



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE GEOGRAFÍA

MAESTRÍA EN ANÁLISIS ESPACIAL Y GEOINFORMÁTICA

**TRABAJO TERMINAL DE GRADO
MODALIDAD TESIS**

**ESTIMACIÓN DE CONTENIDO DE CARBONO EN BOSQUES TEMPLADOS
A PARTIR DE BIOMASA AÉREA CON IMÁGENES DE SATÉLITE**

Que para obtener el grado de:
Maestra en Análisis Espacial y Geoinformática

PRESENTA

Licenciada en Geoinformática
Anel Reza Reza

DIRECTORA

Dra. en Manejo de Recursos Naturales
XANAT ANTONIO NÉMIGA

CODIRECTORES

Dr. en Ingeniería
ROBERTO FRANCO PLATA

Dr. en Ciencias del Agua
FRANCISCO ZEPEDA MONDRAGON

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	vii
Abstract	viii
1. Introducción	9
1.1. Antecedentes	11
1.2. Planteamiento del Problema	13
1.3. Justificación	14
1.4. Objetivos	15
1.4.1. Objetivo General	15
1.4.2. Objetivos Específicos	15
2. Marco teórico	17
2.1. Cambio Climático y bosques	17
2.2. Los bosques como sumideros de Carbono	20
2.3. Reservorios de Carbono en bosque	22
2.4. Métodos para la estimación de biomasa y Carbono sobre el suelo	23
2.5. Imágenes de satélite	26
2.6. Firma espectral de la vegetación	27
2.7. Índices de vegetación	28
2.8. Especie de estudio	29
2.9. Percepción remota	30
2.10. El programa Landsat de observación terrestre	31
2.11. Características de Landsat 8	31
2.12. Plataformas de descarga de imágenes	33
2.13. Sistemas de información geográfica (SIG)	34
2.14. Relación espacial	34
2.15. Métricas para evaluar modelos de regresión	35
2.16. Error relativo medio	36
3. Método	37
3.1. Datos de campo	38
3.1.1. Método de muestreo	38
3.1.2. Sitios de muestreo	38
3.1.3. Recolección de datos de campo	39
3.1.4. Tratamiento de los datos	40
3.1.5. Estimación del contenido de Carbono	41

3.2. Datos satelitales.....	42
3.2.1. Descarga de datos.....	43
3.2.2. Identificación y recorte de imágenes.....	43
3.2.3. Descarga de las bandas.....	44
3.2.4. Cálculo de índices de vegetación en las imágenes.....	45
3.2.5. Estadísticas de zona.....	46
3.2.6. Relación entre variables de campo y valores de los índices.....	47
3.2.7. Estimación de Carbono.....	48
3.2.8. Evaluación del modelo.....	48
4. Discusión de Resultados.....	51
4.1. Datos de campo.....	51
4.2. Datos satelitales.....	53
4.4. Relación entre datos de campo e índices espectrales.....	55
4.5. Evaluación del modelo.....	57
Conclusiones.....	60
Recomendaciones y aportaciones.....	62
Bibliografía.....	63
Anexos.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de técnicas para la estimación de la biomasa aérea.	24
Tabla 2. Índices de vegetación.	29
Tabla 3. Bandas espectrales del satélite Landsat 8.	31
Tabla 4. Sitios o plataformas de descarga de imágenes de satélite.....	33
Tabla 5. Número de árboles por sitio	40
Tabla 6. Comparación de áreas de estudio.	42
Tabla 7. Diferencias de los niveles de procesamiento de la imagen.....	45
Tabla 8. Fórmulas de los índices espectrales.	46
Tabla 9. Total de Carbono por sitio de árboles densos.	51
Tabla 10. Total de Carbono por sitio de árboles fragmentados.....	52
Tabla 11. Imágenes resultantes de aplicar los índices espectrales.....	53
Tabla 12. Resultados del coeficiente de determinación (R2) entre los sitios y los valores de los índices espectrales.....	56
Tabla 13. Coeficientes de estimación.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del carbono (Ecuared, 2020).	20
Figura 2. Reservorios de carbono (Ortega et al., 2010)	22
Figura 3. Esquema de un sistema de teledetección (Olaya, 2020).	25
Figura 4. Esquema del espectro electromagnético (Hernández & Montaner, 2009).	27
Figura 5. Firma espectral de la vegetación (Chuvienco, 2002).	28
Figura 6. Pinus hartwegii y sus fascículos característicos (Carrasco, 2022; Pozos, 2024).	30
Figura 7. Regiones espectrales registradas para Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 (NASA, s.f.).	33
Figura 8. Diagrama de procesos, modificado de (Márquez, 2007).	37
Figura 9. Mapa de Ubicación de los sitios de muestreo. Elaboración propia.	39
Figura 10. Sitios de muestreo y mediciones (Cedillo, 2017).	40
Figura 11. Espacio de recorte de la imagen en el sitio EO Browser (Navegador EO, s.f.).	44
Figura 12. Tabla de atributos de los sitios de muestreo con carbono estimado y estadísticas de zona. Elaboración propia.	47
Figura 13. Mapa de estimación y puntos de validación. Elaboración propia.	49
Figura 14. Mapa de sitios de muestreo densos y fragmentados. Elaboración propia.	52
Figura 15. Histogramas del índice de vegetación ajustado al suelo. Elaboración propia	54
Figura 16. Histogramas del índice de pigmentos insensibles a la estructura. Elaboración propia.	55
Figura 17. Representación espacial de los resultados. Elaboración propia.	57
Figura 18. Gráfica de los valores reales y estimados de carbono arbóreo por sitios de validación.	58
Figura 19. Gráfica de regresión lineal de los datos estimados y de campo.	58

RESUMEN.

Se estimó el contenido de Carbono arbóreo en bosques de *Pinus hartwegii* del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), en una porción del ejido de San Juan de las Huertas del municipio de Zinacantepec. El desarrollo de la investigación se basó en tres momentos. El primero enfocado al tratamiento y recolección de datos de campo. Un segundo en el procesamiento de las imágenes de satélite Landsat 8 y el tercero en la evaluación del modelo y mapa de contenido de Carbono. Fue importante contar con una ecuación alométrica para el cálculo de Carbono con los datos de campo, y para este caso se aplicó la elaborada con datos de los bosques *Pinus hartwegii* del Parque Nacional Ixta-Popocatepec por Carrillo et al. (2016).

A las imágenes de satélite Landsat 8 descargadas de la plataforma EO browser de Sentinel HUB, se les aplicaron cinco índices espectrales dentro del software QGIS, los cuales fueron NDVI, SAVI, NDMI, SIPI Y GNDVI. Los valores del Índice de vegetación de diferencia normalizada verde o GNDVI tuvieron una relación relativamente alta de 0.6, entre el Carbono de campo y los valores del índice de cada píxel, en comparación con los otros índices. A partir de este resultado se generó un modelo para estimar el contenido de Carbono en el resto del área forestal mediante la calculadora ráster del software QGIS, utilizando la ecuación $Y = -16725.8 + (34842.3 \cdot \text{GNDVI})$.

Las estimaciones tuvieron un rango entre los 9123.4 y 1186.5 kg. Un paso fundamental fue la validación o evaluación del modelo y por ende de los resultados, para tal fin se aplicaron dos métricas, la primera: el error relativo medio que dio como resultado un valor de 25.8% y el segundo fue un coeficiente de estimación de 1.

Palabras clave: Ecuaciones alométricas, *Pinus hartwegii*, Landsat 8, Estimación de la captura de Carbono.

ABSTRACT.

Carbon content is estimated at the *Pinus hartwegii* stands located at the Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), at San Juan de las Huertas location within Zinacantepec municipality. Research had three phases. The first one focused on the data collection during fieldwork, the second one on the treatment of Landsat 8 imagery and the third one on the desing and evaluation of a model to map Carbon content at APFFNT forests. An allometric equation was used to estimate the carbon content from the fieldwork data, specifically, the one developed by Carrillo et al. (2016) to estimate the Carbon content of *Pinus hartwegii* stands at the Parque Nacional Ixta-Popo.

Landsat 8 Satellite imagery was downloaded from the EO Browser, SentinelHUB web page and 5 indexes were calculated with such information: NDVI, SAVI, NDMI, SIPI Y GNDVI in QGIS. The GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) values were the most correlated to the amount of Carbon estimated in field, in comparison with the other indexes, with a r value of 0.6. From this result, a model to estimate the Carbon content was calculated using the raster calculator function of QGIS and applying the following ecuation: $y = -16725.8 + (34842.3 \text{ (GNDVI)})$.

Estimations of Carbon Content oscillated between 9123.4 y 1186.5 kg. Model validation was carried using two metrics; the RMSE yield a value of 25.8% and the estimation coefficient, a value of 1.

Key words: Allometric equations, *Pinus hartwegii*, Landsat 8, Carbon content estimation.

1. INTRODUCCIÓN.

Los ecosistemas forestales brindan importantes servicios ambientales para los seres vivos, tales como: “regulación de la temperatura, provisión de agua en calidad y cantidad, captura de Carbono, generación de oxígeno, amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales, protección y recuperación de suelos, barrera contra ruidos, refugio de biodiversidad y embellecimiento del paisaje y recreación” (Reyes y Gutiérrez, 2010, p. 98). Los bosques son uno de los principales sumideros de Carbono, ya que capturan y almacenan dióxido de Carbono de la atmósfera, siendo vital mantenerlos como estrategia de mitigación ante el cambio climático.

El bosque del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFF), es vital ya que presta varios servicios ambientales incluyendo la regulación hidrológica y del clima, la captura de Carbono y la recreación. Debido a su ubicación, éstos son indispensables para todo el Valle de Toluca. Como la mayoría de las zonas boscosas del país y quizá del mundo, presenta diversas problemáticas, tales como plagas, incendios forestales, extracción ilegal, que han provocado su deterioro, haciendo urgente su conservación.

Las estrategias de manejo de los ecosistemas forestales en el Nevado de Toluca, propuestas por Endara y Herrera (2016), destacan que la participación ciudadana dentro de proyectos relacionados con el manejo de los bosques es necesario, pues da pie a que se reconozcan que la producción de madera ya no es el objetivo único y principal del bosque en el futuro; por el contrario, existen otros servicios ambientales que provee, como la captura de Carbono. Por otro lado, en el programa de manejo del APFF indica que no se ha cuantificado la captura anual de Carbono en el área en forma reciente (CONANP, 2016).

Los mercados de servicios ambientales por captura de Carbono, establecidos para mitigar el cambio climático, a través del manejo forestal, exigen contar con información actualizada sobre variables o parámetros forestales, que mediante la percepción remota es posible

realizar. En este sentido, Torres et al. (2016) afirman que el avance continuo de los sensores remotos, en términos de resolución: espacial, temporal y radiométrica, así como en las herramientas de cómputo en la nube para su tratamiento y accesibilidad, ofrecen oportunidades para desarrollar mejores técnicas de análisis, que den base al manejo forestal sustentable, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

Las aplicaciones de la percepción remota en la estimación de Carbono son diversas, existiendo métodos basados en el uso de sensores ópticos y de radar, así como de avionetas y drones, para producir imágenes en las que se calculan diversos índices espectrales e indicadores biofísicos. Estos, combinados con datos de campo y ecuaciones alométricas, han permitido estimar el contenido de Carbono en plantaciones y bosques. En este trabajo se usaron imágenes del satélite LANDSAT 8, a las cuales se les aplicaron cinco índices espectrales cuyos valores fueron correlacionados con los datos de campo de 20 sitios de muestreo. El modelo del resultado de esta correlación permitió estimar el contenido de Carbono del resto del área definido para el estudio, ubicada cerca del conocido paraje “parque de los venados” que forma parte del área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), perteneciente al ejido de San Juan de las Huertas, municipio de Zinacantepec.

1.1. Antecedentes.

Diversas investigaciones han demostrado la utilidad de los índices calculados sobre imágenes satelitales para estimar la captura de Carbono. Esto permite obtener información cada vez más específica de las condiciones de la vegetación. Aunado a ello, el trabajo en campo que permite obtener muestras *in situ* de la especie del árbol y las variables biofísicas y al relacionarlas con los índices de vegetación permite estimar el servicio ambiental que genera el bosque del área de estudio.

El inventario de reservas de carbón de la Selva Pai, ubicada en Pakistán, se realizó en 2018 y 2020 mediante el uso de índices de vegetación (NDVI y EVI) derivadas de las imágenes de satélite Landsat-8 OLI/TIRS, contrastados con datos de campo en entorno de sistemas de información geográfica. Los resultados mostraron una correlación positiva entre las reservas de Carbono entre diferentes especies de árboles seleccionadas y los índices calculados en la imagen, tales como el NDVI medio y los valores medios de EVI (Shafique, Hashim y Iqbal, 2021).

En bosques Altos de los Andes en Boyacá, Colombia, se estimó la biomasa aérea y el contenido de Carbono, utilizando datos de campo y teledetección. Para hacerlo se empleó información de 23 parcelas de muestreo, donde se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) de cada árbol ≥ 10 cm y se estimó el contenido de Carbono mediante ecuaciones, para posteriormente correlacionar tres índices de vegetación (NDVI, SAVI y EVI) obtenidos a partir de dos imágenes mejoradas del satélite LANDSAT 8 OLI en época seca y lluviosa del año 2016 (Perea, Andrade y Segura, 2021).

En Tailandia se estimó la captura de Carbono sobre el suelo usando imágenes de satélite Landsat 7 ETM+ en combinación con datos de campo (Laosuwan y Uttaruk, 2016). Las imágenes fueron corregidas y aplicaron el índice de vegetación modificado del suelo ajustado 2 (MSAVI-2), así como un índice denominado de cobertura fraccional del dosel aéreo (FC). En campo establecieron parcelas donde se midió la altura y el DAP de cada árbol, tomando en cuenta aquellos con altura de 130 cm y DAP de 4.5 cm o más, para el cálculo

del Carbono se usaron ecuación alométrica para plantas agroforestales en Tailandia. La relación entre la FC y el contenido de Carbono demuestra que, con un número alto de FC, había un aumento de contenido de Carbono.

Un análisis comparativo de la utilidad de diferentes sensores remotos demostró que la alta resolución espacial no mejora las estimaciones de los parámetros forestales. Se usaron dos imágenes de satélite con diferentes resoluciones espaciales: QuickBird y SPOT 5 HRG. Para hacerlo las imágenes fueron co-registradas para asegurar una correspondencia espacial, se transformaron a reflectancia atmosférica y corrigieron atmosféricamente. Así mismo se aplicaron dos clasificaciones (supervisada y orientada a objetos) lo que permitió clasificar a la imagen en tres categorías (bosque, no bosque y sombras) para aislar los píxeles de bosque para el cálculo de los promedios de los datos espectrales (Torres et al., 2016).

En el estado de Hidalgo, México se ha elaborado un mapeo de Carbono arbóreo aéreo en bosques. Las particularidades del estudio fueron que: no se consideró en las mediciones de campo a los árboles jóvenes, el valor medio de las lecturas del GPS en las parcelas se usó para minimizar el error posicional. Así mismo, se usaron tres parcelas en suelo desnudo para documentar espectralmente las situaciones de mínima biomasa en la construcción del modelo (Aguirre et al., 2009). Los números digitales o valores de la imagen de satélite fueron convertidos a reflectancia atmosférica. Posteriormente se extrajo el promedio de la reflectancia dentro de las parcelas, para minimizar la varianza y enseguida se construyeron cuatro índices espectrales de vegetación: NDVI, NDVI₄₁, NDVI₄₂ y NDVI₄₃. El análisis de la relación entre datos de campo y datos espectrales se hizo con dos modelos stepwise y K⁻ⁿ, esta última usada para estimar a los píxeles objetivo, mediante el cálculo de una media ponderada inversamente a la distancia espectral. Las conclusiones del trabajo demuestran que la densidad de los bosques de coníferas es mejor explicada con índices sensibles a la humedad, debido a que el Carbono aéreo mostró una correlación negativa con los datos crudos de reflectancia y los índices de vegetación sensibles a la humedad.

Los índices espectrales calculados en imágenes obtenidas por Sentinel-2 han demostrado ser de utilidad para establecer una relación con la biomasa aérea. Se ha comparado la

eficiencia de 11 índices utilizando datos del inventario forestal y ecuaciones alométricas para calcular la biomasa aérea y las existencias de Carbono. Con ello, muestrearon 55 parcelas, con radio de 17.84 m en una distancia de 200 m (Khan, Iqbal y Nawaz, 2020).

Un estudio de valoración del contenido de Carbono en bosques de la cuenca del río Magdalena, consideró una clasificación de 8 clases de cobertura del suelo con base en el Inventario Nacional Forestal, y un muestreo sistemático; obteniendo 52 sitios de muestreo de 3,000 m². Con los datos de campo se aplicaron ecuaciones alométricas y un análisis de clases diamétricas, con el que concluyeron que *Pinus hartwegii* es dominante en su estructura diamétrica y que las diferencias en contenido de Carbono se deben a la edad del arbolado, a su estado de conservación, pero también a factores del ambiente tales como la accesibilidad y las pendientes (Galeana, Ordóñez y Corona, 2013).

También se han usado datos espectrales para estimar Carbono en arbustos de un desierto en Mongolia. Solo se usaron 32 parcelas, se usarán imágenes de radar y multiespectrales; Pléiades 1 y Sentinel-2, teniendo como resultado que los índices NDVI y MSAVI fueron buenos indicadores debido a que no se saturan en arbustos dispersos y son más sensibles a parámetros del dosel (Batsaikhan et al., 2022).

1.2. Planteamiento del Problema.

Uno de los mayores problemas ambientales que enfrenta el planeta durante esta última época es el cambio climático, ocasionado por el incremento en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. El gas que más contribuye con este fenómeno son las emisiones de CO₂ (bióxido de Carbono), de las que el 77 % se genera por el uso de combustibles fósiles, el 22 % consecuencia de la deforestación y un 1 % por las actividades de producción (Sánchez y Lara, 2007).

Los bosques son importantes sumideros de Carbono, pues tienen la capacidad de incorporar el Carbono en su estructura por periodos largos de tiempo mediante fotosíntesis. En contraste, también son considerados la segunda fuente de emisión de CO₂ debido a los incendios, la tala de árboles y los cambios de uso de suelo (Rojo, Jasso y Velásquez, 2003).

Sin duda, una de las acciones principales para hacer frente al cambio climático, es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante la conservación de los bosques. El área donde se desarrolló esta investigación está ubicada dentro del Área de Protección de Flora y Fauna del Nevado de Toluca (APFFNT). Los bosques que forman parte de esta área viven sometidos a presión antrópica, que afecta sus superficies y reduce sus densidades (Endara y Herrera, 2016). En esta región abunda *Pinus hartwegii*, especie que tiene un alto valor maderable, y por lo tanto es explotada para fines comerciales, lo que ha afectado la estructura de sus comunidades (Chávez, Campos y Pérez, 2022).

Derivado de lo anterior, existe un gran interés por cuantificar el contenido de Carbono en los bosques, y si bien existen diversos métodos para obtenerlo (Aguirre y Jiménez, 2011), es pertinente desarrollar y probar nuevos métodos e instrumentos para la estimación de Carbono, que permitan contar con la información de manera rápida y lo más certera posible.

1.3. Justificación.

El papel de los bosques ante el cambio climático es imprescindible, pues por su capacidad de fijación y captura de Carbono en cada una de sus partes, ayudan a disminuir el efecto invernadero (CONAFOR, 2017). Comprender su papel en el ciclo del Carbono, en el marco de las dinámicas ecológicas del planeta es fundamental para comprender cómo funciona la biosfera y plantear estrategias para la sostenibilidad Brown (1997) como se citó en Perea, Andrade y Segura (2021).

