



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
CAMPUS V**



**Almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales de
coníferas-latifoliadas post-quema prescrita en la región Frailesca,
Chiapas**

TESIS

**Que para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA
TROPICAL**

Presenta

SUSANA DEL CARMEN LÓPEZ CRUZ L120060

Director de tesis

DEB RAJ ARYAL

VILLAFLORES, CHIAPAS, MÉXICO

FEBRERO, 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS, CAMPUS V.
DIRECCIÓN



Villaflores, Chiapas
21 de febrero de 2022
Oficio N° D/0150/22

C. SUSANA DEL CARMEN LÓPEZ CRUZ
MAESTRANTE EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS CAMPUS V
P R E S E N T E.

En atención a que usted ha presentado los votos aprobatorios del Honorable Jurado designado para su evaluación de posgrado, de la tesis titulada: **“Almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales de coníferas-latifoliadas post-quema prescrita en la región Frailesca, Chiapas”**, por este conducto le comunico que se le autoriza la impresión del documento, de acuerdo a los lineamientos vigentes de la Universidad.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE
FACULTAD DE
“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”



M. C. CARLOS ALBERTO VELÁZQUEZ SANABRIA
ENCARGADO DE LA DIRECCIÓN

C. c. p. Archivo

CAVS*marh.



Código: FO-113-09-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Susana del Carmen López Cruz
Autor (a) de la tesis bajo el título de "Almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales de coníferas-latifoliadas post-quema prescrita en la región Frailesca, Chiapas"
presentada y aprobada en el año 20 22 como requisito para obtener el título o grado de MAESTRA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL, autorizo a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 03 días del mes de marzo del año 2022.

Susana del Carmen López Cruz

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme vivir el día a día, por poner esas personas en el camino que me apoyaron en este tiempo.

Al Dr. Deb Raj Aryal por los consejos, enseñanzas, paciencia, por siempre tener palabras de apoyo y por enseñarme que el valor de la familia es fundamental en esta formación.

A mis revisores Dr. Francisco Guevara Hernández y MC. Carlos Alberto Velázquez Sanabria por todas las enseñanzas, por todas las críticas constructivas, todas fueron de gran ayuda.

Gracias a la Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical (MCPAT) y a la Facultad de Ciencias Agronómicas (FCA) de la UNACH por permitirme realizar mis estudios de posgrado y a todos los profesores que marcaron parte importante en mi formación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca para estudiar la maestría.

Al Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI) del Gobierno del estado de Chiapas por el recurso económico otorgado.

A Alonso, Karla, Juan Carlos Castro, BIOMASA A. C. y todas las personas que fueron parte de mi equipo de trabajo tanto en mis inventarios forestales como laboratorio, mil gracias, fue un trabajo exhausto que sin su ayuda hubiese sido muy difícil.

A mis compañeras de generación Anahí, Paulina, Ceci, Esmeralda, Dalia, fue grato conocerlas y pasar tiempo bonito con ustedes.

A mi familia, por confiar en mí en esta etapa y darme ánimos para seguir adelante.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.1.1 Objetivos específicos.....	2
1.2 Hipótesis.....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Carbono.....	3
2.2 Dióxido de carbono (CO ₂)	3
2.3 Reservorios de carbono.....	4
2.4 Cambio climático	5
2.5 Importancia de los ecosistemas forestales.....	5
2.6 Incendios forestales.....	6
2.6.7 Incendios registrados en México	7
2.8 Quemas prescritas.....	8
2.8.1 El uso del fuego controlado y su relación con los ecosistemas.....	9
2.9 Modelos de recuperación de carbono forestal	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1 Localización del área de estudio.....	11
3.2. Método de muestreo	12
3.2.2 Cuantificación de carbono almacenado	12
3.3 Variables a evaluar	13
3.3.1 Biomasa aérea	13
3.3.2 Hojarasca y mantillo	16
3.3.4 Suelo	18
3.3.5 Índices de biodiversidad y la estructura de la vegetación en la sucesión posterior a la quema.....	19
3.5 Índices de valor de importancia (IVI).....	19
3.6 Índices de similitud	20

3.7 Modelo multivariado.....	20
3.8 Análisis de datos.....	21
4. RESULTADOS	22
4.1 Altura, diámetro de copa y área basal.....	22
4.2 Biomasa aérea y biomasa de raíces	22
4.3 Hojarasca, mantillo y material leñoso caído	23
4.4 Carbono almacenado en suelo	24
4.4.1 Carbono almacenado en los diferentes sitios	24
4.4.2 Carbono almacenado en tres diferentes profundidades de suelo	25
4.5 Densidad aparente	25
4.6 Potencial de hidrógeno (pH)	26
4.7 Potencial de reducción-oxidación (Eh).....	27
4.8 Índice de Shannon	28
4.9 Índice de Simpson	29
4.10 Índice de valor de importancia	29
4.11 Índices de similitud entre sitios	30
4.12 Correlación de variables	31
4.13 Modelo matemático	31
5. DISCUSIÓN	35
5.1 Estructura	35
5.2 Almacenamiento de carbono en biomasa total	36
5.3 Materia muerta	37
5.4 Suelo	38
5.5 Índices de Shannon y Simpson.....	38
5.6 Índice de valor de importancia	39
5.7 Índice de similitud de Jaccard y Sorensen	39
6. CONCLUSIONES.....	41
7. BIBLIOGRAFÍA CITADA	42
8. ANEXOS	52

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas para obtener biomasa aérea de dos especies.	14
Cuadro 2. Clasificación para la toma de datos de Material Leñoso Caído (MLC).	17
Cuadro 3. Análisis de medias de altura, diámetro de copa y área basal.	22
Cuadro 4. Análisis de medias en hojarasca, mantillo y materia leñosa caída (MLC).	24
Cuadro 5. Análisis de medias en los sitios en Mg C ha ⁻¹ en suelo.	25
Cuadro 6. Análisis de medias en diferentes profundidades en Mg C ha ⁻¹ en suelo. ...	25
Cuadro 7. Análisis de medias de densidad aparente en g/cm ³ en tres diferentes profundidades.	26
Cuadro 8. Análisis de medias de densidad aparente (g/cm ³) entre sitios.	26
Cuadro 9. Análisis de medias de pH entre sitios.	27
Cuadro 10. Análisis de medias de pH en tres diferentes profundidades.	27
Cuadro 11. Análisis de medias de potencial redox (Eh) entre sitios.	28
Cuadro 12. Análisis de medias de potencial redox (Eh) en tres diferentes profundidades.	28
Cuadro 13. Índice de Shannon	29
Cuadro 14. Análisis de medias de los índices Simpson.	29
Cuadro 15. Análisis del porcentaje de similitud entre los sitios con los índices de Sorensen y Jaccard.	31
Cuadro 16. Correlación de Pearson	33
Cuadro 17. Resumen del modelo del % de carbono orgánico en el suelo (COS).....	34
Cuadro 18. Resumen del modelo de MM.	34
Cuadro 19. Coeficientes para modelo matemático (% COS).....	52
Cuadro 20. Coeficientes para modelo matemático (MM)	53
Cuadro 21. Coeficientes para modelo matemático (carbono en biomasa total).....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de reservas de carbono en los bosques (FAO, 2020).	4
Figura 2. Superficie forestal por zonas climáticas (FAO, 2020).	6
Figura 3. Realización de una quema prescrita con personal de CONAFOR, BIOMASA A. C. y personal de las brigadas contra incendios forestales.	9
Figura 4. Descripción del área de estudio. Fuente: elaboración propia.	11
Figura 5. Descripción de muestreos en una parcela anidada. Fuente: elaboración propia.....	12
Figura 6. Representación para medir la altura de un árbol. Fuente: elaboración propia.....	14
Figura 7. Representación para medir el diámetro de copa de un árbol. Fuente: elaboración propia.	16
Figura 8. Cuadrante de 30 x 30 cm para el muestreo de hojarasca y mantillo.	16
Figura 9. Calibrador manual utilizado para la medición de material leñoso caído de acuerdo a su retardación.	17
Figura 10. Curva de calibración de espectrofotometría para la obtención de la concentración de carbono.	18
Figura 11. Lecturas pH y Eh en muestras de suelo.	19
Figura 12. Almacenamiento de carbono en biomasa aérea y biomasa de raíces con 3 diferentes tratamientos del fuego. Con: con quemas prescritas; Inc: incendios forestales; Sin: sin perturbación de fuego; AB: biomasa aérea; BR: biomasa de raíces.....	23
Figura 13. Índices de valor de importancia en tres diferentes tratamientos del fuego. Con: con quemas prescritas; Inc: incendios forestales; Sin: sin perturbación de fuego.	30

RESUMEN

El cambio climático es un reflejo de diferentes actividades antropogénicas como los incendios forestales; lo cual, ha llevado a la pérdida de diferentes ecosistemas forestales que son sumideros importantes para la captura y almacenamiento de carbono. Los incendios forestales, a menudo, llegan con una intensidad alta, lo cual afecta a la diversidad del ecosistema ocasionando un desequilibrio ecológico. Con base a la importancia del carbono orgánico y la susceptibilidad al cambio climático, surge la necesidad de dar un manejo que evite los incendios forestales catastróficos y reduzca las emisiones de CO₂. Las quemas prescritas son uno de los manejos alternativos, donde el fuego es controlado, con permisos previos y realizado bajo monitoreos constantes del tiempo atmosférico. Sin embargo, su efecto en el almacenamiento de C no ha sido abordado abundantemente en México. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del fuego, a través de la quema prescrita, sobre el almacenamiento de carbono en la biomasa y suelo, así como los índices ecológicos en ecosistemas forestales de coníferas latifoliadas en Chiapas, México. Se midieron las especies vegetales y suelo en 21 sitios de muestreo, 7 con quemas prescritas, 7 sin perturbación de fuego y 7 con incendios forestales. Los datos se analizaron, primero, verificando la normalidad se homogenizaron las mediante transformación logarítmica, para posteriormente utilizar la prueba de ANOVA con Tukey $p < 0.05$. Se calculó el contenido de carbono en biomasa aérea, combustible forestal y carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades. Se analizó, también, la densidad aparente, pH, conductividad eléctrica de suelo, y los índices de biodiversidad de Shannon, similitud de Sorensen, índice de Jaccard y los índices de valores de importancia relativa de las especies arbóreas. Los resultados arrojaron que, el almacenamiento de carbono, pH y densidad aparente en suelo varían significativamente entre tipos de quemas y profundidades. Para biomasa aérea, material leñoso caído y materia orgánica sobre el suelo no existieron diferencias significativas. El índice de biodiversidad fue más alto en sitios con quemas prescritas que en sitios con incendios forestales. *Quercus magnoliifolia*, *Pinus oocarpa* y *Brysonima crassifolia* fueron las especies forestales con mayor valor de importancia. Existe una similitud mayor entre los sitios sin perturbación de fuego y los sitios con quemas prescritas. En cuanto a su estructura no existieron diferencias significativas. Los resultados de este estudio tienen implicaciones importantes en el uso de quemas prescritas para la conservación de la diversidad de vegetación y el control de incendios forestales catastróficos, puesto que las quemas prescritas no eliminan a los individuos arbóreos, contrario a lo que sucede en los incendios forestales donde la biodiversidad se ve altamente afectada.

Palabras claves: Captura de carbono, biomasa arbórea, carbono orgánico del suelo, ecosistemas forestales, índices ecológicos

1. INTRODUCCIÓN

La problemática debido a la contaminación por el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), está ligada a diversas causas tales como las actividades antropogénicas, como por ejemplo, el cambio de uso de suelo, ya sea por actividades ganaderas, tala inmoderada o urbanización, así como por causas naturales, como tormentas eléctricas o las altas temperaturas en la época de estiaje que puede causar graves incendios en grandes territorios de diferentes ecosistemas (Ballesteros & Aristizabal, 2007; Cuesta & del Rocío, 2018). Todo lo anterior, crea un desbalance en las entradas y salidas de los gases en la atmósfera, aumentando de esa forma los GEI, entre los cuales destaca el dióxido de carbono (CO₂).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), en el 2014, afirmó que el CO₂ es uno de los gases con mayor presencia en la atmósfera y que trae consigo un desequilibrio en la tierra, como por ejemplo la elevación de la temperatura atmosférica (Pachauri *et al.*, 2014). El CO₂ ha estado en constante aumento a partir de la revolución industrial, debido al aumento del uso de los combustibles fósiles. A mediados del siglo XVIII se tenía una concentración de 275 -284 partículas por millón (ppm), según datos de (National Oceanic & Atmospheric Administration, 2021) (NOAA, por sus siglas en inglés); esta concentración aumentó a más de 414 ppm en enero de 2021.

En el mundo, el almacenamiento de carbono está en función a tres reservorios, los océanos, la atmósfera y el sistema terrestre (Burbano Orjuela, 2018). En los ecosistemas forestales, se convierte el CO₂ a carbono orgánico como resultado de los procesos metabólicos de la flora y microfauna, así como de los árboles presentes; sin embargo, a nivel mundial estos ecosistemas se han ido perdiendo, afectando el balance de CO₂ a nivel mundial (Zaninovich, 2017). Los incendios forestales son uno de los principales factores de la pérdida acelerada de estos ecosistemas terrestres. En efecto y para ayudar a preservar los diferentes reservorios terrestres, así como a la mitigación del CO₂, se plantea el uso del fuego controlado mediante quemas prescritas con la intención de reducir moderadamente la carga de combustible forestal (Trejo *et al.*, 2019). Estas quemas controladas son esenciales para algunas especies de los ecosistemas de coníferas-latifoliadas, debido a que se beneficia el aumento de la regeneración vegetativa, gracias al incremento de la germinación de las semillas, a consecuencia de las altas temperaturas alcanzadas por el fuego, y disminuyen el combustible forestal, lo cual acelera la descomposición de la MOS¹ e incrementa el crecimiento de nuevos brotes en un suelo descubierto y con minerales suficientes (Certini, 2005). En otras palabras, estos cambios ayudan para tener un mayor índice de individuos vegetativos en diferentes estratos que coadyuvarán a un mayor almacenamiento de carbono fijado en el suelo, biomasa aérea y material muerto sobre

¹ Materia orgánica sobre el suelo

el suelo, por consiguiente, contribuye a la mitigación del CO₂. A pesar del conocimiento de los beneficios del fuego controlado, no hay mucha información sobre la recuperación de carbono, por ello, se busca desarrollar un modelo aritmético para visualizar qué factor altera el almacenamiento de carbono en los tipos de ecosistemas de coníferas-latifoliadas respecto a diferentes influencias que se presentan en los ecosistemas ya mencionados.

Por ello, es importante estudiar los ecosistemas forestales, pues son uno de los sumideros más importantes de carbono y el contar con un modelo contribuye a tomar futuras decisiones para la mejora de estos ecosistemas, ya que se toma en cuenta todos sus reservorios y la importancia que tiene el manejo del fuego sobre estos ecosistemas a mediano o largo plazo.

