

Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca

División de Estudios de Posgrado e Investigación

**CONTENIDO DE CARBONO EN RODALES DE PINO-ENCINO BAJO
APROVECHAMIENTO MADERABLE EN SAN JUAN LACHAO, OAXACA**

TESIS QUE PRESENTA:

Ashmir Ambrosio Lazo

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS

DIRECTOR:

Dr. Gerardo Rodríguez Ortiz

CODIRECTOR:

Dr. Wenceslao Santiago García

Ex Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca.
Agosto 2023



Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca

División de Estudios de Posgrado e Investigación

**CONTENIDO DE CARBONO EN RODALES DE PINO-ENCINO BAJO
APROVECHAMIENTO MADERABLE EN SAN JUAN LACHAO, OAXACA**

TESIS QUE PRESENTA:

Ashmir Ambrosio Lazo

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN
AGROECOSISTEMAS**

DIRECTOR:

Dr. Gerardo Rodríguez Ortiz

CODIRECTOR:

Dr. Wenceslao Santiago García



Ex-Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca
Agosto 2023

La presente tesis titulada: **Contenido de carbono en rodales de pino-encino bajo aprovechamiento maderable en San Juan Lachao, Oaxaca**” fue realizada bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS

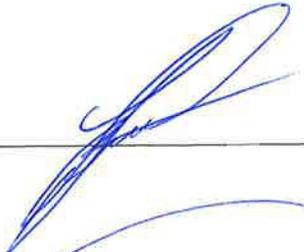
DIRECTOR:
DR. GERARDO RODRÍGUEZ ORTIZ



CO-DIRECTOR:
DR. WENCESLAO SANTIAGO GARCÍA



ASESOR:
DR. JOSÉ RAYMUNDO ENRÍQUEZ DEL VALLE



ASESOR:
DR. VICENTE ARTURO VELASCO VELASCO



	Nombre de la Información Documentada: Formato Autorización del comité para entrega de tesis.	Código: ITVO-AC-PR-08-02
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3, 8.5.2	Revisión: 1
		Página 1 de 1

EXPEDIENTE: 20DIT0009G

Nazareno Xoxocotlán, Oaxaca, 28 de junio del 2023

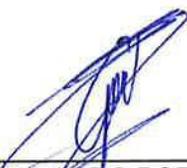
OFICIO No. DEPI/0503/23

C. ASHMIR AMBROSIO LAZO
ESTUDIANTE DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros de su Comité Tutorial, le comunicamos que hemos revisado el contenido de su tesis **“Contenido de carbono en rodales de pino-encino bajo aprovechamiento maderable en San Juan Lachao, Oaxaca”**. Por lo que con base en los lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México se le otorga la **AUTORIZACIÓN** para que proceda a la entrega del documento final de la misma, impresa y en formato digital (PDF); para continuar con su trámite y asignarle la fecha de su examen de grado correspondiente.

Sin más por el momento nos permitimos reconocer su esfuerzo y felicitarle por el logro de su documento de tesis.

A T E N T A M E N T E
“Ciencia y Tecnología para el Campo”


DR. GERARDO RODRÍGUEZ ORTIZ
DIRECTOR DE TESIS


DR. WENCESLAO SANTIAGO GARCÍA
CO-DIRECTOR


DR. JOSÉ RAYMUNDO ENRÍQUEZ DEL VALLE
ASESOR


DR. VICENTE ARTURO VELASCO VELASCO
ASESOR


DR. GUSTAVO OMAR DÍAZ ZORRILLA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DE OAXACA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

	Nombre de la Información Documentada: Formato Autorización de DEPI para entrega de Tesis.	Código: ITVO-AC-PR-08-03
	Referencia a la Norma ISO 9001:2015 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3, 8.5.2	Revisión: 1
		Página 1 de 1

Nazareno Xoxocotlán, Oaxaca, **29/junio/2023**

OFICIO No. DEPI/523/2023

C. ASHMIR AMBROSIO LAZO
ESTUDIANTE DEL PROGRAMA DE MAESTRIA EN CIENCIAS
EN PRODUCTIVIDAD EN AGROECOSISTEMAS
P R E S E N T E

Con base en los Lineamientos para la Operación de Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México, respecto a la presentación del examen de grado, me es muy grato comunicarle que esta División de Estudios de Posgrado e Investigación a mi cargo, **AUTORIZA** la entrega del documento final de su tesis en formato digital (PDF) titulada: **“Contenido de carbono en rodales de pino-encino bajo aprovechamiento maderable en San Juan Lachao, Oaxaca”**.

Cuyo contenido ha sido revisado y aprobado por su Comité Tutorial y cumple en lo general con el formato establecido para este documento, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Productividad en Agroecosistemas.

Sin más por el momento le felicito cordialmente por el logro de esta meta y le reitero el respaldo institucional de su Alma Mater.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
“Ciencia y Tecnología para el Cambio”

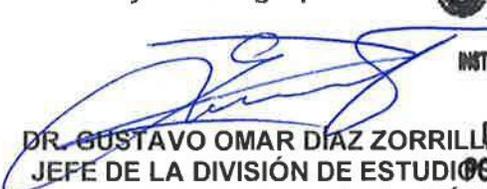


EDUCACIÓN



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DE OAXACA


DR. GUSTAVO OMAR DÍAZ ZORRILLA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

El presente trabajo se llevó a cabo con el apoyo del Consejo Nacional de humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), a través del número de becario **1153610**, con el tema de investigación: **Contenido de carbono en rodales de pino-encino bajo aprovechamiento maderable en San Juan Lachao, Oaxaca.**

Agradecimientos

Agradezco a Dios por guiar mi camino para lograr mis objetivos, académicos y personales, y así poder culminar este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por haber financiado mis estudios de maestría.

Al Dr. Gerardo Rodríguez Ortiz, por compartir su arduo conocimiento; siendo un ejemplo muy importante para mí desarrollo académico y personal.

A mi hijo Liam Matheo, por ser mi motor para lograr mis objetivos; de igual forma a mi hija Azul Maday que desde el cielo me brindó fortaleza.

A mis padres, Gregoria Lazo Sánchez y Bonfilio Ambrosio Matias, por haberme apoyado durante este proceso y darme ánimos.

A mi pareja Arleth Martínez por apoyarme en cada una de mis decisiones, y animarme en cada momento.

A todo el cuerpo académico de la Depi, y a cada uno de mis compañeros; ya que aprendí mucho de todos ellos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE CUADROS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
RESUMEN.....	VI
SUMMARY	VII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general.....	3
1.1.1 Objetivos específicos	4
1.1.2 Hipótesis.....	11
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	¡Error! Marcador no definido.
2.1 Carbono en bosques	5
2.2 Método de desarrollo silvícola	7
2.3 Método de regeneración de árboles padres	8
2.4 Biomasa aérea.....	8
2.5 Biomasa estructural	9
2.6 Biomasa de compartimentos	9
2.7 Gravedad específica	11
2.8 Carbono arbóreo	11

2.9	Carbono de compartimentos	12
2.10	Carbono en suelo	12
2.11	Desfronde arbóreo	13
2.12	Teledetección.....	13
2.12.1	Sentinel 2	14
2.12.2	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....	15
CAPÍTULO III. BIOMASA AÉREA Y CARBONO EN EL SUELO EN RODALES DE PINO-ENCINO BAJO TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS		16
3.1	Resumen.....	16
3.2	Abstract.....	17
3.3	Introducción	18
3.4	Objetivo	20
3.5	Materiales y métodos.....	21
3.5.1	Área de estudio	21
3.5.2	Establecimiento de los sitios de muestreo	22
3.5.3	Inventario y muestreo arbóreo.....	22
3.5.4	Muestreo de compartimentos	23
3.5.5	Análisis de muestras	23
3.5.6	Manejo y análisis de datos.....	24
3.6	Resultados.....	25
3.6.1	Biomasa aérea	25
3.6.2	Carbono en suelo	28
3.7	Discusión	29
3.7.1	Biomasa estructural.....	29
3.7.2	Biomasa en compartimentos y carbono en el suelo	31

3.8	Conclusiones.....	35
3.9	Referencias bibliográficas.....	35
CAPÍTULO IV. MAPEO DE CARBONO EN RODALES DE PINO-ENCINO BAJO APROVECHAMIENTO MADERABLE EN EL SUR DE MÉXICO		43
4.1	Resumen.....	43
4.2	Abstract.....	45
4.3	Introducción.....	46
4.4	Materiales y métodos.....	48
4.4.1	Área de estudio	48
4.4.2	Inventario arbóreo y análisis de laboratorio	49
4.4.3	Datos espectrales <i>Sentinel 2</i>	51
4.4.5	Análisis de datos.....	54
4.5	Resultados.....	55
4.5.1	Ajuste de modelos para estimar biomasa y carbono	55
4.5.2	Expansión de biomasa y carbono	57
4.6	Discusión	60
4.6.1	Ajuste de modelos	60
4.6.2	Expansión de biomasa y carbono	62
4.7	Conclusión.....	64
4.8	Lliteratura citada	64
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES		72
CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES.....		74
CAPÍTULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		75

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
3.6.1	Resumen de análisis de varianza del efecto del aprovechamiento maderable sobre la biomasa aérea y carbono del suelo.....	25
3.6.2	Efecto de los tratamientos silvícolas sobre la acumulación de biomasa aérea y carbono en suelo en rodales bajo aprovechamiento.....	26
4.4.1	Características de bandas espectrales.....	52
4.5.1	Ajuste de modelos con diferentes índices de vegetación para la estimación de biomasa y carbono.....	55
4.5.2	Comparación de biomasa (B) y carbono (C) estimado en campo vs. estimado con <i>Sentinel 2</i>	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página.
3.5.1	Localización de rodales bajo tratamientos silvícolas evaluados en San Juan Lachao, Oaxaca.....	21
3.6.1	Formación de grupos de unidades de muestreo (S) (elipse y rectángulo) con tratamientos silvícolas diferentes, en respuesta de la acumulación de biomasa en el piso forestal.	28
3.6.2	Porcentaje de materia orgánica (MO) y contenido de carbono (C) en el suelo.....	29
4.4.1	Área bajo manejo y rodales en donde se establecieron los sitios de muestreo.....	49
4.4.2	Contenido de materia y carbono orgánico (%) de las especies arbóreas en sitios bajo tratamientos silvícolas.....	51
4.4.3	Expansión de Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), visualización real y vegetación en infrarrojo, del área bajo aprovechamiento.....	53
4.4.4	Expansión de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), visualización real y vegetación en infrarrojo, de los rodales bajo aprovechamiento.....	54
4.5.1	Biomasa (a) y carbono (b) por rodal, estimado con datos de campo vs. datos espectrales.....	56
4.5.2	Expansión de biomasa arbórea y carbono en rodales bajo tratamientos.....	57
4.5.3	Expansión de biomasa y carbono arbóreo en el área bajo aprovechamiento de San Juan Lachao.....	58

RESUMEN

En México y a nivel global el secuestro de carbono (C) proporcionado por los bosques es relevante, debido a las altas emisiones de CO₂. El aprovechamiento maderable modifica los contenidos de biomasa y carbono aéreo, determinar esta acumulación es importante para conocer el efecto de los tratamientos silvícolas (TS) y vincularse al mercado de bonos de carbono. El objetivo fue evaluar el efecto del aprovechamiento maderable sobre la biomasa aérea y carbono en rodales de pino-encino. En 2022 se establecieron de manera selectiva 12 sitios (UM) en cuatro TS: 1er aclareo (1A), aclareo libre (AL), corta de regeneración (CR) y área sin manejo (ASM). Se realizó el inventario arbóreo y del piso forestal para integrar la biomasa y carbono aéreo. Se ajustó un modelo lineal en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (10 m pixel⁻¹, R²_{adj}=0.92), el cual no mostró diferencias entre datos de campo vs. datos espectrales ($p > 0.05$). Los TS se diferenciaron mediante modelo lineal generalizado y comparación de medias (Duncan, 0.05); las UM se clasificaron mediante análisis clúster. Los TS generan montos diferenciados ($p < 0.01$) en la biomasa y carbono de arbustos, hojarasca, humus y herbáceas. No hubo diferencias estadísticas ($p < 0.01$) en el C aéreo del ASM (81.93 t ha⁻¹) vs. TS (74.15 t ha⁻¹). La mayor acumulación de C en desfronde ocurrió en el área con 1A en invierno (2.51±0.31 t ha⁻¹). Los TS modifican el carbono de los compartimentos del piso forestal, lo cual puede revertirse con la aplicación de tratamientos complementarios.

Palabras clave: Compartimentos, Tratamientos silvícolas, *Sentinel 2*.

SUMMARY

In Mexico and globally, the sequestration of carbon (C) provided by forests is relevant, due to the high CO₂ emissions. Timber harvesting modifies the biomass and aerial carbon contents, determining this accumulation is important to know the effect of silvicultural treatments (TS) and link to the carbon bonds market. The objective was to evaluate the effect of timber harvesting on aboveground biomass and carbon in pine-oak stands. In 2022, 12 sites (UM) were selectively established in four TS: 1st thinning (1A), free thinning (AL), regeneration cut (CR) and unmanaged area (ASM). The tree and forest floor inventory was carried out to integrate biomass and aerial carbon. A linear model was fitted based on the normalized difference vegetation index (10 m pixel⁻¹, $R^2_{adj}=0.92$), which did not show differences between field data vs. spectral data ($p>0.05$). The TS were differentiated by means of a generalized linear model and comparison of means (Duncan, 0.05); UM's were classified using cluster analysis. The TS generate differentiated amounts ($p<0.01$) in the biomass and carbon of shrubs, leaf litter, humus and herbaceous plants. There were no statistical differences ($p<0.01$) in the aerial C of the ASM (81.93 t ha⁻¹) vs. TS (74.15 t ha⁻¹). The greatest accumulation of C in litter occurred in the area with 1A in winter (2.51±0.31 t ha⁻¹). The TS modify the carbon of the compartments of the forest floor, which can be reversed with the application of complementary treatments.

Keywords: Compartments, Silvicultural treatments, *Sentinel 2*.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En México y a nivel global el secuestro de carbono (C) proporcionado por los bosques es relevante, debido a las altas emisiones de CO₂, que provocan un desequilibrio climático y efectos negativos hacia la sociedad (Acosta-Mireles, Carrillo-Anzures y Gómez-Villegas, 2011; Yu *et al.*, 2022). El aprovechamiento maderable modifica los patrones de partición y acumulación de biomasa y carbono en los diferentes compartimentos del bosque (Barth, Giménez, Joseau, Gauchat y Fassola, 2016; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019). Evaluar estos efectos con métodos destructivos y empíricos comúnmente usados muestra un alto grado de precisión, pero no es factible a gran escala (Amiri & Pourghasemi, 2022; d'Oliveira *et al.*, 2020; Muhe & Argaw, 2022).

Cuantificar la biomasa total (aérea y subterránea) de los bosques de vegetación pino-encino bajo aprovechamiento maderable es importante para evaluar el efecto de los tratamientos silvícolas (TS) sobre los contenidos de carbono almacenado (Ketterings, Coe, Noordwijk, Ambagau' & Palm, 2001; Soriano-Luna *et al.*, 2015). El uso de imágenes

es un método actualmente usado para generar y validar información de las reservas de C, a diferentes escalas espaciales y temporales; siendo factor clave para la implementación exitosa de mecanismos de mercado de C (Herold *et al.*, 2011).

El C se puede determinar a través de la cantidad de biomasa arbórea estimada (aérea y subterránea), vegetación secundaria, suelo, y material en descomposición (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Miguel-Martínez *et al.*, 2016; Ruiz-Díaz, Rodríguez-Ortiz, Leyva-López, Enríquez-Del Valle, 2014). También evaluar la biomasa y C del material vegetal que se incorpora al piso forestal (desfronde) es importante ya que juega un papel importante en el flujo de nutrientes al suelo; además de poder entender mejor la variación del C almacenado en el piso y suelo forestal (López-Hernández *et al.*, 2022; Paudel, Dossa, Harrison, 2015).

La biomasa aérea desempeña un papel importante en el ciclo del C a nivel local y regional, es por ello la importancia de su cuantificación y monitoreo a través de imágenes satelitales (Main-Knorn *et al.*, 2013; Puliti *et al.*, 2021). Los sensores satelitales miden índices de vegetación que se correlacionan con diversas variables como la biomasa, densidad, volumen y C (Isbaex & Coelho, 2021); estas variables se estiman ajustando modelos alométricos con datos recolectados en campo, en función de los índices de vegetación (Chen, Ren, Zhang, Wang & Xi, 2018; Pandit, Tsuyuki & Dube, 2018; Pertille, Nicoletti, Topanotti & Stepka, 2019).

En México los bosques de vegetación pino-encino son importantes para el sector forestal, obteniéndose el 76% de la producción maderable (Álvarez & Rubio, 2013); además de actuar como grandes sumideros de C, ya que absorben el 30% de las emisiones de CO₂ liberadas en un año (Pan *et al.*, 2011). En estos bosques aproximadamente el 50% de la biomasa arbórea es C orgánico (Bravo *et al.*, 2007; Ruiz-Díaz *et al.*, 2014). Por otro lado, considerar todos los compartimentos del bosque ayuda a comprender de forma más precisa, cuanto carbono se almacena y cuanto se libera en un ecosistema, y así poder mejorar las prácticas de manejo y vincularse al mercado de bonos de carbono; a pesar de que los protocolos de carbono aun no consideran los demás compartimentos del bosque (Espinoza-Zúñiga, Leos-Rodríguez, Rodríguez-Ortiz, Montiel-Batalla & Valdivia-Alcalá, 2023).

San Juan Lachao inició su primer programa de manejo maderable en el año 2010, con una superficie autorizada de 2359.6 ha; en el año 2022 se expandió a 3201 ha, las cuales han sido parte del mercado voluntario de bonos de carbono. Es por ello la importancia de estimar el efecto del manejo maderable y de sus TS, en relación a la captura de C. El objetivo de este estudio es evaluar el efecto del aprovechamiento maderable sobre la acumulación de biomasa aérea y carbono en rodales de pino-encino en San Juan Lachao, Oaxaca.

1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del aprovechamiento maderable sobre la acumulación de biomasa aérea y carbono en rodales de pino-encino en San Juan Lachao, Oaxaca.

1.1.1 Objetivos específicos

Evaluar el efecto de los tratamientos silvícolas sobre los contenidos de biomasa aérea y carbono del suelo en rodales bajo manejo en San Juan Lachao, Oaxaca.

Determinar el contenido de biomasa y carbono arbóreo a través de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales.

1.1.2 Hipótesis

Los montos de C estimados con datos espectrales vs. los estimados en campo no presentan diferencias estadísticas significativas ($p > 0.05$).

Las áreas bajo tratamientos silvícolas presentan montos de carbono estructural de 50 a 60 t ha⁻¹, estando por debajo de las áreas sin manejo (≥ 60 t ha⁻¹).

Las áreas sin manejo presentan la mayor acumulación de biomasa y carbono en el piso forestal, siendo diferentes a las áreas bajo tratamientos silvícolas ($p \leq 0.01$).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Carbono en bosques

El secuestro de carbono proporcionado por los bosques a través la fotosíntesis, es de suma importancia, debido a que las altas emisiones de CO₂ causan un desequilibrio climático y efectos negativos hacia la sociedad (Acosta-Mireles *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2022). El CO₂ es considerado el principal gas del efecto invernadero, provocando cambios significativos en la temperatura del ambiente (Yepes-Quintero *et al.*, 2017); es por ello la importancia de las buenas prácticas de manejo que refuercen a los bosques como sumideros de carbono (Vela-Blanco, López-Blanco y Rodríguez-Gamiño, 2012).

El C total de un bosque se encuentra almacenado en la biomasa arbórea (aérea y subterránea), vegetación secundaria, suelo y material en descomposición (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Miguel-Martínez *et al.*, 2016). Por ello considerar todos los compartimentos ayudan a comprender de forma más precisa; cuanto C se almacena y

compartimentos ayudan a comprender de forma más precisa; cuanto C se almacena y cuanto se libera en un ecosistema y así poder mejorar las prácticas de manejo y vincularse al mercado de bonos de C; aunque este último aun no considera el C almacenado en los demás compartimentos (Espinoza-Zúñiga *et al.*, 2023)

El C total de un bosque se encuentra almacenado en la biomasa arbórea (aérea y subterránea), vegetación secundaria, suelo y material en descomposición (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Miguel-Martínez *et al.*, 2016). Por ello considerar todos los compartimentos ayudan a comprender de forma más precisa; cuanto C se almacena y cuanto se libera en un ecosistema y así poder mejorar las prácticas de manejo y vincularse al mercado de bonos de C; aunque este último aun no considera el C almacenado en los demás compartimentos (Espinoza-Zúñiga *et al.*, 2023)

Una alternativa que vincula el cuidado de los bosques son los mecanismos de mercado de C; en donde involucra que las prácticas de manejo se apliquen de forma adecuada (Herold *et al.*, 2011; Pacheco-Aquino, Durán-Medina & Ordóñez-Díaz, 2018). En algunas comunidades forestales de Oaxaca ya se están aplicando proyectos de C forestal en el mercado voluntario (Bray, Duran & Molina-González, 2012). De esta forma se puede relacionar el buen manejo forestal comunitario con logros económicos, sociales y ecológicos (Bray *et al.*, 2012; Durán, Bray, Velázquez & Larrazábal, 2011).