Los acuerdos internacionales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, tales como los de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Protocolo de Kioto, los Acuerdos de París, los ODS, entre otros, exigen información actualizada de Carbono en los ecosistemas, con el fin de generar proyectos de manejo forestal que permitan conciliar las necesidades locales de producción maderable con los compromisos globales de mitigación de CO₂ en la atmósfera.

Contar con estimaciones precisas del contenido de Carbono permite asignar fondos mediante los programas de reducción de la deforestación y la compensación por bonos ambientales y generar indicadores para dirigir las actividades forestales hacia escenarios más sustentables.

Actualmente hay varias metodologías que emplean técnicas de percepción remota enfocadas a la estimación de biomasa y Carbono en estudios locales (Aguirre et al., 2009). La percepción remota y las imágenes de satélite son una tecnología que proporciona información sobre varios aspectos de la Tierra, nos abre grandes posibilidades de entender su funcionamiento, mediante la innovación en sensores y métodos, que, durante las últimas cinco décadas, han apoyado de manera particular a la cuantificación de reservas y flujos de Carbono y otros temas de interés para la humanidad.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo General.

Estimar el contenido de Carbono arbóreo en rodales de *Pinus hartwegii* ubicados en el Área de Protección de Flora y Fauna del Nevado de Toluca, mediante índices espectrales calculados en imágenes satelitales Landsat 8 y modelos desarrollados en entorno de sistemas de información geográfica.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Calcular el contenido de Carbono en árboles de *Pinus hartwegii* en 20 sitios de muestreo.
- Procesar imágenes obtenidas por el sensor Landsat 8 para calcular índices espectrales de vegetación NDVI, GNDVI, MSI, NDMI, SAVI, y SIPI.
- Establecer la correlación espacial entre el contenido de Carbono calculado por sitio y los índices espectrales calculados en imágenes satelitales

- Estimar el contenido de Carbono en el resto de los árboles, mediante modelos espaciales desarrollados en entorno de sistemas de información geográfica.
- Validación del modelo generado.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Cambio Climático y bosques.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC] define al cambio climático como:

“un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, el cual altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (CMNUCC, 2004:3).

Algunos investigadores han documentado la variabilidad en el clima, como Masson y Panmao (2022) reportan que en la escala global los extremos cálidos (incluidas las olas de calor) se han vuelto más frecuentes e intensos en la mayoría de las regiones terrestres desde la década de 1950, mientras que los extremos fríos se han vuelto menos frecuentes y severos; percibiéndose una tendencia de cambio en el clima global. Los impactos observables del cambio climático son, entre otros: aumentos regionales de temperatura, aumento de la frecuencia de aridez y sequía, alteraciones en los ecosistemas marinos, terrestres y de agua dulce, impactos en los sistemas humanos, incluidos la seguridad del agua y la producción de alimentos, la salud y el bienestar, y las ciudades, los asentamientos y la infraestructura (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2019).

Las investigaciones climáticas destacan que los gases de efecto invernadero provocan eventos climáticos extremos. Estos gases, debido a los compuestos químicos que contienen bloquean los rayos del sol, impidiendo que el calor se libere al espacio, lo que genera un aumento en la temperatura del planeta. Por otro lado, los gases de efecto invernadero (GEI) son importantes para la vida en el planeta, porque le permiten mantener la temperatura adecuada, siendo su función calentar la superficie terrestre de manera natural (IPCC, 2021).

Un problema es que la concentración de estos gases se ha incrementado artificialmente desde la revolución industrial, por la creciente emisión generada por las actividades humanas. Los gases de origen antropogénico son: Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Hidroclorofluorocarburos (HCFC), Perfluorocarburos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆). El alto uso de combustibles fósiles, iniciando por el Carbón, han sido detonantes en el incremento de Dióxido de Carbono (SEMARNAT, 2022).

La concentración atmosférica de Dióxido de Carbono se ha incrementado desde 1750 en 31.0% (una tasa de incremento sin precedente en 20 mil años), siendo la más alta en los últimos 420 mil años, e incluso, probablemente de los últimos 2 millones de años (Porrua, 2001). Así que, el Dióxido de Carbono es el responsable químico número uno de todo este lío denominado cambio climático y es un gas familiar, pues lo exhalamos todos los seres vivos (De Ambrosio, 2015).

Como respuesta, se han coordinado diversos esfuerzos internacionales para atender el cambio climático, estableciendo así diversas organizaciones y acuerdos entre las que destacan la IPCC, CMNUCC, el Grupo Asesor sobre Gases de Efecto Invernadero y el Protocolo de Kioto. Dentro de este se obliga legalmente a los países industrializados a reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero de origen humano en un 5% en el periodo 2008-2012. Mientras que los países en desarrollo deberán sólo informar sobre los niveles de sus emisiones (Doñate, 2002). Entre las medidas de mitigación consideradas en el Protocolo para cumplir con el objetivo de disminuir los GEI están el Comercio internacional de emisiones, y los Mecanismos de desarrollo limpio y aplicación conjunta.

Los mecanismos de desarrollo limpio consisten en la elaboración de proyectos de desarrollo sustentable para contribuir a la reducción de emanaciones y al incremento de la absorción de Gases de Efecto Invernadero. Esto incluye diseño, validación, registro, instrumentación, monitoreo y verificación. Pueden trabajarse conjuntamente entre países desarrollados y en vías de desarrollo, con la finalidad de generar inversiones para la reducción de emisiones. Por su parte, la aplicación conjunta consiste en que los países desarrollados inviertan en

proyectos de reducción de emisiones en los países en desarrollo, permitiendo cumplir sus compromisos en la reducción de emisiones implementando proyectos en otro país.

El Comercio Internacional de Emisiones es un mecanismo enfocado a los países en desarrollo para que puedan vender los permisos de emisiones excedentes a los países que consideran más oneroso alcanzar sus metas (López, 2009). Los mecanismos anteriores tienen la finalidad de ayudarse entre países para obtener los niveles de emisiones comprometidas en el Protocolo de Kioto, a partir de la compra de reducciones a otros países, además del beneficio común que implica la reducción de emisiones. Así mismo, “se establecieron una serie de políticas y medidas como (i) el fomento de la eficiencia energética en los sectores pertinentes, (ii) la protección y mejora de los sumideros de los GEI, (iii) la promoción de prácticas sostenibles de gestión forestal, (iv) la promoción de modalidades agrícolas sostenibles, (v) el aumento del uso de energías renovables y tecnologías de secuestro de Carbono, (vi) medidas para limitar y/o reducir emisiones de GEI, no controladas por el Protocolo de Montreal, en el sector del transporte, (vii) medidas para limitar y/o reducir las emisiones de CH₄ mediante su recuperación y utilización en la gestión de residuos, y (viii) reducción progresiva de las deficiencias del mercado, los incentivos fiscales, exenciones tributarias y arancelarias, y subvenciones que sean contrarias al objetivo de la Convención” (Camps y Pinto, 2004: 30).

El Protocolo de Kioto, artículo 3, apartado 4; resalta la importancia de determinar la “modalidad, norma y directriz para asignar las cantidades de GEI atribuidas a las actividades humanas, relacionadas con las emisiones por fuentes y absorción de sumideros como suelos agrícolas, o por cambio del uso de la tierra y silvicultura” (CMNUCC, 2004:4).

En el séptimo informe derivado de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, celebrada en Marrakech se solicita a los países documentar sus métodos para contabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de las actividades humanas directas de degradación y eliminación de la vegetación (CMNUCC, 2003). En 2004, en el décimo informe, se enfatiza acerca de la necesidad de estimar las reservas de Carbono,

mediante metodologías simplificadas para el establecimiento y vigilancia de proyectos derivados de los mecanismos establecidos en el Protocolo de Kioto (CMNUCC, 2004). Así la CMNUCC muestra un mayor interés en los bosques como fuente de sumideros de Carbono terrestre e impulsa la investigación y desarrollo de métodos para contabilidad del Carbono en los ecosistemas forestales.

2.2. Los bosques como sumideros de Carbono.

Burbano (2018) dice que “el Carbono es el elemento químico clave en los compuestos de naturaleza orgánica, el cual circula entre los océanos, la atmósfera, el suelo y el subsuelo” (p. 85). La vegetación es la encargada de incorporar el Carbono atmosférico al ciclo biológico por medio de la fotosíntesis (Benjamín & Masera, 2001). A lo largo del ciclo de proceso biogeoquímico de síntesis, fijación y producción de Carbono, en diferentes medios bióticos y abióticos y escenarios que incluyen la biósfera, litósfera, atmósfera e hidrosfera, el Carbono se mantiene en movimiento (Figura 1). “Los organismos vivos están constituidos por compuestos de Carbono, el cual se gana en los procesos metabólicos realizados durante su crecimiento, ya sea en el follaje, ramas, raíces o tronco” (Ordoñez, 1999:13). El proceso es de vital importancia para mitigar el cambio climático, ya que disminuye los niveles de gases de efecto invernadero y mantiene el ciclo biogeoquímico equilibrado.

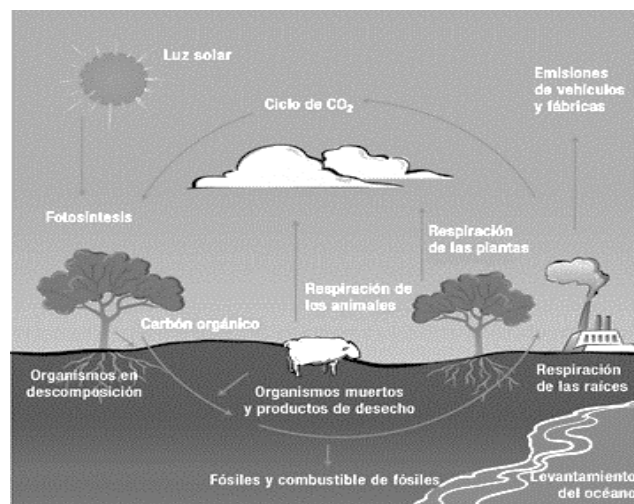


Figura 1. Ciclo del carbono (EcuRed, 2020).

Así, los bosques integran dióxido de Carbono presente en la atmósfera e incorpora este gas a su biomasa. Debido a estos procesos naturales, se considera que los bosques son sumideros de carbono, ya que extraen el gas y lo integran a su composición y estructura. Por otro lado, pueden convertirse en emisores de Carbono al ser perturbados por incendios, deforestación, cambio de uso de suelo, entre otras (Arango, 2011).

A través de la fotosíntesis, la vegetación absorbe el dióxido de Carbono necesario para su crecimiento y posteriormente lo almacenan en forma de biomasa aérea y en las raíces. Los bosques capturan y conservan más Carbono que cualquier otro ecosistema terrestre por la gran cantidad de biomasa acumulada, además de que participan con el 90% del flujo anual de Carbono, haciendo un intercambio entre la atmósfera y el suelo mediante la fotosíntesis. Esto abre la posibilidad de mitigar gases GEI por medio de la captura de Carbono en diferentes ecosistemas vegetales, conocidos como sumideros (Apps et al., 1993; Brown et al., 1993; Dixon et al., 1994 como se citó en Benjamín, 2001). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCC por sus siglas en inglés) define como sumidero de Carbono; cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe o remueve un Gas de efecto invernadero (GEI), un aerosol o un precursor de un GEI de la atmósfera.

Los bosques como parte de los ecosistemas terrestres tienen un papel importante dentro del ciclo del carbono. Con base a Gallardo y Merino (2007), "aproximadamente el 50% del total de Carbono contenido en los ecosistemas terrestres se encuentra en los suelos y la biomasa de los ecosistemas forestales" (p. 50). Las estimaciones realizadas sostienen que los bosques del mundo almacenan 289 Gigatoneladas de Carbono solo en su biomasa (Cordero, 2011:6). Por ello, han recibido el nombre de sumideros de Carbono, que se definen como: un componente que almacena acumula o libera una sustancia como los gases de efecto invernadero. El papel de los bosques como sumideros de gases de efecto invernadero y principalmente reservorios de CO₂, los convierte en pieza clave para la mitigación de las emisiones de GEI. Por ello es necesario, además de conservar la biomasa forestal, tener la capacidad de medir cuánto Carbono almacenan para valorar su capacidad de mitigación.

2.3. Reservorios de Carbono en bosque.

Los acuerdos de Marrakech, derivados del séptimo periodo de sesiones de la CMNUCC en 2001, reconocen cinco reservorios de Carbono principales en los bosques: la biomasa sobre el suelo, la biomasa bajo el suelo, la madera muerta, la hojarasca y la materia orgánica del suelo (Figura 2). Biomasa es toda materia orgánica aérea o subterránea, viva o muerta y se divide en biomasa sobre el suelo, biomasa por debajo del suelo, biomasa de madera muerta y hojarasca (FAO, 2004). La Biomasa sobre el suelo contempla toda la biomasa viva por encima del suelo incluyendo el tronco, tocón, ramas, corteza, semillas y hojas. Este tipo de biomasa se encuentra contenida y es calculada para dos depósitos diferentes.

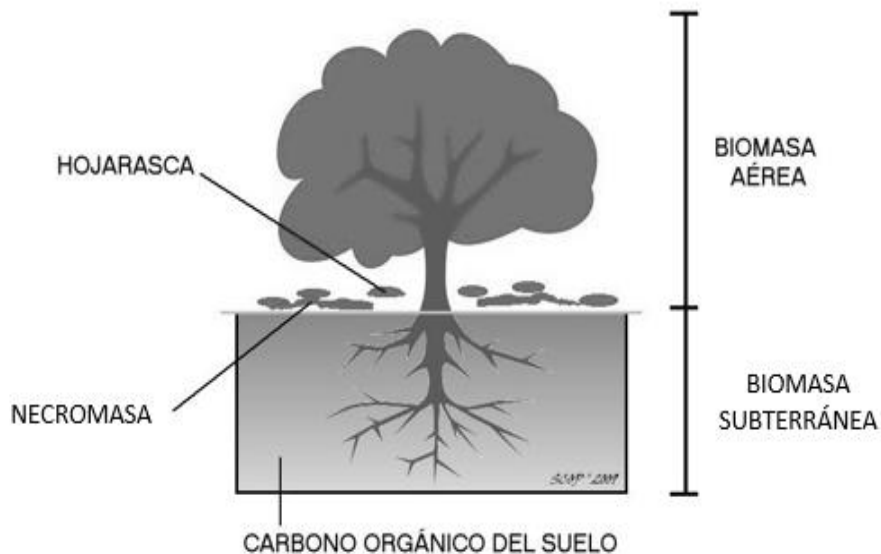


Figura 2. Reservorios de carbono (Ortega et al., 2010)

La biomasa bajo el suelo se refiere a toda la biomasa viva de las raíces vivas, excluyendo raíces pequeñas de menos de 2 mm de diámetro, pues no pueden discriminarse de la materia orgánica del suelo u hojarasca. La madera muerta (árboles muertos en pie y troncos caídos) incluye la madera que yace en la superficie, las raíces muertas y los tocones de un diámetro superior o igual a 10 cm. La hojarasca comprende el Carbono encontrado en toda la biomasa muerta, con un diámetro inferior al diámetro mínimo usualmente de 10 cm, en

varios estadios de descomposición por encima del suelo mineral u orgánico. Para el cálculo del Carbono de la hojarasca se sigue el mismo procedimiento que para la biomasa de los tallos leñosos menores a 5 cm y el sotobosque.

2.4. Métodos para la estimación de biomasa y Carbono sobre el suelo.

Derivado de las investigaciones y acciones internacionales, los bosques son vistos como una de las principales acciones de mitigación del cambio climático. Se han realizado estudios de estimación de biomasa aérea y Carbono que incluyen en sus métodos de cálculo el uso de imágenes de satélite, tanto ópticas como de radar. Para calcular el contenido de Carbono de los árboles, se retoma el valor de la biomasa y se multiplica por el porcentaje de Carbono determinado en cada especie o grupo de especies (Aguirre y Jiménez, 2002). Diferentes estudios han estimado Carbono mediante ecuaciones publicadas en la literatura científica.

Las ecuaciones alométricas permiten predecir la biomasa y/o Carbono de un árbol a partir de las características dendrométricas más fáciles de medir; como su diámetro o su altura (Picard, Saint-André y Henry, 2012). Diversos estudios reportan la generación y uso de ecuaciones alométricas para estimar biomasa en bosques, en donde fue necesario pesar los árboles; mediante muestras recolectadas en campo, que requieren desramar y cortar el árbol para ser medido, es decir a partir de un muestreo destructivo. Es necesario considerar las dimensiones del arbolado incluido en la muestra y la zona geográfica de las ecuaciones utilizadas en el proyecto, ya que no todos los modelos alométricos se ajustan a las condiciones de los bosques (López et al., 2018). Los métodos para la cuantificación del almacenamiento de biomasa y Carbono en bosques son esenciales para el cálculo de balance de emisiones de GEI, porque permiten explicar el papel que juegan los bosques (Castellanos et al., 2013).

Existen un sinnúmero de métodos para estimar la biomasa, mismos que se clasifican en tres categorías (Tabla 1), aquellos basados en mediciones en campo, en sensores remotos y en Sistemas de Información Geográfica (Lu, 2006).

Tabla 1. Resumen de técnicas para la estimación de la biomasa aérea.

Categoría	Método	Datos usados	Características
Mediciones en campo	Muestreo destructivo	Muestreo de árboles	Árboles individuales
	Ecuaciones alométricas	Muestreo de árboles	Árboles individuales
	Conversión de volumen de biomasa	Volumen de muestreo de árboles o tablas de estándares	Árboles individuales,
Sensores remotos	Alta resolución especial	Fotografía aérea, IKONOS	Por nivel de píxel
	Media resolución especial	Landsat TM/ ETM+ SPOT	Por nivel de píxel
	Gruesa resolución especial	IRS-1C WiFS, AVHRR	Por nivel de píxel
	Datos de radar	Radar, LIDAR	Por nivel de píxel
Sistemas de Información Geográfica	Basado en datos auxiliares	Elevación, pendiente, precipitación, tipo de suelo, otros	Por nivel de píxel o nivel de campo

Fuente: (Lu, 2006).

A continuación, se describe cada uno de los métodos mencionados en el cuadro anterior.

El método destructivo consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa directamente, determinando luego su peso seco. Consiste en cosechar toda la vegetación, estimación de la biomasa aérea por el método del árbol medio y modelos de regresión, que relacionan la masa seca de algunos árboles con otras variables (DAP, altura, peso específico de la madera, entre otras) (Schlegel, 2001; Vasquez y Arellano, 2012).

Por su parte, el método de ecuaciones alométricas estima

“la biomasa con ecuaciones o modelos matemáticos creados por medio de análisis de regresión entre variables de los árboles, tales como el diámetro a la altura del pecho (Dap), la altura comercial (Hc) y total (Ht), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera” (Fonseca, 2017:94).

Fonseca (2017) menciona que los métodos de conversión de volumen de biomasa ocupan el “volumen del fuste y con la densidad básica se calcula el peso seco y un factor de expansión” (p. 94), por su parte, Bowers, Coleman y Fletcher (2002) determinan el peso seco total (biomasa total del árbol) y posteriormente multiplicar por el número de árboles por hectárea.

Los métodos basados en sensores remotos, según (Lu, 2006) permiten un rápido procesamiento de grandes cantidades de datos y altas correlaciones entre las bandas espectrales y los parámetros de la vegetación. Los sensores remotos (D) forman parte del sistema de teledetección (Figura 3), que se complementan con; un foco energético o fuente de luz (A) y la superficie terrestre (B) (Chuvienco, 2002). El sensor incorpora la capacidad de «leer» la radiación electromagnética y registrar su intensidad dentro de una zona concreta del espectro y puede ir desde una simple cámara fotográfica hasta un sensor más especializado (Olaya, 2020) para posteriormente ser guarda la información registrada, en una imagen en formato digital, que contendrán la reflectancia de los objetos capturados.

