cantidades de biomasa aérea y carbono promedio por año, en base a los puntos de validación, nos indica de igual

manera la dinámica de incremento gradual que mantienen las plantaciones de coníferas en cuanto al contenido de biomasa y carbono.

Para la validación de los tres modelos se hizo uso de la técnica del Error medio cuadrático (RSME). A continuación, se presentan los valores de RMSE obtenidos de la validación cruzada.

Como se muestra en la tabla XXII y en las figuras 30, 31 y 32, se realizó una validación cruzada, es decir el modelo (M1) utilizando el índice NDVI en época seca del año 2015, 2018 y 2021, de igual forma para el modelo (M2) y (M3) utilizando el NDVI en época seca, lo que permitió determinar el RSME tanto para biomasa como carbono, mediante la presente validación se logró evidenciar que uno de los RSME conservadores corresponde al modelo tres presentando así un promedio de 63.91 (T/ha) para biomasa aérea y un 31.96 (T/ha) de carbono, algunos de los factores que influyen en la predicción de biomasa aérea, consiste en la fórmulas utilizadas para calcular las variables secundarias y terciarias anteriormente mencionadas así como la edad de las plantaciones ya que a menor edad su dosel no contempla el mismo tamaño que el de una plantación adulta, por lo tanto al relacionar con el tamaño del pixel de la imagen satelital podría existir interacción de algún otro tipo de vegetación o superficie que provoque un aumento o disminución en el valor de los niveles digitales que a su vez genere una correlación atípica.

Así mismo en la fase de evaluación se realizó una segunda comparación de datos para evaluar la correlación existente entre 16 PPMF proporcionadas por el INAB y los valores resultantes del modelo (M3) como se muestra en la figura 33, esto con la finalidad de comparar la metodología planteada con la metodología que viene del proyecto del mapa de estratos de carbono para Guatemala, como se muestra en la figura 33, el coeficiente de correlación de

Pearson únicamente presentó el 12 % de significancia entre los datos, lo que muestra de forma preliminar diferencias entre las metodologías, algunos de los factores que influyen en la predicción de biomasa aérea, consiste en la fórmulas utilizadas para estimar la biomasa aérea, otro de los factores consiste en la estratificación de datos por tipo de horizonte ómbrico considerando también un registro histórico en las variables de precipitación y temperatura a nivel nacional. Dentro de los factores que permiten que exista el 12 % de significancia, se puede mencionar tanto la edad de las plantaciones como el registro de los datos iniciales.

Con base a los resultados obtenidos, cabe resaltar que los datos de mayor significancia corresponden al índice espectral NDVI, la función de este índice consiste principalmente en la estimación o evaluación de la densidad y estado de la vegetación, en la presente investigación el uso del NDVI junto con los índices restantes como se muestra en la tabla X, permitieron contar con valores digitales los cuales fueron correlacionados con datos de campo para generar específicamente un modelo que pueda ser utilizado como una alternativa para la estimación de biomasa aérea existente en rodales de plantaciones de coníferas en una temporalidad específica, esto tomando en cuenta la base sobre la cual funciona el NDVI, es por ello que al momento de replicar la presente metodología es necesario considerar dos factores importantes como lo son; la etapa fenológica y climática en la cual se lleve a cabo el análisis biomasa aérea y carbono, esto con la finalidad de contar con datos con una exactitud y validez aceptable.

Por último es importante mencionar que ambos estudios pueden ser complementarios ya que para el caso de la presente investigación se cuenta con una mayor cantidad de registros por parcela, los cuales podrían utilizar las ecuaciones alométricas ya establecidas en la metodología del mapa de estratos

de carbono, que a su vez se pueden correlacionar con el NDVI que es el índice espectral que mejor ajuste presentó y posteriormente realizar la estratificación por horizonte ómbrico y por último llevar a cabo los respectivos análisis con la finalidad de evaluar precisión del complemento de estos factores de ambas metodologías.

CONCLUSIONES

1. El método planteado puede ser utilizado para la cuantificación de biomasa aérea a través del uso del índice espectral NDVI (imágenes Sentinel-2) y datos de campo, en plantaciones de coníferas (*Pinus maximinoi* y *Cupressus lusitanica),* ya que el RMSE resultante, obtenido a partir del método se encuentra dentro del rango de investigaciones elaboradas y consultas, siempre y cuando se tomen en cuenta la etapa fenológica y climática en la cual se lleve a cabo el análisis.