Los métodos de manejo y tratamientos silvícolas, como estrategia de manejo forestal, pueden contribuir a mitigar el cambio climático, dependiendo de su efecto sobre las reservas de carbono a nivel local y global; aunque estos también provocan liberaciones

de carbono durante su aplicación (Ruiz-Peinado, Bravo-Oviedo, Montero, Del Río, 2014). Diversos autores refieren que cuando se aplica la intervención silvícola trae como consecuencia el aumento de carbono forestal (Barth *et al.*, 2016; Chávez-Aguilar *et al.*, 2016); aunque esto depende de la intervención adecuada del gestor forestal y de los métodos complementarios que realice (Álvarez & Rubio, 2013; Jandl *et al.*, 2007).

2.2 Método de desarrollo silvícola

El Método de Desarrollo Silvícola (MDS) es un sistema de manejo intensivo, en donde se aplican distintos tratamientos silvícolas con el objetivo de mantener o llevar la masa forestal hacia una estructura normal-regular, maximizando el potencial productivo del sitio forestal. (Pérez-López, González-Espinosa, Ramírez-Marcial & Toledo-Aceves, 2020). En México, este método de manejo al igual que el Método Mexicano de Ordenación de Bosque Irregulares (MMOBI) es de los más utilizados en bosque templados con vegetación pino encino (López-Hernández *et al.*, 2017). Este método trata de establecer masas regulares, ya que muchos bosques, en especial de pino o pino-encino, tienden a formar masas regulares; por lo que este es un método regulador de densidad-volumen (Hernández-Salas, 2014).

La elección de un método de manejo depende de las características que estructuran un rodal, tales como, densidad, edad, diámetro, pendiente, diversidad de especies etc.; además de tomar en cuenta un conjunto de criterios de sostenibilidad del orden ambiental, social, económico y técnico (Pérez-Rodríguez, Vargas-Larreta, Aguirre-Calderón, Corral-Rivas & Rojo-Alboreca, 2013). La finalidad de este método es llegar a

una corta de regeneración óptima, a través de diversos tratamientos silvícolas, asegurando la continuidad de las masas forestales (Nom-152-Semarnat, 2006).

2.3 Método de regeneración de árboles padres

El método de árboles padres se basa en la repoblación de las masas forestales con tendencia regular, esto a través de tratamientos silvícolas, como preaclareos, aclareos, cortas de liberación, cortas de regeneración y algunos tratamientos secundarios. Durante el desarrollo de una masa forestal, hay árboles que son eliminados de manera natural o por aprovechamiento; por ello la importancia de realizar la sustitución adecuada de estos, en función de la densidad (Castelán-Lorenzo & Arteaga-Martínez, 2009).

El método de árboles padres toma en cuenta que la regeneración es uno de los aspectos de mayor importancia, al momento de manejar un bosque, ya que garantiza una repoblación de manera natural (Castelán-Lorenzo & Arteaga-Martínez, 2009). Este método modifica las condiciones ambientales y la disponibilidad de los recursos, así como la capacidad de reproducción o regeneración de las especies (Hernández, Deras-Ávila, Deras-Ávila, & Colín, 2019; Khumbongmayum, Tripathi, & mKhan, 2005).

2.4 Biomasa aérea

La biomasa aérea es la suma de la biomasa estructural (arborea) + biomasa de compartimentos arbustivo, herbáceo, humus, hojarasca y necromasa. La biomasa acumulada en un ecosistema forestal es un parámetro indicador de la productividad a lo

largo del tiempo (Eamus, Mcguinness & Burrows, 2000; Fonseca, Alice & José, 2009); además de ser un potente indicador para las estimaciones de C orgánico de los bosques (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Vásquez-Fabián, Rodríguez-Ortiz, Enríquez-del Valle, Campos-Ángeles, Santana-Flores, 2017). Una forma de resaltar la importancia de los bosques en la mitigación del cambio climático, es proporcionando información del potencial de secuestro de C en la biomasa aérea (Návar, 2009).

2.5 Biomasa estructural

La biomasa que un árbol acumula y que está distribuida entre sus estructuras (fuste, ramas, corteza, follaje, estructuras reproductivas) depende de varios factores como: variables dasométricas, altitud, método de manejo, densidad arbórea, tiempo, etc. (Figuroa-Navarro, Ángeles-Pérez, Velázquez-Martínez & de los Santos-Posadas, 2010; García-Aguilar, Rodríguez-Ortiz & Martínez-de la Cruz, 2015; Gracia, Gil & Montero 2005; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019). La estimación de biomasa arbórea requiere de un análisis destructivo o de estimaciones basadas en relaciones alométricas, con base a variables como el diámetro normal, altura, edad y densidad (Gómez-Díaz, Monterroso-Rivas, Tinoco-Rueda & Etchevers-Barra, 2012; Návar, 2009; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019).

2.6 Biomasa de compartimentos

En un ecosistema las estimaciones de reservas de C pueden complementarse mediante el cálculo de biomasa de mantillo, sotobosque, mantillo, necromasa, hierbas y arbustos (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Zianis & Mencuccini, 2004). Para obtener datos precisos

de lo que un bosque puede almacenar en contenido de biomasa aérea es importante incluir la estimación de los demás compartimentos (Barth *et al.*, 2016). Estimar la cantidad de biomasa de vegetación secundaria es importante, debido a la estrecha correlación que estas tienen con el flujo de C, permitiendo un estudio más integral de C sobre la vegetación total (Espinoza-Zúñiga *et al.*, 2023).

El piso forestal es de suma importancia para la reincorporación de materia orgánica al suelo, ya que este contiene grandes cantidades de C a través de la biomasa procedente de la abscisión de órganos de las plantas (Gómez-Díaz *et al.*, 2012). La biomasa del piso forestal está constituida por el material en proceso de descomposición que se reincorpora al suelo (hojarasca + humus) (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Wagner, Schmidt, Richardson, McNabb, 2006).

En la actualidad los estudios del piso forestal no han sido tan precisas cuantitativamente, siendo más descriptivas; y aunque existen varias descripciones del piso forestal, es escasa la información sobre su contenido de C y biomasa almacenada (Schulp, Nabuurs, Verburg & de Waal, 2008); esto es subsecuente no permitiendo una información viable sobre los contenidos de carbono almacenado en el piso forestal de acuerdo al tipo de vegetación (Gómez-Díaz *et al.*, 2012); el piso forestal es la base de la reincorporación de residuos orgánicos al suelo, este es esencial en el ciclo de nutrimentos, ya que los libera en la descomposición y pueden ser usados de nuevo por la planta, manteniendo así un balance nutrimental (Gómez-Díaz *et al.*, 2012; Vesterdal, Schmidt, Callesen, Nilsson & Gundersen, 2008).

2.7 Gravedad específica

La gravedad específica es la relación entre el peso seco y volumen verde de una muestra. La biomasa de componentes estructurales se determina mediante la gravedad específica (GE, g cm^{-3}) de las virutas o rodajas, el cual multiplicado por el volumen (m^3) proporciona la biomasa total (kg) (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011).

2.8 Carbono arbóreo

El carbono arbóreo se determina a través de la biomasa de fuste, ramas, follaje y raíz. La mayor cantidad de C que se almacena en los árboles se fija a través del proceso de la fotosíntesis y se acumula en la biomasa aérea (Aguirre-Calderón & Jiménez-Pérez, 2011; Perea-Ardila, Andrade-Castañeda, Segura-Madrigal, 2021) . Diversos autores mencionan que aproximadamente el 50% de la biomasa arbórea es C orgánico (Bravo, Bravo-Oviedo, Del Peso & Montero, 2008; Ruiz-Díaz *et al.*, 2014).

La estimación del C arbóreo a través de ecuaciones alométricas es de suma importancia, ya que proporciona información de una masa forestal (Acosta-Mireles *et al.*, 2011). Aunque estimar la cantidad de C que almacenan los árboles en sus estructuras es difícil, debido a que el proceso de acumulación es dinámico, dependiendo de diversos factores del sitio, especie y tipo de tejido del árbol (Cortés-Pérez *et al.*, 2021; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019).

2.9 Carbono de compartimentos

Las investigaciones de dinámica de C, se enfocan principalmente en el componente estructural (árbol) y suelo; sin embargo, para conocer más a fondo esta dinámica del carbono en los ecosistemas forestales, es necesario incluir otros compartimentos, como vegetación secundaria (arbustos y herbáceas) y piso forestal, ya que es ahí donde se fijan grandes cantidades de C, mediante la incorporación de biomasa proveniente de las plantas (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Espinoza-Zúñiga *et al.*, 2023; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019). De esta forma el carbono almacenado en los demás compartimentos del bosque puede ser considerado en el mercado de bonos de carbono, ya que estos ayudan a comprender de forma más precisa, cuanto C se almacena y se libera en un bosque (Barth *et al.*, 2016; Espinoza-Zúñiga *et al.*, 2023).

2.10 Carbono en suelo

El suelo es un gran reservorio de C, por lo que es necesario contar con información sobre su capacidad de almacenamiento en los diferentes ecosistemas y tipos de vegetación (Vela-Blanco *et al.*, 2012). Los bosques almacenan aproximadamente el 80 % de los reservorios de C terrestres en el suelo (Jandl *et al.*, 2007; Six *et al.*, 2002). Conocer los cambios del C en el suelo es complejo, debido a que su variabilidad espacial es alta, además de que la incorporación de C al suelo es un proceso a largo plazo (Conen *et al.*, 2005). La tasa anual de reincorporación de carbono al suelo está entre 2 y 12 kg ha⁻¹ (Schlesinger & Andrews, 2000).

2.11 Desfronde arbóreo

El desfronde de las plantas es una vía esencial de incorporación de materia orgánica y de nutrientes al suelo, se define el desfronde como la caída natural o influenciada de biomasa procedente de la parte aérea de los árboles, arbustos y matorrales: hojas, frutos, ramillos, corteza, etc., de forma periódica y que contiene una gran parte de los nutrientes extraídos del suelo por las plantas (Bravo-Oviedo, del Rio, Montero & Rubio-Cuadrado, 2013). El desfronde anual se refiere a la cantidad de biomasa caída de forma natural a lo largo de un año en un ecosistema, en este caso se habla de un ecosistema forestal, este proceso puede ser estudiado a través de la temporalidad, ciclos de corta, aprovechamiento o tratamientos silvícolas aplicados (Bueis, Bravo, Pando, & Turrión, 2017).

Evaluar la biomasa y C del material vegetal que se incorpora al piso forestal (desfronde) es importante ya que juega un papel importante en el flujo de nutrientes al suelo; además de poder entender mejor la variación del C almacenado en el piso y suelo forestal (López-Hernández *et al.*, 2022; Paudel *et al.*, 2015).

2.12 Teledetección

Existen diversas metodologías para la estimación de biomasa y C en los ecosistemas forestales, entre ellos está el uso de las imágenes satelitales, compuestas de píxeles individuales o grupos de ellos como unidad de análisis (Aguirre-Salado *et al.*, 2009). Las

herramientas de teledetección son clave para el flujo de C en bosques, y por ende aportar a la mitigación del cambio climático a nivel local y regional (Perea-Ardila *et al.*, 2021).

Los métodos comúnmente usados para la estimación de biomasa y C son los más efectivos para su monitoreo, sin embargo, el costo es elevado al realizarlo a gran escala, ya que estos se basan en métodos destructivos a través de establecimiento de parcelas de campo (Liang & Wang, 2020); aplicando muestreo destructivo a cierto número de individuos (Zhu & Liu, 2015). Alternativamente, se pueden usar ecuaciones alométricas no destructivas para medir biomasa en el campo (Liang & Wang, 2020); aunque es más factible si estos se ajustan modelos matemáticos, mediante regresión entre las variables de interés y los datos espectrales de las imágenes de satélite, para validar la información o como metodología completa (Isbaex & Coelho, 2021; Pandit *et al.*, 2018)

2.12.1 Sentinel 2

Sentinel 2 es un satélite óptico con 13 bandas espectrales, que se puso en órbita en 2014. La resolución espacial de las bandas varía entre 10 y 60 m. Además, tiene un área de cobertura de 290 km y pasa por la misma zona en poco tiempo (ESA, 2021). La disponibilidad gratuita de los conjuntos de datos satelitales *Sentinel 2* de alta resolución ha creado nuevas posibilidades para mapear y monitorear diferentes ecosistemas y tipos de vegetación (Hudait & Patel, 2022; Puletti, Chianucci & Castaldi, 2018). La agencia espacial europea lanzó la plataforma *Sentinel 2* con el fin de proporcionar servicios basados en observaciones de información multiespectrales de alta resolución de la superficie terrestre (Drusch *et al.*, 2012); con esa información es posible dar seguimiento

a cambios en los bosques y en la cobertura del suelo, y por tanto gestionar desastres naturales (Wong, Fung, & Yeung, 2019).

2.12.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es el método más utilizado para aumentar la diferenciación de la vegetación (Chu, Venevsky, Wu & Wang, 2019). Se obtiene calculando juntas las bandas roja e infrarroja cercana y aumenta la precisión cuando se usa en la clasificación de áreas verdes (Pettoirelli, 2013). El NDVI es uno de los indicadores comúnmente utilizados para detectar e indicar el estado y la dinámica de la cubierta vegetal (Wong *et al.*, 2019; Xing *et al.*, 2020).

CAPÍTULO III

BIOMASA AÉREA Y CARBONO EN EL SUELO EN RODALES DE PINO-ENCINO BAJO TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS

[ABOVEGROUND BIOMASS AND SOIL CARBON IN PINE-OAK STANDS UNDER SILVICULTURAL TREATMENTS]

3.1 Resumen

El aprovechamiento maderable modifica los patrones de partición y acumulación de biomasa estructural y de compartimentos del bosque, determinar dicha acumulación es importante para conocer el efecto de los tratamientos silvícolas (TS) aplicados. El objetivo fue analizar la biomasa aérea y carbono (C) del suelo en rodales bajo TS. En 2022 se establecieron de manera selectiva 12 sitios (UM) en cuatro TS: 1er aclareo (1A), aclareo libre (AL), corta de regeneración (CR) y área sin manejo (ASM). Se realizó inventario arbóreo y del piso forestal para integrar la biomasa estructural y de compartimentos. Los TS se diferenciaron mediante modelo lineal generalizado y comparación de medias (Duncan, 0.05); las UM se clasificaron mediante análisis clúster. Los TS generan montos

diferenciados ($p < 0.01$) en la biomasa estructural de arbustos, hojarasca, humus y gravedad específica del suelo. El área con CR mostró la mayor cantidad de biomasa en el compartimento herbáceo y arbustivo, 0.24 t ha^{-1} y 3.80 t ha^{-1} . El ASM, AL y 1A mostraron diferencia significativa de biomasa en humus ($p > 0.01$) en comparación con CR (3.93 t ha^{-1}), con incrementos respectivos de 160, 265 y 275%. El ASM presentó la mayor acumulación de biomasa aérea total (180.49 t ha^{-1}), mientras que los TS en promedio generaron 166.97 t ha^{-1} . El contenido de materia orgánica (11.6%) y C (6.7%) en el suelo del ASM fue significativamente diferente ($p \leq 0.01$) de los demás tratamientos. Los TS modifican la biomasa de los compartimentos del piso forestal, lo cual puede revertirse con la aplicación de tratamientos complementarios.

PALABRAS CLAVE: compartimentos, densidad del suelo, materia orgánica, San Juan Lachao, tratamiento silvícola.

3.2 Abstract

Timber harvesting modifies the patterns of partitioning and accumulation of structural biomass of forest compartments, determine that accumulation rate is important in order to know the effect of applied silvicultural treatments (TS). The objective was to analyze aboveground biomass and soil carbon (C) in stands under TS. In 2022, 12 sites (UM) were selectively established in four TS: 1st thinning (1A), free thinning (AL), regeneration cutting (CR) and unmanaged area (ASM) Tree and forest floor inventory was carried out to integrate structural and compartmental biomass. The TS were differentiated by means of a generalized linear model and comparison of means (Duncan, 0.05); UMs were

classified using cluster analysis. The TS generate differentiated amounts ($p < 0.01$) in the structural biomass of shrubs, leaf litter, humus and specific gravity of the soil. The area with CR showed the highest amount of biomass in the herbaceous and shrubby compartment, 0.24 t ha^{-1} and 3.80 t ha^{-1} . The ASM, AL and 1A showed a significant difference in biomass in humus ($p > 0.01$) compared to CR (3.93 t ha^{-1}), with respective increases of 160, 265 and 275%. The ASM presented the highest accumulation of total Aboveground biomass (180.49 t ha^{-1}), while the TS on average generated 166.97 t ha^{-1} . The organic matter (11.6%) and C (6.7%) content in the ASM soil was significantly different ($p \leq 0.01$) from the other treatments. The TS modify the biomass of compartments of the forest floor, which can be reversed with the application of complementary treatments.

KEYWORDS: compartments, soil density, organic matter, San Juan Lachao, silvicultural treatment.

3.3 Introducción

En México y a nivel global el secuestro de carbono (C) proporcionado por los bosques es relevante, debido a las altas emisiones de CO_2 , que causan un desequilibrio climático y efectos negativos hacia la sociedad (Acosta Mireles *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2022); por otro lado, los aprovechamientos forestales no sustentables y cambios de uso del suelo contribuyen a las emisiones de CO_2 y reducen el potencial para la captura de C (Galicia, Saynes & Campo, 2015). El aprovechamiento maderable modifica los patrones de partición y acumulación de biomasa en los diferentes compartimentos del bosque; cada

método y tratamiento silvícola aplicado afecta de forma distinta (Barth *et al.*, 2016; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019); aunque estos efectos son poco estudiados y documentados en bosques de pino-encino en clima templado (Álvarez & Rubio, 2013).

En México los bosques de vegetación pino-encino son importantes para la producción forestal, de los que se obtiene el 76% de la producción maderable (Álvarez & Rubio, 2013); además de actuar como grandes sumideros de C, absorben el 30% de las emisiones de CO₂ liberadas en un año (Pan *et al.*, 2011). Cuantificar la biomasa de los bosques que se hayan sometido a aprovechamiento maderable es importante para evaluar la productividad y el efecto de los tratamientos silvícolas sobre los contenidos de C almacenado (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Ketterings *et al.*, 2001; Soriano-Luna *et al.*, 2015). Al conocer los montos de C contribuye a entender el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas forestales, y así poder tomar decisiones en el manejo forestal (Cutini, Chianucci & Manetti, 2013; Joshi & Dhyani, 2018; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019).

El C se puede determinar a través de la cantidad de biomasa arbórea estimada (aérea y subterránea), vegetación secundaria, suelo, y material en descomposición (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Miguel-Martínez *et al.*, 2016; Ruiz-Díaz *et al.*, 2014). En los bosques de pino-encino aproximadamente el 50% de la biomasa arbórea es C orgánico (Ruiz-Díaz *et al.*, 2014); (Bravo *et al.*, 2007). Diversos estudios mencionan que aproximadamente el 44% del C orgánico del bosque está en el suelo, 42% en la biomasa arbórea y vegetación secundaria, 8% en la madera muerta y 5% en el mantillo (Galicia *et al.*, 2016; Pan *et al.*, 2011). Determinar el C orgánico presente en la biomasa de la vegetación secundaria y

la depositada en el suelo es importante para conocer mejor la dinámica de un ecosistema (Ekoungoulou, Liu, Loumeto & Ifo, 2014).

La biomasa acumulada en un ecosistema forestal es un parámetro indicador de la productividad a lo largo del tiempo (Eamus *et al.*, 2000; Fonseca *et al.*, 2009); está compuesta por el peso seco de la materia orgánica (M.O.) aérea y subterránea que existe en ese ecosistema (Návar, 2009). La biomasa que un árbol acumula y está distribuida entre sus estructuras depende de varios factores como: variables dasométricas, altitud, método de manejo, densidad arbórea, tiempo, etc., (Figuroa-Navarro *et al.*, 2010; García-Aguilar *et al.*, 2015; Gracia *et al.*, 2005; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019).

La comunidad de San Juan Lachao, cuenta con 3 290 ha de bosque de pino-encino, de las cuales 573 ha están bajo manejo forestal a través del método de desarrollo silvícola (MDS) y 1 787 ha bajo el método mexicano de ordenación de bosques irregulares (MMOBI). Las especies arbóreas de importancia maderable son *Pinus douglasiana* Mtz., *P. maximinoi* H.E. Moore, *P. devoniana* Lindl., *Quercus rugosa* Née, *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl. y otras hojosas (Servicios Técnicos Forestales [STF], 2011).

3.4 Objetivo

El objetivo de esta investigación fue analizar la biomasa aérea y carbono orgánico del suelo de rodales bajo tratamientos silvícolas de San Juan Lachao, Oaxaca.

3.5 Materiales y métodos

3.5.1 Área de estudio

La investigación se realizó en el bosque bajo manejo de 3 201 ha de San Juan Lachao, Juquila, Oaxaca, México, con coordenadas: 16° 09' 30.26" LN y 97° 07' 28.04" LO, con variaciones de altitud entre los 900 y los 2 600 m y promedio de 1 900 m (Figura 1). El clima predominante es cálido subhúmedo (Cw); la temperatura promedio anual es de 22° C, y la precipitación promedio es de 2 500 mm (Servicios Técnicos Forestales [STF], 2011).