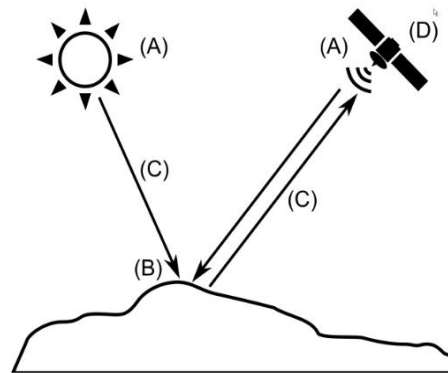


Figura 3. Esquema de un sistema de teledetección (Olaya, 2020).

El método necesita la estimación de biomasa mediante la definición parcelas, de las cuales se colecta información de diámetro y altura de cada árbol que la integra, después se calcula densidad de la madera y la biomasa de cada árbol con ecuaciones alométricas. Posteriormente, con los datos de los sensores remotos se generan variables relacionadas con la biomasa que permiten generar modelos estimación (Hernandez et al., 2021). Según Lu (2006) este método puede subdividirse con respecto a la resolución espacial de las

imágenes derivadas de los sensores remotos. La resolución espacial, designa al objeto más pequeño que puede distinguirse sobre la imagen y se mide en milímetros sobre la imagen o metros sobre el terreno (Chuvienco, 2002). Por tanto, esta clasificación se divide en alta, media, gruesa resolución espacial y datos de radar.

Los métodos basados en mediciones en campo generan buenos resultados. Son más precisos, pero también más caros porque consumen mucho tiempo y requieren el corte de árboles. Sin embargo, a partir de sus resultados se derivan las ecuaciones alométricas, que son usadas para estimaciones basadas en sensores remotos de grandes extensiones de bosque, reduciendo tiempos y costos. Para desarrollar los métodos basados en sensores remotos o sistemas de información geográfica, es necesario contar con datos obtenidos de métodos basados en mediciones en campo (Carrillo et al., 2016).

2.5. Imágenes de satélite.

Las imágenes de satélite están compuestas por bandas espectrales que almacenan los datos de la cantidad de radiación electromagnética emitida o reflejada por un objeto. El nivel de energía se describe a través de la longitud de onda; al rango de radiación electromagnética se le denomina espectro electromagnético (Figura 4) y se divide en regiones que captan ciertas longitudes de onda: las de radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos x y rayos gamma (Hernández y Montaner, 2009).

Cada objeto espacial de la tierra proporciona una respuesta espectral distinta. El sol emite la fuente de energía principal que llega a la tierra, denominada radiación solar, y cuando ésta incide sobre el objeto espacial, una parte se refleja y es reenviada al espacio, otra se absorbe, lo que incrementa la energía del objeto y/o se transmite hacia otros objetos. La porción de radiación que se refleja es denominada reflectividad y su comportamiento depende de las características físicas y químicas del objeto, así como de factores externos, que pueden ser ángulo de observación del sensor, iluminación solar, relieve y condiciones atmosféricas. Esto influye a que cada objeto no presente un comportamiento espectral único y permanente, sino una variabilidad espectral (Chuvienco, 2002).

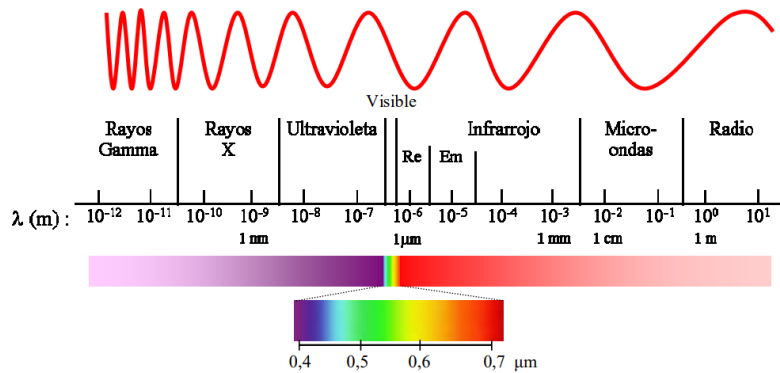


Figura 4. Esquema del espectro electromagnético (Hernández & Montaner, 2009).

2.6. Firma espectral de la vegetación.

A la variación de la reflectancia en función de la longitud de onda de los objetos se le denomina firma espectral, y esta depende de la radiación reflejada, absorbida y transmitida de cada objeto. En la Figura 5 observamos el comportamiento de la vegetación sana y adulta en el espectro electromagnético. En la porción del azul y roja presenta una baja reflectividad causada por la absorción de los pigmentos foliares o fotosintéticos, mientras que en la fracción verde e infrarrojo cercano la reflectividad incrementa la reflectividad, en este caso debido, al tejido interno de la hoja o bien su estructura y va reduciéndose en el infrarrojo medio y largo principalmente por la absorción de energía provocada por el contenido de agua en la vegetación (Maya, 2019).

La reflectividad de la vegetación depende del estado fenológico, forma, tamaño, grosor y contenido de humedad de la hoja y por ende del dosel arbóreo. Así como de factores externos, como la pendiente, orientación, posición del sol durante el año, presencia de la atmosfera y por las características ópticas y la distribución espacial de los elementos que se encuentren a su alrededor (Manzo & Meave, 2003).

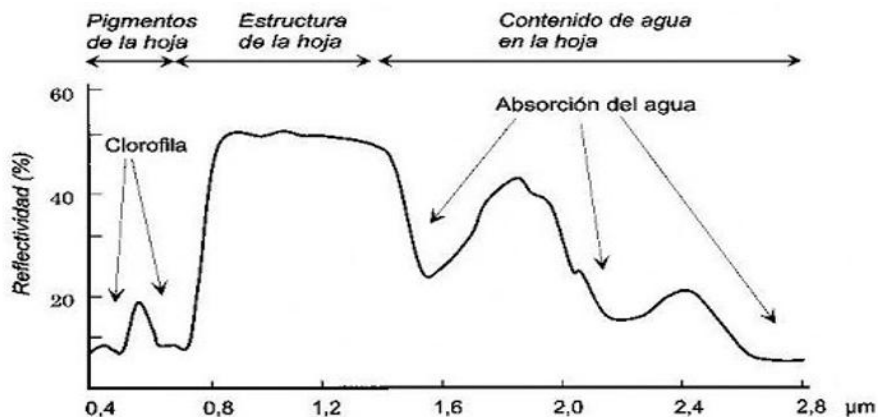


Figura 5. Firma espectral de la vegetación (Chuvienco, 2002).

2.7. Índices de vegetación.

Con la información que proveen los datos recopilados en las imágenes de satélite, se han desarrollado diversos índices que miden la productividad de la vegetación. (Xiao *et al.*, 2019). “Los índices espectrales de vegetación han sido utilizados en el campo de los sensores remotos desde los inicios de esta tecnología, como una forma indirecta de estimar variables” (Paz *et al.*, 2015:177) relacionadas con el estado de la vegetación, incluyendo su verdor, su vigorosidad y salud. “Los índices combinan las reflectancias superficiales o valores espectrales de dos o más longitudes de onda con el objetivo de resaltar una propiedad o característica en particular de la vegetación representada cuantitativamente en un solo valor de píxel en la imagen de satélite” (NV5, s.f.). Estos se calculan a partir de la combinación matemática de dos o más bandas de una imagen satelital multiespectral y tienden a presentar de forma más nítida las características de la vegetación (Cruz *et al.*, 2020).

La tabla 2 resume los índices considerados en esta investigación. Los cuales presentan en común, el uso de valores de reflectividad en las porciones del espectro del rojo y del infrarrojo cercano, debido al comportamiento espectral de la vegetación, donde en la región del espectro rojo mantiene una absorción de la radiación electromagnética, además de que la consideran que está fuertemente relacionada con el contenido de clorofila y en el infrarrojo cercano una alta reflectividad comparada con el comportamiento que presenta

en el espectro visible, en este caso intervenida por el LAI (Leaf Area Index o Índice de Superficie Foliar), que es una métrica usada para medir la cantidad de follaje (Bannari et al., 1995 citado por (Gilabert et al., 1997).

Tabla 2. Índices de vegetación.

Índice	Definición	Utilidad	Valores
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada	Mide el verdor y la densidad de la vegetación.	-1 a 1
GNDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada verde	Estima la actividad fotosintética y determinar el consumo de agua y nitrógeno de la vegetación.	-1 a 1
MSI	Índice de estrés hídrico	Mide el estrés del dosel ya que es sensible al cambio de contenido de agua.	0 a más de 3
NDMI	Índice de humedad de diferencia normalizada	Determina el contenido de agua en la vegetación, eliminando las variaciones inducidas por la estructura interna de la hoja	-1 a 1
SAVI	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo	Usado donde la cubierta de la vegetación es baja y la influencia del brillo del suelo afecta la respuesta espectral de la vegetación.	-1 y 1
SIPI	Índice de pigmentos insensibles a la estructura	Representa la estructura variante del dosel de la vegetación o índice de área foliar	0 a 2

Fuente: (Sentinelhub, 2023).

2.8. Especie de estudio.

Los sitios de muestreo de *Pinus hartwegii* se encuentran ubicados en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT), el cual a su vez está dentro del Eje Neovolcánico Transversal, que presenta un área de gran concentración de pinares. En elevaciones superiores a 3.000 sobre el nivel medio del mar prevalecen los bosques de *Pinus hartwegii* (Rzedowski, 2006). Según Endara et al. (2013), es la especie única en el mundo capaz de establecerse en condiciones ambientales extremas, por lo que es conocido como el pino de las alturas.

La especie se puede identificar como se muestra en la figura 6 por su cono rojizo muy oscuro, con escamas delgadas y frágiles, además de tener hojas rígidas, llamadas fascículos, de entre 3 a 6 acículas (Musálem & Solis, 2000). La estructura forestal de *Pinos hartwegii* es abierta, con un estrato arbóreo que alcanza los 25 m a los 35 m y conforme la aumenta la altitud su diámetro y altura disminuyen (Carrillo, 2018).



Figura 6. *Pinus hartwegii* y sus fascículos característicos (Carrasco, 2022; Pozos, 2024).

2.9. Percepción remota.

Según Olaya, (2020) percepción remota “es una técnica que permite desarrollar, capturar, procesar y analizar imágenes satelitales obtenidas de sensores remotos, aerotransportados y con mediciones in situ”, y, en consecuencia, permite estudiar la distribución de los recursos naturales, y fenómenos físicos que ocurren en la superficie terrestre como la contaminación, la deforestación, cambios en la superficie terrestre, inundaciones, hundimientos, etc. Desde sus inicios a la fecha ha tenido un crecimiento en diferentes ámbitos como nuevos satélites, sensores, software de procesamiento, hardware para el procesamiento, información en la nube, uso de nuevos algoritmos, entre otros, que permiten explotar exponencialmente esta técnica para el estudio de la Tierra.

2.10. El programa Landsat de observación terrestre.

La percepción remota permite recopilar datos necesarios en la estimación de Carbono, tanto por la mejora de las características de los sensores remotos, como por las técnicas de análisis (Torres *et al.*, 2016). La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) diseñó el primer proyecto específico para la observación de los recursos naturales; el escáner mapeador multiespectral MSS (Chuvieco, 2002). Desde 1970, la constelación Landsat genera imágenes satelitales continuas de la superficie de la Tierra desde el espacio y ha evolucionado con el objetivo de captar información más precisa y detallada, mejorando las cualidades radiométricas, geométricas y espaciales en sus satélites y sensores. El primer sensor fue el Multiespectral Scanner (MSS), seguido del Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y fue mejorado en el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas contaba una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros (INEGI, 2020). Recientemente, NASA ha lanzado Landsat 8 y Landsat 9; dos satélites que generan información multiespectral de la región óptica e infrarroja con el sensor OLI y de la región del infrarrojo térmico con el sensor TIRS. Su mantenimiento y operación está a cargo de NASA; en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

2.11. Características de Landsat 8.

El satélite Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013. Es un sensor pasivo ya que mide la energía radiante reflejada mientras los rayos del Sol están presentes. En consecuencia, su órbita es heliosincrónica, lo que significa que pasa por cualquier punto de la Tierra en el mismo tiempo que el Sol, con una trayectoria oblicua. Orbita a una altitud de 705 km con un ancho de barrido de 185 km, tiene una inclinación de 98.2° y su resolución espectral es de 11 bandas espectrales (Tabla 3), distribuidas en el espectro electromagnético como a continuación se detallan.

Tabla 3. Bandas espectrales del satélite Landsat 8.

Banda	Espectro visible	Longitud de onda central (micrómetros)	Resolución espacial (metros)
Banda 1	Ultravioleta	0.433 - 0.453	30
Banda 2	Azul	0.450 - 0.515	30
Banda 3	Verde	0.525 - 0.600	30
Banda 4	Rojo	0.630 - 0.680	30
Banda 5	NIR	0.845 - 0.885	30
Banda 6	SWIR	1.560 - 1.660	30
Banda 7		2.100 - 2.300	30
Banda 8	Pancromático	0.500 - 0.680	15
Banda 9	Ciro	1.360 – 1.390	30
Banda 10	Infrarrojo térmico	10,6 - 11,2	100
Banda 11		11,5 - 12,5	

Fuente: (NASA, s.f.)

Como se observa en la figura 7. El sensor OLI (Operational Land Imager) registra la información hasta la banda 9, se adiciona la banda 1, con el objetivo de ser utilizada en estudios hídricos y costeros y la banda 9 para la detección de nubes. Mientras que el sensor TIRS (Thermal Infrared Sensor) se enfoca a los rangos espectrales del infrarrojo térmico, estos se capturan en una resolución radiométrica de 12 bits; permitiendo la mejora en la capacidad de captura y registro de cambios en la superficie terrestre. También se destaca que cuenta con una banda pancromática, sensible a todas las longitudes de onda del espectro visible, que da la posibilidad de complementar la resolución de las otras bandas. Respecto a la resolución temporal, el satélite Landsat 8 hace una visita de la misma zona cada 16 días. La resolución espacial desde la banda 1 hasta la banda 7 y la banda 9 es de 30 metros, aunque cuenta con 15 m de resolución en la imagen pancromática de la banda 8 y de 100 m en la región térmica, en las bandas 10 y 11.

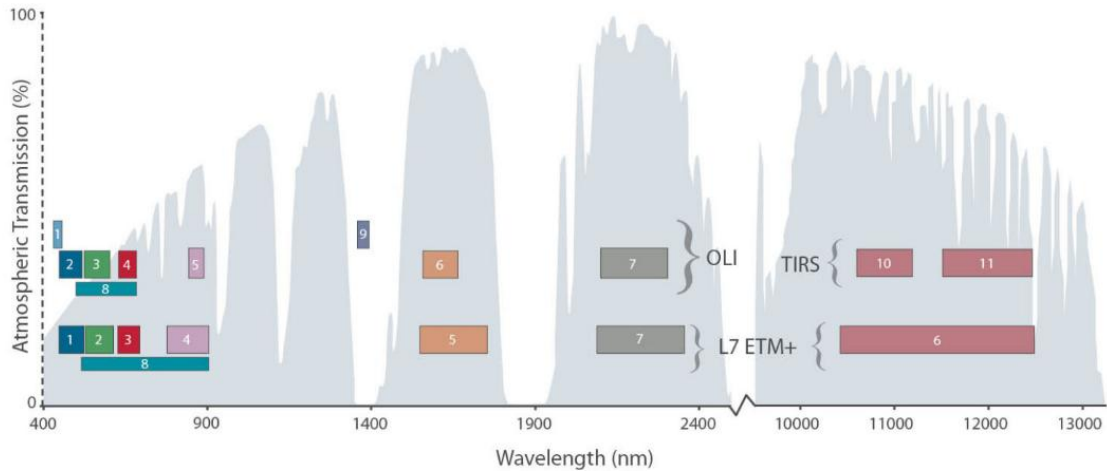


Figura 7. Regiones espectrales registradas para Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 (NASA, s.f.).

2.12. Plataformas de descarga de imágenes.

Actualmente existen diferentes sitios o plataformas de internet para descarga de imágenes de satélite de forma gratuita, en ellas se almacenan datos de diferentes satélites y sensores, proporcionan los datos con y sin preprocesamiento. Algunos de estos sitios cuentan con las funciones de aplicar análisis o cálculos sobre las imágenes de manera remota y almacenar la información en la nube; como aplicación de índices espectrales, análisis de temporalidad de cambio, combinación de bandas y generación de algoritmos. Enseguida se enlistan sitios de acceso en la tabla 4.

Tabla 4. Sitios o plataformas de descarga de imágenes de satélite.

Núm.	Sitios o plataformas	Liga de acceso
1	Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos	https://earthexplorer.usgs.gov/
2	World View, Earth data de la NASA	https://worldview.earthdata.nasa.gov/
3	Google Earth Engine de Google	https://earthengine.google.com/
4	Copernicus Open Access Hub y Sentinel Playground	https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=5&lat=50.16282&lng=20.78613&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=MOSAIC
6	EOSDA LandViewer	https://eos.com/landviewer/?lat=19.2858&lng=-99.6525&z=11
7	EO Browser - Sentinel Hub	https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/
8	Banco De Imágenes Del INPE	http://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore
9	MAXAR open Data Program	https://xpress.maxar.com/?lat=0&lon=0&zoom=3.0

Fuente: (EOS, 2024; Geoinnova, 2022; MASTERGIS, 2022).

Las plataformas permiten descargar las imágenes satelitales en L1 o L2. Según el sitio de la USGS, los datos de nivel 1 son descargados como números digitales (DN) en un formato entero de 16 bits sin signo y se pueden convertir a reflectancia o radiancia. En el caso del nivel 2 los productos son datos sobre la reflectancia de superficie y son generados a partir de las imágenes de nivel 1 (USGS, s.f.). EO Browser Sentinel Hub, que permite consultar o analizar datos satelitales de los sensores como Sentinel, Envisat Meris, MODIS, Landsat, entre otros sensores de forma más accesible y fácil, ya que trabaja en un entorno SIG, pero en la nube, apoyando en la sincronización, almacenamiento, procesamiento, algoritmos de descompresión, metadatos o bandas de sensores (Sentinelhub, 2023).

2.13. Sistemas de información geográfica (SIG).

Olaya (2020) define a los SIG como una herramienta para trabajar con información georeferenciada mediante operaciones de lectura, edición, almacenamiento, gestión y análisis de datos espaciales, así como la generación de resultados como mapas, informes y gráficos y Tomilson menciona que los componentes de un SIG son software, hardware, datos, personas y métodos. Diversas paqueterías apoyan a la manipulación y operación de los datos. Quantum GIS; el cual es un software SIG (sistema de información geográfica) libre y de código abierto, que permite crear, editar, visualizar, analizar y publicar información geoespacial (QGIS, 2002).

2.14. Relación espacial.

La relación espacial, se realizó bajo el enfoque del concepto de regresión, el cual es una de las técnicas usadas en diversas disciplinas como las ciencias sociales, naturales, ambientales y de la Tierra, que permite analizar, examinar, explorar y modelar la relación, pero principalmente predecir o estimar el valor de la variable dependiente en función de las variables independientes (Lina et al., 2006). La técnica se desarrolla en entorno de sistemas de información geográfica y consiste en ajustar un modelo a los datos, estimando coeficientes a partir de las observaciones, con el fin de predecir valores de la variable de respuesta a partir de una o más variables. Además, en los diferentes tipos de regresión

como: regresión lineal simple, regresión lineal múltiple, regresión logística, regresión de poisson, regresión de cox, entre otras, la selección de la regresión, que se usará para la estimación dependerá de la naturaleza de los datos y de lo que se quiera resolver.