1.1 Objetivo general

Evaluar el almacenamiento de carbono en ecosistemas forestales de coníferas-latifoliadas post-quema prescrita en la región Frailesca, Chiapas.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Cuantificar la cantidad de carbono almacenado en biomasa aérea, suelo y mantillo (según su estado de descomposición) después de la quema prescrita.
- b) Estimar los índices de biodiversidad y la estructura de la vegetación en la sucesión posterior a la quema prescrita en el área de estudio.

1.2 Hipótesis

En los sitios con quemas prescritas se espera un mayor almacenamiento de carbono en suelo, mantillo y biomasa aérea, con un índice mayor de biodiversidad en comparación a los sitios con incendios catastróficos.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Carbono

El carbono es un elemento que se encuentra en la naturaleza y forma parte de la composición química de los organismos, este puede combinarse con distintos elementos como nitrógeno, fósforo, hidrogeno, azufre y oxígeno, para constituir así, los compuestos más importantes para la existencia de todo ser vivo (Jaramillo, 2004).

El ciclo del carbono está basado en dos ciclos, uno es a corto plazo que se trata de un proceso bioquímico y otro de largo plazo con un proceso geoquímico. Algunas estimaciones indican que, anualmente las actividades realizadas por los humanos afectan a ambos ciclos con una emisión anual aproximada de 8.6 Pg. Al realizar una estimación del carbono emitido, alrededor de 3.3 Pg es absorbido por la atmósfera y 2.2 Pg es absorbido por los océanos. En las últimas 15 décadas existió un incremento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera del 31%, lo cual ha alterado drásticamente los niveles de los GEI (Verhulst *et al.*, 2015).

Por lo anterior, es un compuesto químico clave que se encuentra en la materia orgánica y, su intercambio entre el reservorio atmosférico y terrestre es mediante procesos químicos, físicos y biológicos. Entre los procesos de intercambios principales a destacar, se encuentra la fotosíntesis, la respiración y a las emisiones derivadas de actividades antropogénicas (Rugnitz Tito *et al.*, 2009).

Se estima que, en el suelo, se tiene mayor CO almacenado con 1500 Pg C en el primer metro del suelo; comparándolo con la vegetación terrestre con 500 Pg C y la atmósfera, con aproximadamente 800 Pg C. Se debe saber que el COS no es estático, pues este circula por diferentes reservorios mundiales en forma de moléculas diversas (Kane & Solutions, 2015).

El carbono orgánico y otros elementos que ayudan a las especies vegetales en su crecimiento, dependen de la biodiversidad y de los organismos que existe en el suelo, pues estos interactúan entre sí formando una actividad biológica (Orgiazzi *et al.*, 2016). Sin embargo, la calidad y la cantidad que exista de materia orgánica, de acuerdo a la biodiversidad existente en el ecosistema, determinará la actividad de la biota del suelo, que son quienes interactúan con las raíces de las plantas y realizan la absorción de minerales y agua (Thiele-Bruhn *et al.*, 2012).

2.2 Dióxido de carbono (CO₂)

La problemática que ha preocupado a la sociedad es el calentamiento global, a consecuencia del incremento de los GEI, entre ellos el CO₂. El CO₂ antropogénico aumentó significativamente a partir del inicio de la revolución industrial; durante el periodo de los años del 2004 al 2013. Se estima que el 44% del CO₂ se acumuló a nivel atmosférico, el 26% se encuentra en el océano y el 30% se encuentra vía terrestre (Weart, 2008).

Según datos a nivel mundial, la concentración de CO₂ atmosférico anual está en constante aumento; en junio de 2018, se registró una concentración 408.72 ppm; en el año 2019, su incremento fue de 2.94 ppm con respecto al año anterior (411.66 ppm); para el año 2020, se registró 413.25 ppm y para el año 2021, se registró 415.68 ppm (National Oceanic & Atmospheric Administration, 2021).

2.3 Reservorios de carbono

El carbono se encuentra en diferentes reservorios como en los océanos, el suelo, subsuelo y la atmósfera. La vegetación, el mantillo, capa de fermentación y el suelo son los almacenes principales del carbono en los bosques forestales (Figura 1) (Benjamín & Masera, 2001; FAO, 2020). Por ello, los ecosistemas terrestres como los bosques y los predios cultivados, desempeñan un papel importante en la eliminación del carbono atmosférico, en su almacenamiento en la biomasa y en los reservorios del suelo (Erb *et al.*, 2013; Lal *et al.*, 2015; Le Quéré *et al.*, 2009; Pan *et al.*, 2011; Ramachandran Nair *et al.*, 2009). Estos ecosistemas también son reconocidos por su papel fundamental en la modulación del intercambio de energía y agua entre la superficie terrestre y la atmósfera, lo que afecta el medio ambiente local (Alkama & Cescatti, 2016; Giardina *et al.*, 2018).

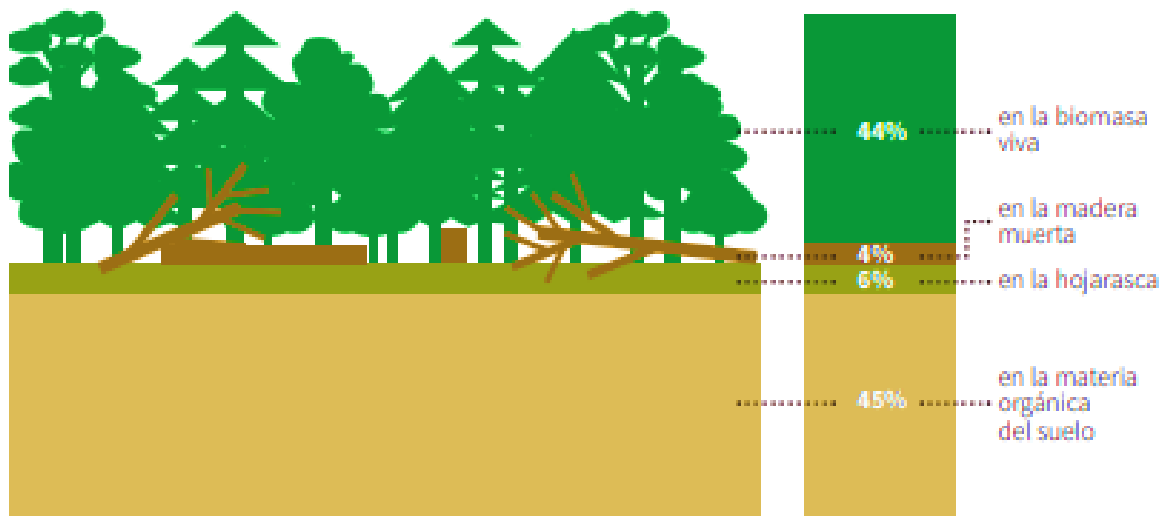


Figura 1. Porcentaje de reservas de carbono en los bosques (FAO, 2020).

El potencial de captura de carbono en biomasa aérea y en el suelo en México, ha sido estimado en 200 y 327 Mg ha⁻¹, respectivamente (Monreal *et al.*, 2005).

A nivel mundial, se estimó que existe en el ecosistema 861 Pg de carbono, de los cuales 383 Pg se encuentran en el suelo, 363 Pg en la biomasa aérea, 73 Pg en la madera muerta y 43 Pg se encuentran en el mantillo (Pan *et al.*, 2011).

México se ubica dentro del trópico, por lo que es un país muy diverso. Los bosques que se encuentran en el país contienen alrededor del 42% de especies de pino del total de las especies del mundo (Sánchez-González, 2008); en cuanto a las especies

de encinos, se calcula que, a nivel mundial, existen alrededor de 500 especies y en México existen alrededor de, 160 especies (Valencia-A, 2004)

2.4 Cambio climático

El calentamiento global es un efecto del incremento de los GEI. Los principales gases son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (Caviglia *et al.*, 2016). Uno de los principales problemas ambientales, a nivel mundial, es el cambio climático, que repercute ambiental, económica y socialmente. El cambio climático es un fenómeno que se produce en las variaciones del clima, a causa de la elevación de la temperatura en la atmósfera terrestre afectado así, al calentamiento global (García-Silvera *et al.*, 2021).

El calentamiento global proviene de las altas concentraciones de GEI que quedan dentro de la atmósfera, reteniéndolos y ocasionando cambios significativos en el clima por el aumento de la temperatura media en los últimos años. Las emisiones de los GEI pueden ser por causas naturales y antropogénicas como resultado del uso extremo de combustibles fósiles o la tala ilegal (Pachauri, *et al.*, 2014).

En Chiapas, las actividades agropecuarias representan el 76% de las emisiones de GEI, entre las principales dinámicas de cambio de uso del suelo en el estado entre los años 2007 al 2011 fue la pérdida de bosques secundarios templados. En su lugar se establecieron parcelas agrícolas donde predomina el cultivo de maíz, en cuanto a la vegetación secundaria de selva, la deforestación se ha dado a gran escala para el uso de suelo en el ámbito ganadero, en cuanto a los bosques de pino y encino, la deforestación es el índice más grave a nivel estatal (Covaleda *et al.*, 2016).

2.5 Importancia de los ecosistemas forestales

Conservar los bosques trae efectos positivos como los servicios ecosistémicos como provisión de agua para consumo de poblaciones, generación de energía hidroeléctrica, control de la erosión de suelo, regulación del clima a escala local y la contribución para mitigar el cambio climático al secuestrar y almacenar carbono (Finegan *et al.*, 2020).

A nivel mundial, existe gran cantidad de biodiversidad distribuidas en diferentes áreas, la mayoría de especies es localizada en el trópico con el 45% proporción y distribución forestal mundial (Figura 2) (FAO, 2020b); sin embargo, por diferentes causas, es también el área donde existe mayor pérdida de biodiversidad. La pérdida de la biodiversidad en los ecosistemas forestales provocan un grave daño al ecosistema tardando muchos años para su recuperación (Mataix-Solera & Guerrero, 2007).

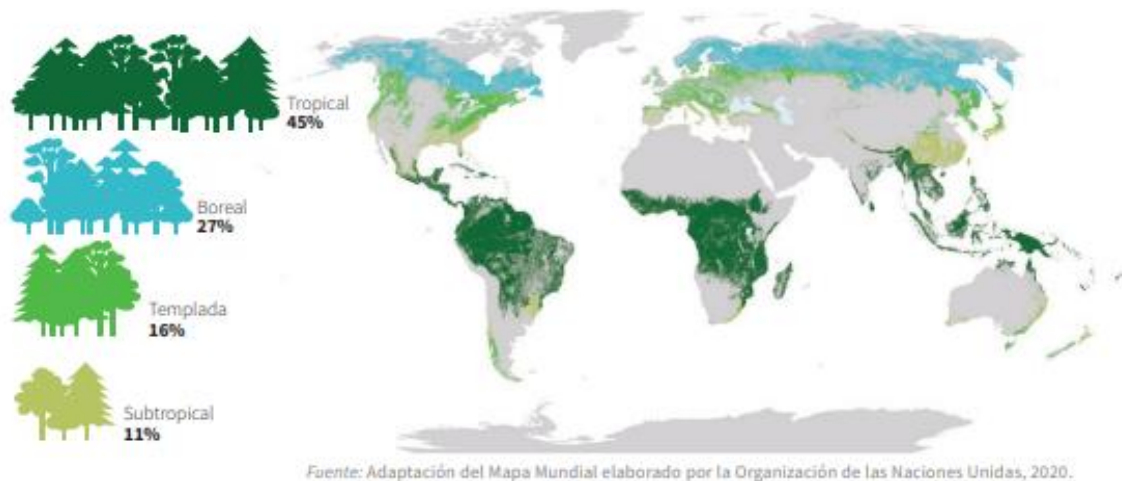


Figura 2. Superficie forestal por zonas climáticas (FAO, 2020).

De acuerdo con datos de la FAO 2020, aunque la pérdida neta de bosques ha disminuido al paso de los años, los valores siguen siendo altos. Entre los años de 1990 al 2000, la pérdida neta de bosques fue de 7.8 millones de hectáreas por año, además de 5.2 millones de hectáreas anuales en la década del 2000 al 2010 y de 4.7 millones de hectáreas al año en la década del 2010 al 2020. Esto se debe a la reducción que existe de la tasa de expansión de los ecosistemas boscosos; al no tener superficie arbórea no puede existir una pérdida de este mismo.

Estas pérdidas de bosque se atribuyen a diferentes causas, entre ellas se encuentran los incendios forestales. México es un país muy vulnerable al fuego por su clima, relieve, tipos de suelo y vegetación existente. Por ejemplo, del 1 de enero al 31 de diciembre de 2020, en México se tiene registro de 5,913 incendios con una afectación de 378,928 hectáreas por incendio forestales (CONAFOR, 2020).

2.6 Incendios forestales

Los ecosistemas forestales enfrentan muchas perturbaciones que conllevan reacciones negativas como mala sanidad, vitalidad y llegan a reducir la capacidad de brindar los servicios ecosistémicos al entorno. De acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), los incendios forestales son uno de los principales factores que afecta a los ecosistemas forestales en México y el resto del mundo; ya que el fuego provoca una serie de cambios de alto impacto a nivel económico, ecológico y social en un tiempo muy corto, por esa situación es necesario poner atención especial a estos eventos (SEMARNAT, 2009).

En el año 2015, se estimó a nivel mundial que se incendiaron alrededor de 98 millones de hectáreas de bosque; siendo las zonas tropicales, las áreas más dañadas donde los incendios arrasaron cerca del 4% de la superficie forestal. Entre los lugares más afectados, se encontró América del sur y África, en donde se registraron más de dos tercios de la superficie boscosa. Al quedar propensos ante cualquier daño, los

insectos, enfermedades y fenómenos naturales dañaron casi 40 millones de hectáreas de ecosistemas forestales en ese año (FAO, 2020b).

En México, según datos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), se registra un promedio de 8 mil incendios forestales por año. Estas cifras dependen en gran medida de las condiciones climáticas. En las últimas décadas, se tiene el registro de un caso extraordinario en la temporada de 1998, donde se registró más de 14,000 incendios y casi el millón de hectáreas afectadas (CONAFOR, 2013).

De acuerdo a datos estadísticos, el 99% de los incendios ocurridos entre 1998-2005 tienen como origen las diferentes actividades antropogénicas, principalmente las actividades agropecuarias y los incendios intencionales (relacionados a conflictos agrarios y a diferentes actividades ilegales) (SEMARNAT, 2009). Según UACH-SEMARNAP (1999), estos acontecimientos en el sur del país, contribuyen a una amplia degradación de los bosques. Un ejemplo de esta información ocurrió durante la temporada 1998, cuando más de 19,000 hectáreas (ha) de selvas resultaron afectadas en la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote (REBISO); el fuego provocó, en las áreas siniestradas, la mortalidad de los individuos arbóreos fuera total o muy alta (SEMARNAT, 2000), los incendios se dieron a nivel subterráneos, lo cual solo pudo sofocarse con las primeras lluvias, semanas después del inicio del incendio.