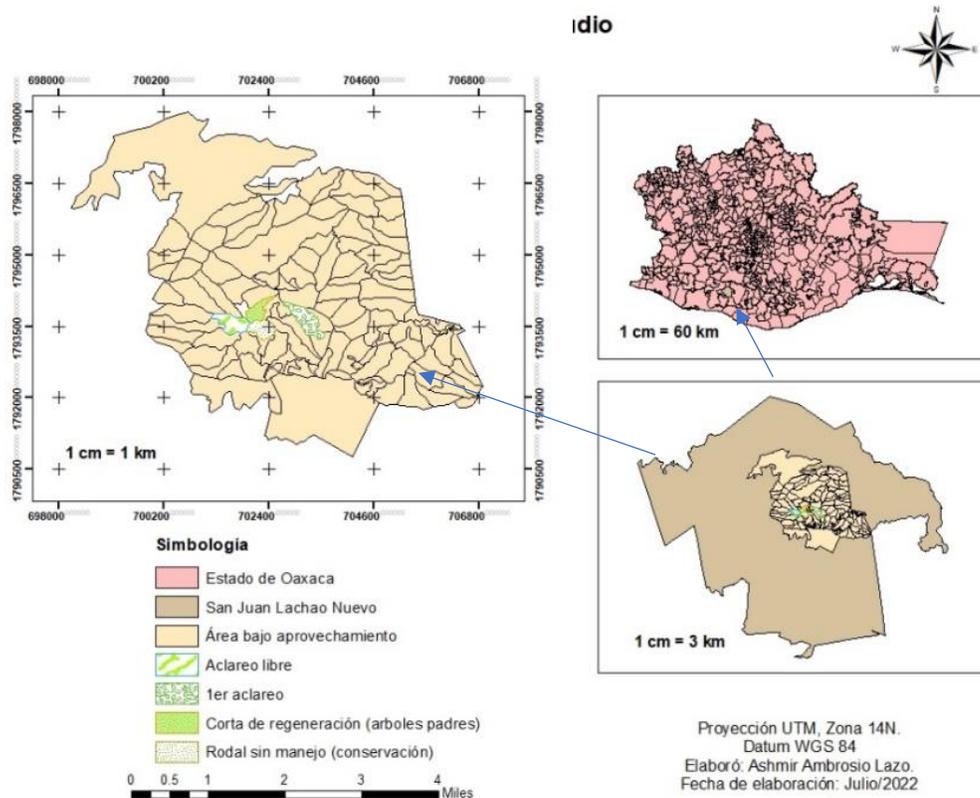


Figura 3.5 1. Localización de rodales bajo tratamientos silvícolas evaluados en San Juan Lachao, Oaxaca.

3.5.2 Establecimiento de los sitios de muestreo

En el 2022 se establecieron 12 sitios circulares de 400 m² con compensación por pendiente, de manera dirigida en rodales aprovechados durante el periodo 2013 - 2014, esto bajo la metodología usada por (Chávez-Pascual *et al.*, 2017; Miguel-Martínez *et al.*, 2016). Se utilizó un diseño de muestreo selectivo para evaluar cuatro tratamientos: aclareo libre (AL), 1er aclareo (1A), corta de regeneración bajo el método de árboles padres (CR) y área sin manejo (ASM), con tres repeticiones; las cuales contaban con las mismas características de altitud, exposición, densidad y pendiente. Los sitios (UM) se geo-posicionaron con ayuda de GPS (*global positioning system*) (Garmin eTrex 30, USA®) MAPS 6.

3.5.3 Inventario y muestreo arbóreo

En los sitios se realizó el inventario arbóreo, en donde se registró: diámetro normal (DN, cm) con una cinta diamétrica (Hartmann ®, 283D), altura total (AT, m) mediante un clinómetro (Haglöf ®, EC II D-HS115), y diámetro de copa (DC, m) con una cinta métrica (Truper ® TP50ME). Se eligió una muestra de árboles en forma proporcional a la frecuencia relativa de cada especie, a los que se extrajo una muestra (viruta) con un taladro de Pressler (Haglöf®, Sweden). En algunas especies como *Quercus spp*, *Arbutus xalapensis* Kunth, *Alnus acuminata* Kunth, entre otras, se derribó al menos un individuo de cada especie por sitio para obtener una rodaja de 5 cm de grosor, como muestra. Se tomaron variables descriptivas del sitio: altitud, exposición y pendiente promedio con un clinómetro.

3.5.4 Muestreo de compartimentos

Mediante la metodología propuesta por Rodríguez-Ortiz *et al.* (2019); se colectó la necromasa y el material arbustivo en dos áreas de 9 m² por sitio, y se pesaron con una báscula romana de 25 kg (Pretul ®, 21255); la necromasa en rollo se cubicó con la fórmula de Newton (Romahn de la Vega & Ramírez, 2010). La hojarasca, humus, y material herbáceo se colectaron en un área de 1 m² dentro de cada cuadrante de los sitios, se pesaron con una báscula de precisión (Dhaus, CS 5000, 5000±2 g); también se introdujo a presión y verticalmente en el suelo un tubo PVC de 30 cm de longitud y 4 cm de diámetro, para extraer una muestra (10 - 30 cm) que se cubicó (cm³) con la fórmula de Smallian (Romahn de la Vega & Ramírez, 2010). A todo el material obtenido se le obtuvo una submuestra y se pesó para obtener su peso fresco (PF, g).

3.5.5 Análisis de muestras

Las muestras se analizaron en el laboratorio de Agro-ecosistemas del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Las virutas y rodajas se pesaron en una báscula analítica (Shimadzu ®, aty224, ±1mg) para determinar su peso verde (PV, g); el volumen verde (VV, cm⁻³) se determinó con ayuda de un vernier digital y aplicando la fórmula de Newton (Romahn de la Vega & Ramírez, 2010). Posteriormente se introdujeron a una estufa de secado (Memmert®, 100-800) a 102°C, hasta obtener su peso constante y su peso seco (PS, g). Se obtuvo la gravedad específica (GE, kg m⁻³) por especie, $GE = (PS / VV) \times 1000$, sugerida por Denne & Hale, (1999) .

Las muestras de los demás compartimentos se introdujeron a la estufa de secado a diferentes temperaturas, hasta obtener su peso constante y posteriormente su peso seco (PS, g): material leñoso (120° c), semileñoso (75°c) y suelo (50° c). Se obtuvo un factor de conversión de biomasa (FC) para las muestras de necromasa, arbustivo, herbáceas, hojarasca y humus, $FC = PS / PV$, el cual es eficaz (Bravo et al., 2008). Para el suelo se determinó la GE (kg m⁻³), $GE = (PS / VV) \times 1000$, y carbono a través del contenido de materia orgánica, bajo el método Walkey and Black (Nom-021-RENAC).

3.5.6 Manejo y análisis de datos

Se determinó el volumen total árbol con corteza (VTAcc, m³) de las especies arbóreas encontradas, con el sistema biométrico forestal (Vargas-Larreta *et al.*, 2017); la biomasa por especie (kg) se estimó utilizando su GE (kg m⁻³) (Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2011). Se obtuvo la biomasa (kg) de los compartimentos: necromasa, arbustivo, herbáceo, humus y hojarasca de cada área muestreada mediante el producto del PV (kg) y FC. Los datos de biomasa se infirieron a toneladas por hectárea (t ha⁻¹).

En los datos se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas respectivas de Shapiro-Wilk y Bartlett ($\alpha > 0.05$), algunas variables se transformaron a logaritmo natural sólo y combinado. Los TS se diferenciaron mediante modelo lineal generalizado (PROC GLM) y prueba de medias (Duncan, 0.05); las UM se clasificaron con análisis clúster. Todos los análisis se desarrollaron en el programa SAS (Statistical Analysis System) (SAS Institute, 2017)

3.6 Resultados

3.6.1 Biomasa aérea

En respuesta a los tratamientos silvícolas, se encontraron diferencias altamente significativas en la acumulación de biomasa estructural de arbustos y en los compartimentos hojarasca y humus ($p < 0.01$); estas variables presentaron una heterogeneidad moderada - alta (CV entre 31.5% y 64.2%) debido a que la densidad arbórea y la cobertura es diferente entre los tratamientos. El compartimento herbáceo y necromasa no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) debido a la gran heterogeneidad (CV > 94.0 %) de los residuos de la extracción realizada que genera problemas de inflación de varianzas. La biomasa estructural arbórea entre TS se mantuvo constante ($p > 0.05$), (cuadro 3.6.1).

Cuadro 3.6.1. Resumen de análisis de varianza del efecto del aprovechamiento maderable sobre la biomasa aérea y carbono del suelo.

Variable	GL Error	Cuadrados medios		CV (%)	\sqrt{CME}
		TS	Error		
<i>Pinus</i> spp.	8	1181.5 ^{ns}	1582.7	42.4	39.8
<i>Quercus</i> spp. ^{†††}	8	0.8 ^{ns}	0.4	17.3	0.6
Total arbórea	8	470.9 ^{ns}	1908.2	31.3	43.6
Hojarasca	44	119.1 ^{**}	11.7	31.5	3.4
Humus	44	306.9 ^{**}	20.0	41.3	4.5
Herbácea [†]	37	0.6 ^{ns}	0.3	94.1	0.6
Arbustivo ^{††}	12	2.1 ^{**}	0.3	64.2	0.6
Necromasa ^π	20	1.0 ^{ns}	0.5	152.6	0.7
Biomasa aérea total	8	349.5 ^{ns}	2370.8	28.6	48.7
Suelo (GE)	44	352576.9 ^{**}	42603.5	23.8	206.4
Carbono en suelo	44	2898.6 ^{**}	351.8	30.9	18.8

GL=grados de libertad, TS=tratamiento silvícola, CV=coeficiente de variación, CME = cuadrado medio del error, GE=gravedad específica (kg m⁻³) **altamente significativo ($p \leq 0.01$), ^{ns}no significativo ($p > 0.05$).

Datos transformados [†] $\ln \sqrt{x}$, ^{††} $\ln(\cos x+1)$, ^{†††} $\ln(x)$, ^π $\ln(\sqrt{x/100})$

La biomasa estructural arbórea por género y total, así como la biomasa aérea total no mostraron diferencia estadística ($p > 0.05$) entre los TS aplicados y el área bajo conservación (ASM), debido a que éstas últimas a pesar que contienen árboles de mayores dimensiones (diámetro, altura, etc.), poseen la menor densidad (492 árboles ha⁻¹); de esta manera, los rodales de San Juan Lachao tienen en promedio 170.4 t ha⁻¹ de biomasa total aérea (cuadro 3.6.2).

Cuadro 3.6.2 Efecto de los tratamientos silvícolas sobre la acumulación de biomasa aérea y carbono en suelo en rodales bajo aprovechamiento.

Biomasa (t ha ⁻¹)	Tratamiento silvícola			
	Aclareo libre	Primer aclareo	CR	ASM
<i>Pinus</i> spp	65.9± 13.9 ^a	98.0± 7.4 ^a	112.8± 29 ^a	98.6± 32.0 ^a
<i>Quercus</i> spp	70.9± 19.0 ^a	28.2± 10.6 ^a	24.8± 5.8 ^a	57.7± 22.5 ^a
Total, arbóreo	136.8± 25.4 ^a	126.2± 16.5 ^a	137.5± 28.6 ^a	156.3± 28.4 ^a
Hojarasca	11.3± 1.3 ^b	15.1± 0.8 ^a	8.1± 1.0 ^b	8.9± 0.7 ^b
Humus	14.5± 1.4 ^a	14.8± 1.4 ^a	3.9± 0.8 ^b	10.2± 1.5 ^a
Herbácea	0.1± 0.02 ^b	0.1± 0.1 ^{ab}	0.2± 0.1 ^a	0.2± 0.1 ^{ab}
Arbustiva	0.4± 0.1 ^b	1.0± 0.3 ^b	3.8± 0.6 ^a	0.7± 0.4 ^b
Necromasa ^π	4.1± 0.8 ^{ab}	20.1± 16.5 ^a	3.1± 2.4 ^b	4.3± 2.1 ^{ab}
B aérea total	167.1± 27.3 ^a	177.2± 23.7 ^a	156.6± 32.5 ^a	180.5± 28.3 ^a
C suelo (t ha ⁻¹)	40.3± 8.7 ^b	75.8± 4.4 ^a	57.4± 4.1 ^{ab}	69.0± 2.5 ^a
GE suelo (kg m ⁻³)	735.4± 86.4 ^{bc}	959.9± 23.7 ^{ab}	1063.8± 68.5 ^a	713.9± 38.6 ^c
DN (cm)	15.5± 0.9 ^b	16.4± 1.4 ^b	14.1± 0.7 ^b	25.8± 3.3 ^a
AT (m)	14.7± 0.4 ^a	13.4± 0.4 ^a	11.1± 0.9 ^b	14.8± 0.4 ^a
DC (m)	5.9± 0.7 ^b	7.2± 0.1 ^{ab}	5.3± 0.7 ^b	10.0± 1.4 ^a
AC (m ²)	30.5± 7.0 ^b	45.8± 1.8 ^b	33.4± 10.9 ^b	87.1± 19.3 ^a
Densidad (árboles ha ⁻¹)	1166.7± 109.3 ^a	1141.7± 344.4 ^a	825.0± 14.4 ^{ab}	491.7± 79.5 ^b

CR = corta de regeneración (árboles padres), ASM = área sin manejo (conservación), B = biomasa, C = carbono, DN = diámetro normal AT = altura total, DC = diámetro de copa, AC = área de copa, GE = gravedad específica. Los datos con letras distintas en hileras presentan diferencias estadísticas significativas (Duncan, 0.05). Media ± error estándar. ^πSeparación de medias con datos transformados a $\ln(\sqrt{x/100})$.

El área donde se aplicó corta de regeneración mostró los montos más bajos en los compartimentos de humus y hojarasca (12.0 t ha^{-1}), que es 59.2% menor al testigo (ASM) y 149.2% menor al primer aclareo de mayor acumulación; estas diferencias podrían ser debido a: 1) la baja densidad arbórea resultante de la corta de regeneración por árboles padres, en donde la vegetación secundaria (arbustiva y herbácea) predominó; 2) que en los sitios en que hubo CR predomina arbolado joven los cuales muestran escasa senescencia y abscisión de hojas y ramas. Debido a que el compartimento de necromasa no se diferenció estadísticamente entre TS, la separación de medias se realizó con datos transformados, de tal manera que los sitios con primer aclareo generaron una acumulación mayor de 449.4% con respecto al resto de TS (cuadro 3.6.2).

Los 12 sitios se clasificaron tomando en consideración la biomasa acumulada en el piso forestal (sin contemplar biomasa arbórea); de esta manera, se observa a una distancia euclídea promedio de 50.2 la separación de dos grandes grupos. La unidad de muestreo S5_1A contiene biomasa en el piso forestal diferenciada de las demás UM; el resto de sitios se separó a una distancia media de 12.5 entre conglomerados, de tal forma que los sitios con aplicación de CR (óvalo verde) se asocian al contener cantidades similares de biomasa en el piso forestal. Por otro lado, las áreas de conservación (rectángulo naranja) asocian montos similares de biomasa, lo cual sucede a una distancia media de 4.6 (Figura 3.6.1).

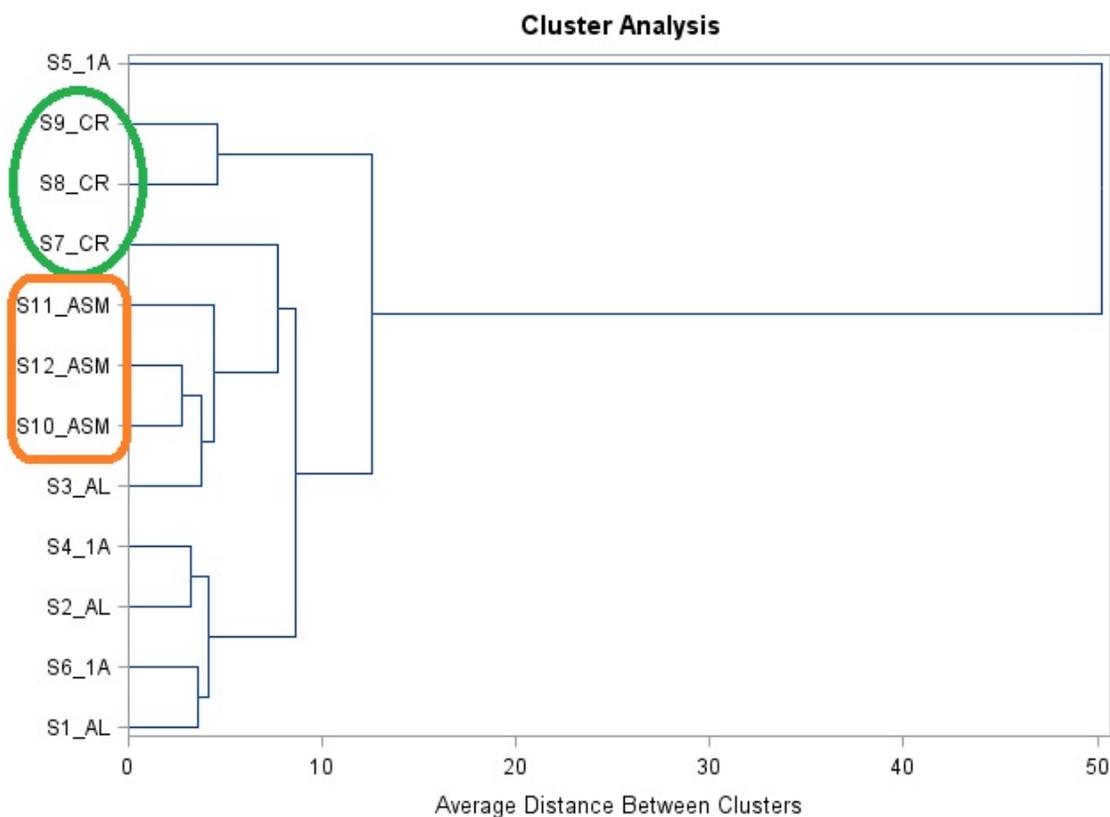


Figura 3.6 1. formación de grupos de unidades de muestreo (S) (elipse y rectángulo) con tratamientos silvícolas diferentes, en respuesta de la acumulación de biomasa en el piso forestal. S = sitio (UM), AL = aclareo libre, 1A = primer aclareo, CR = corta de regeneración, ASM = área sin manejo.

3.6.2 Carbono en suelo

La gravedad específica y el contenido de C del suelo se diferenciaron ($p < 0.01$) entre tratamientos silvícolas (Tabla1). La GE del suelo del área con CR (1063.8 kg m^{-3}) fue mayor ($p < 0.01$) en comparación con el rodal sin manejo (713.9 kg m^{-3}), lo cual es 49% más denso. Los sitios con intensidades de corta menores (1A), así como las áreas bajo conservación presentaron los mayores contenidos de C en el suelo (72.4 t ha^{-1}), mismo que se diferenció estadísticamente con el TS de aclareo libre, de mayor intensidad de corta (cuadro 3.6.2). En el mismo sentido, el contenido de materia orgánica en el suelo del ASM (11.6%) fue significativamente diferente ($p \leq 0.01$) de los demás tratamientos.

El contenido de C almacenado en el suelo del ASM (6.7%) fue 91.4% mayor que el almacenado en rodales bajo AL (3.5%) (Figura 3.6.2).

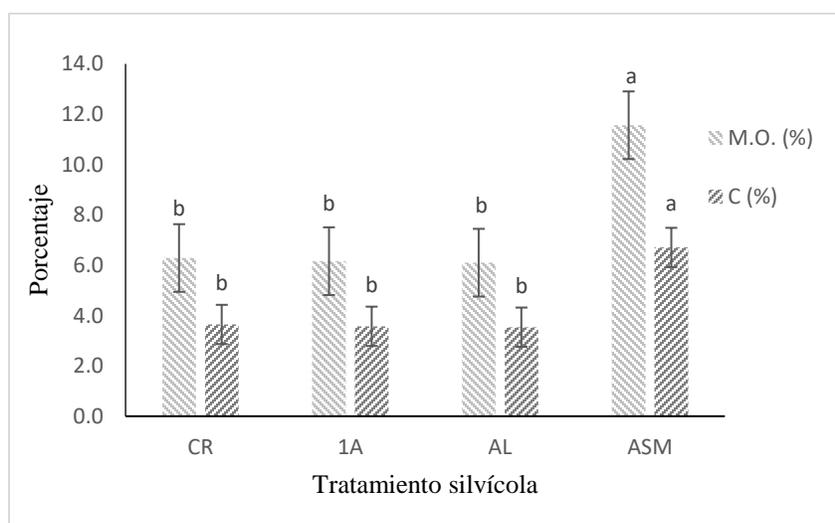


Figura 3.6 2. Porcentaje de materia orgánica (MO) y contenido de carbono (C) en el suelo. CR = corta de regeneración (árboles padres), 1A = primer aclareo, AL = aclareo libre, ASM = área sin manejo. Los datos con letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). Las barras verticales representan el error estándar.

3.7 Discusión

3.7.1 Biomasa estructural

El área bajo conservación (ASM) mostró en promedio la mayor cantidad de biomasa arbórea (156.3 t ha^{-1}), no mostrando diferencia significativa sobre las áreas bajo tratamientos silvícolas (AL, 1A y CR), que en promedio acumulan 133.5 t ha^{-1} . Álvarez et al. (2012) mencionan que en bosques mixtos bajo conservación los montos superiores a 150 t ha^{-1} son excelentes reservorios de C, aunque esto depende del tipo de vegetación y de factores fisiográficos (García-Aguilar et al., 2015). Galicia et al. (2015) reportan en un bosque maduro de pino-encino sin aprovechamiento de la Sierra Norte de Oaxaca,

altos valores de biomasa arbórea, 225 a 347 t ha⁻¹. Siles, Talavera, Rugama, Alaniz, & Ortiz-González, (2017) reportan 221.2 t ha⁻¹ de biomasa arbórea, en una reserva con vegetación pino-encino de Santa Rosa, Nicaragua; todos ellos valores superiores a los obtenidos en este estudio.