Los resultados de la regresión lineal permiten conocer si la relación entre variables es estadísticamente significativa, en otras palabras, si la variable predictora explica la mayor parte de las variaciones. Esto puede verse en la variable R o medida de bondad, que se expresa en un valor entre cero y uno, si los valores de la variable dependiente observados son iguales a 1 significa que el modelo se ajusta perfectamente, por lo que entre más alto el valor mejor.

2.15. Métricas para evaluar modelos de regresión.

Existen varias métricas que pueden proporcionar información sobre la precisión y calidad de un modelo. El coeficiente de determinación o también conocido como R^2 es un modelo de interpretación simple y fácil de calcular, creado por (Vonesh & Chinchilli, 1997 como se citó en Guzman et al.,2012) con el fin de evaluar la bondad de ajuste entre valores predichos y valores observados. El resultado varía entre 0 y 1, mientras más cerca de 1, mejor se explica el modelo. En cuanto se acerca a 0, el modelo esta menos ajustado. Se expresa en la siguiente formula:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}$$

Donde:

Σ = sumatoria

m= número de observaciones

y = son los valores reales

\hat{y} = son los valores predichos

Por tanto, para resolverla se deberá calcular la media de los valores reales. Calcular la suma de total de cuadrados, seguido por la suma de los cuadrados de los residuos. Dividir la suma de cuadrados entre la suma de los cuadrados de los residuos, y restar a 1 el resultado.

2.16. Error relativo medio.

Este indicador de calidad de una medida se define como el cociente entre el error absoluto y el valor considerado como exacto o la media, puede ser positivo o negativo y no tiene unidades. Se suele expresar de la siguiente manera

$$\epsilon r = \frac{\sum |\bar{y} - y_i|}{\bar{y}}$$

Donde:

Σ = sumatoria

y = son los valores reales

\hat{y} = son los valores predichos

3. MÉTODO.

Existen varias metodologías como las mencionadas en los antecedentes, que usan la percepción remota en estudios locales dirigidos a la estimación de biomasa o Carbono para este caso se usarán las basadas en sensores remotos y datos de campo. El trabajo se divide en tres fases (Figura 8), la primera enfocada al tratamiento de los datos de campo, la segunda en el procesamiento de las imágenes de satélite y la tercera en la relación espacial de los datos de campo e imágenes de satélite y la última en la estimación del contenido de Carbono.

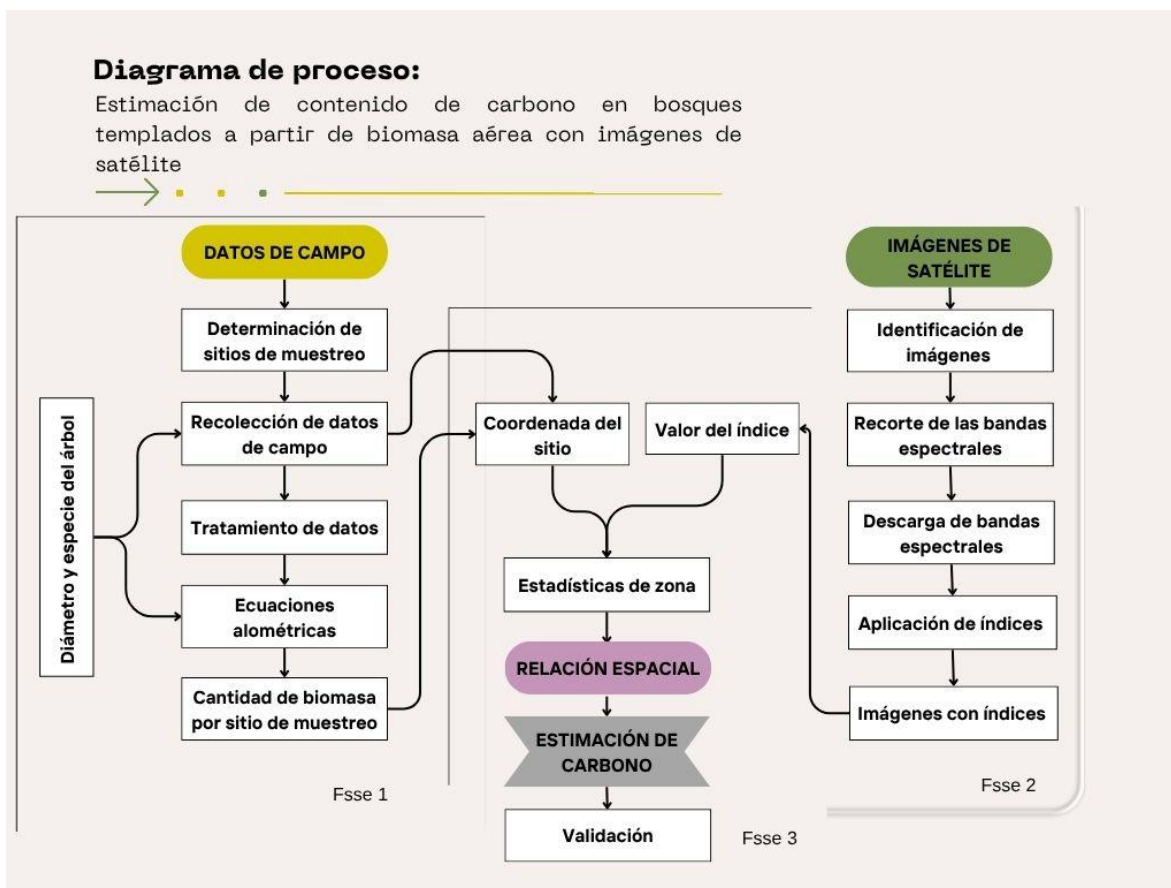


Figura 8. Diagrama de procesos, modificado de (Márquez, 2007).

3.1. Datos de campo.

Los datos de campo fueron derivados del proyecto de investigación titulado “Análisis espacial del nivel de infestación por muérdago enano en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca”, 2017. Del cual se nos proporcionaron 20 sitios de muestreo, recolectados en el mes de abril y junio de 2016, ubicados al noroeste del cráter del volcán en el Parque Nacional Nevado de Toluca y al norte del paraje denominado parque de los venados.

3.1.1. Método de muestreo.

Los sitios de muestreo se recolectaron de la adaptación del muestreo sistemático. Si bien, el muestreo sistemático consiste en distribuir una red de parcelas ordenadas conforme a una geometría regular, sobre el área de muestra (Mariscal et al., 2000), en el proyecto de investigación, se ubicaron las muestras o unidades muestrales (UM) en un patrón regular en toda la zona de estudio, que para el caso fueron las curvas de nivel, desde la cota 3000 msnm hasta la 4000 msnm a cada 100 metros de equidistancia, en consideración a la variabilidad climática asociada a la altitud (Mayer & Ott, 1991, como se citó en Cedillo Alonso, 2017).

3.1.2. Sitios de muestreo.

Podemos observar en la figura 9, que, de los 20 sitios de muestreo, los que se ubican en las curvas 3840 y 3820, en la esquina superior derecha o bien, al noreste siguen el patrón de la geometría regular de la curva de nivel y con la equidistancia correspondiente, el resto están distribuidos en toda el área.

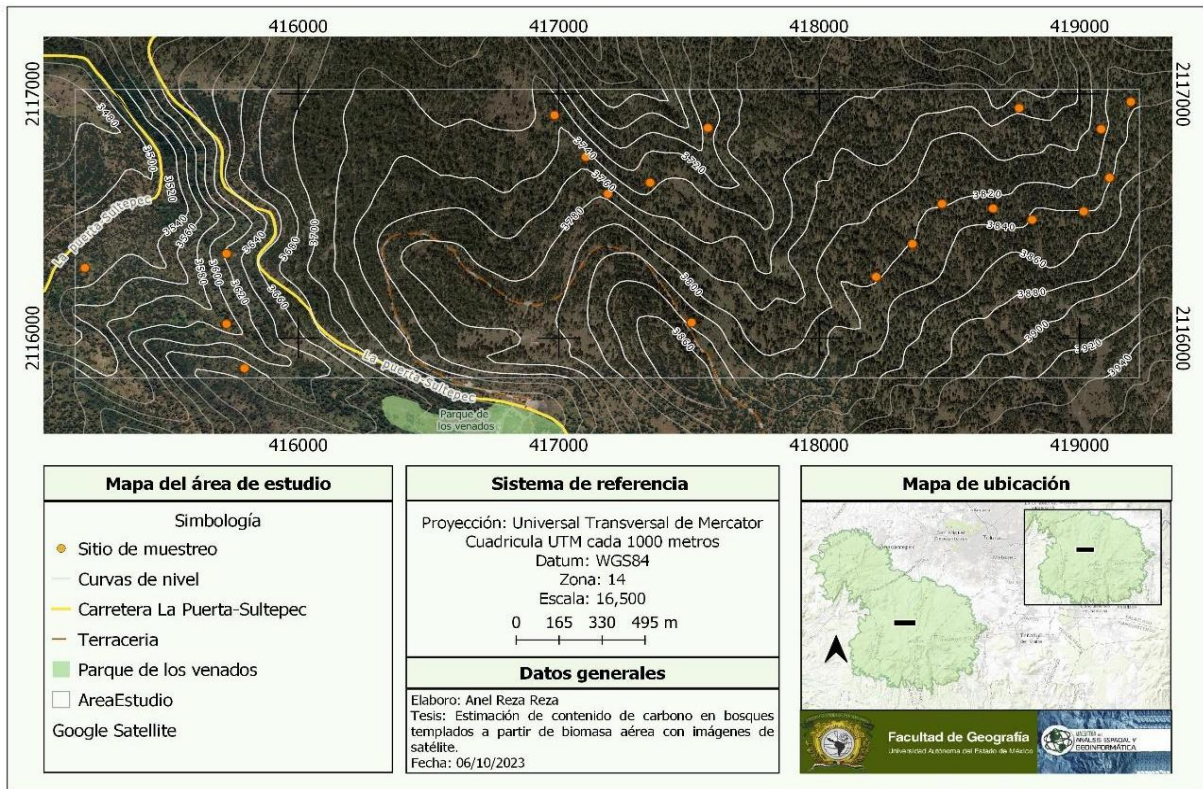


Figura 9. Mapa de Ubicación de los sitios de muestreo. Elaboración propia.

3.1.3. Recolección de datos de campo.

Cada unidad de muestreo (UM) se estableció a cada 200 metros, teniendo una forma circular (Figura 10), de 0.1 ha, 17.86 metros de radio y 35.6 metros de diámetro, en la cual para el levantamiento de la información (dasométricos) se forman los ejes X y Y dentro del círculo a partir del punto central y se delimitó una línea perpendicular por eje a una distancia de 1 metro. La información se recolectó considerando sitios para cada uno de los estados de desarrollo del bosque, reconociendo los siguientes: “fustales, plántulas, brinzales, latizales en el área total del círculo, así como árboles juveniles en las líneas perpendiculares a los ejes establecidos a 1 m de distancia” (Cedillo, 2017:49-52). La recolección fue en un formulario que recopilaba los datos de, número de sitio, fecha, coordenadas x, y, z, categoría, especie y DAP, entre otras variables de interés para el proyecto.

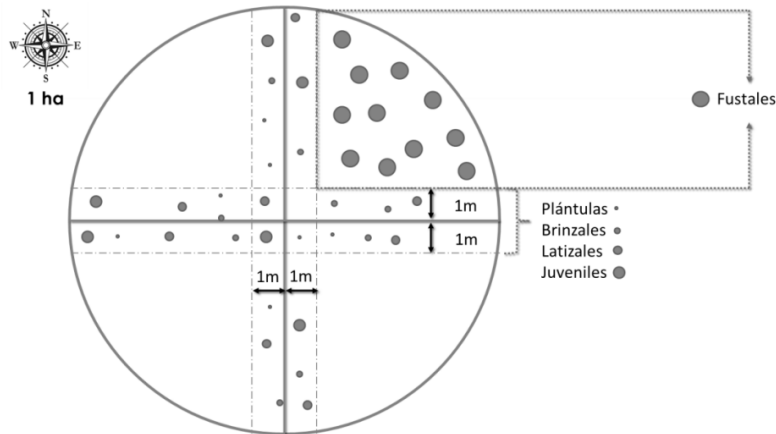


Figura 10. Sitios de muestreo y mediciones (Cedillo, 2017).

3.1.4. Tratamiento de los datos.

Los datos dasométricos recolectados en campo, se concentraron en un archivo de Excel, en dos hojas, diferenciados por categorías: densos y fragmentados, cada categoría con los siguientes datos: sitio (identificador), x, y, fecha, categoría, especie, y DAP (Anexo 1). Por cada categoría se recolectaron 10 sitios. Los bosques densos registraron un total de 217 árboles, mientras que los sitios de la categoría fragmentados un total de 152 individuos que en total suman 369 árboles considerados para el análisis (Tabla 5).

Tabla 5. Número de árboles por sitio

Sitio	Densos	Sitio	Fragmentados
1891	8	2002	13
1918	16	1954	61
1931	23	1949	11
1939	43	1970	19
1940	8	1989	15
1946	15	1829	10
1958	20	1867	7
1983	27	1868	7
2010	36	1910	6
2012	21	1888	3
Total	217	Total	152

Fuente: Elaboración propia con datos del muestreo.

Posteriormente cada sitio se convirtió a una entidad de punto, en formato de archivo *shape* de ESRI; este es un formato sencillo usado para almacenar información de atributos de entidades geográficas (ESRI, 2021). Dentro del software se definió la geometría del archivo para contar con datos con su asociación espacial (georeferidos) y con las propiedades o características de la recolección de campo, dentro del software GIS a este tipo de geometría se le denomina vectorial puntual. Por otro lado, fue necesario dibujar el área de muestreo en cada sitio, que como se mencionó anteriormente en el apartado de datos de campo, su diámetro de cada área fue de 35.6 metros y 17.86 metros de radio; esto se elaboró con la herramienta de geoprocso *buffer* con el valor del radio del muestreo.

3.1.5. Estimación del contenido de Carbono.

La ecuación alométrica se retomó del estudio realizado por (Carrillo et al., 2016) para la estimación de Carbono en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl de árboles de *Pinus hartwegii*. El trabajo se basó en técnicas de muestreo destructivo con 29 árboles y las predicciones resultantes presentan un alto ajuste (R^2 de 0.98) con el Carbono real.

El resultado de R^2 se derivó de aplicar la ecuación con el modelo ajustado $Y = b X^k$, donde la variable dependiente (Y) es el carbono, expresada en kilogramos y la variable independiente será el diámetro normal (DN) en centímetros, medido a 1.3 m de altura. Mientras que los parámetros “b” y “k” resultaron de la regresión lineal por el método de mínimos cuadrados. La ecuación resultante y usada para la estimación de carbono es:

$$C = 0.030 * DN^{2.472}$$

Donde:

C= Carbono en kilogramos.

DN= diámetro normal o diámetro de altura al pecho en cm.

En comparación (Tabla 6), las condiciones físico-climáticas del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl son similares a las del Área de Protección de Flora y Fauna del Nevado de Toluca, principalmente porque ambos se ubican en el Eje Volcánico Transversal a una altitud similar en promedio, además del clima, temperatura y precipitación media anual, pero con

un tipo de suelo igual. Por lo que, se considera que las ecuaciones alométricas estarán favoreciendo a una estimación del contenido de Carbono, con más exactitud.

Tabla 6. Comparación de áreas de estudio.

Característica	Parque Nacional Ixta-Popo	Área de Protección de Flora y Fauna del Nevado de Toluca
Ubicación	Parte central del eje volcánico transversal de México	
Altitud	Popocatepetl 5400 m.s.n.m. Iztaccíhuatl 5215 m.s.n.m.	4680 m.s.n.m.
Clima predominante	Frío subhúmedo de alta montaña	Frío
Temperatura media	5 a 12°C,	-2 °C a 7 °C
Temperatura del mes más frío	3 a 8°C	
Precipitación media anual	928 mm	200 a 1 800 mm
Tipo de suelo	Andosoles	Andosol (90 %)

Fuente: (Carrillo et al., 2016; Chávez et al., 2022).

La estimación de Carbono en campo consintió en la aplicación de las fórmulas generadas para los *Pinus hartwegii* en cada árbol registrado en el trabajo de campo a cada árbol registrado se le aplicaron las fórmulas antes mencionadas, sustituyendo solamente el DAP en correspondencia a la variable diámetro normal. Posteriormente fue necesario hacer una sumatoria del total de Carbono en cada sitio, por cada categoría (denso y fragmentado).

3.2. Datos satelitales

Las imágenes de satélite de Landsat 8 fueron descargadas del sitio denominado EO Browser de Sentinel Hub, quienes proveen colecciones de datos, principalmente de satélites Sentinel, así como acceso y descarga a otros conjuntos de datos como de GIBS, MODIS, y Landsat (Landsat 1-5 MSS, Landsat 4-5 TM, y Landsat 8-9) proporcionados por la NASA/USGS, además de GIBS, Proba-V y NICFI. Las imágenes usadas en el proyecto fueron de la misión Landsat 8, dado que el lanzamiento de Landsat 9 ocurrió en el año 2021 y las imágenes debían coincidir con la fecha del levantamiento de los datos de campo, siendo

estos de 2016. Las herramientas dentro del sitio de descarga facilitaron el procesamiento de los datos, en cuanto al recorte y corrección atmosférica.

3.2.1. Descarga de datos.

Desde el lanzamiento del primer satélite con fines de observación de la Tierra, los productos que de ellos se obtienen, han tenido diferentes medios para acceder a ellos, los cuales han evolucionado junto con las tecnologías de la información. Hoy, existen varias plataformas de descarga con imágenes de satélites gratuitas, y que además permiten hacer preprocesamientos o procesamientos en la nube.

La descarga de imágenes satelitales fue en la plataforma del navegador EO Browser Sentinel Hub. Se hizo una revisión de la galería de imágenes Landsat 8-9 del año 2016 entre los meses de enero y julio, tomando como criterio que, el levantamiento de la información fue entre los meses de abril y julio, esto permitió ampliar la probabilidad de encontrar imágenes sin nubes o con la menor nubosidad posible, dado que, entre los meses de junio y julio en la zona, son de los más lluviosos y no se encontraron imágenes sin nubes en esa temporada.

3.2.2. Identificación y recorte de imágenes.

La plataforma da la posibilidad de cargar un archivo en formato *geojson* con datum WGS84 de la zona de estudio o de interés, que en la figura 11 puede identificarse con un marco y una transparencia del relleno en color azul. En este caso se usó un polígono rectangular del área de estudio, cubriendo el área donde se distribuyen los sitios de muestreo. Dentro del rango de meses establecidos se identificaron 5 fechas: 21 de enero, 28 de enero, 6 de febrero, 13 de febrero y 01 de abril, las cuales presentaron un mínimo de porcentaje de nubosidad en el área de interés.