2. De los cuatro índices espectrales propuestos (NDVI, GNDVI, NDMI y GRVI), todos obtuvieron una correlación positiva con los datos de campo, sin embargo el índice espectral que presentó un mejor ajuste en los tres años (2015, 2018 y 2021) para generar el modelo estadístico, fue el índice espectral NDVI, ya que fue el que presentó una correlación significativa entre sus valores digitales y la biomasa calculada en época seca, sobre todo en el año 2021, presentando así un 0.62 tanto en el coeficiente de Pearson como Spearman.

3. Como se ha podido observar en cuanto la distribución espacial de los tres modelos, se logra apreciar cantidades resultantes similares, sin embargo, las cantidades más representativas y conservadoras se le atribuyen al modelo (M3), esto debido a la edad de las plantaciones y el estado silvícola, es decir que de acuerdo al crecimiento de los árboles, estos son más representativos en la imagen satelital además de contar con una distribución homogénea sobre el suelo y sin obstrucción de otro tipo de

cobertura vegetal, lo que a su vez permitió una mejor correlación ya que se contó con los valores más representativos del índice NDVI.

4. En cuanto a la validación de los tres modelos de tipo potencial seleccionados y generados en función del índice espectral NDVI, que fue el que mejor ajuste presenta en relación a los datos de campo, se concluye que es posible utilizar el modelo correspondiente al año 2021 para la predicción de biomasa aérea en plantaciones de coníferas (*Pinus maximinoi* y *Cupressus lusitanica),* el cual presenta un valor conservador de RMSE promedio de 63 T/ha, y un 12% de significancia al correlacionar los datos de las 16 PPMF-INAB, dadas las condiciones bajo las cuales se utilizó este método, es importante continuar evaluando el comportamiento del mismo para poder ser utilizado como una alternativa en la estimación de biomasa aérea.

RECOMENDACIONES

1. Continuar replicando este método indirecto, haciendo uso del índice espectral NDVI en inventarios consecutivos, considerando la etapa fenológica y climática, para evaluar y analizar la tendencia geoespacial de los datos.

2. Es importante continuar con análisis de correlación y por clase diamétrica entre los datos de biomasa y los índices espectrales planteados, para analizar si es posible ajustar y mejorar los resultados de correlación existentes.

3. Considerar una investigación en la cual se comparen las cantidades de biomasa obtenidas con el índice NDVI y otro tipo de índices de vegetación, como lo son el RVI y RFDI (tipo Radar), ya que este tipo de imágenes emiten su misma energía, lo que les permitirá evaluar el comportamiento en cuanto a la etapa fenológica y climática de las plantaciones.

4. Es importante evaluar la correlación entre el índice espectral NDVI y el uso de otro tipo imágenes de mayor resolución espacial, que permitan comparar y mejorar la certeza del método planteado.

REFERENCIAS

1. Acosta Mireles, M. (2017). Estimación de la densidad forestal mediante imágenes Landsat ETM+ en la región sur del Estado de México. México.

2. Agencia extremeña de la energía. (2013). *La Biomasa Forestal*. España.

3. Aguas Bedoya, C.A. (2016). *Estimación de biomasa aérea forestal en bosque de Robledales del altiplano norte de Antioquia, utilizando Teledetección*. Colombia.

4. Aguilar Rodríguez, Silvia, Abundiz Bonilla, Leonor; Barajas Morales, Josefina. (2001). *Comparación de la gravedad específica y características anatómicas de la madera de dos comunidades vegetales en México. Anales del Instituto de Biología.* Serie Botánica. México.

5. Andrade. H.J. (2010). *Elementos básicos de dasometría*. Colombia.

6. Aparisi Navarro, S. (2019). *Análisis de la biomasa forestal mediante imágenes de satélite.* Valencia, España.

7. Benavides Ballesteros, H.O, León Aristizabal, G.E. (2007). *Información técnica sobre Gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Recuperado de:

https://www.academia.edu/download/50544101/Gases_de_Efecto_Invernadero_y_el_Cambio_Climatico.pdf

8. Catellanos López, E.J. (2011). *Elaboración del primer mapa nacional sobre el carbono capturado por plantaciones y bosques naturales de Guatemala*. Guatemala.

9. Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Segunda Edición. España.

10. Comisión Europea-Copernicus. (2018). *El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial*. España.

11. Díaz González, F.A. (2014). *Aproximación a los sistemas de percepción remota en satélites pequeños.* Bogotá: Universidad Sergio Arboleda.

12. EOS. (20 de agosto de 2022). *Índices De Vegetación En La Agricultura Digital.* EOS DATA ANALYTICS. Recuperado el 25 de agosto de 2022 de https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/

13. Escobar Carmona, R. (2016). *Estimación de la biomasa forestal de la sierra San Miguelito por medio de imágenes de satélite.* México.

14. Estrategia Nacional REDD+ de Guatemala. (2020). *Documento técnico: factores de emisión para la construcción del nivel de referencia subnacional de emisiones y absorciones forestales (nrf/nref) para redd+.* Guatemala.

15. García Garrido. S. (2012). *Centrales Termoeléctricas de Biomas*. España.

16. García, M.M. (2016). *Estimación de la biomasa aérea de herbáceas con sensores aerotransportados de alta resolución*. España.

17. Gómez Xutuc, D. D. (2017). *Informe metodológico para la elaboración del mapa de estratos de Carbono.* Guatemala.

18. GU. (20 de mayo de 2019). *Índices espectrales con datos satelitales multiespectrales.* GEO UNIVERSITY. Recuperado el 25 de agosto de 2022 de https://www.geo.university/pages/blog?p=spectral-indices-with-multispectral-satellite-data.

19. Gutiérrez Rodríguez, E. (2013). *Guía de cubicación de madera*. Colombia.

20. Imaña Encinas, José. (2011). *Mensura Dasométrica. Brasília: Universidad de Brasília*. Brasil.

21. INAB (Instituto Nacional de Bosques). (2019). *Guía práctica para la cubicación de productos forestales, Dirección de Industria y Comercio Forestal*. INAB-Guatemala.

22. Instituto Nacional De Bosques-INAB. (2017). *Ciprés común Cupressus lusitanica Miller.* INAB-Guatemala.

23. Instituto Nacional De Bosques-INAB. (2017). *Pino Candelillo Pinus maximinoi H.E. Moore*. INAB-Guatemala.

24. IPCC. (2006). *Directrices para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero. Vol. 4, Cap .3.* Recuperado de: https://www.ipcc-

nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_03_Ch3_Representation.pdf

25. Juárez Félix, Y. (2014). *Dasometría apuntes de clase y guía de actividades prácticas.* Cochabamba, Bolivia.

26. L3Harris Geospatial. (23 abril 2021). *Broadband Greenness.* L3HARRIS GEOSPATIAL. Recuperado el 23 abril 2021de https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/broadbandgreenness.html#Green4

27. Labrador García, M., Évaro Brondo, J.A., Arbelo Pérez, M. (2012). *Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio.* Canarias.

28. Marroquín Morales, P. (2017). *Estimación de Biomasa Aérea Mediante Modelos Alométricos en Pinus cembroides Zucc., y Pinus halepensis Mill., en Saltillo, Coahuila, México.* México.

29. Martínez Barrón, R.A. (2016). *Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango.* México.

30. Mastellanes Ferrera, R. (2018). *Sentinel Index Toolbox*. Agencia Espacial Europea.

31. Méndez Paiz, B. A. (2011). *Manual de laboratorio del curso mediciones forestales, Universidad de San Carlos de Guatemala.* Guatemala.

32. Mendoza Chichipe, M.E. (2018). *Estimación de carbono en plantaciones de pinus patula mediante el análisis espectral de una imagen satelital sentinel-2, distrito de luya viejo, amazonas.* Perú.

33. Mitchel, H.B. (2010). *Image Fusion: Theories, Techniques and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. Germany.

34. Muñoz Aguayo, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. Centro de Información de Recursos Naturales.* Chile.

35. Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. España.

36. Orellana Días, O. (2012). *Estimación del carbono almacenado en la zona núcleo del parque nacional montaña de Celaque (pnmc) honduras, utilizando la teledetección y sistemas de información geográfica.* Honduras.

37. Orgaz, A. (2018). *Energía renovable: La biomasa*. La Tablada, Córdoba, España.

38. Perea Ardila, M.A. (2018). *Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora "Iguaque"*. Colombia.

39. Rahman, M. M., Robson. A. J (2016). *A Novel Approach for Sugarcane Yield Prediction Using Landsat Time Series Imagery: A Case Study on Bundaberg Region*. University of New England, Australia.