Los valores de biomasa arbórea del ASM no difieren de los del área con CR, lo cual coincide con Chávez-Pascual *et al.* (2017), quienes reportan en áreas con CR (10 años) 55.94 t ha⁻¹ y en ASM (60.67 t ha⁻¹). La biomasa arbórea se compensa cuando se aplican los tratamientos de forma adecuada; en diversos estudios de distribución de biomasa en árboles se ha identificado una disminución de la proporción de biomasa con el aumento del tamaño del árbol (Figueroa-Navarro *et al.*, 2010); por ello aplicar tratamientos silvícolas en un turno adecuado incrementa la acumulación de biomasa.

El ASM presentó árboles con diámetro de 25.8 cm y biomasa de 317.8 kg árbol⁻¹; las áreas bajo aprovechamiento presentaron DN = 15.3 cm y biomasa arbórea de 133.5 kg árbol⁻¹. Estos datos concuerdan con los estimados por Acosta-Mireles *et al.* (2011), donde reportan en un bosque de pino-encino bajo manejo de la sierra Huasteca de Hidalgo, DN > 15 cm con 209.75 kg árbol⁻¹ de biomasa. También concuerdan con datos encontrados por Aguirre-Calderón & Jiménez-Pérez (2011), quienes determinaron una biomasa de 219.87 kg árbol⁻¹ para *P. pseudostrobus* Lindl. y 251.23 kg árbol⁻¹ para *P. teocote* Schiede ex Schltdl. Vásquez-Fabián *et al.* (2017) reportan mayores contenidos de biomasa en *P. pseudostrobus* Lindl. (492.45 kg árbol⁻¹) en árboles con DN = 21 cm y altura total de 16.7 m. De igual forma Chávez-Pascual *et al.* (2018) reportaron altas cantidades de biomasa (444.14) kg árbol⁻¹ para DN = 27.7 cm. Delgado, Acevedo, Castellanos, Ramírez, &

Serrano (2005) comentan que existe una estrecha relación alométrica entre el diámetro normal y la biomasa, entre mayores sean los diámetros mayor acumulación de biomasa se presenta. (Rodríguez-Larramendi *et al.*, 2016).

La gravedad específica de la madera (no mostrada en los resultados) del género *Pinus* fue de 466 kg m^{-3} y del encino 584 kg m^{-3} , y son un parámetro fundamental para estimar la biomasa y conocer dinámica del C. Álvarez & Rubio (2013) reportan valores similares en un bosque de pino-encino de la Sierra Juárez, 450 kg m^{-3} para pino y 630 kg m^{-3} para encino; la GE de la madera es un indicador potencial para predecir la biomasa arbórea de cualquier ecosistema (Álvarez *et al.*, 2012; Ganamé *et al.*, 2021).

3.7.2 Biomasa en compartimentos y carbono en el suelo

El ASM presenta menor densidad ($491 \text{ árboles ha}^{-1}$), pero mayor diámetro y altura promedio; esta área presentó 0.15 , 0.68 , 8.9 y 4.26 t ha^{-1} de biomasa en los compartimentos: herbáceo, arbustivo, hojarasca y necromasa, respectivamente. El área con AL presentó la mayor densidad ($1166 \text{ árboles ha}^{-1}$) con 0.09 , 0.43 , 11.3 , 4.05 t ha^{-1} de biomasa en los mismos compartimentos respectivos. Con respecto a lo anterior, Barth *et al.* (2016) reportaron en densidades de $375 \text{ árboles ha}^{-1}$, contenidos de biomasa de 0.44 , 1.59 , 14.54 , 0.87 t ha^{-1} y en densidades de $1500 \text{ árboles ha}^{-1}$ biomasa de 0.40 , 1.60 , 12.76 , 2.53 t ha^{-1} , esto para los compartimentos herbáceo, arbustivo, hojarasca y necromasa, respectivamente. Castelán-Lorenzo & Arteaga-Martínez (2009) y Pensado-Fernández, Sánchez-Velásquez, Pineda-López & Díaz-Fleischer, (2014) refieren que la adecuada densidad y distribución de arbórea favorecen las condiciones del sitio, por lo tanto, un incremento en la biomasa.

Las áreas con AL, 1A y ASM mostraron 14.46, 14.77, 10.22 t ha⁻¹ de biomasa en humus, respectivamente, siendo superiores al área con CR (3.93 t ha⁻¹); de igual forma, el área con 1A fue la de mayor contenido de biomasa en hojarasca (15.1 t ha⁻¹). Estos resultados concuerdan con los reportados por Chávez-Pascual *et al.* (2017), donde la menor acumulación de biomasa del piso forestal (hojarasca y humus) fue en áreas con CR (32.57 t ha⁻¹ ± 2.9 t ha⁻¹) y la mayor en sitios conservados (44.4 t ha⁻¹ ± 1.8 t ha⁻¹).

Las áreas con CR muestran la menor cantidad de hojarasca y humus debido a la alta densidad arbórea y la escasa luz que llega al piso forestal (Wagner *et al.*, 2006). Por otro lado, las ASM presentan altas concentraciones de biomasa en esos compartimentos; Gómez-Díaz *et al.* (2012) en la Reserva de la Biosfera, Huautla, Morelos, reportan en dos condiciones de bosque de encino, bosque secundario medio y bosque maduro, respectivamente: 7.7 t ha⁻¹ y 10.2 t ha⁻¹ de biomasa en hojarasca, así como 7.0 y 21.7 t ha⁻¹ de biomasa en humus. De igual forma Gómez-Díaz *et al.* (2012) encontraron en dos condiciones de bosque tropical seco (secundario temprano y maduro): 4.7 y 5.8 t ha⁻¹ de biomasa en el piso forestal (humus + hojarasca).

Los sitios con aplicación de 1A acumularon 20.1 t ha⁻¹ de necromasa, que representa un incremento porcentual entre 381% y 572% con respecto al resto de TS. Áreas sometidas a aclareos presentan altas cantidades en necromasa, como lo documentan Martiarena, Alcides-Pinazo, Wallis-Von, Knebel & Pahr (2011) en una plantación de *Pinus taeda* L. en Argentina, donde en densidades residuales de 711, 364 y 122 árboles ha⁻¹ encontraron 25, 18.3 y 16.7 t ha⁻¹ de necromasa, respectivamente. Los aclareos son buenas técnicas para suprimir la vegetación que compite con las plantas jóvenes de pino, cambiando la

composición de la vegetación (Santala, Aubin, Hoepting, Bachand & Pitt, 2019). El ASM tuvo 4.26 t ha^{-1} de necromasa resultante de podas naturales, caída de frutos y muerte por competencia; Galicia *et al.* (2015) reportan en bosque maduros sin aprovechamiento valores de 8.7 a 17.9 t ha^{-1} .

El área con CR tuvo 3.8 t ha^{-1} de biomasa arbustiva, cantidad 458.9%, 166.0% y superior a la encontrada en ASM y AL, respectivamente. También, los sitios de CR tuvieron 60% más de biomasa herbácea que el ASM. Esto coincide con los resultados presentados por Chávez-Pascual *et al.* (2017) en un bosque de pino-encino de la Sierra Norte de Oaxaca, donde encontraron diferencias significativas de biomasa arbustiva y herbácea en áreas con CR a 10 años (42.27 t ha^{-1} y 1.42 t ha^{-1}). Esta proliferación arbustiva y herbácea se debe a la alta reducción de la densidad arbórea favoreciendo la entrada de luz bajo el dosel (Ruiz-Díaz *et al.*, 2014); caso contrario las ASM, son un bosque abierto con menor densidad arbórea, pero con dimensiones mayores, limitando la energía solar hacia el suelo (Parker, Pitt & Morneault, 2012). Por lo anterior, áreas con CR y sin tratamientos complementarios tienden a aumentar el material arbustivo y herbáceo y pueden afectar la regeneración de especies de importancia maderable como *Pinus* spp. (Pallavacini, 2010).

No hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) en la acumulación de biomasa herbácea y arbustiva entre los tratamientos AL, 1A y ASM; esto coincide con lo encontrado por Martiarena *et al.* (2011) donde reporta valores respectivos de 1.33, 1.25 y 1.07 t ha^{-1} de biomasa herbácea en respuesta a aclareos con intensidades de 0%, 33% y 66%, pero

contrasta en biomasa arbustiva donde reportaron valores en el mismo orden de 0.26, 0.70 y 5.29 t ha⁻¹.

La gravedad específica del suelo del área con CR (1063.8 kg m⁻³) mostró diferencias significativas ($p < 0.01$) en comparación con el rodal sin manejo (713.88 kg m⁻³), lo cual es 49% más denso. Por otro lado, Martiarena *et al.* (2011) encontró valores mayores en suelos forestales bajo aprovechamiento: 1320 kg m⁻³ en áreas bajo conservación y en áreas con 33% y 66 % de aclareo 1290 kg m⁻³ y 1270 kg m⁻³, respectivamente.

Los sitios con aplicación de AL contienen los menores montos de C en suelo (40.3 t ha⁻¹), además de valores reducidos en MO (6%) y contenido de C (3.8%), (Figura 3.6.1); el resto de TS acumulan en promedio 67.4 t C ha⁻¹, lo cual representa un decremento de 67.2%. Solís-Hernández *et al.* (2014), reportan en suelos forestales (10-30 cm), 6.1 - 102.5 t ha⁻¹ de C en áreas con CR, y 10.9 - 106.3 t ha⁻¹ en áreas bajo aclareos. Vela-Blanco *et al.* (2012) determinaron en suelos bajo conservación (10 - 30 cm) del Distrito Federal con vegetación de *Abies* spp. y *Pinus* spp. contenidos de C orgánico de 100 a 150 t ha⁻¹. Por otro lado, en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México se encontraron a 50 cm de profundidad en rodales conservados de pino-encino 103 ± 35 t C ha⁻¹ y en rodales bajo aprovechamiento valores de 39 ± 20 t C ha⁻¹ (Pérez-Ramírez, Ramírez, Jaramillo-López & Bautista, 2013); lo que indica que el almacenamiento de C disminuye con la profundidad del suelo.

3.8 Conclusiones

Los tratamientos silvícolas (TS) aplicados en los bosques comunales de San Juan Lachao no modifican la biomasa estructural arbórea, sin embargo, influyen en los montos de biomasa acumulada en arbustos y herbáceas, así como la acumulada en compartimentos de hojarasca, necromasa y humus. Los TS de aclareo libre y cortas de regeneración (CR) tienden a reducir la biomasa acumulada en el piso forestal de los rodales; sin embargo, las intensidades de corta bajas (primer aclareo) igualan la acumulación de biomasa del piso forestal del área sin manejo (ASM).

No se encontraron diferencias en acumulación de biomasa aérea total entre el ASM (180.5 t ha⁻¹) y las áreas con TS (167.0 t ha⁻¹); sin embargo, el suelo del área bajo conservación presentó mayor contenido de carbono (6.7%) en la materia orgánica (MO =11.6%), esto debido a la conservación del mismo. Es por ello que al realizar aprovechamiento maderable se deben contemplar tratamientos complementarios de reincorporación de MO al suelo, llevando a cabo un balance nutrimental.

3.9 Referencias bibliográficas

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Gómez-Villegas, R. G. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 529–543. <https://doi.org/10.29312/remexca.v2i4.1638>
- Aguirre-Calderón, O. A., & Jiménez-Pérez, J. (2011). Evaluación del contenido de carbono en bosques del Sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 74–84.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Álvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de las Salas, G., del Valle, I., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S., & Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267, 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>

Álvarez, S., & Rubio, A. (2013). Línea base de carbono en bosque mixto de Pino-Encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO₂FIX V.3.2. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 125–137. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.005>

Barth, S. R., Giménez, A. M., Joseau, M. J., Gauchat, M. E., & Fassola, H. E. (2016). Compartimentalización de la biomasa aérea de *Grevillea robusta* A. en función a la densidad inicial de plantación. *Scientia Forestalis*, 44(111), 653–664. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.11>

Bravo, F., del Río, M., Bravo-Oviedo, A., del Peso, C., & Montero, G. (2008). Forest management strategies and carbon sequestration. In *Gestión de ecosistemas forestales: el desafío del cambio climático. Manejo de ecosistemas forestales* (Vol. 17, pp. 179–194). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8343-3_11

Bravo, F., Herrero C., Ordóñez, C., Segur, M., Gómez, C., Menéndez, M., & Cámara, asunción. (2007). Cuantificación de la fijación de CO₂ en la biomasa arbórea de los sistemas forestales españoles. In: *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático: Vol. 12:12* (pp. 143–222). https://www.researchgate.net/publication/256403018_Cuantificacion_de_la_fijacion_de_CO2_en_la_biomasa_arborea_de_los_sistemas_forestales_espanoles

Castelán-Lorenzo, M., & Arteaga-Martínez, B. (2009). Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en cortas bajo el método de árboles padres. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 15(1), 49–57. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62916073005>

- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Enríquez-del Valle, J. R., Chávez-Servia, J. L., & Campos-Ángeles, G. V. (2018). Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1273–1284. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i6.1290>
- Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V. A., & Gómez-Cárdenas, M. (2017). Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera Bosques*, 23(3), 147–161. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>
- Cutini, A., Chianucci, F., & Manetti, M. C. (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 6(1), 331–335. <https://doi.org/10.3832/ifor0941-006>
- Delgado, L. A., Acevedo, M. F., Castellanos, H., Ramírez, I., & Serrano, J. (2005). Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de árboles de la reserva forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia*, 30(5), 275–283. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33910406>
- Denne, M. P., & Hale, M. D. (1999). Cell wall and lumen percentages in relation to wood density of *Nothofagus nervosa*. *IAWA Journal*, 20(1), 23–36. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001544>
- Eamus, D., McGuinness, K., & Burrows, W. (2000). Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern Territory and Western Australia. *National Carbon Accounting System. Australia*. <http://www.greenhouse.gov.au/ncas>
- Ekoungoulou, R., Liu, X., Loumeto, J. J., & Ifo, S. A. (2014). Tree above-and below-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in secondary forest of Congo. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(4), 09–20. <https://doi.org/10.9790/2402-08420920>
- Figueroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & de los Santos-Posadas, H. M. (2010). Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105–112.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322010000100012

Fonseca G, W., Alice G, F., & Rey B, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36–47. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002009000100006>

Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. maría, Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 1–29. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100001

Galicia, L., Saynes, V., & Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences*, 93(3), 433–457. <https://doi.org/10.17129/botsci.66>

Ganamé, M., Bayen, P., Ouédraogo, I., Balima, L. H., & Thiombiano, A. (2021). Allometric models for improving aboveground biomass estimates in West African savanna ecosystems. *Trees, Forests and People*, 4, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100077>

García-Aguilar, J. Á., Rodríguez-Ortiz, G., & Martínez-de la Cruz, J. (2015). Influencia de variables fisiográficas en la productividad de biomasa aérea en bosques mixtos. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 2(2), 87–98. https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/11/4-RMAE_2015-12-Biomasa.pdf

Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., Tinoco-Rueda, J. A., & Etchevers-Barra, J. D. (2012). Almacenes de carbono en el piso forestal de dos tipos de bosque. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 177–187. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v30n2/2395-8030-tl-30-02-00177.pdf>

Gracia, C., Gil, L., & Montero, G. (2005). Impactos sobre el sector forestal. In *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático* (pp. 399–436).

Institute SAS. (2017). *Base SAS 9.4 procedures guide: statistical procedures*.

- Joshi, R. K., & Dhyani, S. (2018). Biomass, carbon density and diversity of tree species in tropical dry deciduous forests in Central India. *Acta Ecologica Sinica*, 39(4), 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.09.009>
- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau', Y., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1–3), 199–209. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00460-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00460-6)
- Martiarena, R. A., Alcides-Pinazo, M., Wallis-Von, A., Knebel, O., & Pahr, N. M. (2011). Alternativas de manejo silvícola para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. *Ciencia de Suelo (Argentina)*, 29(1), 39–48. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/5811>
- Miguel-Martínez, A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., & Santiago-García, W. (2016). Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1575–1584. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.151>
- Návar, J. (2009). Biomass component equations for Latin American species and groups of species. *Annals of Forest Science*, 66(2), 208–216. <https://doi.org/10.1051/forest/2009001>
- NOM-021-RENAC. (2000, September 30). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Pallavacini, Y. (2010). Factores que influyen en la acumulación de biomasa de herbáceas durante la sucesión en minas de carbón. *Ecosistemas*, 19(3), 78–82. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/376>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Parker, W. C., Pitt, D. G., & Morneault, A. E. (2012). Influence of herbaceous and woody vegetation control on seedling microclimate, leaf gas exchange, water status, and nutrient

relations of *Pinus strobus* L. seedlings planted in a shelterwood. *Forest Ecology and Management*, 271, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.042>

Pensado-Fernández, J. A., Sánchez-Velásquez, L. R., Pineda-López, M. del R., & Díaz-Fleischer, F. (2014). Plantaciones forestales vs. regeneración natural In situ: El caso de los pinos y la rehabilitación en el Parque Nacional Cofre de Perote. *Botanical Sciences*, 92(4), 617–622. <https://doi.org/10.17129/botsci.109>

Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 157–173. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>

Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M., & Campos Saldaña, R. A. (2016). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 77–94. <https://doi.org/https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.53>

Rodríguez-Ortiz, G., Aldrete, A., González-Hernández, V. A., de Los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011). ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? *Agrociencia*, 45(6), 719–732. <https://doi.org/14053195>

Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J. Á., Leyva-López, J. C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-del Valle, J. R., & Santiago-García, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>

Romahn de la Vega, C. F., & Ramírez, M. H. (2010). Dendrometría. *Universidad Autónoma de Chapingo. México, DF*, 312 p. <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>

Ruiz-Díaz, C., Rodríguez-Ortiz, G., Cristóbal Leyva-López, J., Raymundo Enríquez-Del Valle, J., Raymundo, J., & Valle, E.-D. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1), 28–45.

- Santala, K., Aubin, I., Hoepfing, M., Bachand, M., & Pitt, D. (2019). Managing conservation values and tree performance: Lessons learned from 10 year experiments in regenerating eastern white pine (*Pinus strobus* L.). *Forest Ecology and Management*, 432, 748–760. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.038>
- Servicios Técnicos Forestales [STF]. (2011). Programa de manejo forestal para el aprovechamiento y conservación. *San Juan Lachao, Oaxaca*.
- Siles, P., Talavera, P., Rugama, F. A., Alaniz, L., & Ortiz González, W. (2017). Composición florística, estructura y biomasa de los bosques de pino-encino en la reserva Santa Rosa, Tisey, Estelí, Nicaragua. *Revista Biología Tropical*, 65(2), 763–775. <https://www.redalyc.org/journal/449/44950834027/html/>
- Soriano-Luna, M. de los Á., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárate, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423–438. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000400006
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., de los Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., Treviño-Garza, E. J., Martínez-Salvador, M., & Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Sistema biométrico forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(3), 437–455. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>
- Vásquez-Fabián, S. A., Rodríguez-Ortiz, G., Raymundo Enríquez-del Valle, J., Virginia Campos-Angeles, G., & Santana-Flores, A. (2017). Volumen y biomasa aérea de *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote* del sur de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(2), 164–172. https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/11/7-RMAE_2017-15-Biomasa-To-edit.pdf
- Vela Blanco, G., López Blanco, J., & Rodríguez Gamiño, M. D. L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 77(77), 18. <https://doi.org/10.14350/riq.31007>

- Wagner, R. G., Little, K. M., Richardson, B., & McNabb, K. (2006). The role of vegetation management for enhancing productivity of the world's forests. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 79(1), 57–79. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi057>
- Yu, Z., Ciais, P., Piao, S., Houghton, R. A., Lu, C., Tian, H., Agathokleous, E., Kattel, G. R., Sitch, S., Goll, D., Yue, X., Walker, A., Friedlingstein, P., Jain, A. K., Liu, S., & Zhou, G. (2022). Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 13(5374). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32961-2>

CAPÍTULO IV

MAPEO DE CARBONO EN RODALES DE PINO-ENCINO BAJO APROVECHAMIENTO MADERABLE EN EL SUR DE MÉXICO

**[CARBON MAPPING IN PINE-OAK STANDS UNDER TIMBER USE AT SOUTHERN
MEXICO]**

4.1 Resumen

Los métodos destructivos y empíricos comúnmente utilizados para estimar reservorios de carbono en áreas bajo aprovechamiento forestal son tardados, costosos y no factibles a gran escala; las imágenes satélites permiten evaluar a diferentes escalas, reduciendo tiempo y costos. El objetivo fue evaluar la biomasa

arbórea (TB) y contenido de carbono (CC) arbóreo a través de imágenes satelitales derivadas de *Sentinel 2*, en rodales bajo aprovechamiento del sur de México. En 2022 se establecieron de manera dirigida 12 sitios circulares de 400 m², en cuatro tratamientos silvícolas (ST): 1er aclareo (T1), aclareo libre (FT), corta de regeneración (RC) y área sin manejo (AWM). Se realizó el inventario arbóreo, se extrajeron muestras para determinar su biomasa mediante su gravedad específica y su CC a través del método Walkey & Black. Se descargó la imagen satelital del área de estudio, a través de *Sentinel 2*; para ajustar un modelo lineal simple en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (10 m pixel⁻¹) mostrando significancia ($p \leq 0.01$) y $R^2_{\text{adj}} = 0.92$. Posteriormente se estimó la TB y CC (t ha⁻¹) por ST y área bajo aprovechamiento. La superficie total bajo aprovechamiento (3201 ha⁻¹) mostró 126 t TB ha⁻¹ y 57 t C ha⁻¹. El área con FT mostró la mayor acumulación de TB (140 t ha⁻¹) y C (63 t ha⁻¹) sin mostrar diferencias ($p > 0.05$) con respecto al AWM, la cual presentó 129 t TB ha⁻¹ y 58 t C ha⁻¹. Las imágenes satelitales derivadas de *Sentinel 2* estiman confiablemente los montos de biomasa y C de rodales con aprovechamiento forestal; por ello, se puede inducir que la aplicación adecuada de los ST mantiene un balance en la acumulación de C arbóreo.