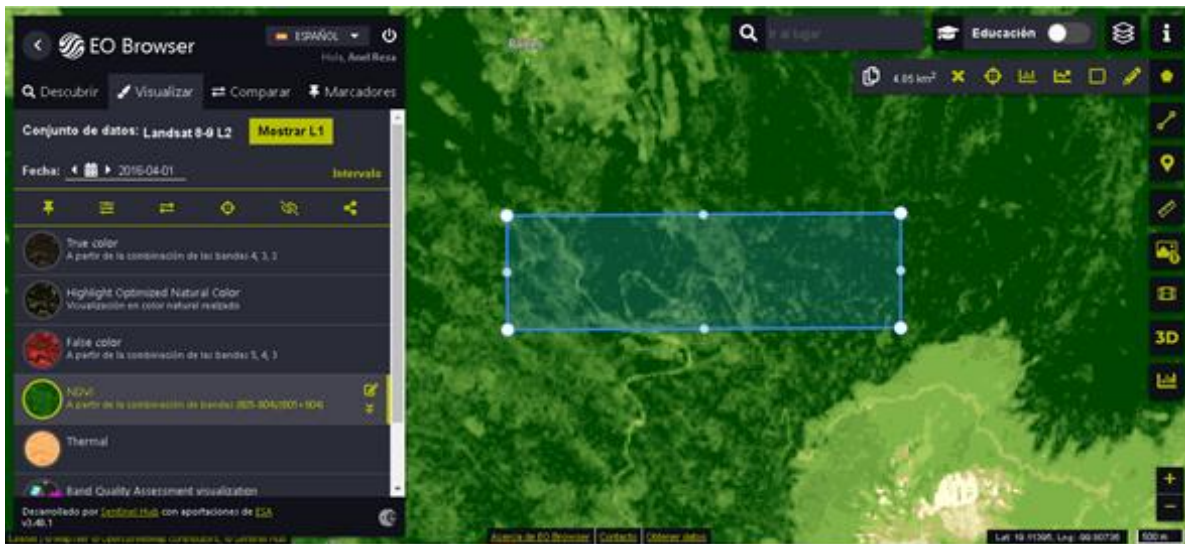


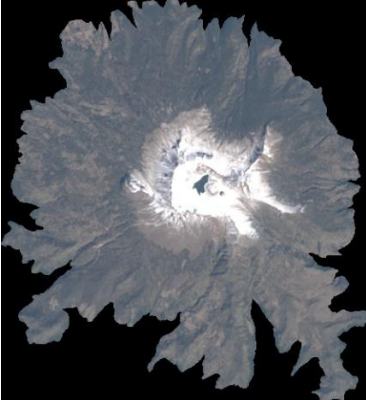
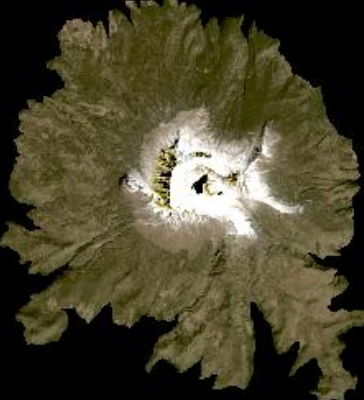
Figura 11. Espacio de recorte de la imagen en el sitio EO Browser (Navegador EO, s.f.).

3.2.3. Descarga de las bandas.

Si bien la plataforma cuenta con los algoritmos y las funciones para generar los índices espectrales y descargarlos, no fue posible trabajar con estos, dado que el software convierte los valores originales a escala RGB, impidiendo trabajar con el dato original del índice en el píxel. Por ello se decidió descargar las bandas espectrales y generar los índices en un software de escritorio. Las bandas espectrales se visualizan en tonos de grises por su resolución radiométrica. Las imágenes fueron descargadas en nivel de procesamiento 2 o L2, quiere decir que, están corregidas atmosféricamente.

En la tabla 7, podemos observar dos imágenes con una combinación de bandas en color natural (b4, b3, b2), del lado izquierdo con nivel de procesamiento L1 y del lado derecho con nivel de procesamiento L2 y visualmente ambas imágenes son diferentes, debido al brillo, después de aplicar la corrección atmosférica. Otro dato importante de puntualizar es que, si bien la resolución espacial de las imágenes Landsat es de 30m, la plataforma dio la opción de descargarlas con una resolución alta, es decir, con una resolución proyectada a 10m.

Tabla 7. Diferencias de los niveles de procesamiento de la imagen.

L1	L2
21 de enero 2016	
	

Fuente: Elaboración propia.

Se descargaron; la banda 1 ultravioleta (0.433-0.453 μm), banda 3 verde (0.525 - 0.600 μm), banda 4 rojo (0.630 - 0.680 μm), banda 5 infrarrojo cercano (0.845 - 0.885 μm) y banda 6 infrarrojo de onda corta (1.560 - 1.660 μm), para las cuatro fechas seleccionadas, dichas bandas son necesarias para el cálculo de los índices espectrales.

3.2.4. Cálculo de índices de vegetación en las imágenes.

Para el estudio de la vegetación, y en este caso de los bosques de *Pinus hartwegii*, se utilizaron índices espectrales que permiten caracterizar y entender mejor el comportamiento de la vegetación en el espectro electromagnético. Estos índices espectrales, calculados a partir de las bandas de Landsat 8, incluyen NDVI, GNDVI, MSI, NDMI, SAVI, y SIPI, y se detallan en la tabla 8; tanto su fórmula como su descripción. Uno de los índices más usado en este tipo de estudios es el NDVI, debido al comportamiento de la vegetación en el espectro electromagnético; bajos reflectivos en el espectro visible del rojo y altos reflectivos en el infrarrojo cercano. Mediante el software QGIS y utilizando la herramienta “calculadora raster”, se aplicaron las fórmulas matemáticas. En total se generaron 6 índices para las imágenes de las 5 fechas identificadas, resultado 30 imágenes para el análisis.

Tabla 8. Fórmulas de los índices espectrales.

Índice	Fórmulas Landsat	Descripción	Autor
NDVI	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	Se basa en la relación entre la cantidad de luz reflejada por la superficie terrestre en dos regiones del espectro electromagnético, luz roja e infrarroja. ^a (INEGI, s.f.)	Rouse et al., 1974
	$(\text{B5} - \text{B4}) / (\text{B5} + \text{B4})$		
GNDVI	$(\text{NIR} - \text{GREEN}) / (\text{NIR} + \text{GREEN})$	Se emplea para realizar estimaciones de la actividad fotosintética y es un índice de vegetación empleado comúnmente para determinar el consumo de agua y nitrógeno de la cubierta vegetal. (ESRI, s.f.)	(Gitelson et al., 1996)
	$(\text{B5} - \text{B3}) / (\text{B5} + \text{B3})$		
MSI	MidIR / NIR	Es una medida de reflectancia que es sensible al aumentar el contenido de agua de la hoja. (Sanabria et al., 2023)	Rock et al. (1985)
	B6 / B5		
NDMI	$(\text{GREEN} - \text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR})$ $(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$	“Detecta los niveles de humedad en la vegetación mediante una combinación de bandas espectrales de infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR)” (EOS, 2023).	McFeeters (1996)
	$(\text{B05} - \text{B06}) / (\text{B05} + \text{B06})$		
SAVI	$((\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R} + \text{L})) * (1 + \text{L})$	Es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección del brillo del suelo. (Tech, s.f.)	Huete (1988)
	$((\text{B5} - \text{B4}) / (\text{B5} + \text{B4} + 0.5)) * (1.5)$ L=0.5		
SIPI	$(\text{NIR} - \text{Blue}) / (\text{NIR} - \text{Red})$	Maximiza la sensibilidad a la proporción de carotenoides a clorofila, mientras minimiza el impacto de la estructura variable del dosel. (Sentinelhub, s.f.)	Peñuelas et al. (1995)
	$(\text{B05} - \text{B01}) / (\text{B05} - \text{B04})$		

Fuente: (Paz et al., 2015; EOS, 2023; Franzpc, 2021; Kemerer et al., 2007; Speranza, 2005;

Sims & Gamon, 2002)

3.2.5. Estadísticas de zona.

Para aplicar la herramienta, fue necesario conocer las características de cada sitio respecto a los índices espectrales y en este sentido se calcularon las estadísticas de zona de los sitios

de muestreo, por cada índice espectral (GNDVI, MSI, NDMI, NDVI, SAVI, SIPI) y por cada día, en el software QGIS, con la herramienta “estadísticas de zona por lotes”, pues permitió procesar rápidamente la información.

Dentro de la herramienta, se solicita indicar las estadísticas a calcular que en este caso fueron el promedio y valor máximo. Esto dio como resultado un archivo *shape* por cada estadística e índice espectral, la tabla de cada *shape* contiene los valores de la estadística y el contenido de Carbono previamente calculado, como se muestra en la figura 12.

Sitio	x	y	Fecha	Categoría	Especie	DAP	Biomasa	Carbono	field_10	_sum	_mean	_median	_stddev	_min	_max
1891	418219	2116251	01/04/2016	Fustal	Phartwegii	60	11342.20000000...	5347.600000000...	NUL	5.90863781278...	0.65651532014211	0.6586251258501	0.007254729770...	0.644934935665...	0.66637647151
1918	418338	2116386	01/04/2016	Juvenil	Phartwegii	8	16729.29999999...	7887.500000000...	NUL	8.002384543418...	0.727489503947...	0.727203607539...	0.007997451340...	0.715440213680...	0.743853444982
1931	418818	2116485	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	63	11412.29999999...	5381.100000000...	NUL	7.979936718940...	0.725448792630...	0.726407885551...	0.014888066707...	0.700123250484...	0.75378155708
1939	419016	2116519	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	22	8115.100000000...	3826.900000000...	NUL	7.195253133773...	0.71952531337738	0.720317095518...	0.010792067383...	0.697891414165...	0.73562037944
1940	418668	2116531	01/04/2016	Fustal	Phartwegii	62	11624.70000000...	5480.800000000...	NUL	6.493501961231...	0.649350196123...	0.644579380750...	0.041240567450...	0.591911911964...	0.72756844738
1946	418472	2116550	01/04/2016	Fustal	Phartwegii	92	16305.79999999...	7687.600000000...	NUL	6.301026344299...	0.70011403825548	0.702114522457...	0.015273492156...	0.676489412784...	0.72229993871
1958	419115	2116657	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	53	14269.70000000...	6728.399999999...	NUL	8.992907702922...	0.749408975243...	0.730785529613...	0.006451962879...	0.737309638639...	0.75896178998
1983	419083	2116856	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	53	11546.60000000...	5444.800000000...	NUL	7.357120037078...	0.735712003707...	0.735164701938...	0.022353368651...	0.703758239746...	0.77181196212
2010	418768	2116942	23/04/2016	Fustal	Phartwegii	25	12888.10000000...	6077.300000000...	NUL	6.899332642555...	0.689933264255...	0.688812404870...	0.029342333035...	0.635159075260...	0.72993272542
2012	417573	2116861	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	52	10661.70000000...	5026.600000000...	NUL	6.387262940406...	0.709695882267...	0.705810785293...	0.008867957564...	0.696360230445...	0.72338896989
2002	419197	2116968	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	58	14127.29999999...	6660.780620000...	NUL	6.500384032726...	0.722264892525...	0.716902852058...	0.013571283969...	0.705439805984...	0.74750214815
1954	417351	2116637	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	15	9256.399999999...	4365.399782000...	NUL	6.963477253913...	0.696347725391...	0.697609931230...	0.005726235968...	0.684168338775...	0.70557034015
1949	417189	2116591	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	20	3664.399999999...	1728.14424999...	NUL	6.081533670425...	0.608153367042...	0.60587278008461	0.0056345667221	0.598225653171...	0.61901950836
1970	417104	2116742	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	20	6935.399999999...	3270.136282999...	NUL	5.779264450073...	0.577926445007...	0.579053044319...	0.009336758977...	0.566037714481...	0.59396124868
1989	416984	2116913	22/04/2016	Fustal	Phartwegii	61	3751.099999999...	1768.794184000...	NUL	6.400567650794...	0.640056765079...	0.63645014166832	0.014242111603...	0.616698920726...	0.65726774930
1829	415793	2115877	26/02/2016	Fustal	Phartwegii	28	1843.399999999...	869.473640999...	NUL	6.245051741600...	0.624505174160...	0.622798055410...	0.010766365649...	0.609598113059...	0.64474028348
1867	417510	2116064	01/04/2016	Fustal	Phartwegii	70	9596.700000000...	4524.299732999...	NUL	6.869140505790...	0.686914050579...	0.689985454082...	0.017557231704...	0.652036309242...	0.7065847953
1868	415724	2116058	26/02/2016	Fustal	Phartwegii	38	4981.199999999...	2348.778119999...	NUL	5.723834633827...	0.635981625980...	0.635020077228...	0.015262141762...	0.616845428943...	0.66125750541
1910	415724	2116346	26/02/2016	Fustal	Phartwegii	38	528.899999999...	249.4490453999...	NUL	5.841268658638...	0.584126865838...	0.58504319190979	0.027110808927...	0.54114031791687	0.62534469366
1888	415180	2116288	26/02/2016	Fustal	Phartwegii	48	42.0000000000...	1069.793519000...	NUL	5.96017779197...	0.66224197546641	0.663177847862...	0.008950163068...	0.647492825984...	0.67439925670

Figura 12. Tabla de atributos de los sitios de muestreo con carbono estimado y estadísticas de zona. Elaboración propia.

3.2.6. Relación entre variables de campo y valores de los índices.

Los resultados de la regresión lineal permiten conocer si la relación entre variables es estadísticamente significativa, en otras palabras, si la variable predictora explica la mayor parte de las variaciones. Esto puede verse en la variable R o medida de bondad, que se expresa en un valor entre cero y uno, si los valores de la variable dependiente observados son iguales a 1 significa que el modelo se ajusta perfectamente, por lo que entre más alto el valor mejor.

El cálculo de la regresión lineal se aplicó en el software *GeoDa*, donde se agregaron los archivos *shape* resultado de la herramienta estadísticas de zona, donde se determinó cual es la variable dependiente e independiente o explicativa. Según (Amiel, 2007) la variable independiente es el motivo o explicación de ocurrencia y la dependiente es el fenómeno que resulta o debe explicarse, en este caso, la variable independiente son los índices espectrales y la explicativa o dependiente es el contenido de Carbono aéreo calculado con los datos de campo.

3.2.7. Estimación de Carbono.

La estimación de Carbono se basó en el modelo de estimación, que está definido por la ecuación de la recta, que es $Y = a + bX$

Donde:

Y = es la variable dependiente (respuesta),

X = es la variable independiente (predictora),

a = ordenada en el origen o la constante (es el valor de Y cuando X) y

b= pendiente de la recta o coeficiente de regresión

el número de unidades que aumenta o disminuye, por cada unidad que aumenta X, a puede ser positiva o negativa), dicha recta toma el valor de cero = de regresión nos permite, estimar un valor de la variable Y en correspondencia de la variable X.

3.2.8. Evaluación del modelo.

Para la evaluación del modelo generado a partir del índice GNDVI con la imagen del 6 de febrero de 2016, se midió la diferencia entre la realidad y los estimado, calculado el error relativo (RCME %). Siendo necesario contar con datos del valor real o valores observados y el valor obtenido o estimado, que, en este caso, los datos observados fueron 13 polígonos con datos dasométricos (Figura 13) proporcionados por el departamento de Sanidad Forestal de la Protectora de Bosques (PROBOSQUE) del Estado de México. Los datos

corresponden a los informes técnicos fitosanitarios, de los predios dentro del ejido de San Juan de las Huertas del municipio de Zinacantepec.

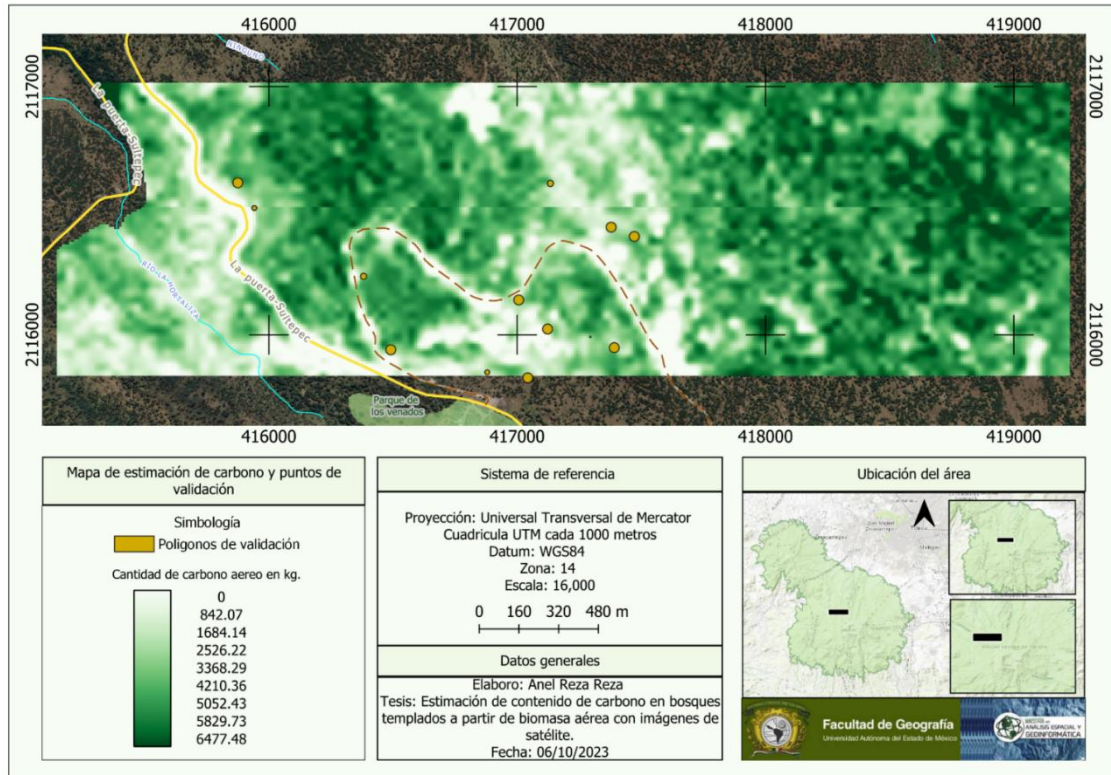


Figura 13. Mapa de estimación y puntos de validación. Elaboración propia.

Los datos dasométricos se presentan al final del cuerpo del informe técnico, en el apartado de inventario del arbolado afectado por plantas parásitas y presentado en formato de tabla. En la tabla se indica el sitio, no. de árbol, especie hospedante, diámetro, altura, volumen unitario, volumen total, volumen de ramas, % de poda y la planta parásita, para el uso de la validación del modelo, solo se recuperaron los datos de sitio, no. de árbol, especie hospedante y diámetro. Seguido de estos datos en el informe, igualmente en una tabla se anotan los datos referentes al resumen del muestreo realizado, donde describen el no. de sitio, coordenadas de latitud y longitud, total de árboles, volumen afectado, volumen de ramas, % de poda y nivel de infección, dividido en nivel y daño.

Al contar con los datos en tablas distintas, fue necesario integrar en un archivo de Excel con los datos de sitio, no. de árbol, especie hospedante y diámetro de la tabla del inventario del arbolado afectado por plantas parásitas, que se describen en la primera tabla y completada con los datos de las coordenadas en latitud y longitud de cada sitio de la segunda tabla. En cuanto al cálculo del contenido de Carbono aéreo, se usó la fórmula $C = 0.030 * DN^{2.472}$,

Donde:

C= Carbono aéreo sobre el suelo

DN= Diámetro normal

sustituyendo el dato correspondiente al diámetro normal (DN) por cada árbol en cada sitio para contar con los datos observados.

En cuanto a los datos estimados, se usó el archivo de los datos observados para obtener una cobertura de puntos a partir de las coordenadas de cada sitio que se sobrepusieron a la imagen del contenido de Carbono aéreo estimado derivado del índice GNDVI y se tomaron los datos correspondientes.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1. Datos de campo.

Los datos de la categoría densos (Tabla 9), que en su mayoría fueron fustales tuvieron un promedio de DAP de 37.7 y por cada sitio varía desde los valores mínimos de 19.4 hasta el máximo de 57.1 en los sitios 1939 y 1940 respectivamente, la categoría presentó un promedio de 5888.8 kg por hectárea

Tabla 9. Total de Carbono por sitio de árboles densos.