En México, según datos de la FAO (2015), a nivel nacional se perdió, entre los años 1990 al 2000, 354 mil hectáreas anuales; para el lapso de los años 2000 al 2005, se redujo a 235 mil hectáreas por año; además para los años del 2005 al 2010, se perdieron alrededor de 155 mil hectáreas anuales y en el periodo de los años 2010-2015, se estimó en 92 mil hectáreas de pérdidas anuales de bosques, que por lo regular, estas disminuciones se atribuyen principalmente a la deforestación ilegal seguida de cambio de uso de suelo.

2.6.7 Incendios registrados en México

Según datos de SEMARNAT (2001), México es un país muy susceptible a incendios forestales por sus condiciones climáticas. Por ello, en la época de estiaje se registran incendios con frecuencia y salen dañados un gran número de ecosistemas.

En la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) se tiene un registro de incendios de los años 1998 al 2017; para el 2017, se reportaron 8,896 incendios en toda la República Mexicana, con una superficie total de 726,361.21 ha afectadas, donde Chiapas acumuló 390 incendios reportados con área afectada de 13,001.83 ha.

En el año 2018, el registro fue de 6,970 incendios en los 32 estados afectando una superficie de 488,162 ha. Sin embargo, para el año 2019, se registró un total de 633,678 ha quemadas, teniendo así un incremento en las superficies afectadas; para el año 2020, se registró una disminución, la cual fue de 378,928 ha; entre los estados con mayores incendios, se registró a Chiapas, el cual se ubicó en el 6to lugar, teniendo

un registro de 319 incendios forestales con 17,927 ha afectadas; de las cuales, se incendiaron 473 ha de arbolado adulto y 94 ha de renuevos (CONAFOR, 2020).

2.8 Quemadas prescritas

Existen soluciones para reducir la concentración de dióxido de carbono o reducir las emisiones. Una de las soluciones es almacenarlo el mayor tiempo posible, esto puede ser en biomasa, suelo y océano. Para el primero se logra mediante la fotosíntesis y para el segundo es mediante la descomposición y mineralización de materia orgánica (INECC & PNUD, 2017). Por ello, la Organización para la Conservación de la Naturaleza (TNC, por sus siglas en inglés) mencionó la importancia del manejo del fuego como parte de los factores ecológicos, además es necesario para ayudar a las plantas a regenerarse en ciertos ecosistemas. Para ello, es importante conocer sus condiciones naturales, incluida la intensidad y frecuencia de los cambios según la evolución de cada ecosistema (TNC, 2004).

El fuego desempeña un rol importante en la evolución de muchos ecosistemas forestales, pero llega a ser muy perjudicial cuando la actividad humana fomenta un desequilibrio negativo con el fuego, donde el ecosistema no puede ser capaz de sobrellevar su desarrollo (Rodríguez Trejo *et al.*, 2019). No es fácil de comprender que el fuego juegue un papel natural en los ecosistemas, pero se sabe que cuando estos se han interrelacionado equitativamente, han proporcionado factores favorables. Algunos ecosistemas han desarrollado adaptabilidad en la reducción de combustibles, el control de enfermedades de las plantas, la mineralización de nutrientes y hasta la germinación de las semillas, pero como sociedad se ha inculcado la noción de que el fuego está relacionado con destrucción en cualquiera de sus ubicaciones geográficas, olvidando los beneficios para algunas especies (CONAFOR, 2010).

Para obtener beneficios en ecosistemas forestales que son tolerantes al fuego, se sugiere la realización de quemadas prescritas, las cuales se ejecutan en condiciones climáticas adecuadas, se monitorea el clima, se ubica la topografía en donde se trabajará y se identifica el tipo de combustible de la zona, todo esto con el fin de lograr metas entre las que se destaca a corto plazo, controlar la acumulación de biomasa y reducir el riesgo de un incendio forestal en el futuro (Alcañiz *et al.*, 2016; Martínez-Murillo *et al.*, 2016). Para los beneficios a largo plazo se pretende generar impactos positivos en los ecosistemas, como por ejemplo la regeneración de especies que requieren altas temperaturas para su desarrollo o mejores hábitats forestales (Alcañiz *et al.*, 2016; Khouri & Prendes, 2006).

Actualmente se buscan alternativas para contrarrestar los incendios forestales y una herramienta para controlar los efectos catastróficos del fuego intenso es la quema prescrita, donde el fuego es controlado teniendo así menor impacto a la vegetación (Wright *et al.*, 2021).

Las quemas prescritas (Figura 3) también se utilizan como una estrategia de restauración en la biodiversidad y puede influir en el espesor de materia orgánica sobre suelo, la apertura del dosel, con impactos en el establecimiento, supervivencia y crecimiento de plántulas de especies arbóreas (Turner *et al.* 2016; Calviño-Cancela *et al.*, 2018)



Figura 3. Realización de una quema prescrita con personal de CONAFOR, BIOMASA A. C. y personal de las brigadas contra incendios forestales.

La asociación civil Biodiversidad, Medio Ambiente, Suelo y Agua (BIOMASA, A. C.) tiene un enfoque de investigación que se basa en el estudio del comportamiento del fuego en diferentes ecosistemas para la realización de quemas prescritas y monitoreos al ecosistema.

En el municipio de Villaflores, Chiapas se han realizado estudios en sitios con incendios forestales en colaboración de protección civil, BIOMASA A. C., Universidad Autónoma de Chapingo y brigadas ejidales, donde los resultados fueron favorecedores para el ecosistema forestal, aumentando el rebrote de especies como *Pinus Oocarpa* y teniendo una mortalidad mínima (5%), además de registrar especies con alta adaptabilidad al fuego (Rodríguez Trejo *et al.*, 2019).

2.8.1 El uso del fuego controlado y su relación con los ecosistemas

Cisneros-González *et al.*, (2018) mencionan que el fuego llega a ser un elemento muy beneficioso para el ecosistema que evoluciona con él, pero no es de ayuda para

aquellos ecosistemas que no están adaptados a este fenómeno. Cuando el problema del fuego excede la tolerancia de la especie, se producirá un incendio y provocará un impacto en los procesos ecológicos, provocando pérdida de biodiversidad, cambios en los procesos hidrológicos, deforestación y como última instancia la liberación de GEI (Vargas Rodríguez, 2017).

Existen fuegos de alta y baja intensidad, todo depende de la interrelación del tiempo atmosférico, de la topografía y del combustible. De acuerdo a lo anterior existen fuegos donde la severidad es escasa, como las quemaduras prescritas, en estas actividades se pueden observar después de algún tiempo importantes incrementos en la productividad debido a la deposición de materia orgánica semipirolizada y cenizas, y la consiguiente liberación de nutrientes a formas inorgánicas (Zavala *et al.*, 2014), estos sitios presentan altas concentraciones de nutrientes, los cuales varían de acuerdo al tipo de vegetación y ubicación geográfica del lugar (Mataix-Solera & Guerrero, 2007).

Es importante mencionar que, si bien las quemaduras prescritas producen emisiones de GEI, también se debe saber que con la realización de estas quemaduras se espera la reducción de un incendio catastrófico, debido a la disminución de combustibles y un aumento de almacenamiento de carbono orgánico a largo plazo (Bradstock & Williams, 2009).

De acuerdo con el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, (2008) la severidad de los incendios forestales puede afectar tanto a la cobertura vegetal como el área basal de árboles. Sin embargo, el efecto de las quemaduras prescritas en los índices ecológicos puede ayudar a gestionar la tierra para mejorar la conservación de la vegetación nativa. Pero, los estudios sobre el efecto de quemaduras prescritas en los índices de biodiversidad vegetal en México, aún son limitados.

2.9 Modelos de recuperación de carbono forestal

Los modelos nos proporcionan información que se puede proyectar a largo plazo, según Bohn *et al.*, 2014 y Lonsdale *et al.*, 2015, los modelos basados en procesos se utilizan ampliamente para simular el crecimiento a largo plazo de árboles o, en su caso, en masas forestales. Así mismo, es utilizado para pronosticar el carbono y la dinámica de la vegetación utilizando vegetación y escenarios climáticos diferentes (Collalti *et al.*, 2018; Gutiérrez *et al.*, 2014; Peters *et al.*, 2013) donde se puede proyectar el flujo de agua, carbono y nutrientes dentro de los ecosistemas.

Los modelos de sucesión forestal ocupan un nicho especial entre los modelos que simulan la dinámica de los reservorios en los ecosistemas forestales. Los modelos de sucesión predicen los cambios en la composición de especies en un largo período para examinar diferentes vías sucesionales forestales, es allí donde radica la gran importancia de los modelos para los bosques (Frêne & Oyarzún, 2014; Sánchez Correa, 2011)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio.

Las áreas de estudio donde se trabajó con ecosistemas de coníferas-latifoliadas fueron ubicadas en los municipios de Villaflores y Villa Corzo, Chiapas (Figura 4). De acuerdo con las especificaciones del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el primer municipio se encuentra ubicado entre 16°09' y 16°36' de latitud norte y 93°02' y 93°47' de longitud oeste, con una altitud entre 200 y 2 300 m. Este municipio colinda al norte con los municipios de Suchiapa y Ocozocoautla de Espinosa; al sur con los municipios de Tonalá y Villa Corzo; al este con los municipios de Chiapa de Corzo, Suchiapa y Villa Corzo; al oeste con los municipios de Jiquipilas y Arriaga. Mientras que, el municipio de Villa Corzo, se encuentra ubicado entre los 15°49'58.80" a 16°17'44.16" de latitud norte 93°36'49.68" a 92°51'28.08" de longitud oeste, con una altitud entre 200 y 2 300 m. Este municipio colinda al norte con Villaflores y El Parral, al este con La Concordia, al sur con La Concordia, Pijijiapan y Tonalá y al oeste con Tonalá y Villaflores (INEGI, 2018).

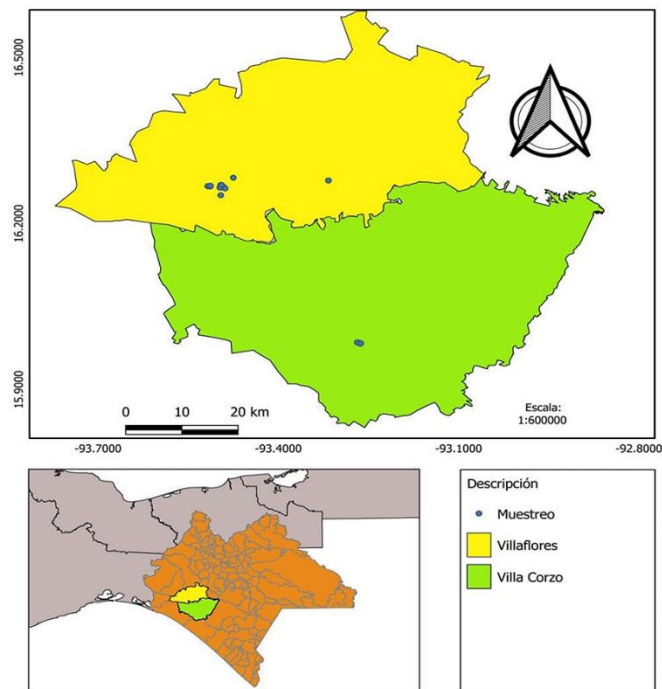


Figura 4. Descripción del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

Dentro del área de estudio, los sitios se ubicaron, uno, en el ejido San Marcos, municipio de Villa Corzo, ubicado entre los paralelos 15°58'50" de latitud norte y los meridianos 93°15'08" de longitud oeste con una altitud de 838 msnm; otro sitio en el ejido Villahermosa, ubicado entre los paralelos 16°16' 0.09" de latitud norte y los meridianos 93°29' 29.7" de longitud oeste con una altitud de 853 msnm; un sitio más

en el ejido Niquidámbar, ubicado entre los paralelos 16°17'02" de latitud norte y los meridianos 93°29'02" de longitud oeste con una altitud de 891 msnm y, por último, un sitio en el Cerro Nambiyugua, ubicado entre los paralelos 16° 16" 45.78" de latitud norte y los meridianos 93° 19" 32.79" de longitud oeste con una altitud 1020 msnm. Estos últimos tres sitios se encuentran en el municipio de Villaflores.

3.2. Método de muestreo

Para realizar los muestreos en campo, se trabajó con 21 parcelas anidadas circulares con un radio de 17.84m (1000m²) donde se dividió en cuadrantes con ayuda de lazos y cintas métricas (Figura 5), tomando muestras por cada sitio perturbado (7 parcelas con quemas prescritas), no perturbado (7 parcelas sin presencia de fuego) y 7 parcelas con incendios forestales. Para el inventario forestal, se utilizó la misma parcela de 1000 m² y una sub-parcela dentro de la misma parcela para medir árboles con diferente DAP²

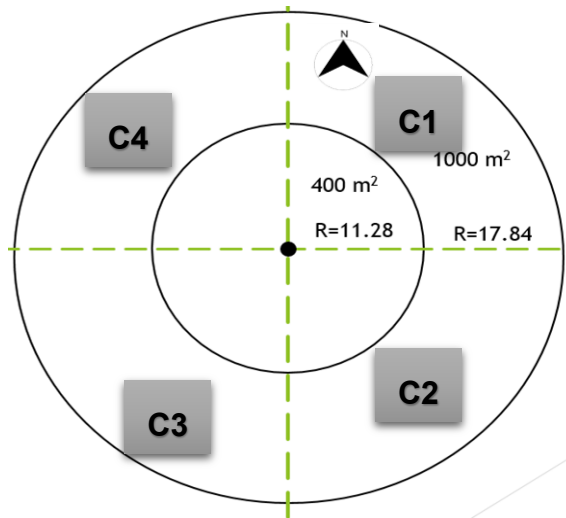


Figura 5. Descripción de muestreos en una parcela anidada. Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Cuantificación de carbono almacenado

Se realizó un inventario forestal y análisis de suelo donde se evaluó la recuperación de composición y estructura de vegetación, también se determinó la cantidad de carbono almacenado en los ecosistemas para conocer la magnitud de la pérdida de la capacidad de almacenamiento del ecosistema (CONAFOR, 2011).

² Diámetro a la altura de pecho (1.30 m)

El diseño del muestreo fue sistemático, se trabajó con parcelas anidadas circulares. Para la recolección de datos se realizó por medio de formatos elaborados y extraídos del INFyS³ de CONAFOR, para identificar las variables cuantitativas y cualitativas a medir. Las variables que se obtuvieron de cada árbol fueron:

- Nombre común
- Nombre científico
- Condición de cada árbol: vivo, muerto o tocón
- Espesor y cosecha de mantillo
- DAP
- Altura total
- Número de especies por sitio
- % de pendiente del sitio
- Presencia de agentes de perturbación como incendios, plagas y enfermedades, talas clandestinas, entrada y salidas de ganado entre otros.