Palabras clave: Carbon content, Normalized Difference Vegetation Index, San Juan Lachao, Sentinel, silvicultural treatment.

4.2 Abstract

Background: The destructive and empirical methods commonly used to estimate carbon pools in forests managed timber are time-consuming, expensive and unfeasible at a large scale; satellite images allow evaluations at different scales, reducing time and costs. The objective of this study was to evaluate the tree biomass (TB) and carbon content (CC) through satellite images derived from *Sentinel 2* in underutilized stands in southern Mexico.

Methods: In 2022, 12 circular sites of 400 m² with four silvicultural treatments (STs) were established in a targeted manner: 1st thinning (T1), free thinning (FT), regeneration cut (RC) and unmanaged area (UA). A tree inventory was carried out, and samples were obtained to determine their TB based on specific gravity and CC through the Walkey and Black method. The satellite image of the study area was downloaded from *Sentinel 2* to fit a simple linear model as a function of the Normalized Difference Vegetation Index (10 m pixel⁻¹) showing significance ($p \leq 0.01$) and a $R^2 \text{ adj} = 0.92$. Subsequently, the TB and CC (t ha⁻¹) were estimated for each ST and managed area.

Results: The total managed area (3,201 ha⁻¹) had 126 t TB ha⁻¹ and 57 t C ha⁻¹. Of the areas with STs, the area with FT showed the highest accumulation of TB (140 t ha⁻¹) and C (63 t ha⁻¹) without showing differences ($p > 0.05$) with respect to those of the UA, which presented 129 t TB ha⁻¹ and 58 t C ha⁻¹. The satellite images from *Sentinel 2* provide reliable estimates of the amounts of TB and CC in the managed stands. Therefore, it can be concluded that an adequate application of STs maintains a balance in the accumulation of tree C.

Index Words: Carbon content, Normalized difference vegetation index, San Juan Lachao, Sentinel, silvicultural treatment.

4.3 Introducción

En México y a nivel global el secuestro de carbono (C) proporcionado por los bosques ha tomado gran relevancia, debido a las altas emisiones de CO², que causan un desequilibrio climático y efectos negativos hacia la sociedad (Yu *et al.*, 2022). En la actualidad los métodos destructivos y empíricos comúnmente utilizados para estimar el C forestal, son tardados, costosos y no factibles a gran escala (Amiri & Pourghasemi, 2022; d'Oliveira *et al.*, 2020; Muhe & Argaw, 2022); por ello, el uso de imágenes satelitales obtenidas a través de la teledetección ayuda a evaluar reservas de C a diferentes escalas espaciales y temporales; obteniendo datos precisos para los planes estratégicos de gestión forestal (Dou & Yang, 2018; Vashum & Jayakumar, 2012); y siendo un factor clave para la implementación exitosa de mecanismos de mercado de C (Herold *et al.*, 2011)

Los sensores satelitales miden índices de vegetación que se correlacionan con diversas variables como la biomasa, densidad, volumen y C (Isbaex & Coelho, 2021); estas variables se estiman ajustando modelos alométricos con datos recolectados en campo en función de los índices de vegetación (Chen *et al.*, 2018; Pandit *et al.*, 2018; Pertille *et al.*, 2019). Estos modelos de estimación a múltiples escalas se usan comúnmente en estudios de vegetación forestal, aunque también aplican en diversos estudios de monitoreo de nutrientes en otros tipos de vegetación (Chen *et al.*, 2018; Dou & Yang, 2018).

La agencia espacial europea lanzó la plataforma *Sentinel 2* con el fin de proporcionar servicios basados en observaciones de información multiespectrales de alta resolución de la superficie terrestre (Drusch *et al.*, 2012). con esa información es posible dar seguimiento a cambios en los bosques y en la cobertura del suelo, y por tanto gestionar desastres naturales (Wong *et al.*, 2019). *Sentinel 2* es un satélite óptico con 13 bandas espectrales, que se puso en órbita en 2014. La resolución espacial de las bandas varía entre 10 y 60 m. Además, tiene un área de cobertura de 290 km y pasa por la misma zona en poco tiempo (ESA, 2021). La disponibilidad gratuita de los conjuntos de datos satelitales *Sentinel 2* de alta resolución ha creado nuevas posibilidades para mapear y monitorear diferentes ecosistemas y tipos de vegetación (Hudait & Patel, 2022; Puletti *et al.*, 2018)

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es el método más utilizado para aumentar la diferenciación de la vegetación (Chu *et al.*, 2019). Se obtiene calculando juntas las bandas roja e infrarroja cercana y aumenta la precisión cuando se usa en la clasificación de áreas verdes (Pettorelli, 2013). El NDVI es uno de los indicadores comúnmente utilizados para detectar e indicar el estado y la dinámica de la cubierta vegetal (Wong *et al.*, 2019; Xing *et al.*, 2020).

La biomasa aérea desempeña un papel importante en el ciclo del C a nivel local y regional, es por ello la importancia de su cuantificación y monitoreo a través de imágenes satelitales (Main-Knorn *et al.*, 2013; Puliti *et al.*, 2021). Cuantificar la biomasa y el C forestal de los bosques bajo aprovechamiento maderable es importante para entender su dinámica, evaluar el efecto de los tratamientos silvícolas aplicados y tomar decisiones

para la venta de bonos de C, por parte de la comunidad (Cutini *et al.*, 2013; d'Oliveira *et al.*, 2020; Joshi & Dhyani, 2018; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2019).

San Juan Lachao inició su primer programa de manejo maderable en el año 2010, con una superficie autorizada de 2359.6 ha; en el año 2022 se expandió a 3201 ha, las cuales han sido parte del mercado voluntario de bonos de carbono; es por ello la importancia de estimar el efecto del manejo maderable y de sus TS, en relación a la captura de C, a través de imágenes satelitales, ya que brinda información viable a gran escala, siendo una herramienta importante de validación de datos; además de que en el sur de México, no hay estudios de este tipo. El objetivo fue evaluar el contenido de biomasa y C arbóreo de San Juan Lachao, Oaxaca, México a través de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales. Bajo la hipótesis, de que no hay diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los montos de C estimados con datos espectrales vs. los estimados en campo.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Área de estudio

La investigación se realizó en el bosque bajo manejo de San Juan Lachao, Pueblo Nuevo, Juquila, Oaxaca, México, con coordenadas: 16° 09' 30.26" LN y 97° 07' 28.04" LO y altitud promedio de 1900 m (Figura 1). El clima predominante es cálido subhúmedo (Cw), temperatura media anual de 22° C y precipitación promedio de 2500 mm. La comunidad de San Juan Lachao cuenta con un bosque de pino-encino de 3201 ha, de las cuales 573 están bajo manejo forestal a través del método de desarrollo silvícola (MDS) y 1787 bajo el método mexicano de ordenación de bosques irregulares (MMOBI). Esta superficie

está compuesta por especies de importancia maderable, como *Pinus douglasiana* Mtz., *P. maximinoi* H.E. Moore, *P. devoniana* Lindl., *Quercus rugosa* Née, *Q. crassifolia* Humb. & amp; Bonpl. y otras latifoliadas (Servicios Técnicos Forestales [STF], 2011).

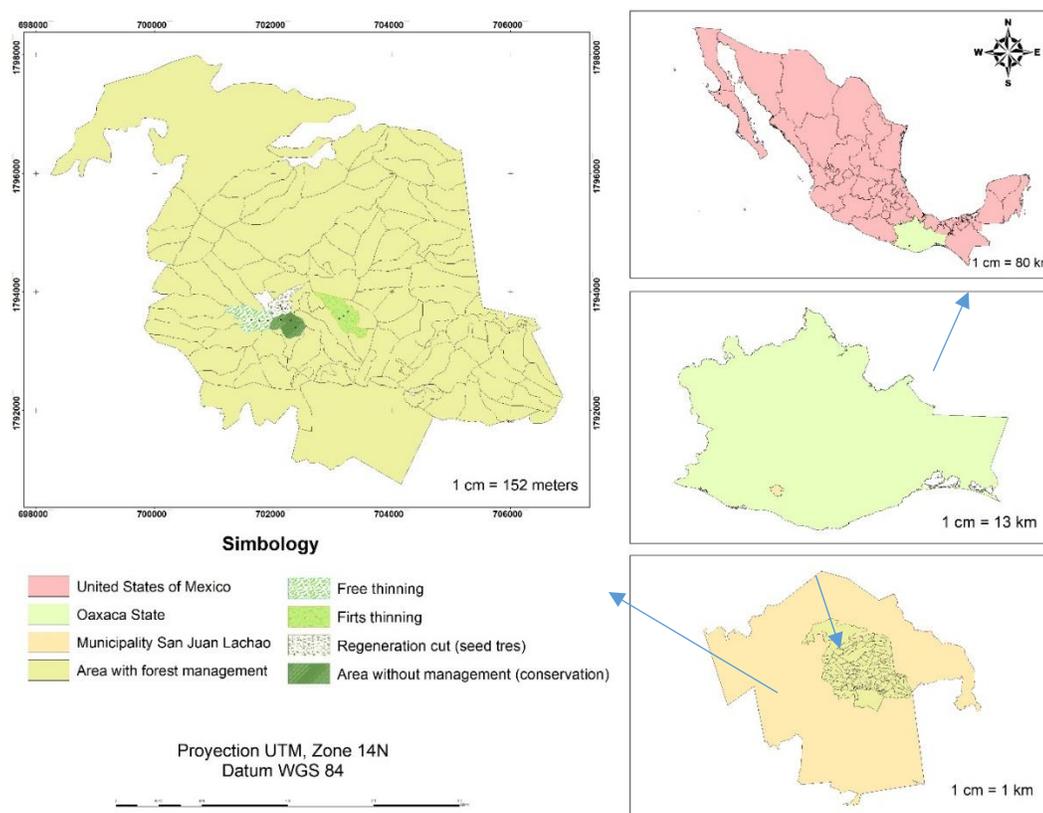


Figura 4.4 1. Área bajo manejo y rodales en donde se establecieron los sitios de muestreo

4.4.2 Inventario arbóreo y análisis de laboratorio

En el 2022 se establecieron 12 sitios circulares de 400 m² con compensación por pendiente, de manera dirigida en rodales aprovechados durante el periodo 2013 - 2014, esto bajo la metodología usada por Chávez-Pascual *et al.* (2017); Miguel-Martínez *et al.* (2016). Los sitios se establecieron en cuatro tratamientos silvícolas: aclareo libre (AL), 1er aclareo (1A), corta de regeneración bajo el método de árboles padres (CR) y área sin

manejo (ASM), con tres repeticiones. Los sitios se geo-posicionaron con ayuda de GPS (*global positioning system*) (Garmin eTrex 30, USA®) MAPS 6, dentro de cada rodal. Se tomaron variables descriptivas del sitio: altitud (m), pendiente promedio del sitio (%), con un clinómetro (Haglöf®, EC II D-HS115), y exposición.

En los sitios se realizó el inventario arbóreo, registrando las variables: diámetro normal (DN, cm) con una cinta diamétrica (Hartmann ®, 283D), altura total (AT, m) con un clinómetro (Haglöf ®, EC II D-HS115) y área de copa (AC, m) con una cinta métrica. Se seleccionaron árboles en forma proporcional a la frecuencia relativa de cada especie para extraerles una muestra (viruta o rodaja); para *Pinus spp* se utilizó un taladro de Pressler (Haglöf®, Sweden) para extraer una viruta a una altura de 1.30 m; en algunas especies como *Quercus spp*, *Arbutus xalapensis* Kunth, *Alnus acuminata* Kunth, se derribó al menos un árbol de cada especie por sitio para obtener una rodaja de 5 cm de grosor (Rodríguez-Ortiz et al., 2019).

Las muestras se analizaron en el laboratorio de Agroecosistemas del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Las virutas y rodajas de todas las especies se pesaron en una báscula analítica (Shimadzu ®, aty224, ± 1 mg) para determinar su peso verde (PV g). El volumen verde (VV, cm^3) se determinó con ayuda de un vernier digital y aplicando la fórmula de Newton (Romahn de la Vega & Ramírez, 2010). Posteriormente se introdujeron a una estufa de secado (Memmert®, 100-800) a 102°C , hasta obtener su peso constante y su peso seco (PS, g). Se obtuvo la gravedad específica por especie, (GE , kg m^{-3})
$$GE = (PS / VV) \times 1000$$
 (Bhardwaj et al., 2016). Posteriormente las muestras se molieron

para determinar su contenido de C a través del contenido de materia orgánica bajo el método de walkey & Black (NOM-021-RENAC, 2000); en donde el 58% de la materia orgánica determinada es C (Figura 4.4.2).

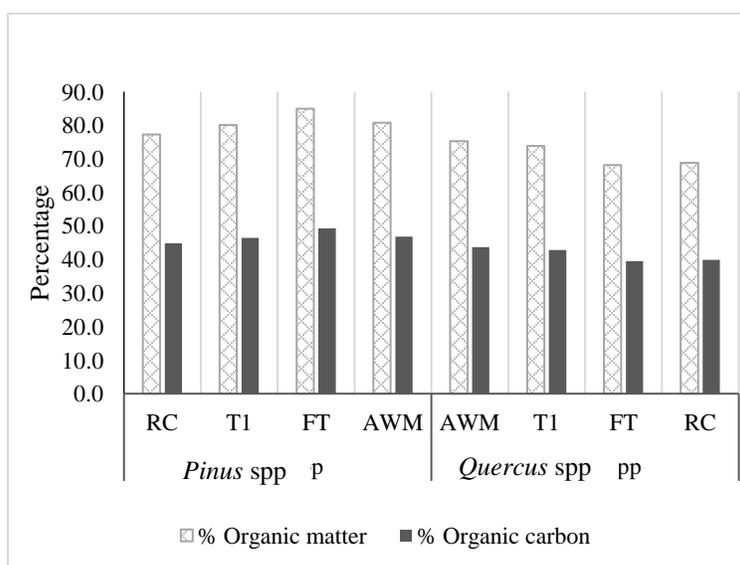


Figura 4.4 2. Contenido de materia y carbono orgánico (%) de las especies arbóreas en sitios bajo tratamientos silvícolas. RC=corta de regeneración, T1=primer aclareo, FT=aclareo libre, AWM= área sin manejo.

Se determinó el volumen total árbol con corteza (VTAcc, m³) de todas las especies arbóreas encontradas, con el sistema biométrico forestal (Vargas-Larreta et al., 2017); el producto volumen y GE (kg m⁻³) proporciona el contenido de biomasa (kg árbol⁻¹) (Rodríguez-Ortiz et al., 2011).

4.4.3 Datos espectrales *Sentinel 2*

La imagen espectral del área de estudio se descargó dividida en 13 bandas, en la plataforma *Sentinels Scientific Data Hub*. La descarga fue en nivel 2A la cual tiene preprocesamientos a nivel de corrección atmosférica.

Cuadro 4.4.1. Características de bandas espectrales.

N.Banda	Nombre de banda	Longitud de onda (nm)	Resolución (m)
1	Coastal aerosol	443.9	60
2	Blue	496.6	10
3	Green	560	10
4	Red	664.5	10
5	Vegetation Red Edge	703.9	20
6	Vegetation Red Edge	740.2	20
7	Vegetation Red Edge	782.5	20
8	NIR	835.1	10
8A	Narrow NIR	864.8	20
9	Water vapour	945	60
10	SWIR – Cirrus	1373.5	60
11	SWIR	1613.7	20
12	SWIR	2202.4	20

La imagen se procesó con el software QGIS 2.16.16[®], en donde primero se aplicó la corrección atmosférica a cada banda. Para visualizar la imagen en color verdadero se realizó un juego de bandas 2, 3 y 4, las tres con 10 m de resolución por píxel. Posteriormente se realizó un juego de las bandas 3, 4 y 8 (10 m píxel⁻¹) para visualizar la vegetación en infrarrojo (Figura 4.4.3).

Para el cálculo del NDVI se utilizaron las bandas 4(Rojo) y 8 (NIR). Se aplicó la fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

, donde: Red y NIR son las medidas de reflectancia espectral adquiridas en las regiones roja (visible) e infrarroja cercana, respectivamente. Estas reflectancias espectrales son en sí mismas proporciones de la radiación reflejada sobre cada banda espectral individual. A las capas de NDVI, visualización real y vegetación en

infrarrojo se les realizó un corte del área bajo aprovechamiento y de los 4 rodales en donde se ubican los sitios de muestreo (Figura 4.4.4).

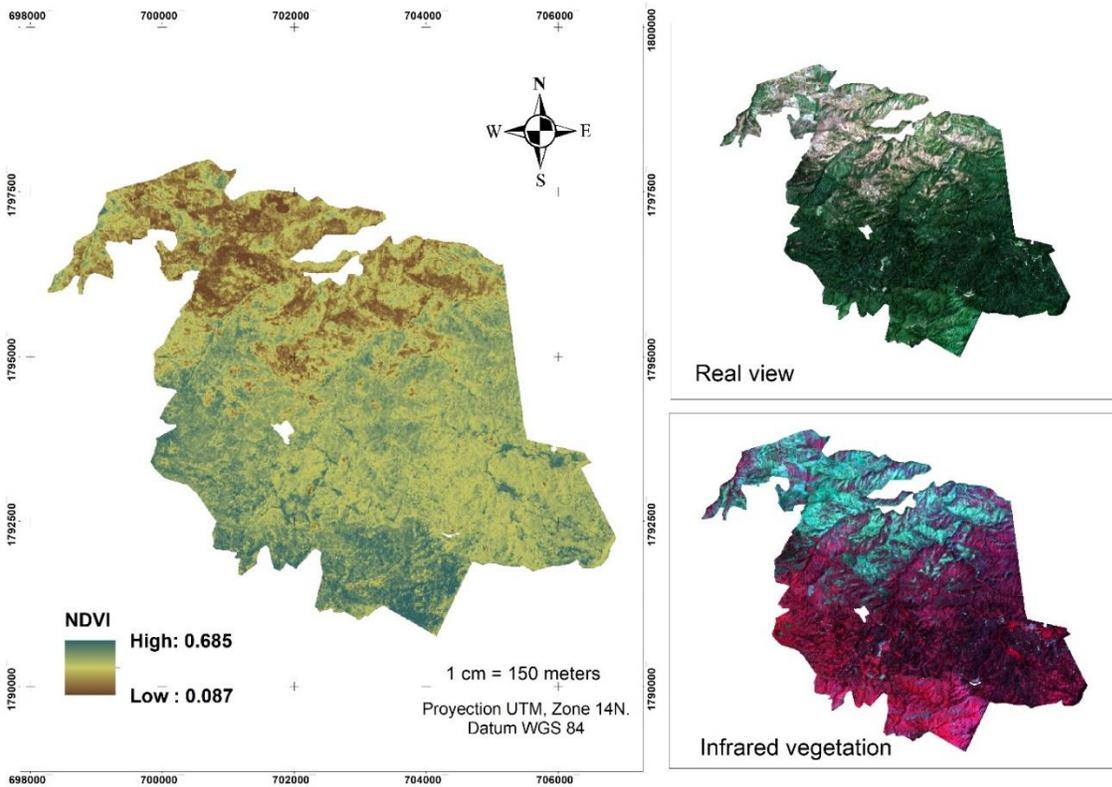


Figura 4.4 3. Expansión de Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), visualización real y vegetación en infrarrojo, del área bajo aprovechamiento.

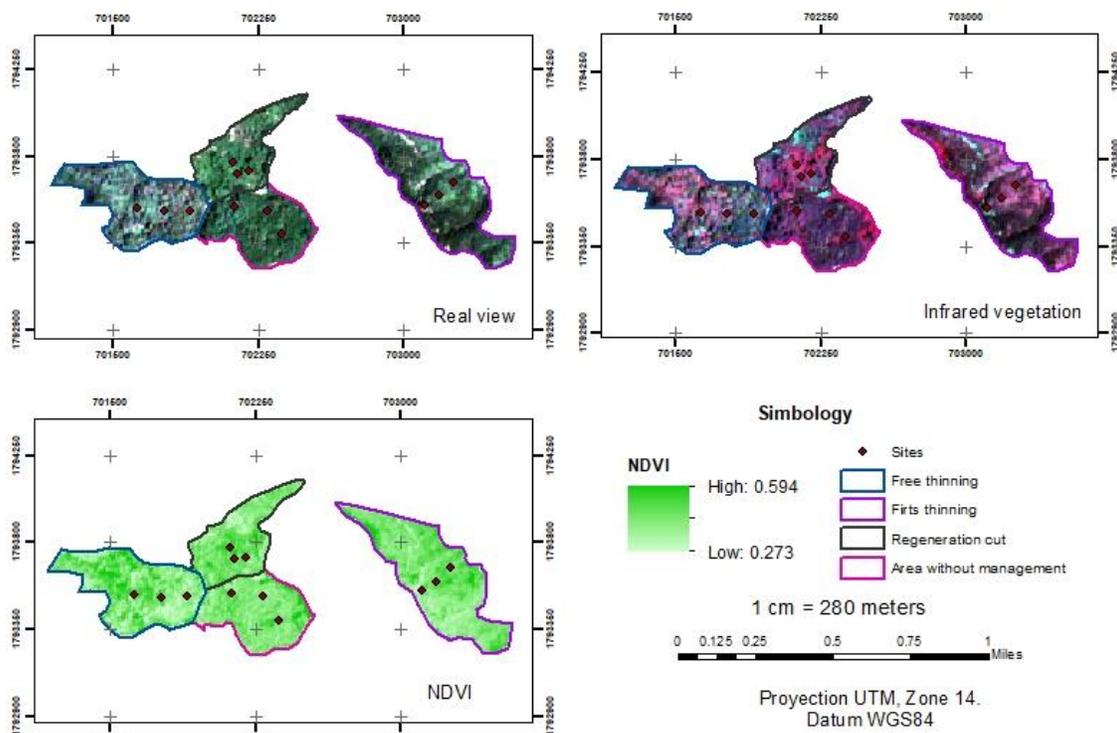


Figura 4.4 4 Expansión de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), visualización real y vegetación en infrarrojo, de los rodales bajo aprovechamiento.