Sitio	x	Y	Fecha	Categoría	Especie	DAP	Carbono
1891	418219	2116251	01/04/2016	Fustal	P. hartwegii	56.2	5347.6
1918	418358	2116386	01/04/2016	Juvenil	P. hartwegii	46.6	7887.5
1931	418818	2116485	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	29.5	5381.1
1939	419016	2116519	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	19.4	3826.9
1940	418668	2116531	01/04/2016	Fustal	P. hartwegii	57.1	5480.8
1946	418472	2116550	01/04/2016	Fustal	P. hartwegii	46.1	7687.6
1958	419115	2116657	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	38.0	6728.4
1983	419083	2116856	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	29.92	5444.8
2010	418768	2116942	23/04/2016	Fustal	P. hartwegii	27.25	6077.3
2012	417573	2116861	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	24.47	5026.6
Promedio						37.454	5888.86

Fuente: Elaboración propia con los datos del muestreo.

En esta categoría, de árboles fragmentados (Tabla 10) se observan una disminución tanto del DAP como del promedio de carbono, aunque también la mayoría de los árboles son fustales. El DAP promedio es de 25.39 y por cada sitio varía desde los valores mínimos de 19.1 hasta el máximo de 46.46 en los sitios 1829 y 2002 respectivamente, la categoría presentó un promedio de 2685.50 kg por hectárea.

Tabla 10. Total de Carbono por sitio de árboles fragmentados.

Sitio	x	Y	Fecha	Categoría	Especie	DAP	Carbono
2002	419197	2116968	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	46.46	6660.78066
1954	417351	2116637	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	19.16	4365.39978
1949	417189	2116591	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	28.72	1728.14424
1970	417104	2116742	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	24.26	3270.13628
1989	416984	2116913	22/04/2016	Fustal	P. hartwegii	21.2	1768.79418
1829	415793	2115877	26/02/2016	Fustal	P. hartwegii	19.1	869.473641
1867	417510	2116064	01/04/2016	Fustal	P. hartwegii	45.42	4524.29973
1868	415724	2116058	26/02/2016	Fustal	P. hartwegii	41.14	2348.77812
1910	415724	2116346	26/02/2016	Fustal	P. hartwegii	10.33	249.449045
1888	415180	2116288	26/02/2016	Fustal	P. hartwegii	44.33	1069.79352
Promedio						25.39	2685.50

Fuente: Elaboración propia con los datos del muestreo.

Los sitios fragmentados se ubican espacialmente (Figura 14) cercanos a las vías de comunicación, en este caso a la carretera La Puerta – Sultepec y la carretera de terracería que lleva al cráter del área natural, impactando en la estructura arbórea, así como una menor cantidad de Carbono aéreo en los sitios de muestreo.

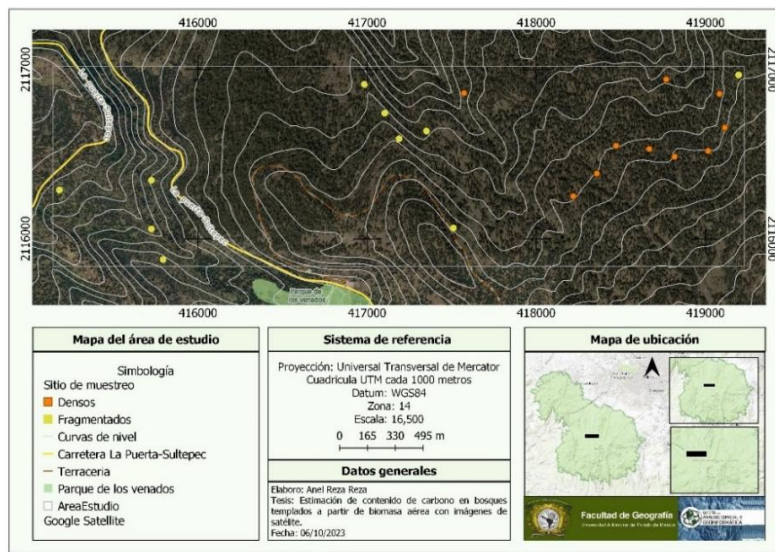


Figura 14. Mapa de sitios de muestreo densos y fragmentados. Elaboración propia.

4.2. Datos satelitales.

Las fechas de las imágenes descargadas son de los meses de enero y febrero, que pertenecen a la época invernal y el mes de abril, que corresponde a la primavera. Excluyendo las de enero, las imágenes corresponden a los meses de recolección de los datos en campo. Las imágenes generadas a partir de los índices espectrales se presentan en escala de grises, como se muestra en la tabla 11, donde cada pixel contiene un valor del índice, que varía según las características del sitio analizado. Además, la resolución radiométrica de 8 bits en todas las imágenes permite representar la información en 256 niveles de gris organizados en una banda o canal.

Tabla 11. Imágenes resultantes de aplicar los índices espectrales.

Fecha/ Índice	NDVI	GNDVI	MSI	SAVI	NDMI	SIPI
21 de enero						
28 de enero						
6 de febrero						
13 de febrero						
1 de abril						

Fuente: Elaboración propia.

Los índices NDVI y GNDVI muestran que las áreas con árboles aparecen en tonos de gris a claros, mientras que la carretera y las zonas con poca vegetación o suelo predominante se representan en negro con menor brillo. En el primer índice, un mayor contenido de biomasa incrementa su valor, mientras que, en el segundo, el aumento del verdor de la vegetación también eleva el índice. En ambos casos, los valores más altos se representan en blanco.

En el caso del índice MSI, los valores más altos indican un mayor estrés hídrico y un menor contenido de agua, representándose en tonos claros y muy brillantes. Estas áreas corresponden a zonas desprovistas de vegetación o vías de comunicación, en contraste con la representación de los dos índices anteriores, donde los bosques aparecen en tonos de gris a negro.

Para las imágenes con el índice SAVI, las zonas con baja densidad vegetal o una mayor presencia de suelo desnudo se representan en tonos oscuros. En cambio, las áreas con mayor densidad forestal muestran valores más altos. Como se observa en los histogramas de la imagen en la figura 15, con excepción del 28 de enero, los datos se agrupan en dos picos y presentan valores superiores a 1.2.

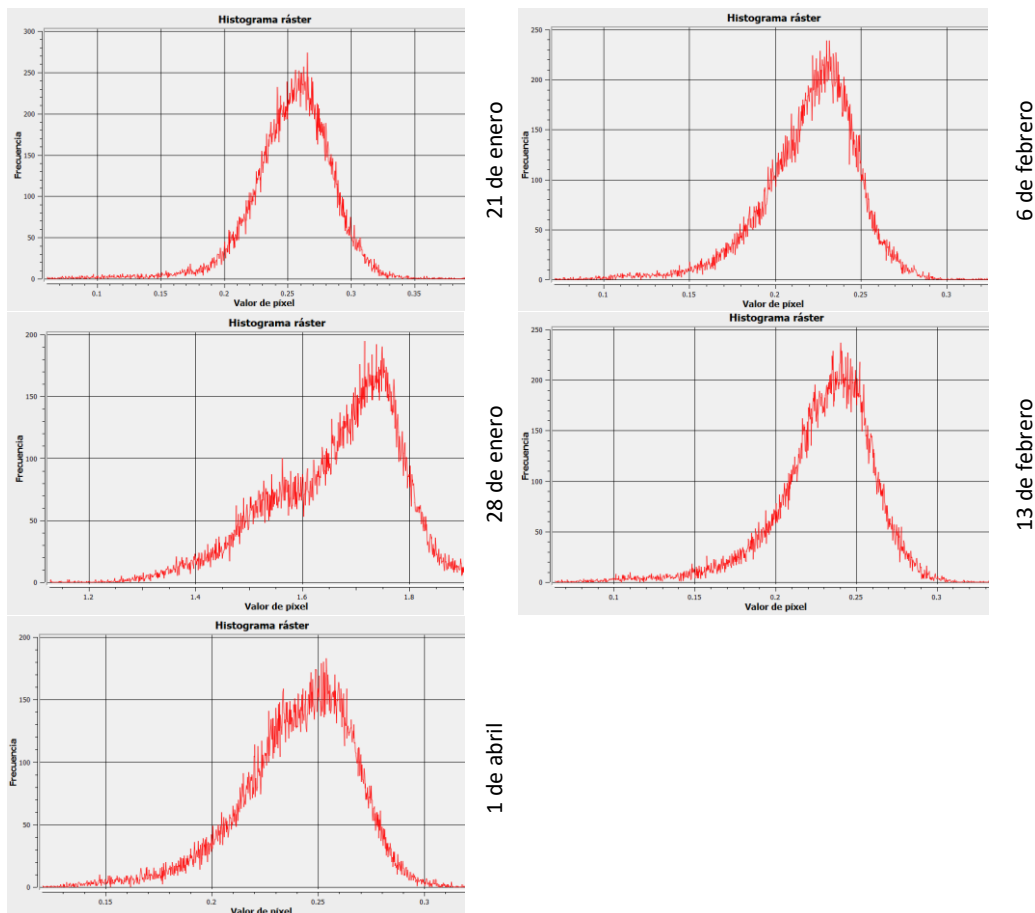


Figura 15. Histogramas del índice de vegetación ajustado al suelo. Elaboración propia

El Índice de Humedad de Diferencia Normalizado, se utiliza principalmente como un indicador de estrés hídrico en la vegetación. En las imágenes derivadas de este índice, los datos se representan en una escala de grises, con pocas áreas brillantes. Las zonas más oscuras corresponden a áreas sin vegetación y con poca humedad, mientras que las tonalidades de gris indican una humedad relativamente mayor.

En el caso del índice SIPI, las imágenes presentan valores superiores a 1, como se observa en los histogramas de la figura 16. Además, los resultados muestran un mayor brillo en comparación con los demás índices, siendo las zonas sin vegetación las que registran los valores más altos.

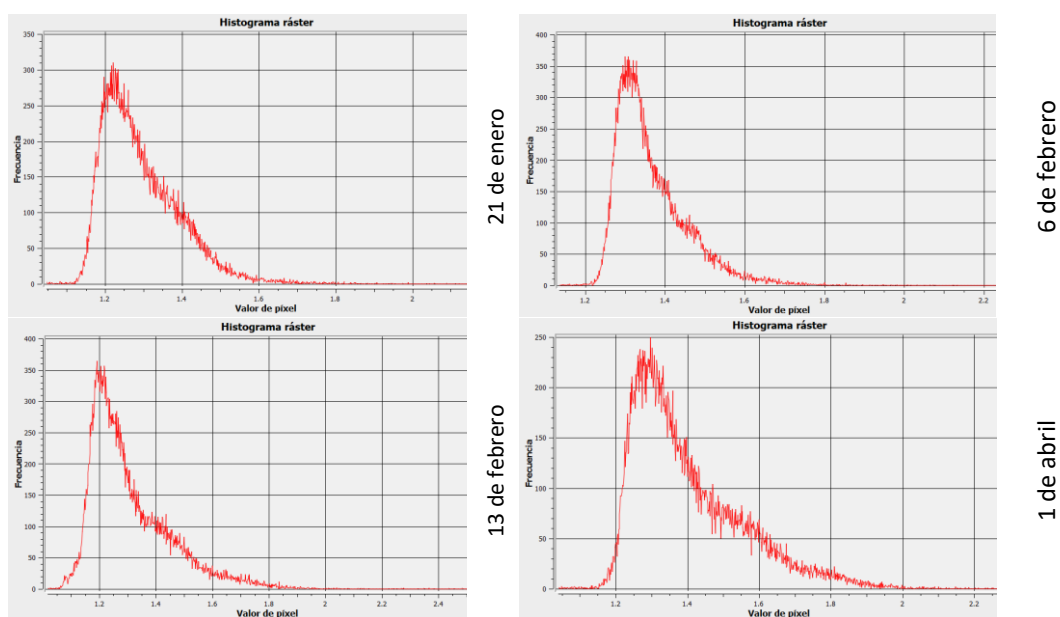


Figura 16. Histogramas del índice de pigmentos insensibles a la estructura. Elaboración propia.

4.4. Relación entre datos de campo e índices espectrales.

Los resultados de la regresión lineal se muestran en la tabla 12, se indica el valor del coeficiente de determinación R^2 . Se observa que, en general, los datos muestran una relación baja. Sin embargo, la relación de los valores promedio y máximo de los índices GNDVI y NDVI con el carbono de los sitios de muestreo, en comparación con los demás resultados, exhiben una relación relativamente más alta. Principalmente, los coeficientes

de determinación del índice GNDVI, los cuales presentan un buen ajuste, dado que como explica García Herrero et al. (2018) que mientras, se acerca a 1 el ajuste es “perfecto”. En este caso, tanto con los valores promedio del 28 de enero y 6 de febrero, así como los valores máximos del 6 y 13 de febrero y 1 de abril son mayores a 0.6, indicando que el 60% de la variable “Carbono” (variable dependiente) es predicha con la variable del valor del índice GNDVI (variable independiente). Debido que para el desarrollo del índice se usa la banda verde que permite medir con mayor precisión el contenido de clorofila.

Tabla 12. Resultados del coeficiente de determinación (R2) entre los sitios y los valores de los índices espectrales.

Métrica	Promedio					Máximo				
	Enero		Febrero		Abril	Enero		Febrero		Abril
Índice/Día	21	28	6	21	28	21	28	6	13	1
GNDVI	0.566	0.600	0.655	0.594	0.581	0.594	0.581	0.676	0.606	0.640
MSI	0.504	0.540	0.501	0.472	0.535	0.472	0.535	0.428	0.407	0.021
NDMI	0.482	0.529	0.490	0.475	0.495	0.475	0.495	0.529	0.509	0.467
NDVI	0.552	0.589	0.589	0.587	0.574	0.587	0.574	0.574	0.578	0.641
SAVI	0.014	0.015	0.070	0.038	0.031	0.038	0.031	0.143	0.038	0.147
SIPI	0.555	0.609	0.451	0.457	0.529	0.457	0.529	0.342	0.494	0.570

Fuente: Elaboración propia.

Aunque la mayoría de los datos de campo fueron recopilados en el mes de abril. Las estadísticas del valor máximo del índice GNDVI y los datos carbono de los sitios del día seis de febrero presentaron la relación más “alta”, con respecto a los demás datos, por lo que se extrajeron los coeficientes indicados en la tabla 13, necesarios para la generación del modelo de estimación de carbono del resto del área.

Tabla 13. Coeficientes de estimación.

Fecha	Índice	Estadística	Valor de R2	Valor de	Fecha	Índice
06 de febrero	GNDVI	Máximo	0.676	-16725.8	34842.3	$Y = -16725.8 + (34842.3 \text{ (GNDVI)})$

Fuente: Elaboración propia.

Se aplicó el modelo de regresión simple para toda la imagen del índice GNDVI. El resultado de aplicar la fórmula para toda la imagen puede verse en la figura 17, donde la cantidad de carbono se representa en tonalidades de verdes. Las áreas con vegetación más densa tienen los verdes más intensos y aquellas zonas con nula o escasa vegetación se presentan en tonos claros. Los valores de carbono van desde los 842.07 kg por hectárea a los 6477.48 kg. Las zonas en blanco representan áreas sin vegetación, caminos como una vereda y la carretera.

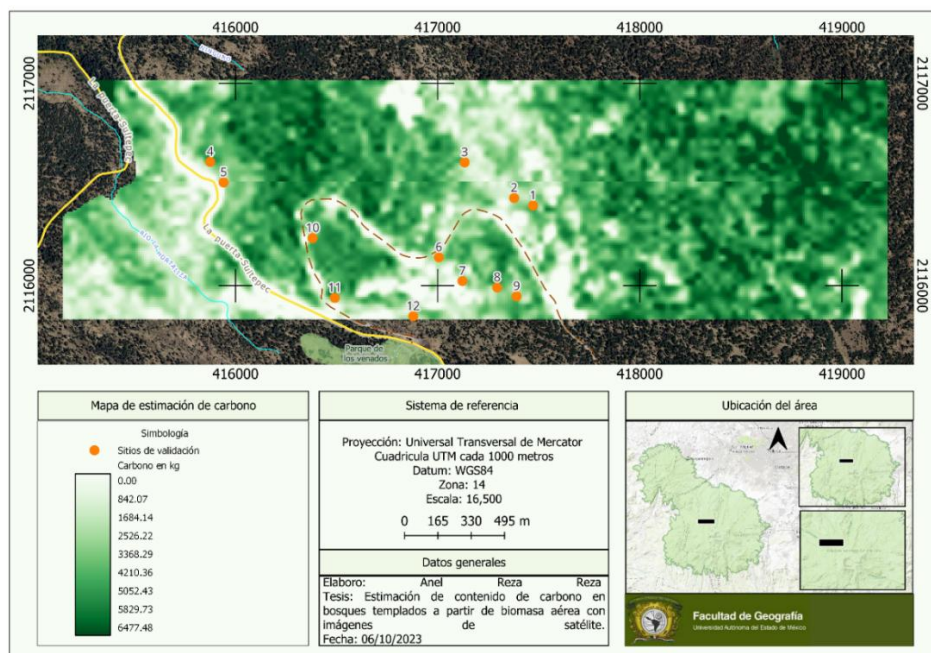


Figura 17. Representación espacial de los resultados. Elaboración propia.

4.5. Evaluación del modelo

Después de aplicar el modelo a la imagen fue importante comprobar que la imagen sea adecuada para calcular el contenido de Carbono aéreo. El resultado de aplicar la fórmula del error relativo medio a los datos estimados de Carbono aéreo a partir del índice espectral GNDVI con fecha del 6 de febrero de 2016, con un valor de R^2 de 0.6; en comparación con los calculados a partir de los datos del departamento de sanidad forestal de PROBOSQUE, muestran que los valores estimados están un 27.5% alejados de nuestros valores de campo, según los resultados del error relativo medio (MRE). La figura 18 muestra la comparación entre los valores reales y estimados, notando que 7 sitios están sobre estimados y 5 por

debajo del valor real o subestimados.

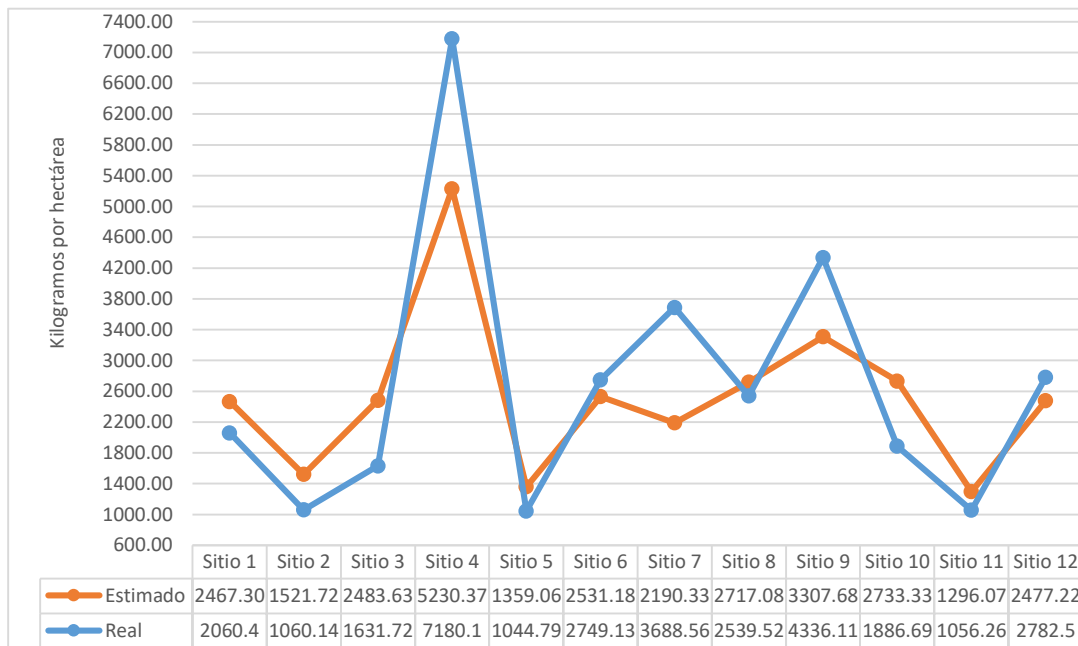


Figura 18. Gráfica de los valores reales y estimados de carbono arbóreo por sitios de validación.