Se realizó, de igual manera, análisis físico-químico de suelo, para determinar la cantidad de carbono orgánico, potencial de hidrogeno (pH) y Potencial de reducción-oxidación (Eh) mediante un potenciómetro y densidad aparente.

3.3 Variables a evaluar

3.3.1 Biomasa aérea

Para esta variable, se ubicaron y seleccionaron las parcelas con quemas prescritas (realizados en los años de 2015, 2016 y 2017) y sin quemas prescritas que se encontraron dentro del mismo entorno ambiental, topográfico y similitud en la vegetación para comparar las diferencias entre los tres sitios.

Se realizó un inventario forestal por cada parcela anidada en un sitio circular de 1000 m² para medir árboles con DAP mayor de 7.5 cm y sub-sitios de 400 m² para registrar árboles con DAP menor o igual a 7.5 cm y altura mayor de 25 cm, iniciando del lado Norte y siguiendo las manecillas del reloj.

3.3.1.1 Altura

Se tomó la altura de cada árbol, como lo ilustra la Figura 6, con ayuda de un clinómetro, se obtienen dos ángulos: el ángulo superior, que se toma de la parte más alta de la copa del árbol, y el ángulo inferior, tomado al nivel de suelo, además se tomó la distancia del árbol a la persona, para así poder aplicar la siguiente fórmula [1].

$$H = OC (\tan \alpha + \tan \beta) \quad (1)$$

Donde:

³ Inventario Nacional Forestal y Suelo

H = Altura del árbol en metros (distancia AB)

OC = Distancia horizontal al árbol en metros

α = Ángulo del observador al ápice del árbol (ángulo superior)

β = Ángulo del observador a la base del árbol (ángulo inferior)

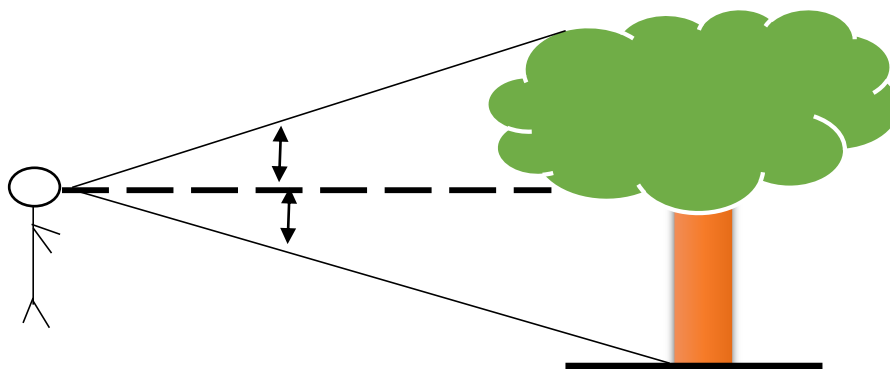


Figura 6. Representación para medir la altura de un árbol. Fuente: elaboración propia.

La biomasa aérea de cada árbol, se calculó usando el DAP (tomado a 1.30 m de la base del suelo) y la altura total. Con estos datos, se utilizaron ecuaciones alométricas de Vargas-Larreta *et al.*, (2017) y Chave *et al.*, (2014) para calcular la biomasa aérea.

Para *Pinus oocarpa* y *Quercus rugosa*, se utilizaron las ecuaciones de Vargas-Larreta *et al.*, 2017 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas para obtener biomasa aérea de dos especies.

<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Quercus rugosa</i>
$Ww = 0.00716 d^{2.02253} h^{1.30938}$	$Ww = 0.01988 d^{2.28684} h^{0.52175}$
$WB = 0.03088 d^{1.10021} h^{1.09925}$	$WB = 0.05621 d^{2.0764}$
$Wb r = 0.01613 d^{1.90578} h^{0.70112}$	$Wb r = 0.11276 d^{1.52164} h^{0.53343}$
$WF = 0.03886 d^{1.53515} h^{0.31776}$	$WF = 0.0377 d^{1.42193} h^{0.70675}$
$Wt = \sum W I$	$Wt = \sum W I$

d = diámetro a la altura del pecho (cm), h = altura total (m), Ww = biomasa de la madera del tallo (kg árbol⁻¹), Wb = biomasa de la corteza del tallo (kg árbol⁻¹), br = biomasa de la madera más la corteza de las ramas (kg árbol⁻¹), Wf = follaje (hojas) biomasa (kg árbol⁻¹), Wt = biomasa aérea total (Ww + Wb + Wbr + Wf) (kg árbol⁻¹)

Para las especies tropicales, se utilizó la ecuación de (Chave *et al.*, 2014) [2].

$$AGB_{est} = 0.0673 \times \rho D^2 H)^{0.976} \quad (2)$$

Donde:

AGB_{est} = Biomasa aérea

ρ = densidad de madera

D= DAP

h= altura

Para la biomasa de raíz (Br) se utilizó la ecuación de (Cairns *et al.*, 1997) [3].

$$BR = \exp(-1.085 + 0.926 \ln(BA)) \quad (3)$$

Donde:

BR= Biomasa de raíces

BA= Biomasa aérea

3.3.1.2 Área basal

El área basal se obtuvo mediante el DAP de cada árbol. El área basal es una variable importante que se utiliza para describir de alguna manera el estado de desarrollo de un árbol, para ello se utilizó la siguiente fórmula [4]

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

Donde:

AB= Área basal

DAP= Diámetro a la altura de pecho

3.3.1.3 Diámetro de copa

El diámetro de copa se midió por cada árbol, para ello se trazaron dos líneas perpendiculares de acuerdo a los puntos cardinales (Figura 7), con ayuda de una cinta métrica. Para calcular el diámetro de copa se obtuvo el promedio de las dos longitudes (Norte-Sur y Este-Oeste).

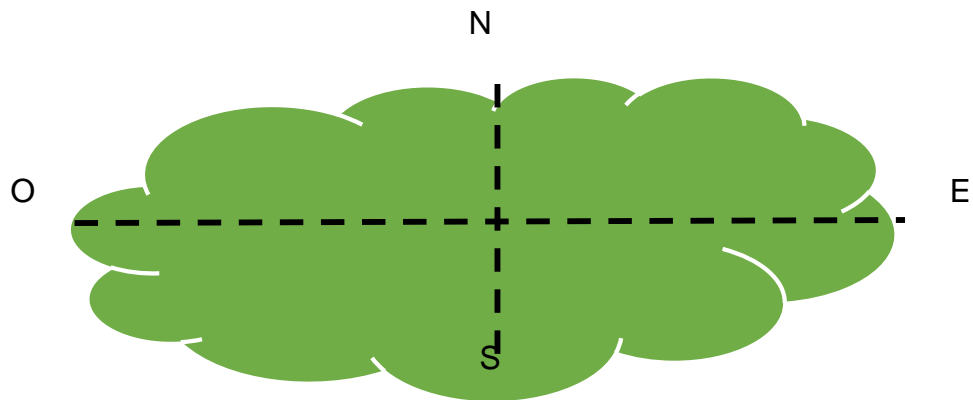


Figura 7. Representación para medir el diámetro de copa de un árbol. Fuente: elaboración propia.

3.3.2 Hojarasca y mantillo

Para realizar el muestreo en hojarasca y mantillo, se tomaron los mismos cuadrantes de 30 cm² de las parcelas anidadas, ubicadas anteriormente para biomasa aérea. Se realizaron 4 muestreos por cada parcela anidada, uno por cada cuadrante. En cada uno de ellos, se midió el espesor de la hojarasca y mantillo, se levantaron las muestras (Figura 8) y posteriormente se llevaron al laboratorio de Nutrición Animal de la Facultad de Ciencias Agronómicas, *Campus V*, para obtener el peso fresco y pasarlas a la estufa de secado a 65° C por 3 días. Posteriormente, se obtuvo el peso seco, se molieron y pasaron por un tamizando con malla de 0.05 mm, para finalmente determinar el carbono orgánico mediante la Norma oficial Mexicana-021 con el método de Walkley y Black 1934 utilizando 0.025 g de muestra de materia orgánica.



Figura 8. Cuadrante de 30 x 30 cm para el muestreo de hojarasca y mantillo.

3.3.3 Material leñoso caído

En los sitios de muestreo ya ubicados, se realizó un inventario del material leñoso caído (MLC) con ayuda de un calibrador manual (Figura 9), en donde se cuantificó la cantidad de MLC y se registró por cada categoría.

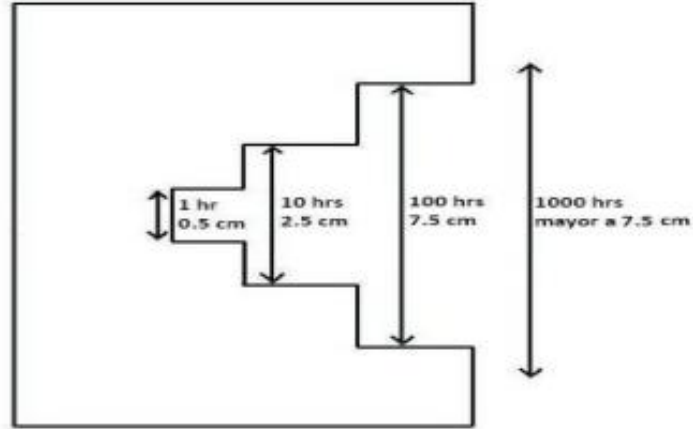


Figura 9. Calibrador manual utilizado para la medición de material leñoso caído de acuerdo a su retardación.

De acuerdo a la metodología del INFyS, se trazaron líneas perpendiculares siguiendo los puntos cardinales (Cuadro 2). Los datos se clasificaron de acuerdo a la categoría de finos, regulares, medianos y grandes respecto al diámetro (cm) del material leñoso.

Cuadro 2. Clasificación para la toma de datos de Material Leñoso Caído (MLC).

Categoría	Diámetro (cm)	Tiempo de retardación (horas)*	Medición en el transecto
Finos	0-0.5	1	10 a 15
Regulares	0.51-2.5	10	10 a 15
Medianos	2.51-7.5	100	0 a 15
Grandes	≥ 7.5	1000	0 a 15

*Tiempo de retardación: tiempo en que tarda el combustible en perder 60% del contenido de humedad ante altas temperaturas.

Para cuantificar el volumen de la madera muerta sobre el suelo, se utilizó en el método de líneas de intersección o intersecciones planares (Brown *et al.*, 1974; Van Wagner, 1982) [5].

$$V = \frac{\pi * D^2}{8L} \quad (5)$$

Donde:

D= Diámetro

V= volumen de madera muerta ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)

L= longitud de los metros lineales de muestreo (m)

3.3.4 Suelo

Una vez que se extrajo la hojarasca y el mantillo, se tomaron ocho muestras de suelo por cada sitio muestreado (dos muestra por cada cuadrante: una para densidad aparente y otra para analizar el carbono orgánico). Para ambas muestras, se tomaron 3 sub-muestras que corresponden a tres diferentes profundidades; para la densidad aparente, se tomaron 3 muestras, con la ayuda de un tubo de metal, que correspondía a las profundidades de 0 a 10 cm, 10 a 20 cm y 20 a 30 cm. Para cuantificar la densidad aparente, las muestras fueron llevadas al laboratorio para ser secadas en estufas por 3 días a 65°C ; posteriormente, se realizó la separación y el pesado de piedras, raíces finas y suelo, y mediante la relación del peso seco y el volumen del cilindro de metal se obtuvo la densidad aparente.

Para el análisis de carbono en suelo, se utilizaron sub-muestras de diferentes profundidades, para evaluar el contenido de carbono orgánico a través del método de Walkley and Black, 1934, de acuerdo a lo estipulado en la NOM-021. Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo, obtenido con el uso de espectrofotometría (Figura 10), a partir de una fórmula ajustada, que se obtiene a base de la calibración con una solución de sacarosa ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$).

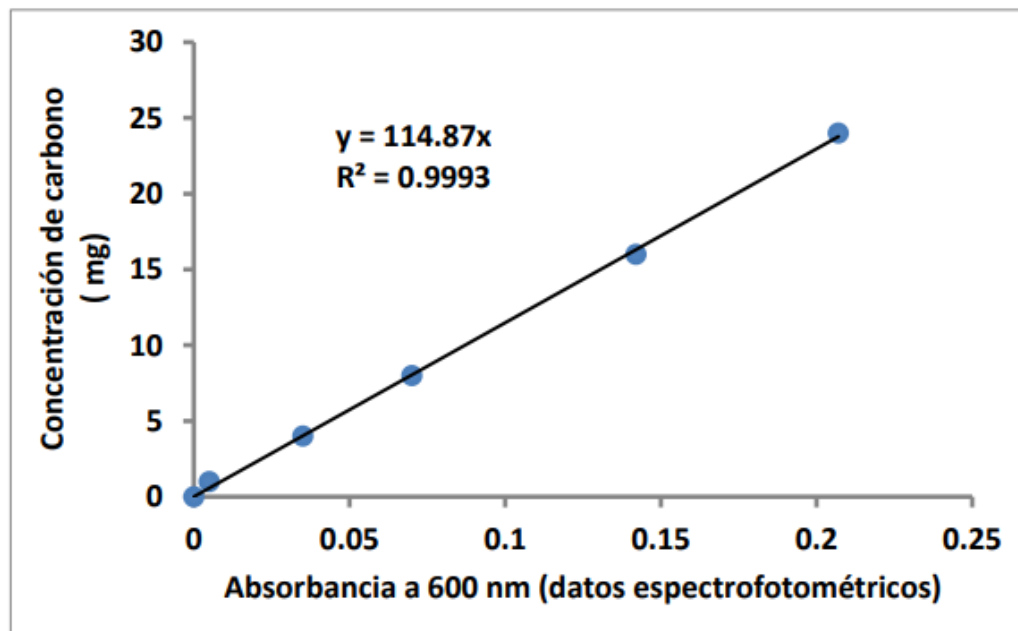


Figura 10. Curva de calibración de espectrofotometría para la obtención de la concentración de carbono.

Para obtener el pH y el potencial de reducción-oxidación (Eh), se tomaron muestras del suelo que se utilizó para evaluar el carbono orgánico, y, siguiendo lo estipulado en la NOM 021, con ayuda de un potenciómetro, se tomaron las lecturas por cada muestra de suelo (Figura 11).