4.4.5 Análisis de datos

En las variables de biomasa y C se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (prueba de Shapiro-Wilk y Bartlett respectivamente, $\alpha = 0.05$). Una vez obtenidos los valores de NDVI por píxel (10 m resolución), se determinó el valor promedio de NDVI por sitio de muestreo, esto utilizando una ventana de 3x3 píxeles circundantes al punto central. Para esto se realizó una validación a través de “estadísticos de ráster para puntos”. Se ajustaron modelos alométricos para estimar C y biomasa ($t \text{ píxel}^{-1}$ y $t \text{ ha}^{-1}$) en función del NDVI (Cuadro 4.5.1). Posteriormente con los modelos se llevó a cabo la expansión de biomasa y carbono por sitio, rodal y área de manejo, a través del valor de NDVI de cada píxel.

Los tratamientos silvícolas se diferenciaron mediante modelo lineal generalizado (PROC GLM) y prueba de medias Tukey ($\alpha=0.05$). Todos los análisis fueron realizados en el programa SAS (Statistical Analysis System) (Institute SAS, 2017).

4.5 Resultados

4.5.1 Ajuste de modelos para estimar biomasa y carbono

Los modelos lineales sin intercepto (β_0) fueron los que mejor se ajustaron para la estimación de la biomasa y C en función del NDVI, siendo altamente significativos ($p \leq 0.01$). El NDVI explica el 92.2 % y el 91.9 % de la variación existente en la biomasa y C. Los CV $\leq 32.2\%$ son moderados-altos, debido a la variación en densidad arbórea y cobertura entre los tratamientos silvícolas aplicados. La desviación estándar de los modelos es baja, esto indica que los valores de biomasa y C estimados están poco alejados de la tendencia de la media (Cuadro 2).

Cuadro 4.5.1. Ajuste de modelos con diferentes índices de vegetación para la estimación de biomasa y carbono

Modelo	Parámetro β_1	R ²	\sqrt{SME}	CV (%)
$B = \beta_1 \times NDVI$	3.05115971**	0.92	0.42**	30.2
$C = \beta_1 \times NDVI$	1.36719158**	0.92	0.19**	30.9
$B = \beta_1 \times GNDVI$	3.3303334**	0.92	0.42**	30.2
$C = \beta_1 \times GNDVI$	1.4923619**	0.92	0.19**	30.9
$B = \beta_1 \times EVI$	3.0480304**	0.91	0.44**	31.7

$C = \beta_1 \times EVI$	1.3648815**	0.91	0.20**	32.5
$B = \beta_1 \times SAVI$	4.0386605**	0.92	0.44**	31.4
$C = \beta_1 \times SAVI$	1.8087569**	0.91	0.20**	32.2
$B = \beta_1 \times AVI$	3.4448735**	0.92	0.42**	30.2
$C = \beta_1 \times AVI$	1.5436013**	0.92	0.19**	30.9

B=biomasa (t pixel⁻¹), C=carbono (t pixel⁻¹), pixel=100 m², β_1 =parámetro de regresión R²=coeficiente de determinación, SME=cuadrado medio del error, CV=coeficiente de variación, **altamente significativo, Índice de vegetación de diferencia normalizada, GNDVI= índice de vegetación de diferencia normalizada verde, EVI= índice de vegetación mejorado, SAVI= índice de vegetación ajustado al suelo, AVI= índice de vegetación avanzada.

Se validó el modelo a través de una prueba t-Student ($\alpha = 0.05$) comparando la biomasa y el C por rodal (t), estimados con datos de campo vs. estimados con datos espectrales; no se encontraron diferencias entre ambos tipos de datos ($p > 0.05$) (Figura 4.5.1 a y b). Por lo que los modelos son eficientes para predecir la biomasa y C a través del NDVI, ya que generan resultados confiables al estimar a gran escala (expansión).

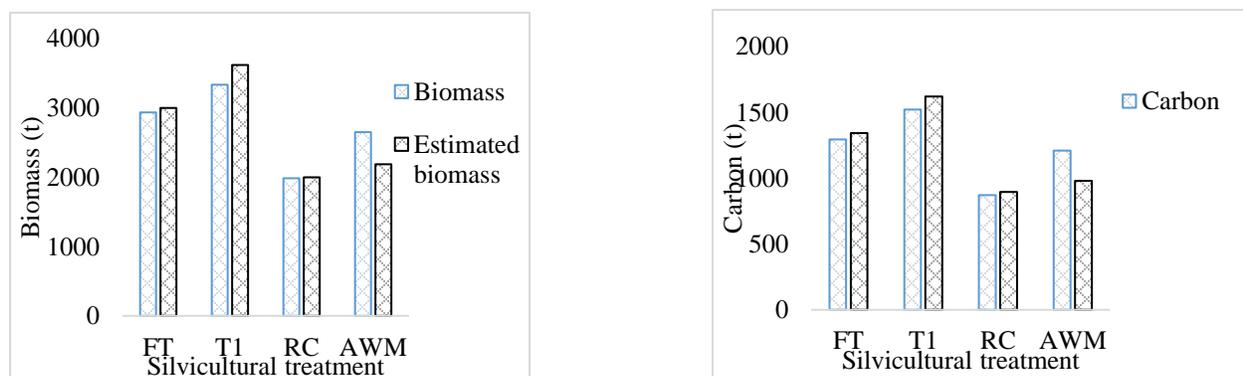


Figura 4.5.1 Biomasa (a) y carbono (b) por rodal, estimado con datos de campo vs. datos espectrales.

4.5.2 Expansión de biomasa y carbono

Los rodales bajo AL (21.4 ha) y 1A (26.4 ha) presentaron, en ambas variables, valores de expansión promedio similares de 140 t TB ha⁻¹ y 63 t C ha⁻¹ vs. 137 t TB ha⁻¹ y 61 t C ha⁻¹, de tal manera que los montos totales por rodal respectivo fueron de 1343 t C y 1620 t de C. Los valores mínimos y máximos entre las áreas bajo los dos tipos de aclareos muestran una similitud, debido a que la función de estos es disminuir la densidad cuando el arbolado está en fase latizal (Figura 4.5.2).

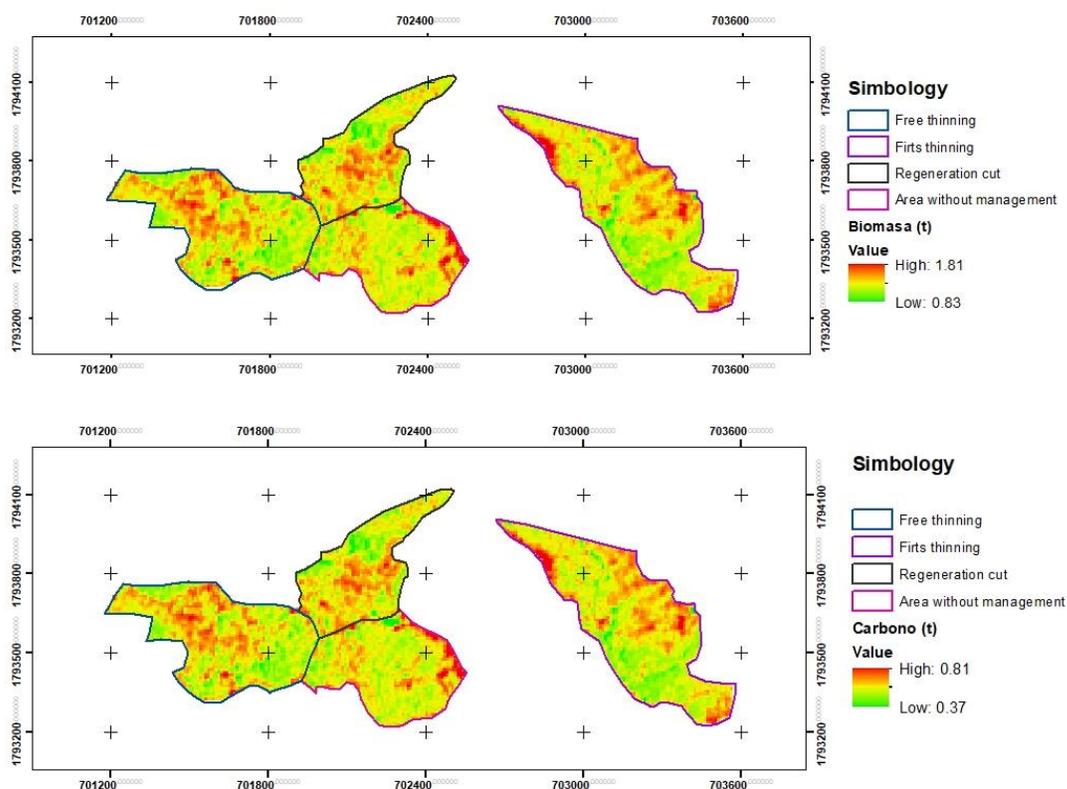


Figura 4.5.2. Expansión de biomasa arbórea y carbono en rodales bajo tratamientos.

El rodal bajo RC (14.4 ha) presentó 139 t TB ha⁻¹ y 62 t C ha⁻¹; con valores mínimos y máximos para C entre 41 y 81 t ha⁻¹, mostrando una buena acumulación de C, en

respuesta a la regeneración del tratamiento de árboles padres. El rodal sin manejo (17 ha) presentó un promedio de 129 t TB ha⁻¹ y 58 t C ha⁻¹, con rango de variación entre valores mínimos y máximos de 37 a 79 t C ha⁻¹. Los rodales sometidos bajo tratamientos silvícolas (FT, T1 y RC) presentaron el mismo valor máximo de acumulación de carbono (81 t ha⁻¹), siendo 2% mayor al AWM. (Figura 4.5.2).

El rodal con FT presentó 8.6 % más de carbono (t ha⁻¹) sobre el AWM; y densidades arbóreas de 1166 árboles ha⁻¹ vs 825 árboles ha⁻¹, respectivamente. Esta diferencia en carbono es debido a que los rodales con FT mantienen una estructura coetánea con DN, DC (diámetro de copa) y AT similares, mientras las AWM son altamente heterogéneas, presentando variación en su área.

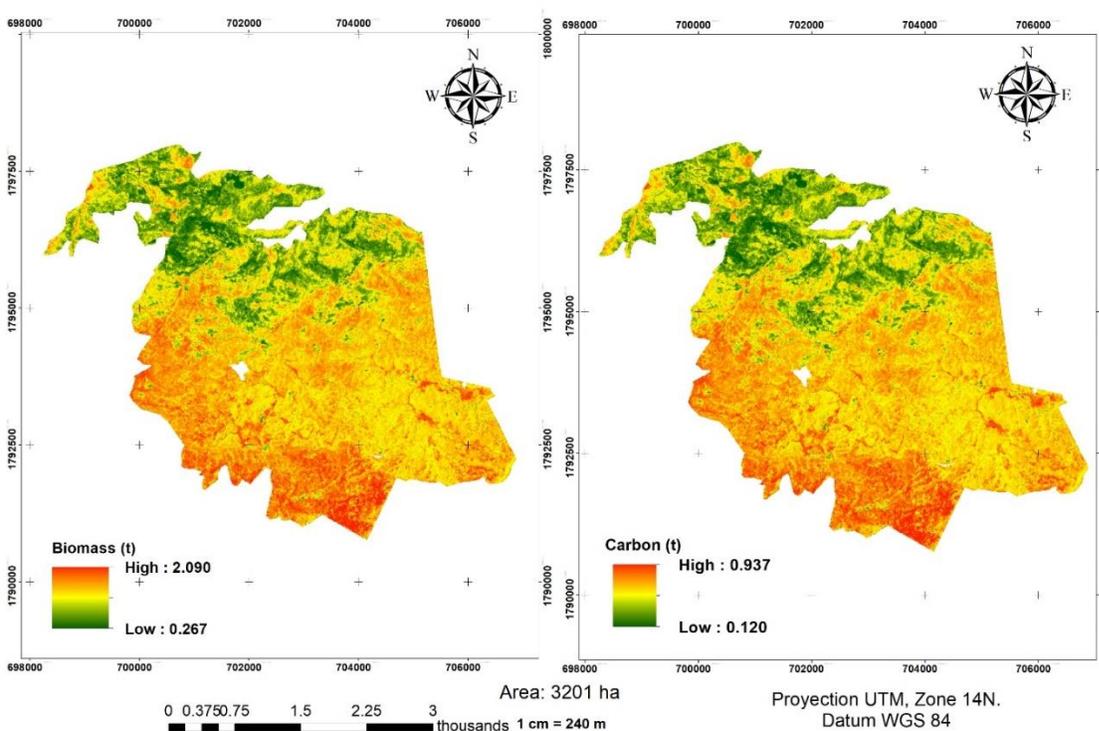


Figura 4.5 3. Expansión de biomasa y carbono arbóreo en el área bajo aprovechamiento de San Juan Lachao.

En el área bajo manejo de San Juan Lachao (3201 ha) se estimaron un total de 404,048.08 t B y 181,049.56 t C. Se estimó una acumulación promedio de 126 t TB ha⁻¹ y 57 t C ha⁻¹; con valores mínimos y máximos de 27 a 209 t TB ha⁻¹ y 12 a 94 t C ha⁻¹. Las áreas con altas acumulaciones de biomasa y C se observan de color rojo intenso, a diferencia de las verdes que son las que muestran la menor acumulación (Figura 4.5.3).

Todos los tratamientos silvícolas mostraron montos similares ($p > 0.05$) en biomasa y C por género (*Pinus* y *Quercus*), así como en los montos totales arbóreos (inferidos en muestreo de campo). Por otro lado, el C arbóreo estimado con el NDVI para los sitios (UM) en la imagen espectral fue mayor ($p \leq 0.01$) en la RC (66.6 t ha⁻¹) que en el AWM (57.9 t ha⁻¹) donde mostró mayor heterogeneidad; el mismo comportamiento se encontró para la biomasa arbórea (Cuadro 4.5.2). Esta diferencia es visible, debido que el AWM tiene una alta heterogeneidad, por lo que hacer una inferencia con datos de campo no es viable, a diferencia de realizar la expansión con la imagen satelital, la cual muestra más exactitud hacia la estructura de ese rodal irregular (Cuadro 3). Además, las áreas bajo manejo tienen una tendencia más homogénea con un dosel distribuido sistemáticamente, caso contrario para las ASM, en donde la heterogeneidad arroja hacia una estructura irregular.

Cuadro 4.5.2 Comparación de biomasa (B) y carbono (C) estimado en campo vs. estimado con *Sentinel 2*.

Variable (t ha ⁻¹)	Tratamiento silvícola			
	Aclareo libre	Primer aclareo	RC	AWM
B <i>Pinus</i> spp	65.9±13.9 ^a	98.0±7.4 ^a	112.8±29 ^a	98.6±32.0 ^a
B <i>Quercus</i> spp	70.9±19.0 ^a	28.2±10.6 ^a	24.8±5.8 ^a	57.7±22.5 ^a

B arbórea	136.8±25.4 ^a	126.2±16.5 ^a	137.5±28.6 ^a	156.3±28.4 ^a
B arbórea <i>Sentinel</i> 2 [†]	138.4±4.2 ^{ab}	135.8±3.2 ^{ab}	148.7±3.6 ^a	129.2±5.7 ^b
C <i>Pinus</i> spp	32.4±6.8 ^a	45.5±3.4 ^a	50.6±13.0 ^a	46.2±15.0 ^a
C <i>Quercus</i> spp	28.0±7.5 ^a	12.1±4.5 ^a	9.9±2.3 ^a	25.2±9.8 ^a
C arbóreo	60.4±11.0 ^a	57.6±7.3 ^a	60.4±12.8 ^a	71.4±13.2 ^a
C total <i>Sentinel</i> 2 [†]	62.0±1.9 ^{ab}	60.9±1.4 ^{ab}	66.6±1.6 ^a	57.9±2.5 ^b

RC=corta de regeneración (árboles padres), AWM= área sin manejo (conservación), † Valores obtenidos en función del índice de vegetación de diferencia normalizada. Los datos con letras distintas en filas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, 0.05). Media ± error estándar.

4.6 Discusión

4.6.1 Ajuste de modelos

Los rodales con tratamientos silvícolas (FT, T1, RC) muestran valores de biomasa y C similares, pero varían con el AWM, esto debido a la edad del rodal, el área de copa, tamaño de los árboles, factores edáficos y altitud (Rajput et al., 2017; Ruiz-Díaz et al., 2014). Las áreas con aclareos T1 y FT presentaron en promedio 138.5 t ha⁻¹ de biomasa y 62 t ha⁻¹ de carbono; el área con RC presentó 139 t TB ha⁻¹ y 62 t C ha⁻¹ (Figura 6). Con respecto a lo anterior Aguirre-Salado et al. (2009) reportan en rodales coetáneos de *P. patula* Schl. et Cham. bajo aprovechamiento una estimación con percepción remota de 55 t C ha⁻¹.

Los modelos mejor ajustados en este trabajo fueron “lineal simple” en función del índice de vegetación de diferencia normalizada (10 m pixel⁻¹) mostrando significancia ($p \leq 0.01$) y $R^2_{adj}=0.92$; con el cual la superficie total bajo aprovechamiento (3201 ha) mostró 126 t TB ha⁻¹ (valores de 27 a 209 t TB ha⁻¹) y 57 t C ha⁻¹ (valores de 12 a 94 t C ha⁻¹), lo que

muestra valores potenciales de biomasa y C (Figura 4.5.3). Thurner et al. (2014) ajustaron modelos lineales simples para estimar carbono ($R^2 = 0.70-0.90$) en bosques mixtos de América del Norte, Europa y Asia, donde encontraron en promedio 58 ± 22.1 t C ha⁻¹. Reyes-Cárdenas et al. (2019) estimó la biomasa forestal en el norte de México, ajustando un modelo exponencial en función del NDVI, encontrando valores menores (0.85 a 157 t ha⁻¹) a los de este estudio.

Elegir el mejor modelo depende del tipo de vegetación a evaluar y del tipo de satélite óptico a utilizar, así que depende del evaluador hacer la mejor elección; por ejemplo Aguirre-Salado et al. (2009) ajustaron un modelo de regresión múltiple usando como variables independientes el NDVI y el índice de estrés hídrico ($R^2=0.70$). D'Oliveira *et al.* (2020) estimaron la biomasa de 10 parcelas forestales en el suroeste de la Amazonía brasileña, ajustando modelos lineales múltiples en función de variables LiDAR, ($R^2 = 0.90$, RMSE = 13.23 t ha⁻¹) presentando valores de 11.1 a 273 t ha⁻¹. Por otro lado, Rex et al. (2020) estimaron la biomasa con imágenes LiDAR (229.10 t ha⁻¹) en bosques tropicales de tala de baja intensidad en Pará, Brasil, aunque en este caso utilizando regresión OLS y una selección de variables por medio de análisis de componentes principales ($R^2= 0.35 - R^2=0.53$), mostrando menor significancia del modelo.

Se validó el modelo a través de una prueba t-Student ($\alpha, 0.05$) comparando la biomasa y el C por rodal (t), estimados con datos de campo vs. estimados con datos espectrales, no presentando diferencias estadísticas ($p > 0.05$); correlacionar valores de campo con datos espectrales proporciona información eficaz y verídicos (Vaghela et al., 2021). Reyes-Cárdenas et al. (2016) correlacionaron información de campo con datos

espectrales y obtuvieron valores semejantes; Aguirre-Salado et al. (2012) ajustaron un modelo lineal para estimar biomasa aérea en función del NDVI y campos continuos de vegetación (VCF) ($R^2_{adj}=0.77$ CME= 26.00 t ha⁻¹), mostrando coeficientes de correlación de validación altos ($r = 0.87^{**}$); Miranda-Verly et al. (2023) estimaron el C del bosque atlántico, con imágenes de *Sentinel 2*, mostrando un alto coeficiente de correlación entre los promedios de carbono estimadas y observadas ($r=0.84$).