Por otro lado, se calculó el coeficiente de determinación, mediante una gráfico de regresión lineal simple que se muestra en la figura 19, para conocer que tan bien el modelo estadístico derivado del índice GNDVI, se ajusta a los datos de campo.

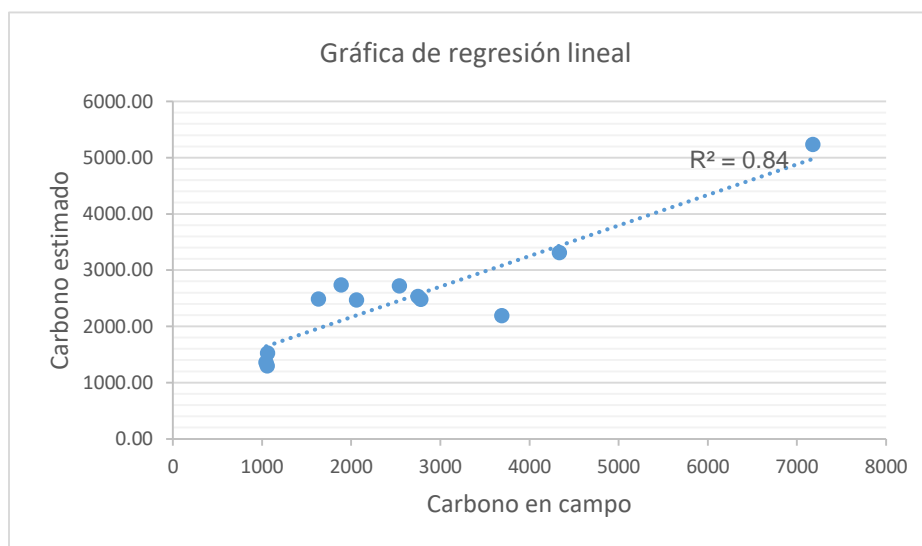


Figura 29. Gráfica de regresión lineal de los datos estimados y de campo.

El resultado de este coeficiente demostró que se puede explicar adecuadamente la variabilidad de los datos estimados con los de campo, debido a que se obtuvo un valor de $R^2 = 0.84$. Además, la distribución de los puntos muestra una tendencia creciente, indicando que a medida que aumenta la variable independiente (carbono estimado), también tiende a aumentar la variable dependiente (carbono en campo), sin embargo, algunos puntos se desvían ligeramente de la línea de tendencia, demostrando la dispersión o los datos atípicos, indicada en el resultado de MRE.

CONCLUSIONES.

La metodología de la investigación permitió estimar el contenido de Carbono arbóreo en rodales de *Pinus hartwegii* ubicados en el Área de Protección de Flora y Fauna del Nevado de Toluca, en una superficie de 4.6 km². A partir de índices espectrales calculados en imágenes satelitales Landsat 8, siendo en este caso, con el índice espectral GNDVI. Así como modelos desarrollados en entorno de Sistemas de Información Geográfica, sustentados en datos de campo, que en su mayoría son mediciones de árboles fustales y ecuaciones alométricas para la especie mencionada, relacionados con modelos estadísticos como regresión lineal simple, error relativo medio y estadísticas básicas como el promedio.

Con las características espectrales y resolución espacial de las imágenes Landsat 8, las cuales fueron descargadas del sitio EO BROWSER, con una resolución de 10 metros, permiten calcular el contenido de Carbono arbóreo, a través del índice espectral Green Normalized Difference Vegetation Index o GNDVI, complementario al NDVI, el cual mide el contenido de clorofila; y que mostró mejor relación con los datos de campo de los 20 sitios de muestreo. Esto podría darse por la estructura de la hoja, así como por la altitud en la que los bosques crecen, teniendo más afinidad con este índice. Aunque es de resaltar que los índices NDMI, SAVI, MSI y SIPI mostraron una relación media con los datos de campo, ya que a excepción del SIPI, se combinan con las bandas del infrarrojo cercano, la banda verde y la roja. Por otro lado, se confirma que los índices basados en la humedad y contruidos con la banda del infrarrojo de onda corta, tienen buena capacidad para predecir variables forestales en bosques de coníferas (Aguirre et al., 2009)

Los Sistemas de Información Geográfica proveen de herramientas suficientes para el cálculo, aplicación de ecuaciones, manejo y análisis de los datos estadística y espacialmente. Aunque también fue importante el uso del software GEODA para la relación espacial. El procesamiento de las imágenes de satélite en la plataforma EO browser a simplificado procesos que antes se hacían en software especializado y con elevado costo de

licenciamiento, razón por la que este tipo de plataformas sintetizan y difunden datos de manera rápida, masiva y de manejo intuitivo.

La metodología puede ser replicable en cualquier área de interés, sin embargo, es importante contar con datos dasométricos, ya que, entre mayor número de muestras, mejor será la fiabilidad del modelo y por tanto de los resultados. Otro punto importante es las ecuaciones alométricas, que en el caso de la investigación se usaron unos generadas para el mismo tipo de árbol y con condiciones de temperatura, clima, precipitación y tipo de suelo similares, lo que puede influir favorablemente en el modelo y la estimación.

RECOMENDACIONES Y APORTACIONES.

Los parámetros forestales como el contenido de Carbono en bosques son datos e información importante para la gestión de ecosistema, en cualquier área como la mitigación del cambio climático mediante los mercados de bonos de Carbono, para la conservación de la biodiversidad o la gestión sostenible de los recursos, esto con el fin de que la población cuente con una base para conservar su entorno inmediato.

La metodología es replicable en áreas relativamente pequeñas o hablando cartográficamente, en escalas grandes mediante imágenes ópticas de resolución media. En este sentido, podemos reflexionar que existen hoy día sensores como LíDar que recaban información de la estructura del bosque como la altura y densidad del dosel; variables que posibilitan la estimación de contenido de Carbono aéreo pero que tanto el sensor como las imágenes tiene un costo elevado de adquisición por lo que solo podrían usarse en proyectos con financiamiento suficiente.

Otros proyectos que pueden complementar las investigaciones de estimación de contenido de Carbono aéreo en bosques es la recopilación de ecuaciones alométricas en bases de datos espaciales, con el fin de contar con fórmulas precisas para zonas que ya pasaron por el proceso de formulación de ecuaciones, donde requieren el derribo, quema y medición del Carbono del árbol. Las imágenes ópticas derivadas del satélite WorldView con resolución espacial de 31 cm, así como sensores de muy alta resolución espacial como Planet, darían la posibilidad de hacer un conteo de las copas de los árboles; apoyando en la identificación de especies o la densidad de un área para muestreo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguierre Salado, C. A., Valdez Lazalde, J. R., Ángel Pérez, G., De los Santos Posadas, H. M., Haapanen, R., & Aguirre Salado, A. I. (2009). Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de Pino patula en Hidalgo, México. *Agrociencia*, 43(2), 209-220.
- Aguirre Calderón, O., y Jiménez Pérez, J. (2002). Manual para la evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. [Informe técnico]. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD004674.pdf>
- Aguirre Calderón, O. A., y Jiménez Pérez, J. (2011). Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 73-84.
- Amiel Pérez, J. (2007). Las variables en el método científico. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 73(3), 171-177.
- Arango Castaño, B. (2011). Sumideros de carbono en el marco del Protocolo de Kioto. *Memorando de Derecho*, 2(2), 13-21.
- Batsaikhan, B., Lkhamjav, O., Batsaikhan, G., Batsaikhan, N., y Norovsuren, B. (2022). Carbon stock estimation using remote sensing data and field measurement in Haloxylon ammodendron-dominant winter cold desert region of Mongolia. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XX (3), 9-17. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-9-2020>
- Benjamín, J. A., y Masera, O. (2001). Captura de Carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7 (1), 3-12.
- Bowers, S., Coleman, N., y Fletcher, R. (2002). Stand Volume an growth: Getting the numbers. *Forest measurement*, 2-25.
- Burbano Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas* 35, 82-96.
- Camps Arbestain, M., y Pinto, M. (2004). Los sumideros de carbono en el marco del protocolo de kioto. *Edafología*, 11, 27-36.
- Carrasco, J.(2022). *Bosque de pino hartwegii*. [Fotografía] *iNaturalista*, México.
- Carrillo Anzures, F., Acosta Mireles, M., Jimenez Cruz, C., Gonzalez Molina, L., y Etchevers Barra, J. D. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista*

Mexicana de Ciencias Agrícolas, 7(3), 681-691.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v7i3.327>

Carrillo Arizmendi, L. (2018). Crecimiento y formación de madera de *Pinus hartwegii* Lindl. a lo largo de un gradiente altitudinal en el Nevado de Toluca, Estado de México. Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales.
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/32382>

Castellanos Bolaños , J. F., Gómez Cárdenas , M., Contreras-Hinojosa, J., & González Cubas, R.(2013). *Métodologías para cuantificar biomasa y carbono en bosques*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Cedillo Alonso, M. (2017). *Análisis espacial del nivel de infestación por muérdago enano en el bosque de pino del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca*. Universidad Autónoma del Estado de México.

Chávez Aguilar , G., Campos Ángeles, G. V. & Pérez Suárez , M. (2022). Estructura y composición del bosque de *Pinus hartwegii* Lindl. en su distribución altitudinal en el Nevado de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 54-76.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1257>

Chivieco Salinero, E. (2002). *Teledetección ambiental* . España: Ariel.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (2003). *Informe de la conferencia de las partes sobre su séptimo período de sesiones, celebrado en Marrakech del 29 de octubre al 10 de noviembre de 2001*.
<https://unfccc.int/resource/docs/spanish/cop7/cp713a01s.pdf>

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (2004). *Informe de la conferencia de las partes sobre su décimo período de sesiones, celebrado en Buenos Aires del 6 al 18 de diciembre de 2004*.
<https://unfccc.int/resource/docs/spanish/cop10/cp1010s.pdf>

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2017, 22 de noviembre). *Bosques y Cambio Climático*. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/conafor/documentos/bosques-y-cambio-climatico-23762>

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2016). *Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca*.
<https://www.gob.mx/conanp/articulos/programa-de-manejo-del-area>

Cordero Camacho, D. (2011). *Los bosques en América Latina*. En R. Borja (Ed.). *Fundación Friedrich Ebert, FES-ILDIS*.

- Cruz Flores, D., Curbelo Benítez, E., Ferrer-Sánchez, Y., & Ávila, D. (2020). Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba. *Ecosistemas*, 29(1), 12. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>
- De Ambrosio, M. (2015). *Todo lo que necesitas saber sobre el cambio climático*. Paidós.
- Doñate, I. (2002). El protocolo de Kioto un instrumento del futuro. *Medi ambient: Tecnología i cultura*, 32, 86-90.
- EOS Data Analytics. (2024, 7 de julio). *Imágenes de satélite gratis: Fuentes de datos para todos*. Recuperado el 7 de marzo de 2024, de <https://eos.com/es/blog/imagenes-de-satelite-gratis/>
- EcuRed. (2020, 3 de noviembre). Gases de efecto invernadero. [https://www.ecured.cu/index.php?title=Gases de efecto invernadero&oldid=3792733](https://www.ecured.cu/index.php?title=Gases_de_efecto_invernadero&oldid=3792733)
- Endara Agramont, A., Calderón Contreras, R., Nava Bernal, G., & Franco Maass, S. (2013). Análisis de los procesos de fragmentación en bosques de alta montaña. *American Journal of Plant Sciences*, 4(3A), 697-704. <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.43A088>
- Endara Agramont, A. R., & Herrera Tapia, F. (2016). Deterioro y conservación de los bosques del Nevado de Toluca y el rol de los actores locales. *Ciencia Ergo Sum*, 23(3), 246-257.
- EOS Data Analytics. (2023, 6 de noviembre). NDMI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada). Recuperado el 20 de octubre de 2024, de <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>
- ESRI. (2021, 6 de noviembre). ¿Qué es un shapefile? Recuperado el 3 de mayo de 2024, de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>
- ESRI. (s.f.). *GNDVI*. Recuperado el 23 de abril de 2023, de <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/arcpy/image-analyst/gnvd.htm>
- FAO. (2004). *Actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales a 2005*. Recuperado el 10 de febrero de 2023, de <https://www.fao.org/4/ae156s/ae156s00.htm#TopOfPage>
- Pozos, F., (2024) *Acículas y conos del Pino hartwegii*. [Fotografía] *iNaturalist México*.
- Fonseca González, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de ciencias ambientales. Tropical Journal of environmental sciences*, 51(2), 91-109. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.51-2.5>

Franzpc. (2021, 1 de noviembre). *Lista de índices espectrales en Sentinel 2 y Landsat*. ArcGeek. Recuperado el 24 de agosto de 2023, de <https://acolita.com/lista-de-indices-espectrales-en-sentinel-2-y-landsat/>

Galeana Pizaña, J. M., Ordóñez Díaz, J. A. & Corona Romero, N. (2013). Estimación de contenido de carbono. *Madera y Bosques*, 19(1), 53-59. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.191347>

Gallardo Lancho, J. & Merino, A. (2007). El ciclo del carbono y la dinámica de los sistemas forestales. En F. G. natural (Ed.), *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático* (pp. 43-64).

García Herrero, J., Berlanga de Jesús, A., Molina López, J. M., Patricio Guisado, M. Á., Bustamante, Á. L., & Padilla Arias, W. R. (2018). *Ciencia de datos: Técnicas analíticas y aprendizaje estadístico en un enfoque práctico*. ALTARIA, S.L.

Geoinnova. (2022, 16 de junio). 8 sitios web de descarga de imágenes satelitales gratuitas. Recuperado el 7 de julio de 2024, de <https://geoinnova.org/blog-territorio/imagenes-satelitales-gratuitas/>

Gilabert, M., Gonzalez Piqueras, J., & García Haro, J. (1997). Acerca de Los Índices de Vegetación. *Teledetección*, 10(8).

Guzman, D., Salazar, J., Correa, J. & Zuluaga, C. (2012). Comparación de algunos R^2 como medidas de bondad de ajuste en modelos lineales mixtos. *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*, 1(2), 69-72.

Hernández P., J. & Montaner F., D. (2009). *Patrones de respuesta espectral*. En C. Mena Frau (Ed.), Publicaciones SAF. Santiago, Chile.

Hernandez Stefanoni, J., Castillo Santiago, M., Mauricio, J., François Mas, J., Tun Dzul, F., & Dupuy Rada, J. (2021). *Mapeo de la biomasa aérea de los bosques mediante datos de sensores remotos y R*. El Colegio de la Frontera Sur.

INEGI. (2020). Producción y publicación de la Geomediana Nacional a partir de las imágenes del Cubo de Datos Geoespaciales de México: Documento metodo

lógico. INEGI.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198763.pdf

INEGI. (s.f.). *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)*. Recuperado el 05 de abril de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/investigacion/ndvi/>

- IPCC. (2019). *Calentamiento global de 1,5°C. Resumen*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf
- IPCC. (2021). *Cambio Climático 2021: un resumen para todo el mundo*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll_Spanish.pdf
- Kemerer , A., Di Bella, C., Melchiori, R., Bnech , A. & Alvarez , R. (2007). *Comparación de índices espectrales para la predicción del IAF en canopeos de maíz*. En A. Grisotto, M. Sacido, & R. Rivas (Eds.), *Teledetección* (pp. 125-129). Mar de Plata, Argentina: Editorial Martín.
- Khan, K., Iqbal, J. & Nawaz Khan, S. (2020). Assessment of Sentinel-2-Derived Vegetation Indices for The Estimation of Above-Ground Biomass/Carbon Stock, Temporal Deforestation and Carbon Emissions Estimation in The Moist Temperate Forests of Pakistan. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18, 783-815. https://doi.org/10.15666/aeer/1801_783815
- Laosuwan, T. & Uttaruk, Y. (2016). Estimating above ground carbon capture using remote sensing technology in small scale agroforestry areas. *Agriculture and Forestry*, 62(2), 253-262. <https://doi.org/10.17707/AGRICULTFOREST.62.2.22>
- Lina Lavallo, A., Beatriz Micheli , E., & Rubio, N. (2006). Análisis didáctico de regresión y correlación para la enseñanza media. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa*, 9(3), 383-406.
- López López, S., Martínez Trinidad, T., Benavides Meza, H., García Nieto, M., & Ángeles Pérez, G. (2018). Reservorios de biomasa y carbono en el arbolado de la primera sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México. *Maderas y bosques*, 24(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431620>
- López, V. M. (2009). *Cambio Climático y Calentamiento Global*. Editorial Trillas.
- Lu, D. (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297-1328. <https://doi.org/10.1080/01431160500486732>
- Manzo Delgado, L. y A. Meave, J. (2003). La vegetación vista desde el espacio: la fenología foliar a través de la percepción remota. *Revista ciencia*, 54(3), 18-28.
- Mariscal , E. (2000). *Manual de manejo de bosques naturales: Proyecto de desarrollo técnico de la conservación de los bosques - CEMARE*. Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM). Recuperado de <https://catalogosiidca.csuca.org/Record/UP.215031>

- Márquez Díaz, J. (2007). *Estimación de carbono arbóreo por medio de imágenes de satélite SPOT en la región de Tlaxco, Tlaxcala*. [Tesis, Universidad Autónoma de Chapingo]. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/browse/author?scope=f8bc2c58-d690-4c3f-b847-0439c5227c29>
- Masson Delmotte, V. & Panmao, Z. (2022). *Tendencias regionales de los fenómenos extremos en el informe del IPCC de 2021*. Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de https://library.wmo.int/viewer/34214/download?file=Boletin_OMM-71%281%29_es.pdf&type=pdf&navigator=1
- MASTERGIS. (2022, abril 22). *6 Plataformas para descargar imágenes satelitales GRATIS*. Recuperado el 07 de julio de 2024, de <https://mastergis.com/blog/6-plataformas-descargar-imagenes-satelitales-gratis>
- Maya Mesa, M. (2019). Variabilidad en la respuesta espectral de especies forestales en un contexto urbano. [Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/>
- Musálem Santiago, M. & Solís Pérez, M. (2000). *Monografía de pinus hatwegii*. Chapingo, Estado de México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGAR), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP): Centro de Investigación Regional del Centro (CIRCE) Campo Experimental Valle de México.
- NASA. (s.f.). *Landsat 8*. Recuperado el 27 de junio de 2024, de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>
- NV5. (s.f.). *Vegetation Indices*. Recuperado el 05 de noviembre de 2023, de <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/vegetationindices.html>
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. (Autoedición). Recuperado de <https://volaya.github.io/libro-sig/>
- Ordoñez Díaz, J. A. (1999). *Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología- ecretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- Ortega P., S. C., García Guerrero, A., Ruiz Agudelo, C., Sabogal Mogollón, J. & Vargas, J. D. (2010). *Deforestación evitada. Una Guía REDD + Colombia*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Conservación Internacional Colombia; Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF); The The Nature Conservancy; Corporación Ecovera; Fundación Natura; Agencia de Cooperación Americana (USAID); Patrimonio Natural - Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas y Fondo para la Acción Ambiental.