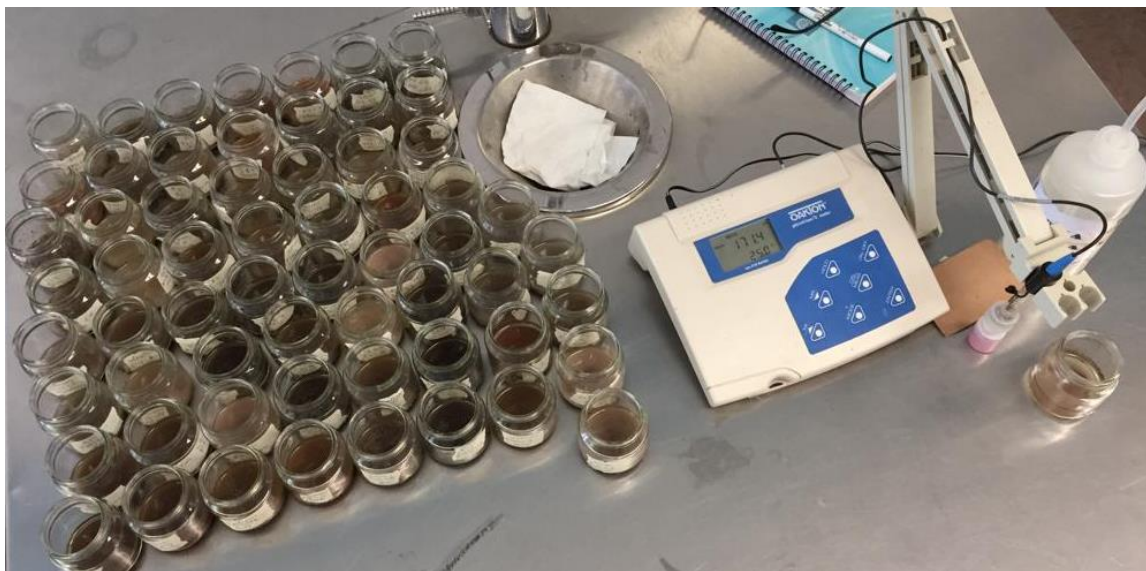


Figura 11. Lecturas pH y Eh en muestras de suelo.

3.3.5 Índices de biodiversidad y la estructura de la vegetación en la sucesión posterior a la quema

Para estimar los índices de biodiversidad, se contabilizó a las especies y el número de individuos por especies en cada una de las parcelas anidadas en los sitios con quemas prescritas, con incendio forestal y sin perturbación de fuego, donde se obtuvieron los datos de número total de especies presentes y de individuos por especies para ser utilizados en las ecuaciones de (Shannon & Weaver, 1949) [6] y de (Simpson, 1949) [7].

$$D = \sum^S pi^2 \quad (6)$$

$$H' = - \sum^S pi \log pi \quad (7)$$

Donde:

S: número de especies o riqueza de especies

Pi: es la proporción del total de la muestra encontrada para la especie i

3.5 Índices de valor de importancia (IVI)

Para la obtención de los índices de importancia, se evaluó la importancia de las especies presentes en las parcelas anidadas, de acuerdo a su estructura y carácter;

estos datos se obtuvieron mediante la sumatoria de la frecuencia relativa [8], dominancia relativa [9] y la densidad relativa [10] (Cottam & Curtis, 1956)

$$1. \text{ Frecuencia relativa} = \frac{\text{frecuencia de la sp.} \times 100}{\text{frecuencia de todas las especies}} \quad (8)$$

$$2. \text{ Dominancia relativa} = \frac{\text{Dominancia de la sp.} \times 100}{\text{dominancia de todas las especies}} \quad (9)$$

$$. \text{ Densidad relativa} = \frac{\text{Número de individuos de la sp.} \times 100}{\text{número total de individuos}} \quad (10)$$

3.6 Índices de similitud

Se contabilizaron todas las especies por sitio y se realizó la comparación cualitativa de todas las especies por sitio con quema prescrita, con incendio forestal y sin perturbación de fuego, utilizando los índices de Sorensen [11] (Sorensen, 1948) y Jaccard [12] (Kent & Coker, 1992)

$$IS_S = \frac{2c}{a+b} * 100 \quad (11)$$

$$IS_J = \frac{c}{a+b-c} * 100 \quad (12)$$

Donde:

IS_J = índice de similitud de Jaccard

IS_S = índices de similitud de Sorensen

a= Número de especies que aparecen en la comunidad A

b= Número de especies que aparecen en la comunidad B

c= Número de especies que aparecen en ambas comunidades

3.7 Modelo multivariado

El modelo empleado para esta investigación se desarrolló mediante coeficientes a partir de la obtención de los análisis multivariados, en los cuales se puede observar las diferentes correlaciones de las variables estudiadas y, con ello, determinar que variable afecta positivamente o negativamente al almacenamiento de carbono en ese sistema. Para este modelo se tomaron en cuenta como variable dependiente el % carbono orgánico de suelo y como variables independientes tipo de quema, elevación, ganadería, edad, densidad aparente, carbono en biomasa área total, altura, diámetro de copa, materia muerta, porcentaje de pendiente, accesibilidad, tipo de bosque, índice de Shannon e índice de Simpson.

3.8 Análisis de datos

Toda la información obtenida en los formatos de campo y laboratorio, se almacenó en una base de datos de Excel para ordenarlos y evaluarlos. Con estos datos se utilizó el Software estadístico IBM SPSS Statistics 24, para obtener estadísticas descriptivas como media, frecuencia, desviación estándar e intervalos de confianza. Posteriormente, se realizó un análisis de Kurskal-Wallis para verificar la normalidad de los datos, los cuales se homogenizaron mediante un logaritmo natural y se realizó una ANOVA para la comparación de medias mediante la prueba de Tukey con un error del 0.05% ($P \leq 0.05$). Se realizó un diseño factorial para comparar las variables dependientes de las independientes tomando como variable independiente los 3 tipos de sitios muestreados y como variables dependientes el carbono en biomasa aérea, raíces, materia muerta y suelo, altura, área basal, elevación, % de pendiente, densidad aparente y los índices ecológicos.

4. RESULTADOS

4.1 Altura, diámetro de copa y área basal

Para las variables de altura, diámetro de copa y área basal no encontraron diferencias significativas, sin embargo estos resultados fueron más bajos en los sitios con incendios forestales como se puede observar en el Cuadro 3. Para la altura de los árboles, estos fueron más altos en los sitios sin perturbación de fuego con 5.93 m en árboles con DAP <7.5 cm y la mayor altura de los árboles con DAP ≥7.5 se registró en los sitios con quemas prescritas con 13.49 m de altura.

Cuadro 3. Análisis de medias de altura, diámetro de copa y área basal.

Categoría	Con	Sin	Inc
Altura <7.5	1.72 ± 1.42	5.93 ± 1.19	3.50 ± 1.41
Altura ≥7.5	13.49 ± 1.06	12.97 ± 1.06	11.15 ± 1.03
Altura total	13.01 ± 1.04	11.41 ± 1.07	10.27 ± 1.07
Diámetro de copa <7.5	1.76 ± 1.44	5.70 ± 1.25	1.58 ± 1.39
Diámetro de copa ≥7.5	53.35 ± 1.36	37.90 ± 1.44	24.31 ± 1.35
Diámetro de copa total	50.78 ± 1.38	31.52 ± 1.41	20.82 ± 1.36
AB <7.5 cm	0.14 ± 0.10	0.27 ± 0.07	0.16 ± 0.08
AB ≥ 7.5 cm	14.36 ± 3.14	11.53 ± 1.49	10.28 ± 1.42
AB total	14.50 ± 3.14	11.79 ± 1.54	10.45 ± 1.40

Sin: sin perturbación de fuego, Con: sitios con quemas prescritas, Inc: sitios con incendios forestales, <7.5: DAP menor a 7.5cm, ≥7.5: DAP mayor o igual a 7.5cm, AB: área basal

El diámetro de copa fue mayor en los sitios sin perturbación de fuego con 5.69 m en árboles con DAP <7.5 cm y árboles en sitios con quemas prescritas, con DAP ≥7.5cm, tuvieron un diámetro de 53.35 m.

Respecto al área basal, los resultados mayores se obtuvieron en los sitios con quemas prescritas con 0.14 m² y 14.36 m² respecto a la categoría diamétrica tomando como área basal total 14.5 m² ha⁻¹.

4.2 Biomasa aérea y biomasa de raíces

La cantidad de carbono almacenado en biomasa aérea varía de 26.48 t C ha⁻¹ a 38.78 t C ha⁻¹, sin embargo, no se obtuvieron diferencias significativas entre los sitios con quemas prescritas, sin quema e incendio forestal (Figura 12).

Para la cantidad de carbono almacenado en raíces, se presenta mayor cantidad de

carbono en sitios con quemas prescritas registrando 9.43 t C ha^{-1} mientras la menor cantidad de carbono (6.65 t C ha^{-1}) fue registrada en sitios con incendios forestales (Figura 12).

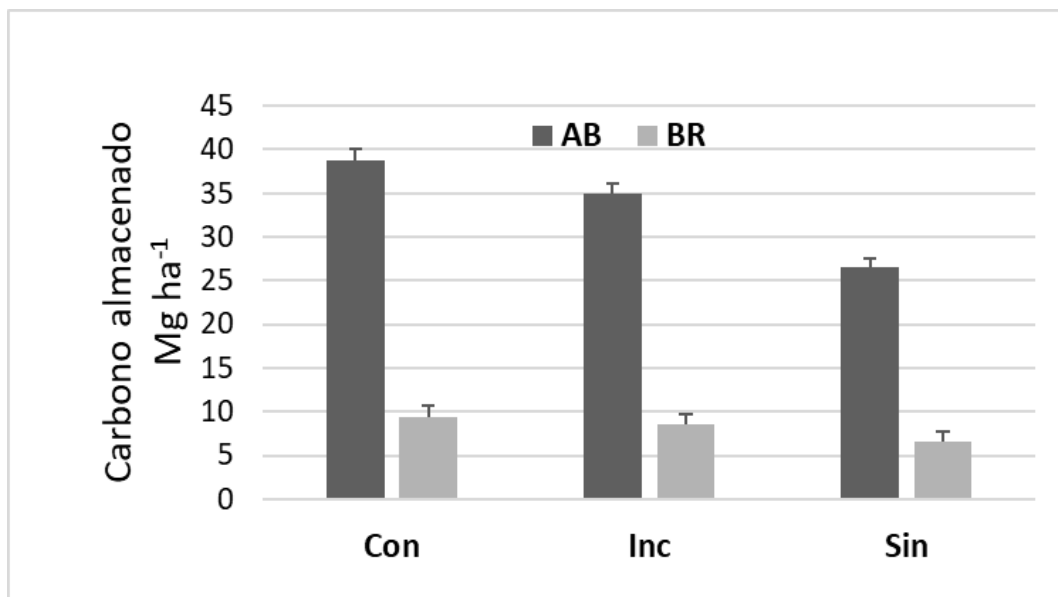


Figura 12. Almacenamiento de carbono en biomasa aérea y biomasa de raíces con 3 diferentes tratamientos del fuego. Con: con quemas prescritas; Inc: incendios forestales; Sin: sin perturbación de fuego; AB: biomasa aérea; BR: biomasa de raíces.

4.3 Hojarasca, mantillo y material leñoso caído

A pesar de que los incendios forestales terminan con gran parte de la biodiversidad del ecosistema, no se obtuvieron diferencias significativas en el contenido de carbono de materia orgánica, para el C en hojarasca se obtuvo entre 1.73 y 2.55 t C ha^{-1} , teniendo el mayor contenido de C los sitios sin perturbación de fuego (Cuadro 4). En mantillo, los sitios con y sin quemas prescritas tuvieron mayor cantidad de carbono (1.87 y 2.10 t C ha^{-1} , respectivamente) comparado con sitios afectados por incendios forestales, en los cuales almacenaron la más baja cantidad de C (0.70 t C ha^{-1}).

El almacenamiento de C en hojarasca varió entre 3.6 y 4.8 t C ha^{-1} sin un efecto significativo de quemas prescritas (Cuadro 4). En mantillo, sitios con quemas prescritas tuvieron mayor cantidad de carbono (4.0 t C ha^{-1}) comparado con incendios forestales (1.4 t C ha^{-1}). La cantidad de carbono en combustibles forestales varió de 0.9 a 3.8 t C ha^{-1} , no se registró diferencias significativas entre los diferentes tratamientos del uso del fuego (Cuadro 4).

La cantidad de carbono en el material leñoso caído varió de 0.48 a 1.04 t C ha^{-1} , no se registró diferencias significativas entre los diferentes tratamientos de quemas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Análisis de medias en hojarasca, mantillo y materia leñosa caída (MLC).

Reservorio de Carbono	Tratamiento de quema	N	Media (Mg C ha ⁻¹)	Error estándar	95% del IC para la media	
					Límite inferior	Límite superior
Hojarasca	Con	7	1.73	0.24	1.14	2.31
	Sin	7	2.55	0.34	1.71	3.38
	Inc	7	1.98	0.24	1.41	2.56
	Total	21	2.09	0.17	1.73	2.44
Mantillo	Con	7	1.87	0.57	0.48	3.25
	Sin	7	2.10	0.56	0.73	3.47
	Inc	7	0.70	0.15	0.34	1.06
	Total	21	1.56	0.29	0.95	2.16
MLC	Con	7	1.37	0.48	0.18	2.56
	Sin	7	0.48	0.19	0.01	0.95
	Inc	7	1.04	0.67	-0.61	2.69
	Total	21	0.96	0.28	0.37	1.55

Mg C Hoj/ha: Mega gramo de carbono por hectárea en hojarasca, SIN: sin perturbación de fuego, CON: sitios con quemas prescritas, INC: sitios con incendios forestales. N: número de muestras. IC: intervalo de confianza (tukey, $p < 0.05$).

4.4 Carbono almacenado en suelo

4.4.1 Carbono almacenado en los diferentes sitios

El suelo es el sumidero más grande de carbono orgánico en la biota terrestre. En este estudio, la mayor cantidad de carbono orgánico se registró en los sitios con quemas prescritas con 61.92 t C ha⁻¹ (promedio de 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidades) y la cantidad menor se registró en sitios sin quemas (48.10 t C ha⁻¹) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Análisis de medias en los sitios en Mg C ha⁻¹ en suelo.

Tratamiento de quema	N	Media (Mg C ha ⁻¹)	Error estándar	95% del IC para la media	
				Límite inferior	Límite superior
Con	7	61.92 ^a	2.75	56.45	67.38
Sin	7	56.21 ^{ab}	2.64	50.96	61.47
Inc	7	48.10 ^b	1.84	44.43	51.76

Mg C Hoj/ha: Mega gramo de carbono por hectárea en hojarasca, SIN: sin perturbación de fuego, CON: sitios con quemaduras prescritas, INC: sitios con incendios forestales. N: número de muestras, IC: intervalo de confianza. Medias en la misma columna con letras distintas difieren estadísticamente (Tukey, $p < 0.05$).

4.4.2 Carbono almacenado en tres diferentes profundidades de suelo

Respecto a las profundidades, en el Cuadro 6 se observa que la mayor cantidad de carbono se encuentra en los primeros 10 cm de suelo con 66.8 t C ha⁻¹, registrando así, diferencias significativas entre cada una de las profundidades.

Cuadro 6. Análisis de medias en diferentes profundidades en Mg C ha⁻¹ en suelo.