4.6.2 Expansión de biomasa y carbono

El AWM presentó valores de biomasa y C de 129 y 58 t ha⁻¹ (Figura 4.5.2), lo que indica que es preciso estimar con imágenes satelitales ya que brinda valores expandibles al área a estudiar. Perea-Ardila et al. (2021) encontraron valores parecidos de biomasa y C arbóreo en función del NDVI, en un bosque Alto-Andinos de Boyacá, Colombia, determinando 168.0 ± 11.2 t ha⁻¹ de biomasa aérea y 84.0 ± 5.61 t C ha⁻¹. De igual forma Clerici et al. (2016) reportan en parcelas de 400 m² en bosques andinos de Cundinamarca 180.7 ± 23.8 t ha⁻¹ de biomasa, y Yepes-Quintero et al. (2017) reportan en bosques de tierras altas de Antioquia contenidos de biomasa y C de 102.38 ± 25.22 t ha⁻¹ y 51.19 ± 12.61 t ha⁻¹ respectivamente. Por otro lado, Bhardwaj et al. (2016) reportan en bosques subtropicales del noroeste del Himalaya biomasa estimada con NDVI de 169.05 a 265.83 t ha⁻¹. Por lo anterior, las imágenes satelitales son una herramienta potencial para diferenciar áreas con manejo y sin manejo (Avogadro & Padró García, 2019).

Tras probar diversos índices de vegetación en este trabajo, el que mejor se ajustó (Cuadro 2) para estimar TB y C fue el NDVI (0.09-0.69), proporcionando valores positivos e indicando áreas con vegetación sana y vigorosa (Figura 3); y aunque en algunas áreas

los valores NDVI son bajos, los valores de TB y C son positivos; contrastando lo que menciona Aguirre-Salado *et al.* (2012), donde las estimaciones tienden a ser negativas cuando los píxeles tienen valores de NDVI bajos. El NDVI es un excelente indicador ya que no son solo las tres bandas del margen rojo las que aumentan la precisión, sino también la banda del infrarrojo cercano (Wang *et al.*, 2018). De esta forma se tiene una alta precisión en las estimaciones de C de áreas bajo aprovechamiento maderable; siempre y cuando se elija y siga la metodología de manera correcta (Yan *et al.*, 2016); además de que usar imágenes del satélite *Sentinel 2* en áreas de vegetación aumenta significativamente la precisión (Polat *et al.*, 2022).

A través de la teledetección es factible extraer información de la vegetación en bosques de pino-encino sin manejo, y hacer una clasificación de manera más fácil, que haciéndolo visualmente (Ancira-Sánchez & Treviño Garza, 2015; Polat *et al.*, 2022); aunque siempre se tienen que considerar factores como topografía, altitud, pendiente, precipitación y temperatura, como lo señalan (Olthoff *et al.*, 2016). Al conocer los contenidos de biomasa y C de un AWM de gran superficie, se puede clasificar en áreas más pequeñas y determinar un método de manejo y tratamientos silvícolas adecuados para aplicarlos a través de un plan de manejo (Agus *et al.*, 2004; Puletti *et al.*, 2018); además de promover los mecanismos de bonos de C (Herold *et al.*, 2011).

4.7 Conclusión

La estimación de biomasa arbórea y carbono con datos espectrales en un área sin manejo muestra un mayor grado de precisión, debido a que se basa en información del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de toda la superficie del rodal, a diferencia de estimaciones con datos de campo, en donde, solo se realizan inferencia, mostrando una menor precisión. Por lo que utilizar imágenes satélites para clasificar nuevas áreas de aprovechamiento es viable; además de poder brindar un monitoreo antes y después de su ciclo de corta, y poder colaborar en mecanismos de bonos de carbono, que benefician a la sociedad y son un soporte para las futuras generaciones.

4.8 Literatura citada

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Gómez-Villegas, R. G. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 529–543. <https://doi.org/10.29312/remexca.v2i4.1638>
- Aguirre-Salado, C. A., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Valdez-Lazalde, J. R., Miranda-Aragón, L., & Aguirre-Salado, A. I. (2012). Construction of aboveground biomass models with remote sensing technology in the intertropical zone in Mexico. *Journal of Geographical Sciences*, 22(4), 669–680. <https://doi.org/10.1007/s11442-012-0955-9>
- Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-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, 209–220.
- Agus, C., Karyanto, O., Kita, S., Haibara, K., Toda, H., Hardiwinoto, S., Supriyo, H., Na'iem, M., Wardana, W., Sipayung, M. S., & Wijoyo, S. (2004). Sustainable site productivity and

nutrient management in a short rotation plantation of *Gmelina arborea* in East Kalimantan, Indonesia. *New Forest*, 28, 277–285.

Amiri, M., & Pourghasemi, H. R. (2022). Mapping the NDVI and monitoring of its changes using Google Earth Engine and Sentinel-2 images. In *Computers in Earth and Environmental Sciences* (pp. 127–136). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89861-4.00044-0>

Ancira-Sánchez, L., & Treviño Garza, J. E. (2015). Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México. *Madera y Bosques*, 21(1), 77–91.

Avogadro, E. G., & Padró García, J. C. (2019). Diferenciación de plantaciones forestales en Entre Ríos (Argentina): Comparación de métodos de clasificación aplicados a imágenes Sentinel-2 y Landsat-8. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 24, 117–139. <https://doi.org/10.21138/qf.652>

Bhardwaj, D. R., Banday, M., Pala, N. A., & Rajput, B. S. (2016). Variation of biomass and carbon pool with NDVI and altitude in sub-tropical forests of northwestern Himalaya. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5626-3>

Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V. A., & Gómez-Cárdenas, M. (2017). Compartimentos de biomasa aérea en rodales de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera y Bosques*, 23(3), 147–161. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>

Chen, L., Ren, C., Zhang, B., Wang, Z., & Xi, Y. (2018). Estimation of forest above-ground biomass by geographically weighted regression and machine learning with sentinel imagery. *Forests*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/f9100582>

Chu, H., Venevsky, S., Wu, C., & Wang, M. (2019). NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of The Total Environment*, 650, 2051–2062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.115>

- Clerici, N., Rubiano, K., Abd-Elrahman, A., Posada Hoestettler, J., & Escobedo, F. (2016). Estimating Aboveground Biomass and Carbon Stocks in Periurban Andean Secondary Forests Using Very High Resolution Imagery. *Forests*, 7(7), 138–154. <https://doi.org/10.3390/f7070138>
- Cutini, A., Chianucci, F., & Manetti, M. C. (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 6(6), 331–335. <https://doi.org/10.3832/ifor0941-006>
- d'Oliveira, M., Broadbent, E., Oliveira, L., Almeida, D., Papa, D., Ferreira, M., Zambrano, A., Silva, C., Avino, F., Prata, G., Mello, R., Figueiredo, E., Jorge, L., Junior, L., Albuquerque, R., Brancalion, P., Wilkinson, B., & Oliveira-da-Costa, M. (2020). Aboveground biomass estimation in Amazonian tropical forests: a comparison of aircraft- and GatorEye UAV-borne LiDAR Data in the Chico Mendes extractive Reserve in Acre, Brazil. *Remote Sensing*, 12(11), 1754. <https://doi.org/10.3390/rs12111754>
- Dou, X., & Yang, Y. (2018). Estimating forest carbon fluxes using four different data-driven techniques based on long-term eddy covariance measurements: Model comparison and evaluation. *Science of the Total Environment*, 627, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.202>
- Drusch, M., del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical High-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- ESA. (2021). *Agencia Espacial Europea*.
- Fung Wong, M. M., Hung Fung, J. C., & Shing Yeung, P. P. (2019). High-resolution calculation of the urban vegetation fraction in the Pearl River Delta from the Sentinel-2 NDVI for urban climate model parameterization. *Geoscience Letters*, 6(2). <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0132-4>
- Herold, M., Román-Cuesta, R. M., Mollicone, D., Hirata, Y., van Laake, P., Asner, G. P., Souza, C., Skutsch, M., Avitabile, V., & MacDicken, K. (2011). Options for monitoring and

estimating historical carbon emissions from forest degradation in the context of REDD+. *Carbon Balance and Management*, 6(1), 13. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-6-13>

Hudait, M., & Patel, P. P. (2022). Crop-type mapping and acreage estimation in smallholding plots using Sentinel-2 images and machine learning algorithms: Some comparisons. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(1), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.01.004>

Institute SAS. (2017). *Base SAS 9.4 procedures guide: statistical procedures*.

Isbaex, C., & Coelho, A. M. (2021). The potential of Sentinel-2 satellite images for land-cover/land-use and forest biomass estimation: A review. In *Forest Biomass - From Trees to Energy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93363>

Joshi, R. K., & Dhyani, S. (2018). Biomass, carbon density and diversity of tree species in tropical dry deciduous forests in Central India. *Acta Ecologica Sinica*, 39(4), 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.09.009>

Main-Knorn, M., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Grodzki, W., Pflugmacher, D., Griffiths, P., & Hostert, P. (2013). Monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach. *Remote Sensing of Environment*, 139, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.010>

Miguel-Martínez, A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., & Santiago-García, W. (2016). Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1575–1584. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.151>

Miranda Verly, O., Vieira Leite, R., da Silva Tavares-Junior, I., José Silva Soares da Rocha, S., Garcia Leite, H., Marinaldo Gleriani, J., Paula Miranda Xavier Rufino, M., de Fatima Silva, V., Moreira Miquelino Eleto Torres, C., Plata-Rueda, A., Monteiro de Castro e Castro, B., Cola Zanuncio, J., & Antônio Gonçalves Javocine, L. (2023). Atlantic forest woody carbon stock estimation for different successional stages using Sentinel-2 data. *Ecological Indicators*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109870>

- Muhe, S., & Argaw, M. (2022). Estimation of above-ground biomass in tropical afro-montane forest using Sentinel-2 derived indices. *Environmental Systems Research*, 11(5). <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00250-y>
- NOM-021-RENAC. (2000, September 30). *Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Olthoff, A. E., Martínez Ruiz, C., & Alday, J. G. (2016). Distribution patterns of shrub vs. tree species along an Atlantic-Mediterranean environmental gradient: an approach from the third Spanish National Forest Inventory data. *Ecosistemas*, 25(3), 22–34. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.03>
- Pandit, S., Tsuyuki, S., & Dube, T. (2018). Estimating above-ground biomass in sub-tropical buffer zone community forests, Nepal, using Sentinel 2 data. *Remote Sensing*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/rs10040601>
- Perea-Ardila, M. A., Andrade-Castañeda, H. J., & Segura-Madriral, M. A. (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, 91–123. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.821>
- Pertille, C. T., Nicoletti, M. F., Topanotti, L. R., & Stepka, T. F. (2019). Biomass quantification of *Pinus taeda* L. from remote optical sensor data. *Advances in Forestry Science*, 6(2), 603–610. <https://doi.org/10.34062/afs.v6i2.7086>
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199693160.001.0001>
- Polat, A. B., Akcay, O., & Balik Sanli, F. (2022). Monitoring seasonal effects in vegetation areas with Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 optic satellite images. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(670). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09947-x>
- Puletti, N., Chianucci, F., & Castaldi, C. (2018). Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments. *Annals of Silvicultural Research*, 42(1), 32–38. <https://doi.org/10.12899/ASR-1463>

- Puliti, S., Breidenbach, J., Schumacher, J., Hauglin, M., Klingenberg, T. F., & Astrup, R. (2021). Above-ground biomass change estimation using national forest inventory data with Sentinel-2 and Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 265, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112644>
- Rajput, B. S., Bhardwaj, D. R., & Pala, N. A. (2017). Factors influencing biomass and carbon storage potential of different land use systems along an elevational gradient in temperate northwestern Himalaya. *Agroforestry Systems*, 91(3), 479–486. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9948-5>
- Rex, F. E., Silva, C. A., Dalla Corte, A. P., Klauberg, C., Mohan, M., Cardil, A., Silva, V. S. da, Almeida, D. R. A. de, Garcia, M., Broadbent, E. N., Valbuena, R., Stoddart, J., Merrick, T., & Hudak, A. T. (2020). Comparison of Statistical Modelling Approaches for Estimating Tropical Forest Aboveground Biomass Stock and Reporting Their Changes in Low-Intensity Logging Areas Using Multi-Temporal LiDAR Data. *Remote Sensing*, 12(9), 1498–2017. <https://doi.org/10.3390/rs12091498>
- Reyes-Cárdenas, O., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Cuéllar-Rodríguez, L. G., Flores-Garnica, J. G., & Cárdenas-Tristán, A. (2019). Modelización de biomasa forestal aérea mediante técnicas deterministas y estocásticas. *Madera Bosques*, 25(1), 1–10. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511622>
- Reyes-Cárdenas, O., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Cuéllar-Rodríguez, L. G., Flores-Garnica, J. G., Cárdenas-Tristán, A., & Buendía-Rodríguez, E. (2016). Dinámica de la biomasa aérea derivada de un programa de reforestación en San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(39), 45–57.
- Rodríguez-Ortíz, G., Aldrete, A., González-Hernández, V. A., de Los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011). ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? *Agrociencia*, 45(6), 719–732. <https://doi.org/14053195>
- Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J. Á., Leyva-López, J. C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-del Valle, J. R., & Santiago-García, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>

- Romahn de la Vega, C. F., & Ramírez, M. H. (2010). Dendrometría. *Universidad Autónoma de Chapingo. México, DF*, 312 p.
- Ruiz-Díaz, C., Rodríguez-Ortiz, G., Cristóbal Leyva-Lopez, J., Raymundo Enríquez-Del Valle, J., Raymundo, J., & Valle, E.-D. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1), 28–45.
- Servicios Técnicos Forestales [STF]. (2011). Programa de manejo forestal para el aprovechamiento y conservación. *San Juan Lachao, Oaxaca*.
- Turner, M., Beer, C., Santoro, M., Carvalhais, N., Wutzler, T., Schepaschenko, D., Shvidenko, A., Kompter, E., Ahrens, B., Levick, S. R., & Schmillius, C. (2014). Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests. *Global Ecology and Biogeography*, 23(3), 297–310. <https://doi.org/10.1111/geb.12125>
- Vaghela, B., Chirakkal, S., Putrevu, D., & Solanki, H. (2021). Modelling above ground biomass of Indian mangrove forest using dual-pol SAR data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100457>
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., de los Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., Treviño-Garza, E. J., Martínez-Salvador, M., & Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Sistema biométrico forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(3), 437–455. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>
- Vashum, K. T., & Jayakumar, S. (2012). Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests - a review. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 02(04). <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000116>
- Wang, B., Jia, K., Liang, S., Xie, X., Wei, X., Zhao, X., Yao, Y., & Zhang, X. (2018). Assessment of Sentinel-2 MSI spectral band reflectances for estimating fractional vegetation cover. *Remote Sensing*, 10(12), 1927. <https://doi.org/10.3390/rs10121927>
- Xing, X., Yan, C., Jia, Y., Jia, H., Lu, J., & Luo, G. (2020). An effective high spatiotemporal resolution ndvi fusion model based on histogram clustering. *Remote Sensing*, 12(22), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs12223774>

- Yan, E., Lin, H., Wang, G., & Sun, H. (2016). Multi-resolution mapping and accuracy assessment of forest carbon density by combining image and plot data from a nested and clustering sampling design. *Remote Sensing*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/rs8070571>
- Yepes-Quintero, A., Duque-Montoya, Á. J., Navarrete-Encinales, D., Phillips-Bernal, J., Cabrera-Montenegro, E., Corrales-Osorio, A., Álvarez-Dávila, E., Galindo-García, G., García-Dávila, M. C., Idárraga, Á., & Vargas-Galvis, D. (2017). Estimación de las reservas y pérdidas de carbono por deforestación en los bosques del departamento de Antioquia, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 33(95), 193–208. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi.14306>
- Yu, Z., Ciais, P., Piao, S., Houghton, R. A., Lu, C., Tian, H., Agathokleous, E., Kattel, G. R., Sitch, S., Goll, D., Yue, X., Walker, A., Friedlingstein, P., Jain, A. K., Liu, S., & Zhou, G. (2022). Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 13(5374). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32961-2>

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES

Los tratamientos silvícolas (TS) aplicados en los bosques comunales de San Juan Lachao no modifican la biomasa y carbono estructural, pero si cambian los patrones de acumulación en los compartimentos de vegetación secundaria y piso forestal. Por otro lado, no se encontraron diferencias ($p>0.05$) en la acumulación de carbono aéreo, entre el ASM (81.93 t ha^{-1}) y las áreas con TS (74.15 t ha^{-1}); sin embargo, el suelo del área bajo conservación presentó mayor contenido de carbono (6.7%) en la materia orgánica (MO =11.6%), esto debido a la conservación del mismo. Es por ello que al realizar aprovechamiento maderable se deben contemplar tratamientos complementarios de reincorporación de MO al suelo, llevando a cabo un balance nutrimental.

En el área bajo manejo de San Juan Lachao (3201 ha) se estimaron un total de 404,048.08 t de biomasa arbórea y 181,049.56 t C arbóreo; esto mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Esta información sirve como el principio de una línea base, para conocer el potencial de carbono que tiene la comunidad en cada uno de sus rodales con y sin manejo; y poder ingresar al Protocolo Mexicano de Bonos de Carbono. Con la finalidad de mejorar el manejo sustentable y ayudar a la mitigación del cambio climático, que afecta a la sociedad en general.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda la aplicación de tratamientos complementarios sobre las áreas bajo corta de regeneración, por ejemplo, acordonamiento de residuos sobre el piso forestal y reforestación. Esto con la finalidad de mejorar la calidad del sitio y mantener un balance nutrimental en los demás compartimentos.

Es necesario continuar con las interpretaciones del área bajo manejo, aplicando diversos métodos de detección remota, con el objetivo de conocer más a fondo cada rodal y así poder definir los tratamientos silvícolas adecuados y óptimos de acuerdo al área de interés.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Gómez-Villegas, R. G. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 529–543. <https://doi.org/10.29312/remexca.v2i4.1638>
- Aguirre-Calderón, O. A., & Jiménez-Pérez, J. (2011). Evaluación del contenido de carbono en bosques del Sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 74–84. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Aguirre-Salado, C. A., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., González-Tagle, M. A., Valdez-Lazalde, J. R., Miranda-Aragón, L., & Aguirre-Salado, A. I. (2012). Construction of aboveground biomass models with remote sensing technology in the intertropical zone in Mexico. *Journal of Geographical Sciences*, 22(4), 669–680. <https://doi.org/10.1007/s11442-012-0955-9>
- Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-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, 209–220.

- Agus, C., Karyanto, O., Kita, S., Haibara, K., Toda, H., Hardiwinoto, S., Supriyo, H., Na'iem, M., Wardana, W., Sipayung, M. S., & Wijoyo, S. (2004). Sustainable site productivity and nutrient management in a short rotation plantation of *Gmelina arborea* in East Kalimantan, Indonesia. *New Forest*, 28, 277–285.
- Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de las Salas, G., del Valle, I., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S., & Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267, 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>
- Álvarez, S., & Rubio, A. (2013). Línea base de carbono en bosque mixto de Pino-Encino de la sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO2FIX V.3.2. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 125–137. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.01.005>
- Amiri, M., & Pourghasemi, H. R. (2022). Mapping the NDVI and monitoring of its changes using Google Earth Engine and Sentinel-2 images. In *Computers in Earth and Environmental Sciences* (127–136). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89861-4.00044-0>
- Ancira-Sánchez, L., & Treviño Garza, J. E. (2015). Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México. *Madera y Bosques*, 21(1), 77–91.
- Avogadro, E. G., & Padró García, J. C. (2019). Comparación de métodos de clasificación aplicados a imágenes Sentinel-2 y Landsat-8, para la diferenciación de plantaciones forestales en entre Ríos, Argentina. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 24, 117–139. <https://doi.org/10.21138/GF.652>
- Barth, S. R., Giménez, A. M., Joseau, M. J., Gauchat, M. E., & Fassola, H. E. (2016). Compartimentalización de la biomasa aérea de *Grevillea robusta* A. en función a la densidad inicial de plantación. *Scientia Forestalis*, 44(111), 653–664. <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.11>
- Bhardwaj, D. R., Banday, M., Pala, N. A., & Rajput, B. S. (2016). Variation of biomass and carbon pool with NDVI and altitude in sub-tropical forests of northwestern Himalaya. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5626-3>
- Bravo, F., del Río, M., Bravo-Oviedo, A., Del Peso, C., & Montero, G. (2008). Forest management strategies and carbon sequestration. In *Gestión de ecosistemas*

forestales: el desafío del cambio climático. *Manejo de ecosistemas forestales*. 17, 179–194. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8343-3_11

Bravo, F., Herrero Celia, Ordóñez, C., Segur, M., Gómez, C., Menéndez, M., & Cámara, asunción. (2007). Cuantificación de la fijación de CO₂ en la biomasa arbórea de los sistemas forestales españoles. In *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático*: 12, 143–222. https://www.researchgate.net/publication/256403018_Cuantificacion_de_la_fijacion_de_CO2_en_la_biomasa_arborea_de_los_sistemas_forestales_espanoles

Bravo-Oviedo, A., del Rio, M., Montero, G., & Rubio-Cuadrado, Á. (2013). Sexto Congreso Forestal Español: Desfronde y tasa de descomposición foliar en rebollar-pinar de repoblación con distinto grado de clara. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*. <https://www.researchgate.net/publication/287890135>

Bray, D., Duran, E., & Molina-Gonzalez, O. A. (2012). Beyond harvests in the commons: multi-scale governance and turbulence in indigenous/community conserved areas in Oaxaca, Mexico. *International Journal of the Commons*, 6(2), 151–178. <https://doi.org/http://www.thecommonsjournal.org>

Bueis, T., Bravo, F., Pando, V., & Turrión, M. B. (2017). Influencia de la densidad del arbolado sobre el desfronde y su reciclado en pinares de repoblación del norte de España. *Bosque*, 38(2), 401–407. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200017>

Castelán-Lorenzo, M., & Arteaga-Martínez, B. (2009). Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en cortas bajo el método de árboles padres. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 15(1), 49–57. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62916073005>

Chávez-Aguilar, G., Ángeles-Pérez, G., Pérez-Suárez, M., López-López, M. Á., García-Moya, E., & Wayson, C. (2016). Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 22(3), 23–36. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231454>

Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Enríquez-del Valle, J. R., Chávez-Servia, J. L., & Campos-Ángeles, G. V. (2018). Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 1273–1284. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i6.1290>

Chávez-Pascual, E. Y., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-Del Valle, J. R., Velasco-Velasco, V. A., & Gómez-Cárdenas, M. (2017). Compartimentos de biomasa aérea en rodales

- de *Pinus oaxacana* bajo tratamientos silvícolas. *Madera Bosques*, 23(3), 147–161. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331627>
- Chen, L., Ren, C., Zhang, B., Wang, Z., & Xi, Y. (2018). Estimation of forest above-ground biomass by geographically weighted regression and machine learning with sentinel imagery. *Forests*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/f9100582>
- Chu, H., Venevsky, S., Wu, C., & Wang, M. (2019). NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 650(2), 2051–2062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.115>
- Clerici, N., Rubiano, K., Abd-Elrahman, A., Posada Hoestettler, J., & Escobedo, F. (2016). Estimating Aboveground Biomass and Carbon Stocks in Periurban Andean Secondary Forests Using Very High Resolution Imagery. *Forests*, 7(7), 138–154. <https://doi.org/10.3390/f7070138>
- Conen, F., Zerva, A., Arrouays, D., Jolivet, C., Jarvis, P. G., Grace, J., & Mencuccini, M. (2005). The carbon balance of forest soils: detectability of changes in soil carbon stocks in temperate and Boreal forests. *SEB Experimental Biology Series*, 9, 235–249.
- Cortés-Pérez, M., De León-González, F., Paz-Pellat, F., Leyva-Pablo, T., Santiago-García, W., Ponce-Mendoza, A., & Fuentes-Ponce, M. (2021). Almacenamiento de carbono aéreo en un bosque templado de Oaxaca: manejo de alta y baja intensidad. *Madera y Bosques*, 27(4). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742440>
- Cutini, A., Chianucci, F., & Manetti, M. C. (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 6(1), 331–335. <https://doi.org/10.3832/ifor0941-006>
- Delgado, L. A., Acevedo, M. F., Castellanos, H., Ramírez, I., & Serrano, J. (2005). Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de árboles de la reserva forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia*, 30(5), 275–283. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33910406>
- Denne, M. P., & Hale, M. D. (1999). Cell wall and lumen percentages in relation to wood density of *Nothofagus nervosa*. *IAWA Journal*, 20(1), 23–36. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001544>
- d'Oliveira, M., Broadbent, E., Oliveira, L., Almeida, D., Papa, D., Ferreira, M., Zambrano, A., Silva, C., Avino, F., Prata, G., Mello, R., Figueiredo, E., Jorge, L., Junior, L., Albuquerque, R., Brancalion, P., Wilkinson, B., & Oliveira-da-Costa, M. (2020).