- Paz Pellat, F., Palacios Vélez, E., Bolaños González, M., Palacios Sánchez, L., Martínez Menes, M., Mejía Saenz, E. & Huete, A. (2007). Diseño de un índice espectral de la vegetación: NDVIcp. *Agrociencia*, 41(5), 539-554.
- Paz Pellat, F., Romero Sánchez, M., Palacios Vélez, E., Bolaños González, M., Valdez Lazalde, J. & Aldrete, A. (2015). Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 177-194.
- Perea Ardila, M. A., Andrade Castañeda, H. & Segura Madrigal, M. (2021). Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora "Iguaque". *Revista cartográfica*, (102),99-123. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.821>
- Picard, N., Saint-André, L. & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: Del trabajo de campo a la predicción*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de <https://www.fao.org/4/i3058s/i3058s.pdf>
- Porrúa Estrada, M. (2001). Cambio climático global: causas y consecuencias. *Revista de información y análisis* 16, 7 -17.
- QGIS Development Team. (2002). *QGIS*. Recuperado el 19 de julio de 2024, de https://docs.qgis.org/3.34/es/docs/gentle_gis_introduction/index.html
- Reyes Avilés, I. & Gutiérrez Chaparro, J. J. (2010). Los servicios ambientales de la arbolización urbana: Retos y aportes para la sustentabilidad de la ciudad de Toluca. *Quivera*, 12(1), 96-102.
- Rojo Martínez, G., Jasso Mata, J., & Velásquez Martínez, A. (2003). Las masas forestales como sumideros de CO₂ ante un cambio climático global. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 57-67.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. (C. N. Biodiversidad, Ed.) Lumusa.
- Sanabria Siles, N., Sandoval Gómez, M. & Dalence Martinic, J. (2023). Área de influencia aguas abajo de la presa La Cañada mediante series de tiempo de índices espectrales de vegetación (Periodo de estiaje 1990 - 2022). *RevActaNova*, 11(2), 105-118. <https://doi.org/10.35319/acta-nova.20233>
- Sánchez-Ramos, G., & Lara-Villalón, M. (2007). Los ecosistemas de montaña y sus implicaciones en el cambio climático global. *CienciaUAT*, 2(2), 20-23.
- Schlegel, B. (2001). Estimación de biomasa y carbono en el sotobosque del tipo forestal siempreverde. En *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*.

- SEMARNAT. (2022, mayo de 2). *Protocolo de Kioto, un acuerdo para reducir los GEI y salvar al planeta*. Recuperado el 15 de agosto de 2023, de Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/protocolo-de-kioto-un-acuerdo-para-reducir-los-gei-y-salvar-al-planeta>
- Sentinelhub. (s.f.). *Custom scripts sentinel-hub*. Recuperado el 06 de junio de 2023, de (Structure Insensitive Pigment Index): <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/SIPI/>
- Sentinelhub. (s.f.). *Navegador EO*. Recuperado el 13 de mayo de 2023, de <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=10&lat=41.9&lng=12.5&themeld=DEFAULT-THEME&toTime=2024-10-10T18%3A42%3A44.453Z>
- Shafique, T., Hashim Zuberi, M. & Iqbal Shams, Z. (2021). Geospatial assessment of carbon stock inventory by vegetation indices in Pai Forest, Sindh, Pakistan. *EQA - International Journal of Environmental Quality*, 47-64. <https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/12203>
- Speranza, F., & Zerda, H. R. (2005). Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales. Facultad de Ciencias Forestales, UNSE, Córdoba, Argentina.
- Sims, D. A., y Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2), 337-354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Tech, R. (s.f.). *Indices de monitoreo*. Recuperado el 12 de julio de 2023, de Índice SAVI: <https://support.geoagro.com/rigran/kb/savi/#:~:text=El%20C3%8Dndice%20de%20Vegetaci%C3%B3n%20ajustado%20al%20suelo%20%28SAVI%29,brillo%20del%20suelo%20utilizando%20un%20factor%20de%20correcci%C3%B3n.>
- Torres Rojas , G., Romero Sánchez , M., Velasco Bautista , E. & González Hernández, A. (2016). Estimación de parámetros forestales en bosques de coníferas con técnicas de percepción remota. *Revista Mexicana de ciencias forestales*, 7(36), 7-24.
- USGS. (s.f.). *Landsat data access*. Recuperado el 31 de octubre de 2023, de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-1-data>
- Vasquez , A. & Arellano Peña, H. (2012). Estructura, biomasa aerea y carbono almacenado en los bosques del sur y Noroccidente de Córdoba. *Colombia Diversidad Biótica XII*, 923-961. <https://doi.org/1208.0248>
- Xiao, J., Chevallier, F., Gomez, C., Guanter, L., Hicke, J., Huete, A., . . . Zhang, X. (2019). Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years.

ANEXOS

Anexo 1. Datos de campo; diámetro de altura al pecho de los sitios densos.

Sitio	Fecha	Categoría	Especie	DAP
1891	01/04/2016	Fustal	hartwegii	60
1891	01/04/2016	Fustal	hartwegii	59
1891	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	54
1891	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	64
1891	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	53
1891	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	72
1891	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	38
1891	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	50
1918	01/04/2016	Juvenil	Hartwegii	8
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	59
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	65
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	62
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	67
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	43
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	76
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	69
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	33
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	52
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	34
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	49
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	37
1918	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	34

1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	63
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	47
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	21
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	8
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	21
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	23
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	21
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	14
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	8
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	16
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	63
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	29
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	9
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	15
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	61
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	47
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	53
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	41
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	29
1931	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	57
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	22
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	16
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	16
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	15

1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	16
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	58
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	12
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	12
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	43
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	32
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	22
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	58
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	8
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	10
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	12
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	25
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	17
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	12
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	14
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	10
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	18
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	12
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	9
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	18
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	15
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	8
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	15
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	15

1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	9
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	52
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	10
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	30
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	41
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	35
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	23
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	9
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
1939	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	12
1940	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	62
1940	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	74
1940	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	60
1940	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	53
1940	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	55
1940	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	51
1940	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	57
1940	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	45
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	92
1946	01/04/2016	Juvenil	Hartwegii	6
1946	01/04/2016	Juvenil	Hartwegii	5
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	62
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	55
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	57
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	48
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	67
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	33
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	45

1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	40
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	58
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	48
1946	01/04/2016	Fustal	Hartwegii	30
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	53
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	64
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	47
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	44
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	42
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	51
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	62
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	43
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	37
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	30
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	54
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	43
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	15
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	23
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	8
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	9
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	55
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
1958	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	55
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	53
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	18
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	37
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	19

1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	47
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	9
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	17
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	10
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	8
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	15
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	30
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	22
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	24
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	26
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	48
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	25
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	17
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	26
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	48
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	51
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	53
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	23
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	24
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	56
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	35
1983	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	56
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	25
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	32
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	30
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	66
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	66

2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	58
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	48
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	15
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	22
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	35
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	17
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	26
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	55
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	23
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	34
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	38
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	21
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	12
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	18
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	14
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	14
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	30
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	38
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	31
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	17
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	16
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	24
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	26
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	18

2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	20
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	16
2010	23/04/2016	Fustal	Hartwegii	28
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	52
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	42
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	36
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	73
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	9
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	9
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	87
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	16
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	13
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	8
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	58
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	9
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	19
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	11
2012	22/04/2016	Fustal	Hartwegii	19
2012	22/04/2016	Juvenil	Hartwegii	7
2012	22/04/2016	Juvenil	Hartwegii	5
2012	22/04/2016	Juvenil	Hartwegii	6

Fuente: Elaboración propia con datos del muestreo.

Anexo 2. Datos de campo, diámetro de altura al pecho de los sitios fragmentados.

Sitio	Fecha	Especie	DAP
-------	-------	---------	-----

2002	22/04/2016	Hartwegii	58
2002	22/04/2016	Hartwegii	54
2002	22/04/2016	Hartwegii	11
2002	22/04/2016	Hartwegii	27
2002	22/04/2016	Hartwegii	11
2002	22/04/2016	Hartwegii	68
2002	22/04/2016	Hartwegii	38
2002	22/04/2016	Hartwegii	58
2002	22/04/2016	Hartwegii	44
2002	22/04/2016	Hartwegii	69
2002	22/04/2016	Hartwegii	60
2002	22/04/2016	Hartwegii	64
2002	22/04/2016	Hartwegii	42
1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	17
1954	22/04/2016	Hartwegii	11
1954	22/04/2016	Hartwegii	14
1954	22/04/2016	Hartwegii	26
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	11
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	17
1954	22/04/2016	Hartwegii	14
1954	22/04/2016	Hartwegii	8
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	24

1954	22/04/2016	Hartwegii	17
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	13
1954	22/04/2016	Hartwegii	16
1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	21
1954	22/04/2016	Hartwegii	18
1954	22/04/2016	Hartwegii	28
1954	22/04/2016	Hartwegii	21
1954	22/04/2016	Hartwegii	28
1954	22/04/2016	Hartwegii	17
1954	22/04/2016	Hartwegii	36
1954	22/04/2016	Hartwegii	11
1954	22/04/2016	Hartwegii	16
1954	22/04/2016	Hartwegii	26
1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	30
1954	22/04/2016	Hartwegii	27
1954	22/04/2016	Hartwegii	35
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	30
1954	22/04/2016	Hartwegii	13
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	11

1954	22/04/2016	Hartwegii	77
1954	22/04/2016	Hartwegii	18
1954	22/04/2016	Hartwegii	22
1954	22/04/2016	Hartwegii	27
1954	22/04/2016	Hartwegii	9
1954	22/04/2016	Hartwegii	13
1954	22/04/2016	Hartwegii	26
1954	22/04/2016	Hartwegii	27
1954	22/04/2016	Hartwegii	18
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	16
1954	22/04/2016	Hartwegii	32
1954	22/04/2016	Hartwegii	19
1954	22/04/2016	Hartwegii	16
1954	22/04/2016	Hartwegii	14
1954	22/04/2016	Hartwegii	16
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	8
1949	22/04/2016	Hartwegii	20
1949	22/04/2016	Hartwegii	30
1949	22/04/2016	Hartwegii	29
1949	22/04/2016	Hartwegii	53
1949	22/04/2016	Hartwegii	46
1949	22/04/2016	Hartwegii	26
1949	22/04/2016	Hartwegii	22
1949	22/04/2016	Hartwegii	21
1949	22/04/2016	Hartwegii	36
1949	22/04/2016	Hartwegii	16

1949	22/04/2016	Hartwegii	17
1970	22/04/2016	Hartwegii	20
1970	22/04/2016	Hartwegii	19
1970	22/04/2016	Hartwegii	30
1970	22/04/2016	Hartwegii	19
1970	22/04/2016	Hartwegii	69
1970	22/04/2016	Hartwegii	48
1970	22/04/2016	Hartwegii	19
1970	22/04/2016	Hartwegii	12
1970	22/04/2016	Hartwegii	64
1970	22/04/2016	Hartwegii	16
1970	22/04/2016	Hartwegii	14
1970	22/04/2016	Hartwegii	14
1970	22/04/2016	Hartwegii	8
1970	22/04/2016	Hartwegii	13
1970	22/04/2016	Hartwegii	9
1970	22/04/2016	Hartwegii	11
1970	22/04/2016	Hartwegii	11
1970	22/04/2016	Hartwegii	17
1970	22/04/2016	Hartwegii	48
1989	22/04/2016	Hartwegii	61
1989	22/04/2016	Hartwegii	13
1989	22/04/2016	Hartwegii	15
1989	22/04/2016	Hartwegii	17
1989	22/04/2016	Hartwegii	13
1989	22/04/2016	Hartwegii	17
1989	22/04/2016	Hartwegii	14
1989	22/04/2016	Hartwegii	10

1989	22/04/2016	Hartwegii	11
1989	22/04/2016	Hartwegii	8
1989	22/04/2016	Hartwegii	53
1989	22/04/2016	Hartwegii	23
1989	22/04/2016	Hartwegii	15
1989	22/04/2016	Hartwegii	17
1989	22/04/2016	Hartwegii	31
1829	26/02/2016	Hartwegii	28
1829	26/02/2016	Hartwegii	29
1829	26/02/2016	Hartwegii	34
1829	26/02/2016	Hartwegii	38
1829	26/02/2016	Hartwegii	35
1829	26/02/2016	Hartwegii	7
1829	26/02/2016	Hartwegii	3
1829	26/02/2016	Hartwegii	4
1829	26/02/2016	Hartwegii	6
1829	26/02/2016	Hartwegii	7
1867	01/04/2016	Hartwegii	70
1867	01/04/2016	Hartwegii	69
1867	01/04/2016	Hartwegii	72
1867	01/04/2016	Hartwegii	28
1867	01/04/2016	Hartwegii	70
1867	01/04/2016	Hartwegii	4
1867	01/04/2016	Hartwegii	5
1868	26/02/2016	Hartwegii	38
1868	26/02/2016	Hartwegii	38
1868	26/02/2016	Hartwegii	44
1868	26/02/2016	Hartwegii	47

1868	26/02/2016	Hartwegii	29
1868	26/02/2016	Hartwegii	64
1868	26/02/2016	Hartwegii	28
1910	26/02/2016	Hartwegii	38
1910	26/02/2016	Hartwegii	5
1910	26/02/2016	Hartwegii	5
1910	26/02/2016	Hartwegii	3
1910	26/02/2016	Hartwegii	4
1910	26/02/2016	Hartwegii	7
1888	26/02/2016	Hartwegii	48
1888	26/02/2016	Hartwegii	40
1888	26/02/2016	Hartwegii	45

Fuente: Elaboración propia con datos del muestreo.

Anexo 3. Datos de campo, diámetro de altura al pecho de los sitios semifragmentados.

Sitio	Fecha	Especie	DAP
2002	22/04/2016	Hartwegii	58
2002	22/04/2016	Hartwegii	54
2002	22/04/2016	Hartwegii	11
2002	22/04/2016	Hartwegii	27
2002	22/04/2016	Hartwegii	11
2002	22/04/2016	Hartwegii	68
2002	22/04/2016	Hartwegii	38
2002	22/04/2016	Hartwegii	58
2002	22/04/2016	Hartwegii	44
2002	22/04/2016	Hartwegii	69

2002	22/04/2016	Hartwegii	60
2002	22/04/2016	Hartwegii	64
2002	22/04/2016	Hartwegii	42
1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	17
1954	22/04/2016	Hartwegii	11
1954	22/04/2016	Hartwegii	14
1954	22/04/2016	Hartwegii	26
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	11
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	17
1954	22/04/2016	Hartwegii	14
1954	22/04/2016	Hartwegii	8
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	24
1954	22/04/2016	Hartwegii	17
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	13
1954	22/04/2016	Hartwegii	16

1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	21
1954	22/04/2016	Hartwegii	18
1954	22/04/2016	Hartwegii	28
1954	22/04/2016	Hartwegii	21
1954	22/04/2016	Hartwegii	28
1954	22/04/2016	Hartwegii	17
1954	22/04/2016	Hartwegii	36
1954	22/04/2016	Hartwegii	11
1954	22/04/2016	Hartwegii	16
1954	22/04/2016	Hartwegii	26
1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	30
1954	22/04/2016	Hartwegii	27
1954	22/04/2016	Hartwegii	35
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	30
1954	22/04/2016	Hartwegii	13
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	15
1954	22/04/2016	Hartwegii	11
1954	22/04/2016	Hartwegii	77
1954	22/04/2016	Hartwegii	18

1954	22/04/2016	Hartwegii	22
1954	22/04/2016	Hartwegii	27
1954	22/04/2016	Hartwegii	9
1954	22/04/2016	Hartwegii	13
1954	22/04/2016	Hartwegii	26
1954	22/04/2016	Hartwegii	27
1954	22/04/2016	Hartwegii	18
1954	22/04/2016	Hartwegii	20
1954	22/04/2016	Hartwegii	16
1954	22/04/2016	Hartwegii	32
1954	22/04/2016	Hartwegii	19
1954	22/04/2016	Hartwegii	16
1954	22/04/2016	Hartwegii	14
1954	22/04/2016	Hartwegii	16
1954	22/04/2016	Hartwegii	10
1954	22/04/2016	Hartwegii	8
1949	22/04/2016	Hartwegii	20
1949	22/04/2016	Hartwegii	30
1949	22/04/2016	Hartwegii	29
1949	22/04/2016	Hartwegii	53
1949	22/04/2016	Hartwegii	46
1949	22/04/2016	Hartwegii	26
1949	22/04/2016	Hartwegii	22
1949	22/04/2016	Hartwegii	21

1949	22/04/2016	Hartwegii	36
1949	22/04/2016	Hartwegii	16
1949	22/04/2016	Hartwegii	17
1970	22/04/2016	Hartwegii	20
1970	22/04/2016	Hartwegii	19
1970	22/04/2016	Hartwegii	30
1970	22/04/2016	Hartwegii	19
1970	22/04/2016	Hartwegii	69
1970	22/04/2016	Hartwegii	48
1970	22/04/2016	Hartwegii	19
1970	22/04/2016	Hartwegii	12
1970	22/04/2016	Hartwegii	64
1970	22/04/2016	Hartwegii	16
1970	22/04/2016	Hartwegii	14
1970	22/04/2016	Hartwegii	14
1970	22/04/2016	Hartwegii	8
1970	22/04/2016	Hartwegii	13
1970	22/04/2016	Hartwegii	9
1970	22/04/2016	Hartwegii	11
1970	22/04/2016	Hartwegii	11
1970	22/04/2016	Hartwegii	17
1970	22/04/2016	Hartwegii	48
1989	22/04/2016	Hartwegii	61
1989	22/04/2016	Hartwegii	13

1989	22/04/2016	Hartwegii	15
1989	22/04/2016	Hartwegii	17
1989	22/04/2016	Hartwegii	13
1989	22/04/2016	Hartwegii	17
1989	22/04/2016	Hartwegii	14
1989	22/04/2016	Hartwegii	10
1989	22/04/2016	Hartwegii	11
1989	22/04/2016	Hartwegii	8
1989	22/04/2016	Hartwegii	53
1989	22/04/2016	Hartwegii	23
1989	22/04/2016	Hartwegii	15
1989	22/04/2016	Hartwegii	17
1989	22/04/2016	Hartwegii	31
1829	26/02/2016	Hartwegii	28
1829	26/02/2016	Hartwegii	29
1829	26/02/2016	Hartwegii	34
1829	26/02/2016	Hartwegii	38
1829	26/02/2016	Hartwegii	35
1829	26/02/2016	Hartwegii	7
1829	26/02/2016	Hartwegii	3
1829	26/02/2016	Hartwegii	4
1829	26/02/2016	Hartwegii	6
1829	26/02/2016	Hartwegii	7
1867	01/04/2016	Hartwegii	70

1867	01/04/2016	Hartwegii	69
1867	01/04/2016	Hartwegii	72
1867	01/04/2016	Hartwegii	28
1867	01/04/2016	Hartwegii	70
1867	01/04/2016	Hartwegii	4
1867	01/04/2016	Hartwegii	5
1868	26/02/2016	Hartwegii	38
1868	26/02/2016	Hartwegii	38
1868	26/02/2016	Hartwegii	44
1868	26/02/2016	Hartwegii	47
1868	26/02/2016	Hartwegii	29
1868	26/02/2016	Hartwegii	64
1868	26/02/2016	Hartwegii	28
1910	26/02/2016	Hartwegii	38
1910	26/02/2016	Hartwegii	5
1910	26/02/2016	Hartwegii	5
1910	26/02/2016	Hartwegii	3
1910	26/02/2016	Hartwegii	4
1910	26/02/2016	Hartwegii	7
1888	26/02/2016	Hartwegii	48
1888	26/02/2016	Hartwegii	40
1888	26/02/2016	Hartwegii	45