Profundidad	N	Media		95% del IC	
		Mg C ha ⁻¹	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
10	7	66.83 a	2.81	61.24	72.41
20	7	52.34 b	2.20	47.96	56.73
30	7	47.05 b	1.95	43.17	50.94

Mg C ha⁻¹: megagramo de carbono por hectárea; 10: 0-10 cm de profundidad; 20: 10-20 cm de profundidad; 30: 20-30 cm de profundidad; N: número de muestras; IC: intervalo de confianza. Medias en la misma columna con letras distintas difieren estadísticamente (Tukey, $p < 0.05$).

La menor cantidad de carbono orgánico del suelo se encontró entre los 20 a 30 cm de suelo (47.05 Mg C ha⁻¹).

4.5 Densidad aparente

La densidad aparente ayuda a determinar el grado de compactación del suelo, en otras palabras entre más alto sea el dato, indicará que existe mayor cantidad de partículas desueltas, y por lo consiguiente, mayor compactación, afectando la retención de humedad y el crecimiento de raíces. Para esta investigación se obtuvieron diferencias significativas entre las profundidades (Cuadro 7) y entre sitios (Cuadro 8); para las diferentes profundidades se registró mayor densidad en la profundidad de 20

a 30 cm con 1.34 g/cm³ y menor densidad en los primeros 10 cm de suelo con 1.23 g/cm³.

Cuadro 7. Análisis de medias de densidad aparente en g/cm³ en tres diferentes profundidades.

Profundidad	N	Media (g/cm ³)	Error estándar	95% IC	
				Límite inferior	Límite superior
10	7	1.23 a	0.03	1.18	1.28
20	7	1.3 ab	0.03	1.25	1.36
30	7	1.34 b	0.02	1.29	1.38

10: 0-10 cm de profundidad; 20: 10-20 cm de profundidad; 30: 20-30 cm de profundidad; N: número de muestras; IC: intervalo de confianza. Medias en la misma columna con letras distintas difieren estadísticamente (Tukey, p<0.05).

Cuadro 8. Análisis de medias de densidad aparente (g/cm³) entre sitios.

Sitio	N	Media (g/cm ³)	Error estándar	95% IC	
				Límite inferior	Límite superior
Sin	7	1.30 a	0.023	1.26	1.35
Con	7	1.35 b	0.023	1.31	1.40
Inc	7	1.21 b	0.030	1.15	1.27

Sin: sin perturbación de fuego; Con: con quemas prescritas; Inc: incendios forestales; N: número de muestras; IC: intervalo de confianza. Medias en la misma columna con letras distintas difieren estadísticamente (Tukey, p<0.05).

Para el caso de los sitios, se observan diferencias significativas entre los sitios sin quemas prescritas y los sitios con quemas prescritas e incendios forestales, obteniendo 1.30 g/cm³ para los sitios sin perturbación de fuego y 1.21 g/cm³ para los sitios con incendios forestales.

4.6 Potencial de hidrógeno (pH)

Para el análisis del indicador de pH, se presentaron diferencias significativas entre los sitios sin perturbación de fuego con 4.75 y quemas prescritas con 4.74 respecto a los sitios con incendios forestales con 4.45; sin embargo, todos los sitios se encuentran dentro del rango de suelos ácidos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Análisis de medias de pH entre sitios.

Sitio	N	Media pH	Error estándar	95% IC	
				Límite inferior	Límite superior
Sin	7	4.75 a	.044	4.66	4.83
Con	7	4.74 a	.044	4.65	4.82
Inc	7	4.45 b	.044	4.36	4.54

Sin: sin perturbación de fuego; Con: con quemas prescritas; Inc: incendios forestales; N: número de muestras; IC: intervalo de confianza; Medias en la misma columna con letras distintas difieren estadísticamente (Tukey, $p < 0.05$).

En cuanto al pH, de acuerdo a las profundidades, se puede observar en el Cuadro 10 que no existieron diferencias significativas entre las tres diferentes profundidades, obteniendo similitud entre las cifras encontradas de pH. Para los primeros 10 cm del suelo, se registró 4.65, para los 10 a 20 cm de profundidad el pH bajo a 4.63 y de los 20 a 30 cm de profundidad aumentó a 4.66 de pH.

Cuadro 10. Análisis de medias de pH en tres diferentes profundidades.

Profundidad	N	Media pH	Error estándar	95% IC	
				Límite inferior	Límite superior
10	7	4.65	.044	4.56	4.73
20	7	4.63	.044	4.54	4.71
30	7	4.66	.044	4.57	4.75

10: 0-10 cm de profundidad; 20: 10-20 cm de profundidad; 30: 20-30 cm de profundidad; N: número de muestras; IC: intervalo de confianza. Medias en la misma columna con letras distintas difieren estadísticamente (Tukey, $p < 0.05$).

4.7 Potencial de reducción-oxidación (Eh)

De acuerdo a los resultados encontrados en el potencial de la reducción-oxidación, en los tres diferentes sitios existen diferencias significativas entre los sitios con incendios forestales con 15.51 mV de Eh respecto a los sitios con quemas prescritas con 136.14 mV Eh y los sitios sin perturbación de fuego con 133.53mV Eh (Cuadro 11).

Cuadro 11. Análisis de medias de potencial redox (Eh) entre sitios.

Sitio	N	Media Eh	Error estándar	95% IC	
				Límite inferior	Límite superior
Inc	7	151.51 a	1.91	147.75	155.27
Con	7	136.14 b	1.91	132.37	139.90
Sin	7	133.53 b	1.91	129.76	137.29

Sin: sin perturbación de fuego; Con: con quemas prescritas; Inc: incendios forestales; N: número de muestras; IC: intervalo de confianza; Medias en la misma columna con letras distintas difieren estadísticamente (Tukey, $p < 0.05$).

Para el caso del análisis de las profundidades y el Eh no se encontraron diferencias significativas, sin embargo, dónde se encontró mayor Eh fue en la capa de 10 a 20 cm de suelo con un valor de 142.13 Eh, mientras que el Eh menor se encontró en los primeros 10 cm de suelo con 138.63 Eh (Cuadro 12).

Cuadro 12. Análisis de medias de potencial redox (Eh) en tres diferentes profundidades.

Profundidad	N	Media Eh	Error estándar	95% IC	
				Límite inferior	Límite superior
10	7	138.63	1.91	134.86	142.38
20	7	142.13	1.91	138.36	145.88
30	7	140.43	1.91	136.66	144.18

10: 0-10 cm de profundidad; 20: 10-20 cm de profundidad; 30: 20-30 cm de profundidad; N: número de muestras; IC: intervalo de confianza.

4.8 Índice de Shannon

El índice de Shannon hace referencia a la riqueza de especies y la abundancia del sitio, por lo que se establece una relación entre el número de especies con la proporción del número de individuos de cada especie. De acuerdo a lo encontrado, en el Cuadro 13 se muestra que existe mayor riqueza en los sitios con quemas prescritas, con un índice de 1.26, y menor riqueza en los sitios con incendios forestales. Sin embargo, estos datos se encuentran entre una riqueza media a baja, comparándolo con los rangos de índice que va de 0 (menor riqueza) a 3 (mayor riqueza).

Cuadro 13. Índice de Shannon

Sitio	N	Media	Error estándar	95% IC	
				Límite inferior	Límite superior
Con	7	1.26	0.12	0.97	1.55
Sin	7	1.14	0.13	0.81	1.47
Inc	7	0.36	0.10	0.12	0.59

Sin: sin perturbación de fuego; Con: con quemas prescritas; Inc: incendios forestales; N: número de muestras; IC: intervalo de confianza

4.9 Índice de Simpson

Para el índice de dominancia de Simpson, el cual indica posibilidad de que dos individuos de los sitios seleccionados al azar sean de la misma especie, va de 0 a 1 (siendo el 1 con mayor dominancia), se encontró que los sitios con incendios forestales fueron los más altos con un índice de 0.67 y el más bajo los sitios con quemas prescritas con un valor de 0.37 (Cuadro 14).

Cuadro 14. Análisis de medias de los índices Simpson.

Sitio	N	Media	Error estándar	95% IC	
				Límite inferior	Límite superior
Con	7	0.37	0.06	0.22	0.52
Sin	7	0.42	0.06	0.28	0.56
Inc	7	0.67	0.12	0.37	0.97

SIN: sin perturbación de fuego, CON: sitios con quemas prescritas; INC: sitios con incendios forestales; N: número de muestras; IC: intervalo de confianza.

En los incendios forestales se ven afectadas muchas especies de los ecosistemas, dejando vivos solo a las especies más resistentes, esto se atribuye por qué el índice de dominancia es mayor en los sitios con incendios forestales, caso contrario a los sitios con y sin quemas prescritas donde existe un número mayor de especies presentes.

4.10 Índice de valor de importancia

De acuerdo a la Figura 13, se observa el índice de valor de importancia donde se identificaron 10 especies forestales, los de mayor importancia está entre *Quercus magnoliifolia* N. y los *Pinus oocarpa* S., que destacan en los sitios con quemas prescritas con un valor de importancia de 48.35 y 43.39, sin perturbación de fuego con 44.16 y 40.31 y en incendios forestales con 44.33 y 21.85, respectivamente. Estos resultados muestran que la formación vegetal es predominante por *Quercus*

magnoliifolia N. y *Pinus oocarpa* S. siendo los más importantes dentro de los tres tipos de sitios.

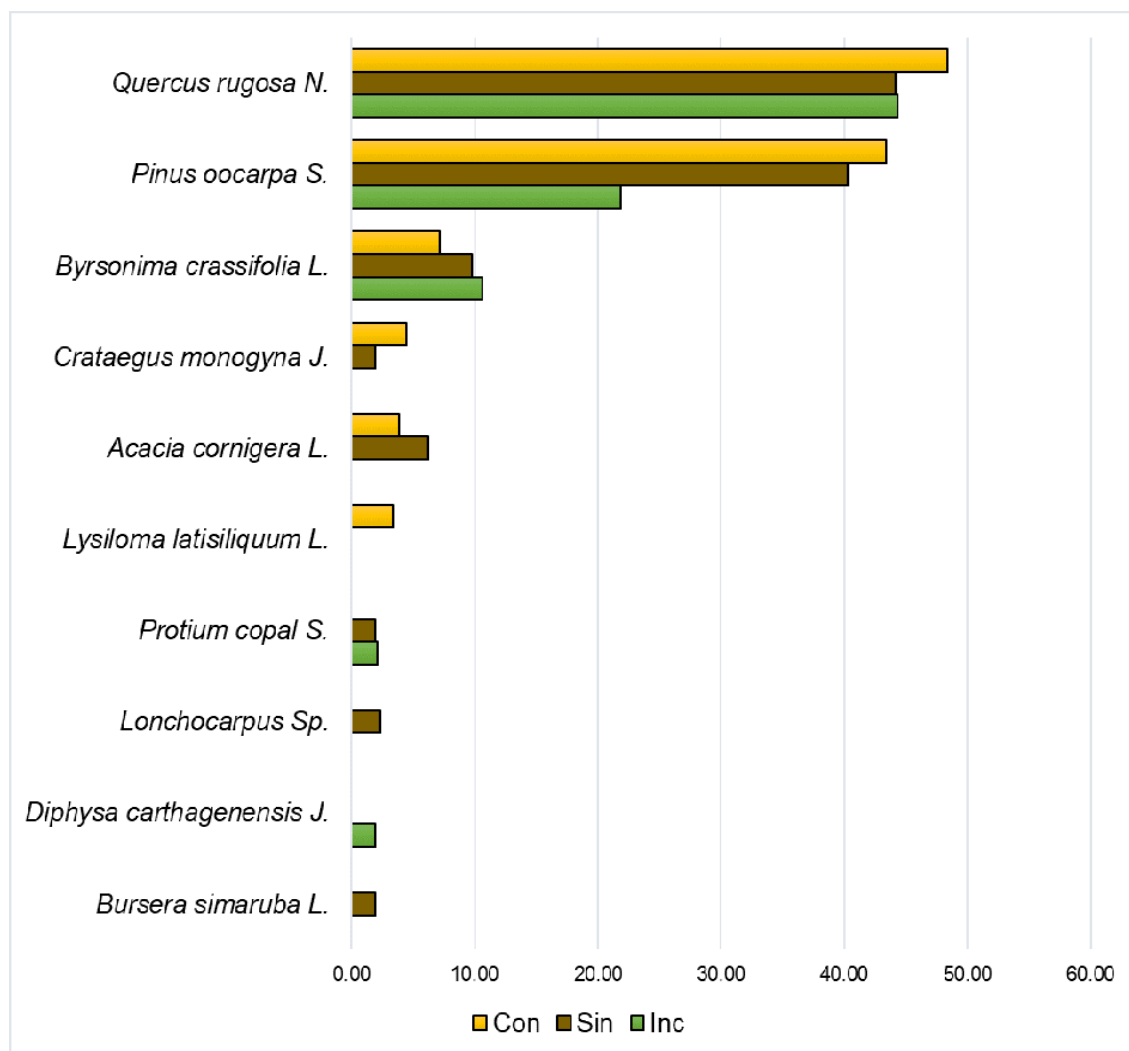


Figura 13. Índices de valor de importancia en tres diferentes tratamientos del fuego. Con: con quemas prescritas; Inc: incendios forestales; Sin: sin perturbación de fuego.

4.11 Índices de similitud entre sitios

Para los índices de similitud de Sorensen, en el Cuadro 15, se encontró mayor similitud entre los sitios con quemas prescritas y los sitios sin perturbación de fuego teniendo el 78% de similitud, de acuerdo al porcentaje de Sorensen y para Jaccard el 64% para la similitud. La similitud más baja fue entre los sitios con incendios forestales y sin perturbación de fuego con 55% de similitud de Sorensen y 38% de similitud de Jaccard, evidenciando con ello que, las quemas prescritas afectan tan solo un 22% en la similitud entre los sitios sin quemas prescritas.

Cuadro 15. Análisis del porcentaje de similitud entre los sitios con los índices de Sorensen y Jaccard.

Sitio	Con	Sin	Inc
		Sorensen (Jaccard)	Sorensen (Jaccard)
CON		78 (64)	59 (42)
SIN	-		55 (38)
INC	-	-	

SIN: sin perturbación de fuego, CON: sitios con quemas prescritas, INC: sitios con incendios forestales. Números dentro de paréntesis es índice de Jaccard

4.12 Correlación de variables

La correlación entre variables es de gran importancia para saber cómo afecta la relación de dos variables al ecosistema. A partir de esto, se realizó una correlación de Pearson bajo un análisis multivariado tomando como variable clave al carbono orgánico del suelo, donde se puede observar que la mayor relación se registra entre el índice de Shannon y el tipo de quema con un -0.647, seguido de la relación entre el índice de Shannon y el índice de Simpson con -0.612 y la relación de densidad aparente y altura donde se registró 0.585.