- Aboveground biomass estimation in Amazonian tropical forests: a comparison of aircraft- and GatorEye UAV-borne LiDAR Data in the Chico Mendes extractive Reserve in Acre, Brazil. *Remote Sensing*, 12(11), 1754. <https://doi.org/10.3390/rs12111754>
- Dou, X., & Yang, Y. (2018). Estimating forest carbon fluxes using four different data-driven techniques based on long-term eddy covariance measurements: Model comparison and evaluation. *Science of the Total Environment*, 627, 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.202>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical High-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Durán, E., Bray, D. B., Velázquez, A., & Larrazábal, A. (2011). Multi-scale forest governance, deforestation, and violence in two regions of Guerrero, Mexico. *World Development*, 39(4), 611–619. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.08.018>
- Eamus, D., McGuinness, K., & Burrows, W. (2000). Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the Northern Territory and Western Australia. *National Carbon Accounting System. Australia*. <http://www.greenhouse.gov.au/ncas>
- Ekoungoulou, R., Liu, X., Loumeto, J. J., & Ifo, S. A. (2014). Tree above-and below-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in secondary forest of Congo. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(4), 09–20. <https://doi.org/10.9790/2402-08420920>
- ESA. (2021). *Agencia Espacial Europea*.
- Espinoza-Zúñiga, P., Leos-Rodríguez, J. A., Rodríguez-Ortiz, G., Montiel-Batalla, B. M., & Valdivia-Alcalá, R. (2023). Carbono estructural y compartimentos en bosques certificados por el Forest Stewardship Council, en Oaxaca, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1). <https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3474>
- Figuroa-Navarro, C. M., Ángeles-Pérez, G., Velázquez-Martínez, A., & de los Santos-Posadas, H. M. (2010). Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 105–112. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322010000100012

- Fonseca, W. G., Alice, F. G., & José, M. R. B. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *BOSQUE*, 30(1), 36–47.
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. maría, Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34, 1–29. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100001
- Galicia, L., Saynes, V., & Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences*, 93(3), 433–457. <https://doi.org/10.17129/botsci.66>
- Ganamé, M., Bayen, P., Ouédraogo, I., Balima, L. H., & Thiombiano, A. (2021). Allometric models for improving aboveground biomass estimates in West African savanna ecosystems. *Trees, Forests and People*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100077>
- García-Aguilar, J. Á., Rodríguez-Ortiz, G., & Martínez-de la Cruz, J. (2015). Influencia de variables fisiográficas en la productividad de biomasa aérea en bosques mixtos. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 2(2), 87–98. <https://doi.org/20079559>
- Gómez-Díaz, J. D., Monterroso-Rivas, A. I., Tinoco-Rueda, J. A., & Etchevers-Barra, J. D. (2012). Almacenes de carbono en el piso forestal de dos tipos de bosque. *Terra Latinoamericana*, 30(2), 177–187. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v30n2/2395-8030-tl-30-02-00177.pdf>
- Gracia, C., Gil, L., & Montero, G. (2005). Impactos sobre el sector forestal. In *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático* (pp. 399–436).
- Hernández, F. J., Deras-Ávila, A. G., Deras-Ávila, N. I., & Colín, J. G. (2019). Influence of the seed tree method on the diversity of regeneration in a mixed forest in Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 25(2), 219–234. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.09.066>
- Hernández Salas, J. (2014). *Ordenación forestal: Regulación, manejo y salud forestal*.
- Herold, M., Román-Cuesta, R. M., Mollicone, D., Hirata, Y., Van Laake, P., Asner, G. P., Souza, C., Skutsch, M., Avitabile, V., & MacDicken, K. (2011). Options for monitoring and estimating historical carbon emissions from forest degradation in the context of REDD+. *Carbon Balance and Management*, 6(1), 13. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-6-13>

- Hudait, M., & Patel, P. P. (2022). Crop-type mapping and acreage estimation in smallholding plots using Sentinel-2 images and machine learning algorithms: Some comparisons. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(1), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.01.004>
- Institute SAS. (2017). *Base SAS 9.4 procedures guide: statistical procedures*.
- Isbaex, C., & Coelho, A. M. (2021). The potential of Sentinel-2 satellite images for land-cover/land-use and forest biomass estimation: A review. In *Forest Biomass - From Trees to Energy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93363>
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D. W., Minkinen, K., & Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? In *Geoderma* (Vol. 137, Issues 3–4, pp. 253–268). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>
- Joshi, R. K., & Dhyani, S. (2018). Biomass, carbon density and diversity of tree species in tropical dry deciduous forests in Central India. *Acta Ecologica Sinica*, 39(4), 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2018.09.009>
- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau, Y., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1–3), 199–209. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00460-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00460-6)
- Khumbongmayum, D. A., Tripathi, R. S., & mKhan, M. L. (2005). Survival and growth of seedlings of a few tree species in the four sacred groves of Manipur, Northeast India. *Current Science*, 88(11), 1780–1788. <https://www.researchgate.net/publication/236628069>
- Liang, S., & Wang, J. (2020). *Advanced Remote Sensing: Extracción de información terrestre y aplicaciones* (Academic Press). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03489-4>
- López Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Monarrez-Gonzalez, J. C., González-Tagle, M. A., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 39–59. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311518>
- López-Hernández, J. M., González-Rodríguez, H., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Estrada-Castillón, A. E., Contreras-Guajardo, N. L., & Del Valle-Arango, J. I. (2022). Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en diferentes comunidades vegetales del Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.2891>

- Main-Knorn, M., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Grodzki, W., Pflugmacher, D., Griffiths, P., & Hostert, P. (2013). Monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach. *Remote Sensing of Environment*, 139, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.010>
- Martiarena, R. A., Alcides Pinazo, M., Wallis Von, A., Knebel, O., & Pahr, N. M. (2011). Alternativas de manejo silvícola para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. *Ciencia de Suelo (Argentina)*, 29(1), 39–48
- Miguel-Martínez, A., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., & Santiago-García, W. (2016). Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus ayacahuite* del norte de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1575–1584. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.151>
- Miranda-Verly, O., Vieira-Leite, R., Tavares-Junior, I. da S., Silva-Soares da Rocha, S. J., Garcia-Leite, H., Marinaldo-Gleriani, J., Xavier-Rufino, M. P. M., de Fatima-Silva, V., Eleto-Torres, C. M. M., Plata-Rueda, A., Monteiro de Castro e Castro, B., Cola-Zanuncio, J., & Antônio Gonçalves Javocine, L. (2023). Atlantic forest woody carbon stock estimation for different successional stages using Sentinel-2 data. *Ecological Indicators*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109870>
- Muhe, S., & Argaw, M. (2022). Estimation of above-ground biomass in tropical afro-montane forest using Sentinel-2 derived indices. *Environmental Systems Research*, 11(5). <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00250-y>
- Návar, J. (2009). Biomass component equations for Latin American species and groups of species. *Annals of Forest Science*, 66(2), 208–216. <https://doi.org/10.1051/forest/2009001>
- NOM-021-RENAC. (2000, September 30). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Nom-152-Semarnat. (2006). *Norma Oficial Mexicana*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5064731&fecha=17/10/2008#gsc.tab=0
- Olthoff, A. E., Martínez Ruiz, C., & Alday, J. G. (2016). Distribution patterns of shrub vs. tree species along an Atlantic-Mediterranean environmental gradient: an approach from the third Spanish National Forest Inventory data. *Ecosistemas*, 25(3), 22–34. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.03>
- Pacheco-Aquino, G., Durán Medina, E., & Ordóñez-Díaz, J. A. B. (2018). Estimación del carbono arbóreo en el área de manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.

Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 6(29), 126–145.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i29.221>

- Pallavacini, Y. (2010). Factores que influyen en la acumulación de biomasa de herbáceas durante la sucesión en minas de carbón. *Ecosistemas*, 19(3), 78–82.
<https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/376>
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993.
<https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pandit, S., Tsuyuki, S., & Dube, T. (2018). Estimating above-ground biomass in sub-tropical buffer zone community forests, Nepal, using Sentinel 2 data. *Remote Sensing*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/rs10040601>
- Parker, W. C., Pitt, D. G., & Morneau, A. E. (2012). Influence of herbaceous and woody vegetation control on seedling microclimate, leaf gas exchange, water status, and nutrient relations of *Pinus strobus* L. seedlings planted in a shelterwood. *Forest Ecology and Management*, 271, 104–114.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.042>
- Paudel, E., Dossa, G. G. O., Xu, J., & Harrison, R. D. (2015). Litterfall and nutrient return along a disturbance gradient in a tropical montane forest. *Forest Ecology and Management*, 353, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.05.028>
- Pensado-Fernández, J. A., Sánchez-Velásquez, L. R., Pineda-López, M. del R., & Díaz-Fleischer, F. (2014). Los aclareos facilitan la regeneración natural. Pensado-Fernandez 2014. *Botanical Sciences*, 92(4), 617–622.
<https://doi.org/10.17129/botsci.109>
- Perea-Ardila, M. A., Andrade-Castañeda, H. J., & Segura-Madrigal, M. A. (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, 91–123. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.821>
- Pérez-López, R. I., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., & Toledo-Aceves, T. (2020). Efectos del “Método de Desarrollo Silvícola” sobre la diversidad arbórea en bosques húmedos de montaña del norte de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91(0), 1–13. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3326>

- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(1), 157–173. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>
- Pérez-Rodríguez, F., Vargas-Larreta, B., Aguirre-Calderón, O. A., Corral-Rivas, J. J., & Rojo-Alboreca, A. (2013). Proceso analítico jerárquico para seleccionar métodos de manejo forestal en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(15), 55–72.
- Pertille, C. T., Nicoletti, M. F., Topanotti, L. R., & Stepka, T. F. (2019). Biomass quantification of *Pinus taeda* L. from remote optical sensor data. *Advances in Forestry Science*, 6(2), 603–610. <https://doi.org/10.34062/afs.v6i2.7086>
- Pettorelli, N. (2013). *The Normalized Difference Vegetation Index*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:osobl/9780199693160.001.0001>
- Polat, A. B., Akcay, O., & Balik Sanli, F. (2022). Monitoring seasonal effects in vegetation areas with Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 optic satellite images. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09947-x>
- Puletti, N., Chianucci, F., & Castaldi, C. (2018). Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments. *Annals of Silvicultural Research*, 42(1), 32–38. <https://doi.org/10.12899/ASR-1463>
- Puliti, S., Breidenbach, J., Schumacher, J., Hauglin, M., Klingenberg, T. F., & Astrup, R. (2021). Above-ground biomass change estimation using national forest inventory data with Sentinel-2 and Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 265, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112644>
- Rajput, B. S., Bhardwaj, D. R., & Pala, N. A. (2017). Factors influencing biomass and carbon storage potential of different land use systems along an elevational gradient in temperate northwestern Himalaya. *Agroforestry Systems*, 91(3), 479–486. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9948-5>
- Rex, F. E., Silva, C. A., Dalla Corte, A. P., Klauberg, C., Mohan, M., Cardil, A., Silva, V. S. da, Almeida, D. R. A. de, Garcia, M., Broadbent, E. N., Valbuena, R., Stoddart, J., Merrick, T., & Hudak, A. T. (2020). Comparison of Statistical Modelling Approaches for Estimating Tropical Forest Aboveground Biomass Stock and Reporting Their Changes in Low-Intensity Logging Areas Using Multi-Temporal LiDAR Data. *Remote Sensing*, 12(9), 1498–2017. <https://doi.org/10.3390/rs12091498>

- Reyes-Cárdenas, O., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Cuéllar-Rodríguez, L. G., Flores-Garnica, J. G., & Cárdenas-Tristán, A. (2019). Modelización de biomasa forestal aérea mediante técnicas deterministas y estocásticas. *Madera y Bosques*, 25(1), 1–10. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511622>
- Reyes-Cárdenas, O., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., Cuéllar-Rodríguez, L. G., Flores-Garnica, J. G., Cárdenas-Tristán, A., & Buendía-Rodríguez, E. (2016). Dinámica de la biomasa aérea derivada de un programa de reforestación en San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(39), 45–57.
- Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M., & Campos Saldaña, R. A. (2016). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 77–94.
- Rodríguez-Ortiz, G., Aldrete, A., González-Hernández, V. A., De Los Santos-Posadas, H. M., Gómez-Guerrero, A., & Fierros-González, A. M. (2011). ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? *Agrociencia*, 45(6), 719–732. <https://doi.org/14053195>
- Rodríguez-Ortiz, G., García-Aguilar, J. Á., Leyva-López, J. C., Ruiz-Díaz, C., Enríquez-del Valle, J. R., & Santiago-García, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Romahn de la Vega, C. F., & Ramírez, M. H. (2010). Dendrometría. *Universidad Autónoma de Chapingo. México, DF*, 312 p. <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>
- Ruiz-Díaz, C., Rodríguez-Ortiz, G., Cristóbal Leyva-Lopez, J., Raymundo Enríquez-Del Valle, J., Raymundo, J., & Valle, E.-D. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1), 28–45.
- Ruiz-Peinado, R., Bravo-Oviedo, A., Montero, G., & del Río, M. (2014). 'Carbon stocks in a Scots pine afforestation under different thinning intensities management.' *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(7), 1059–1072. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9585-0>
- Santala, K., Aubin, I., Hoepfing, M., Bachand, M., & Pitt, D. (2019). Managing conservation values and tree performance: Lessons learned from 10 year experiments in

- regenerating eastern white pine (*Pinus strobus* L.). *Forest Ecology and Management*, 432, 748–760. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.038>
- Schlesinger, W. H., & Andrews, J. A. (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48(1), 7–20.
- Schulp, C. J. E., Nabuurs, G. J., Verburg, P. H., & de Waal, R. W. (2008). Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. *Forest Ecology and Management*, 256(3), 482–490. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.05.007>
- Servicios Técnicos Forestales [STF]. (2011). Programa de manejo forestal para el aprovechamiento y conservación. *San Juan Lachao, Oaxaca*.
- Siles, P., Talavera, P., Rugama, F. A., Alaniz, L., & Ortiz González, W. (2017). Composición florística, estructura y biomasa de los bosques de pino-encino en la reserva Santa Rosa, Tisey, Estelí, Nicaragua. *Revista Biología Tropical*, 65(2), 763–775.
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S. J., Gregorich, E. G., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1981–1987. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1981>
- Soriano-Luna, M. de los Á., Ángeles-Pérez, G., Martínez-Trinidad, T., Plascencia-Escalante, F. O., & Razo-Zárte, R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423–438. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000400006
- Turner, M., Beer, C., Santoro, M., Carvalhais, N., Wutzler, T., Schepaschenko, D., Shvidenko, A., Komptter, E., Ahrens, B., Levick, S. R., & Schmillius, C. (2014). Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests. *Global Ecology and Biogeography*, 23(3), 297–310. <https://doi.org/10.1111/geb.12125>
- Vaghela, B., Chirakkal, S., Putrevu, D., & Solanki, H. (2021). Modelling above ground biomass of Indian mangrove forest using dual-pol SAR data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100457>
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., De los Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., Treviño-Garza, E. J., Martínez-Salvador, M., & Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Sistema biométrico forestal

- para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(3), 437–455. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>
- Vashum, K. T., & Jayakumar, S. (2012). Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests - a review. *Journal of Ecosystem & Ecography*, 02(04). <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000116>
- Vásquez-Fabián, S. A., Rodríguez-Ortiz, G., Raymundo Enríquez-del Valle, J., Virginia Campos-Angeles, G., & Santana-Flores, A. (2017). Volumen y biomasa aérea de *Pinus pseudostrobus* y *P. teocote* del sur de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 4(2), 164–172. https://rmae.voaxaca.tecnm.mx/wp-content/uploads/2020/11/7-RMAE_2017-15-Biomasa-To-edit.pdf
- Vela Blanco, G., López Blanco, J., & Rodríguez Gamiño, M. D. L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 77(77), 18. <https://doi.org/10.14350/riq.31007>
- Vesterdal, L., Schmidt, I. K., Callesen, I., Nilsson, L. O., & Gundersen, P. (2008). Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecology and Management*, 255(1), 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.08.015>
- Wagner, R. G., Little, K. M., Richardson, B., & Mcnabb, K. (2006). The role of vegetation management for enhancing productivity of the world's forests. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 79(1), 57–79. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi057>
- Wang, B., Jia, K., Liang, S., Xie, X., Wei, X., Zhao, X., Yao, Y., & Zhang, X. (2018). Assessment of Sentinel-2 MSI spectral band reflectances for estimating fractional vegetation cover. *Remote Sensing*, 10(12), 1927. <https://doi.org/10.3390/rs10121927>
- Wong, M. M. F., Fung, J. C. H., & Yeung, P. P. S. (2019). High-resolution calculation of the urban vegetation fraction in the Pearl River Delta from the Sentinel-2 NDVI for urban climate model parameterization. *Geoscience Letters*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0132-4>
- Xing, X., Yan, C., Jia, Y., Jia, H., Lu, J., & Luo, G. (2020). An effective high spatiotemporal resolution ndvi fusion model based on histogram clustering. *Remote Sensing*, 12(22), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs12223774>
- Yan, E., Lin, H., Wang, G., & Sun, H. (2016). Multi-resolution mapping and accuracy assessment of forest carbon density by combining image and plot data from a nested

and clustering sampling design. *Remote Sensing*, 8(7).
<https://doi.org/10.3390/rs8070571>

Yepes-Quintero, A., Duque-Montoya, Á. J., Navarrete-Encinales, D., Phillips-Bernal, J., Cabrera-Montenegro, E., Corrales-Osorio, A., Álvarez-Dávila, E., Galindo-García, G., García-Dávila, M. C., Idárraga, Á., & Vargas-Galvis, D. (2017). Estimación de las reservas y pérdidas de carbono por deforestación en los bosques del departamento de Antioquia, Colombia. *Actualidades Biológicas*, 33(95), 193–208.
<https://doi.org/10.17533/udea.acbi.14306>

Yu, Z., Ciais, P., Piao, S., Houghton, R. A., Lu, C., Tian, H., Agathokleous, E., Kattel, G. R., Sitch, S., Goll, D., Yue, X., Walker, A., Friedlingstein, P., Jain, A. K., Liu, S., & Zhou, G. (2022). Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 13(5374). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32961-2>

Zhu, X., & Liu, D. (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014>

Zianis, D., & Mencuccini, M. (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187(2–3), 311–332.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007>