.

40. Reyes Palomeque, G. (2018). *Estimación de la biomasa epigea en bosques tropicales secos de la península de Yucatán combinando datos lidar e imágenes multiespectrales de muy alta resolución*. México.

41. Rojas Unda, S.R. (2015). *Estimación de biomasa forestal Mediante el uso de imágenes radar.* Madrid, España.

42. Russo, Ricardo O. (2009). *Guía práctica para la medición de la captura de carbono en la biomasa forestal. Universidad EARTH,* Costa Rica.

43. Sacristán Romero, F. (2006). *La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. Universidad de Zaragoza*. Zaragoza, España.

44. Starr, I. Guzmán, S. Ramos, V.H. (2016). *Reducción de Emisiones por Deforestación Evitada en la Zona de Usos Múltiples de la Reserva de la Biosfera Maya en Guatemala (GuateCarbon)- CONAP.* Guatemala

45. Tovar Blanco, A.L. (2018). *Estimación de biomasa aérea de Eucalipto (Eucalyptus grandis) y pino (Pinus spp) en plantaciones forestales comerciales, usando imágenes satelitales Sentinel.* Bogotá, Colombia.

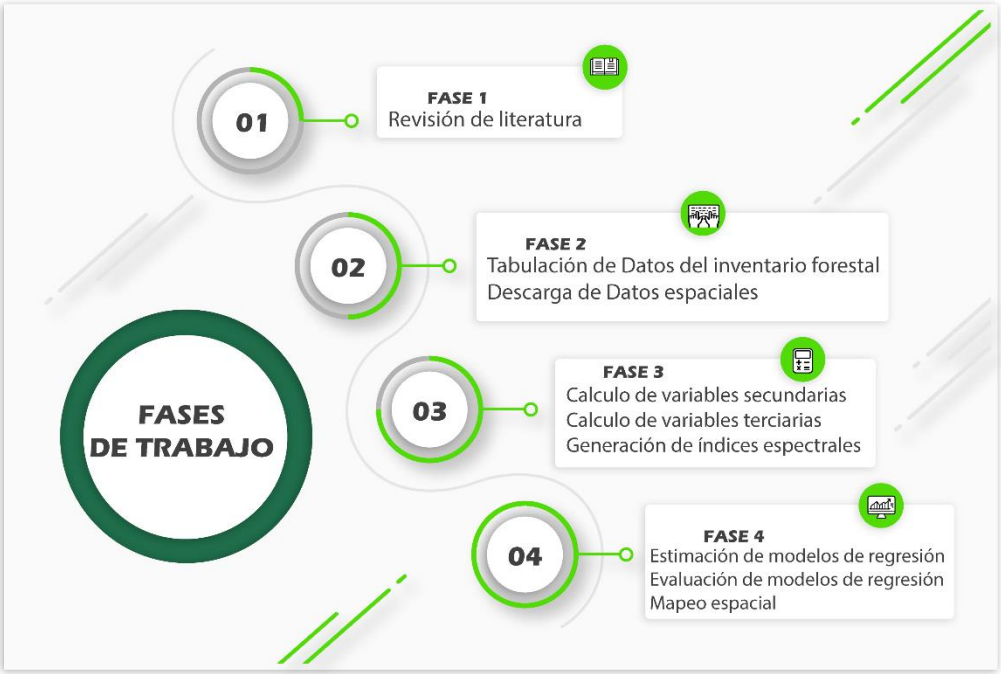
46. USGS. (20 de mayo de 2019). *Normalized Difference Moisture Index.* USGS. Recuperado el 25 de agosto de 2022 de https://www.usgs.gov/landsat-missions/normalized-difference-moisture-index.

47. Valdivia Favián, J. (2020). *Índices de vegetación para la estimación de biomasa Arbórea en sistemas agrosilvícolas de fincas en Zihuateutla*. Puebla, México.

48. Wade, T., Somer, S. (2015). *SIG de la A la Z: Diccionario ilustrativo de los sistemas de información geográfica*. Esri Press.

APENDICE

Apéndice 1. **Fases de trabajo**



Fuente: elaboración propia, realizado con Adobe illustrator.