4.13 Modelo matemático

De acuerdo a los análisis estadísticos realizados, a partir de un análisis multivariado que se puede observar en el Cuadro 16, se tomó como variable dependiente el carbono orgánico del suelo. Se tomó como variables independientes altura, índice de Simpson, Accesibilidad, materia muerta (MM) donde se incluye, hojarasca, mantillo y material leñoso caído, edad, tipo de bosque, carbono en biomasa total (biomasa de raíces y biomasa aérea) elevación, presencia de ganadería, altura, diámetro de copa, índice de Shannon, densidad aparente, porcentaje de la pendiente del sitio y tipo de quema. Se obtuvo un R^2 de 0.089 con una significancia de 0.05% como puede observarse en el Cuadro, del cual se obtuvo el siguiente modelo matemático base.

$$Y = a + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_{14}X_{14} \quad (13)$$

Una vez hecho el análisis multivariado, el modelo a seguir con la variable dependiente de % de carbono orgánico en el suelo es:

$$\begin{aligned}
 Y = & 5.7 + (-0.023) TQ + (-0.544) E + (-0.308) G + (-0.650) \\
 & ED + (0.196) DA + (-0.066) CBA + (0.462) h + (0.650) DC + \\
 & (0.469) MM + (-0.353) PP + (0.862) AC + (-0.037) \\
 & TB + (-0.405) Sh + (0.008) Si
 \end{aligned} \quad (14)$$

Donde:

Y: % de carbono orgánico de suelo

TQ: Tipo de quema

E: Elevación

G: Ganadería

ED: Edad

DA: Densidad aparente

CBt: Carbono en biomasa área total

h: Altura

DC: Diámetro de copa

MM: Materia muerta

PP: Porcentaje de pendiente

AC: Accesibilidad

TB: Tipo de bosque

Sh: Índice de Shannon

Si: Índice de Simpson

Cuadro 16. Correlación de Pearson

VARIABLES	% COS	TQ	% Elevación	Ganadería	Edad	DA	CB total	Altura	D Copa	MM	% de pendiente	Accesibilidad	TB	Shannon	Simpson
% COS	1.000	-0.280	-0.375	-0.415	-0.109	0.112	0.381	0.284	0.406	0.147	-0.125	0.060	-0.221	0.189	0.024
TQ	-0.280	1.000	0.507	0.129	0.244	-0.252	-0.226	-0.246	-0.108	-0.297	-0.148	0.305	0.147	-0.647	0.418
% Elevación	-0.375	0.507	1.000	-0.120	-0.127	-0.013	0.223	0.150	0.226	0.014	-0.103	0.093	0.179	-0.390	0.452
Ganadería	-0.415	0.129	-0.120	1.000	-0.089	0.412	0.500	0.356	0.428	0.058	0.492	0.479	0.019	-0.131	-0.174
Edad	-0.109	0.244	-0.127	-0.089	1.000	0.240	0.149	0.424	0.028	0.199	-0.545	-0.033	0.027	0.136	-0.189
DA	0.112	-0.252	-0.013	-0.412	0.240	1.000	0.414	0.582	0.232	0.103	-0.420	-0.732	0.241	0.041	0.044
CB total	0.381	-0.226	-0.223	-0.500	0.149	0.414	1.000	0.324	0.459	0.062	-0.238	-0.328	-0.015	0.236	-0.104
Altura	0.284	-0.246	-0.150	-0.356	0.424	0.582	0.324	1.000	0.135	0.286	-0.320	-0.486	-0.180	0.280	-0.059
D Copa	0.406	-0.108	-0.226	-0.428	0.028	0.232	0.459	0.135	1.000	-0.382	-0.199	-0.369	0.182	0.307	-0.264
MM	0.147	-0.297	-0.014	-0.058	0.199	0.103	0.062	0.286	-0.382	1.000	0.179	0.047	-0.153	0.263	-0.080
% de pendiente	-0.125	0.148	-0.103	0.492	-0.545	-0.420	-0.238	-0.320	0.199	0.179	1.000	0.239	0.075	-0.062	-0.259
Accesibilidad	0.060	0.305	0.093	0.479	-0.033	-0.732	0.328	0.486	0.369	0.047	0.239	1.000	-0.153	-0.062	-0.039
TB	-0.221	0.147	0.179	0.019	0.027	0.241	-0.015	-0.180	0.182	-0.153	0.075	-0.153	1.000	-0.220	-0.276
Shannon	0.189	-0.647	-0.390	-0.131	0.136	0.041	0.236	0.280	0.307	0.263	-0.062	-0.062	-0.220	1.000	-0.612
Simpson	0.024	0.418	0.452	-0.174	-0.189	0.044	-0.104	-0.059	-0.264	-0.080	-0.259	-0.039	-0.276	-0.612	1.000

También, se realizaron correlaciones con las mismas variables, pero cambiando la variable dependiente por carbono en biomasa total donde el R^2 para esta variable fue alto pues presenta 0.899 como se observa en el Cuadro 17, lo cual lo convierte en datos seguros para realizar un modelo matemático.

Cuadro 17. Resumen del modelo del % de carbono orgánico en el suelo (COS).

Modelo	R	R ²	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	.948 ^a	.899	.662	.39868	.899	3.795	14	6	.055

a. Predictores: (Constante), Simpson, Accesibilidad, MM, Edad, Tipo Bosque, C_Btotal, Elevación, Ganadería, Altura, D_Copa, Shannon, DA, % de pendiente, Tipo Quema

b. Variable dependiente: % COS

Otro modelo analizado fue con la variable dependiente de materia muerta (MM) donde se puede observar en el Cuadro 18, que el valor de R^2 fue de 0.804, dando así un 80% de posibilidad de llevar a cabo el modelo mediante la variable dependiente de MM

Cuadro 18. Resumen del modelo de MM.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl1	gl2	Sig. Cambio en F
1	.897 ^a	0.804	0.346	1.603	0.804	1.757	14	6	0.252

a. Predictores: (Constante), % COS, Simpson, Accesibilidad, Edad, Tipo_Bosque, C_Btotal, Elevación, D_Copa, % de pendiente, Shannon, Ganadería, Altura, DA, Tipo_Quema

b. Variable dependiente: MM

5. DISCUSIÓN

Los incendios forestales provocan un cambio en el ecosistema, al tener pérdidas vegetativas, se pierden muchos nutrientes, entre ellos, el carbono. Yescas-Coronado *et al.*, (2018) mencionan que los incendios afectan el almacén de carbono independientemente del tipo de ecosistema. Por ello, trabajar con quemas prescritas ayuda a evitar fuegos catastróficos y almacenar carbono en los diferentes reservorios terrestres (Wright *et al.*, 2021). Sin embargo, hay autores que mencionan lo contrario, como Moreno *et al.*, (2020) donde atribuyen mayor contaminación de CO₂ por la realización de las quemas prescritas, pero (CONAFOR, 2010) menciona que, en bosques dependientes al fuego, es indispensable esta técnica, pues esto ayuda a la supervivencia de las especies nativas del ecosistema.

La quema prescrita es una técnica que se realiza en ecosistemas dependientes del fuego. Se realizan monitoreos frecuentemente en la velocidad y dirección del viento, temperatura, velocidad de propagación del fuego, altura y longitud de llama, entre otros elementos más; esta técnica se ha empleado para hacer mermas en los combustibles forestales, aclareo de bosques, control de plagas y enfermedades y para intensificar emergencias de plántulas arbóreas. (Kaufmann *et al.*, (2003) mencionan que el fuego controlado tiene un enfoque amplio, para enfrentar temas relacionados con el fuego, tomando a consideración interacciones del ámbito ambiental, social, cultural biológico, económica y política, donde este último tiene mucha influencia en muchos países donde también está prohibida la quema prescrita, aun sabiendo que existen ecosistemas dependientes del fuego (Myers, 2006).

5.1 Estructura

La altura de los árboles es un indicador muy importante para el bosque, puesto que las perturbaciones de fuego afectan en gran medida al soto bosque y, si la intensidad del fuego es muy severa, puede alcanzar la copa y con ello afectar la supervivencia de los árboles; en este estudio la máxima altura se obtuvo en los sitios con quemas prescritas con 13 m. Méndez Osorio *et al.* (2018) registró alturas de 16 m en ecosistemas forestales de coníferas-latifoliadas. Martínez-López y Acosta-Ramos (2014) presentaron una media para *Quercus rugosa* de 19 m tomando como muestra 54 árboles en Oaxaca, México; sin embargo, existen factores climáticos que alteran el desarrollo en los árboles como la temperatura y la exposición a la luz solar. Por ejemplo, en bosques maduros de EEUU, de acuerdo a Burrascano *et al.*, (2013), existen menos árboles muertos en ecosistemas con temperaturas más cálidas. Moctezuma *et al.*, (2015) reportan que especies de *Quercus* pueden llegar a alcanzar hasta 25 m de altura. (Gómez-Mendoza & Rodríguez-Trejo, 2021) mencionan que especies del género de *Quercus* y *Pinus* alcanzan cierto porcentaje de resistencia al

fuego en la etapa de madurez debido al desarrollo de la altura de los árboles.

El diámetro de copa varió de acuerdo con las especies, pues el desarrollo del fuste es diferente en cada tipo de especie arbórea. Méndez Osorio *et al.* (2018) registraron un diámetro de copa para *Pinus oocarpa* de 72 m y *Quercus rugosa* de 88 m, los cuales son las especies más importantes dentro de los 21 sitios muestreados. Flores Garnica *et al.* (2010) registraron un diámetro de copa para especies de pino de 16 m como máximo y para encinos de 12 m en un bosque con quema controlada en Chihuahua. Los autores atribuyen estos datos a que las especies de pino y encino son de fustes bajos, por lo que su densidad de copa es pequeña. Sin embargo, existen beneficios cuando se quema la parte baja de la copa, ya que se eliminan hojas poco eficientes en la fotosíntesis, teniendo tasas de respiración alta comparada con las hojas jóvenes (Kozlowski & Pallardy, 1996).

De acuerdo a las mediciones del área basal, se obtuvo mayor vigor basal en los sitios con quemas prescritas con 14.50 m², los cuales se encuentran dentro de los resultados de Martínez Santiago *et al.*, (2021) quienes reportan entre 12 a 37 m² ha⁻¹ en ecosistemas forestales de coníferas latifoliadas. Quintero-Gradilla *et al.*, (2019) mencionan que, después de 28 años donde hubo un incendio, los ecosistemas de pinos pueden llegar a ser como un ecosistema de 60 años respecto al área basal, riqueza y diversidad de especies. Según Jadán *et al.* (2017) existe una gran relación entre el área basal y la biomasa aérea, pero también se atribuye al cambio en las diferencias de altitudes, pues la actividad fotosintética disminuye a mayor altitud ya que en los árboles existe mayor transpiración y el aumento en biomasa es menor (Báez *et al.*, 2015). A pesar de estos factores ambientales, también influye el fuego, el cual afecta a la estructura boscosa de acuerdo a su severidad. Urrutia-Estrada *et al.* (2018) indicaron que los cambios en la estructura fueron positivos donde existió presencia de fuego con baja severidad.

Valladares (2006) menciona que el fuego puede mejorar la distribución de radiación solar en el dosel y aumenta los procesos fisiológicos y reproductivos de las especies, afectando positiva o negativamente de acuerdo al tamaño del dosel. Otro factor, de gran importancia, que afecta negativamente a los índices ecológicos es el tiempo e intensidad del fuego que se presenta dentro de los sitios. Se sabe que los incendios forestales, normalmente, son de alta intensidad y el tiempo de fuego puede ser prolongado (Flores-Rodríguez, *et al.*, 2020). En este sentido, la quema prescrita es de menor severidad y de tiempo corto, lo cual no deteriora la diversidad biológica vegetal, teniendo un efecto neutro o positivo en el ecosistema (Vaquero Almárcegui & Badía Villas, 2016).

5.2 Almacenamiento de carbono en biomasa total

Los ecosistemas de pino-encino son árboles muy resistentes a los incendios forestales, pues estas especies tienen el mecanismo de rebrotar ante la piro-

resistencia; estas especies desarrollan cortezas gruesas, la cual protege al árbol, las copas se incineran, pero se mantiene con vida la cepa que está formada por lignotuber que actúa como almacén de agua y nutrientes para asegurar la supervivencia de los árboles (Garriga Pérez, 2018; Molinas, 1993).

Respecto a la cantidad de carbono almacenado en biomasa encontrado en este estudio, se reportaron entre 26.1 a 42.0 t C ha⁻¹, otros autores como Castañeda-González, *et al.* (2012) reportan para bosques de encino 13.5 Mg C ha⁻¹ en cambio Fragoso (2003) registró 19.00 Mg C ha⁻¹ pero Aryal *et al.*, (2018) registraron 46.71 Mg C ha⁻¹ en área forestal con enfoque ganadero, todo esto depende, en gran medida, de las condiciones en las que se encuentran los sitios muestreados, pues sitios con presencia de incendios forestales el carbono por hectárea es muy bajo a diferencia de sitios que cuentan con algún tipo de manejo forestal.

Sin embargo, gran parte del desarrollo de la planta y la retención del carbono orgánico tiene mucha relación con la calidad de árboles. Cuando existen condiciones adecuadas en el ecosistema, esto se refleja teniendo árboles vigorosos, esto concuerda con lo dicho por Hernández-Pérez *et al.*, (2017) quienes mencionan que donde existen escenarios climáticos con aumento en temperaturas y poca precipitación, trae consigo la aparición de enfermedades o plagas que afectan los ecosistemas forestales mexicanos.

El fuego incontrolado afecta de manera superficial y subterránea dañando así a las raíces, por lo que los impactos del fuego pueden reducir el crecimiento de este reservorio. Sayer and Haywood, (2006), Rodríguez-Laguna *et al.*, (2009), mencionan que un 15% de la biomasa total corresponde a la raíz dependiendo en gran medida del tipo de especie.

Según Aryal, *et al.*, (2019), en sitios bajo condiciones de árboles dispersos, se registraron 2.57 t C BR ha⁻¹ y en sistemas de pastoreo abierto 1.47 t C BR ha⁻¹. Estos datos están por debajo de lo registrado en los sitios muestreados en esta investigación donde se obtuvo 10.1 t C BR ha⁻¹ como mayor dato mientras la menor cantidad fue de 6.5 toneladas ha⁻¹, pero realizando una comparación con la investigación realizadas por Rodríguez-Laguna, *et al.*, (2009) quienes reportaron 16.51 t C BR ha⁻¹, estos son mayores; sin embargo, no reportan algún dato si existió antes un incendio forestal o si son sitios sin perturbación de fuego.

5.3 Materia muerta

Los datos registrados en esta investigación con los de Flores-Garnica *et al.*, (2018) son bajos ya que estos autores obtuvieron 6.91 Mg C ha⁻¹ y 4.25 Mg C ha⁻¹ en hojarasca y 5.88 Mg C ha⁻¹ y 1.39 Mg C ha⁻¹ en la capa de mantillo. Sin embargo, Álvarez-Arteaga *et al.*, (2013) reportaron 2.74 Mg C ha⁻¹ como media en mantillo, aquí hay que tomar en consideración que este autor considera a la materia orgánica a la hojarasca y el mantillo como una sola muestra. La división de la materia orgánica

(hojarasca y mantillo) se hace a partir de la metodología del INFyS, (2010) donde se clasifica por hojarasca y mantillo, en reservorios separados.

Para el reservorio de material leñoso caído, Velázquez, (2015) reportó, para bosques de pino con incendios forestales, $1.13 \text{ Mg C ha}^{-1}$, en este mismo trabajo se reportó $0.91 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en sitios con incendios forestales¹ y $3.47 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en sitios con quemas prescritas. La cantidad de carbono en este reservorio depende en gran medida a la descomposición de madera que tiene su efecto en la densidad que tiene la madera de cada especie arbórea (Aryal *et al.*, 2019). Cornwell *et al.*, (2009) y Kahl *et al.*, (2017) mencionan que, la descomposición de la materia muerta también depende del tipo de clima, de las especies arbóreas, del tamaño de la MM de acuerdo a su tamaño al morir y, por su puesto, de la densidad de la madera.

5.4 Suelo

El suelo es el reservorio más grande en el almacén de carbono orgánico, en este sentido para este trabajo existió mayor almacén en los sitios con quemas prescritas con $61.91 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Velázquez (2015) registró, para bosques con perturbación de fuego de pino, $35.95 \text{ Mg C ha}^{-1}$, dichos datos se encuentran por debajo de acuerdo a los sitios con incendios forestales de este estudio, en donde se obtuvieron $56.21 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Sin embargo, en estudios de Vaquero Almárcegui & Badía Villas, (2016), en España, a 1875 msnm en terrenos con pastizales, se registró una disminución en COS en los 3 primeros cm del suelo con quemas prescritas. Pero Aznar *et al.*, (2016) reportó que a esas profundidades el suelo no se ve afectado por los fuegos controlados.

Los incendios forestales también afectan principalmente los primeros 5 cm del suelo donde se produce una merma de diferentes nutrientes (Capulín Grande *et al.*, 2010), lo cual concuerda con los datos observados en este trabajo donde se registró un cambio en la cantidad de carbono en sitios con incendios forestales. El resultado de mayor almacenamiento de carbono en los suelos de capas superiores obtenido en esta investigación concuerda con Vargas *et al.*, (2016) quienes registraron mayor almacenamiento de carbono en los primeros 15 cm del suelo.

Respecto a la densidad aparente del suelo, este se fue compactando a mayor profundidad. González Cueto y Herrera Suárez (2009), mencionan que la compactación puede llegar a afectar la producción a largo plazo, lo cual va muy relacionado con la conductividad eléctrica, que son índices importantes para determinar la propiedad física del suelo (Barra *et al.*, 2004) el cual permite que pueda tener mayor o menor movimiento de nutrientes en las diferentes capas de suelo.

5.5 Índices de Shannon y Simpson

De acuerdo a los datos registrados en el índice de Shannon, se comparó con los resultados de un bosque de pino del Valle de México que se encuentra dentro del

rango con un índice de 1.02 (Santibañez-Andrade *et al.*, 2015). Buendía-Rodríguez *et al.*, (2019), registraron un índice de 2.4 como el índice más alto y 1.78 el más bajo en el sur del estado de Nuevo León, siendo bosques bajo manejo forestal de asociaciones de pino-encino, encino-pino y algunas especies de los géneros *Abies*, *Pseudotsuga* y *Picea*, los cuales son un poco más altos a los registrados en este estudio. Amparito, *et al.*, (2018), en unidades muestreadas con alteraciones antropogénicas, reportó un índice de 1.44 en árboles y donde no existió alteraciones registró un índice más alto llegando a 3.42.

De acuerdo al índice de Simpson, si comparamos los resultados con los de Fernández-Hilario *et al.*, (2012) donde obtuvieron un índice de 0.91 en bosques secundarios húmedo-tropical en Perú, en este estudio se obtuvo menor dominancia con 0.67 en los sitios con incendios forestales. Jiménez *et al.*, (2020) mencionan que, en las áreas en donde existe una sola especie, el valor del índice será de uno, lo que confirma el por qué los datos son más altos en los sitios con incendios forestales donde existe menor cantidad de especies.

5.6 Índice de valor de importancia

Respecto a los índices de valor de importancia en relación con la ecología del fuego y sus repercusiones, son escasas puesto que existen reportes de que las quemas prescritas no afectan a la especie de *Quercus magnoliifolia* en cuanto a la supervivencia, ayudando también a su rebrote, debido a que esta técnica se realiza con un fuego a baja intensidad y severidad (Moctezuma *et al.*, 2015). Espinoza-Martínez *et al.*, (2008) mencionan que el fuego es muy importante pues ayuda al aumento de la diversidad de especies en el sotobosque. La aplicación futura de fuego controlado en un modelo moderno, será capaz de mejorar la biodiversidad ayudando también al bienestar humano (Kelly *et al.*, 2020) y mantener la diversidad en los ecosistemas (Wright *et al.*, 2021).

5.7 Índice de similitud de Jaccard y Sorensen

En bosques de Chipinque, México, se comparó un área sin restauración post -incendio y el otro con restauración post -incendios en bosques de pino-encino donde se obtuvo una similitud del 79% (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2008). Los autores atribuyeron a que la intervención (restauración) hace que se crea condiciones parecidas a las de un ecosistema maduro. López Martínez *et al.*, (2017) mencionan que el ecosistema forestal se recupera parcialmente en 19 años después de incendios forestales.

En el presente estudio, se reflejó que las quemas prescritas ayudaron al aumento de individuos de especies que fueron favorecidos por el fuego controlado. Espinoza-Martínez *et al.*, (2008) mencionan que el uso del fuego en baja intensidad puede ayudar al aumento de la diversidad de especies, contribuyendo a un mayor número de especies presentes por sitio. González-Tagle *et al.*, (2008) señalan que se debe considerar la incorporación de este tipo de perturbación en las prácticas del manejo de

un bosque donde exista especies que sean dependientes del fuego, pues ayuda a la regeneración de especies forestales. Cuando el régimen del fuego no se aplique de la manera correcta, este puede traer grandes desafíos para la conservación de la biodiversidad (Kelly, *et al.*, 2020).

6. CONCLUSIONES

Los resultados de la presente investigación demuestran que, el uso del fuego a través de la quema prescrita, conserva la biodiversidad vegetal al mismo grado de áreas sin perturbación de fuego y es mayor que el área con incendios forestales. El índice de Simpson demuestra que existe mayor dominancia, pero de pocas especies en el área con incendios forestales. Los coeficientes de similitudes mostraron mayor similitud entre los sitios con quemas prescritas y sin perturbación de fuego comparado a los sitios con incendios forestales donde la similitud fue baja. La pérdida de biodiversidad puede ser menor con quemas prescritas que con incendios forestales. Sin embargo, esto dependerá de la correlación del tipo de vegetación, nivel de combustible forestal, clima o topografía.

El efecto de las quemas prescritas varía según los reservorios de carbono en ecosistemas forestales de coníferas-latifoliadas. En mantillo y carbono orgánico del suelo, la quema prescrita tuvo un efecto significativo, con mayor carbono almacenado comparado con sitios sin perturbación o con incendios forestales. También se encontró que el almacenamiento de carbono en suelo es mayor en perfiles superiores conforme a las profundidades del suelo. La quema prescrita es útil, pues propicia al aumento de la biodiversidad en los ecosistemas dependientes del fuego, aumenta el carbono almacenado en suelo y pueden evitar los incendios forestales catastróficos que repercuten a la diversidad vegetal.

Con los resultados obtenidos se puede observar que el uso del fuego, bajo una metodología de prescripción, es benéfica para el ecosistema, siempre y cuando, éste sea adaptado al fuego, se tengan las condiciones ambientales favorables y exista un proceso de organización y capacitación previo. Esta acción puede ser replicada en otros sitios con condiciones similares a las establecidas en esta investigación.

7. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Espinoza-Vizcarra, D., Jurado-Ybarra, E., Aguirre-Calderón, O. A., & González-Tagle, M. A. (2008). Evaluación del estrato arbóreo en un área restaurada post-incendio en el Parque Ecológico Chipinque, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 14(2), 113-118.
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., Farguell, J., & Úbeda, X. (2016). Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). *Science of the total environment*, 572, 1329-1335.
- Alkama, R., & Cescatti, A. (2016). Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science*, 351(6273), 600-604.
- Álvarez-Arteaga, G., García Calderón, N. E., Krasilnikov, P., & García-Oliva, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 47(2), 171-180.
- Amparito, L., Armijos, J., Jaramillo, N., & Peña, J. (2018). Regeneración natural en zonas alteradas e identificación de especies forestales potenciales para recuperación hídrica en la microcuenca del río Jipiro, Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*. 8(2).
- Aryal, D. R., Gómez-González, R. R., Hernández-Nuriasmú, R., & Morales-Ruiz, D. E. (2019). Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. *Agroforestry systems*, 93(1), 213-227.
- Aznar, J. M., González-Pérez, J. A., Badía, D., & Martí, C. (2016). At what depth are the properties of a gypseous forest topsoil affected by burning? *Land Degradation & Development*, 27(5), 1344-1353.
- Báez, S., Malizia, A., Carilla, J., Blundo, C., Aguilar, M., Aguirre, N., Aquirre, Z., Álvarez, E., Cuesta, F., & Duque, Á. (2015). Large-scale patterns of turnover and basal area change in Andean forests. *PloS one*, 10(5), e0126594.
- Ballesteros, H. B., & Aristizabal, G. L. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Subdirección de Meteorología.
- Barra, J. E., Cruz, A. B., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2).
- Benjamín, J. A., & Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y bosques*, 7(1), 3-12.

- Bohn, F. J., Frank, K., & Huth, A. (2014). Of climate and its resulting tree growth: Simulating the productivity of temperate forests. *Ecological Modelling*, 278, 9-17.
- Bradstock, R., & Williams, R. (2009). How might management mitigate emissions from fires? *New Phytologist*, 183, 931-934.
- Brown, J. K., JK, B., & PJ, R. (1974). Eliminating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels.
- Buendía-Rodríguez, E., Treviño-Garza, E. J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., & Pompa-García, M. (2019). Estructura de un ecosistema forestal y su relación con el contenido de carbono en el noreste de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(54), 4-25.
- Burbano Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96.
- Burrascano, S., Keeton, W. S., Sabatini, F. M., & Blasi, C. (2013). Commonality and variability in the structural attributes of moist temperate old-growth forests: A global review. *Forest Ecology and Management*, 291, 458-479.
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111(1), 1-11.
- Capulín Grande, J., Mohedano Caballero, L., & Razo Zarate, R. (2010). Cambios en el suelo y vegetación de un bosque de pino afectado por incendio. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 79-87.
- Castañeda-González, J. C., Gallegos-Rodríguez, A., Sánchez-Durán, M., & Domínguez-Calleros, P. A. (2012). Biomasa aérea y posibles emisiones de CO₂ después de un incendio; caso del bosque "La Primavera", Jalisco, México. *Ra Ximhai*, 8(3), 1-15.
- Caviglia, O. P., Wingeyer, A. B., & Novelli, L. E. (2016). El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. *Serie de Extensión INTA Paraná*, 78, 27-32.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*, 143(1), 1-10.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., & Goodman, R. C. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- Cisneros-González, D., Zúñiga-Vásquez, J. M., & Pompa-García, M. (2018). Remote-sensed forest fire activity across Mexico and its sensitivity to drought. *Madera y bosques*, 24(3).

- Collalti, A., Trotta, C., Keenan, T. F., Ibrom, A., Bond-Lamberty, B., Grote, R., Vicca, S., Reyer, C. P., Migliavacca, M., & Veroustraete, F. (2018). Thinning can reduce losses in carbon use efficiency and carbon stocks in managed forests under warmer climate. *Journal of advances in modeling earth systems*, 10(10), 2427-2452.
- CONAFOR. (2010). Comisión Nacional Forestal. Incendios forestales Guía práctica para comunicadores. 1, 56 P.
- CONAFOR. (2011). Inventario Nacional Forestal y de Suelo. Manual y procedimientos para el muestreo de campo Re-muestreo.
- CONAFOR. (2013). Comisión Nacional Forestal. Incendios Forestales en México. Temporada 2013. 1(1), 21 p.
- CONAFOR. (2020). Comisión Nacional Forestal. Incendios forestales Guía práctica para comunicadores. 22 P.
- Cornwell, W. K., Cornelissen, J. H., Allison, S. D., Bausch, J., Eggleton, P., Preston, C. M., Scarff, F., Weedon, J. T., Wirth, C., & Zanne, A. E. (2009). Plant traits and wood fates across the globe: Rotted, burned, or consumed? *Global Change Biology*, 15(10), 2431-2449.
- Cottam, G., & Curtis, J. T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, 37(3), 451-460.
- Covalada, S., Paz, F., & Ranero, A. (2016). Carbono edáfico en Chiapas: Planteamiento de políticas públicas de mitigación de emisiones. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 97-112.
- Cuesta, A. V. del R. R., & del Rocío, A. V. (2018). Análisis de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante descomposición aeróbica de residuos industriales en mezcla con residuos pecuarios.
- Erb, K.-H., Kastner, T., Luysaert, S., Houghton, R. A., Kuemmerle, T., Olofsson, P., & Haberl, H. (2013). Bias in the attribution of forest carbon sinks. *Nature Climate Change*, 3(10), 854-856.
- Espinoza-Martínez, L. A., Rodríguez-Trejo, D. A., & Zamudio-Sánchez, F. J. (2008). Sinecología del sotobosque de *Pinus hartwegii* dos y tres años después de quemadas prescritas. *Agrociencia*, 42(6), 717-730.
- FAO. (2015). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura. *Global Forest Resources Assessment*.
- FAO. (2020a). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Principales resultados. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>

- Fernández-Hilario, R., Allca, D. A., & Marcelo-Peña, J. L. (2012). Composición y estructura de un bosque secundario en el Fundo Santa Teresa, Satipo, Perú. *Xilema*, 25(1), ág-43.
- Finegan, B., Medellín, C., & Delgado, D. (2020). Biodiversidad y servicios ecosistémicos de bosques de montaña de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica: Investigación aplicada a la gestión para la adaptación al cambio climático.
- Flores Garnica, J. G., Xelhuantzi Carmona, J., & Chávez Durán, Á. (2010). Monitoreo del comportamiento del fuego en una quema controlada en un rodal de pino-encino. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 16(1), 49-59.
- Flores-Garnica, J., Wong-González, J. C., & Paz-Pellat, F. (2018). Camas de combustibles forestales y carbono en México. *Madera y bosques*, 24(SPE).
- Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P., & Mena-Munguía, S. (2020). Revisión de métodos de sensores remotos para la detección y evaluación de la severidad de incendios forestales. *Gestión y Ambiente*, 23(2).
- Fondo mexicano para la conservación de la naturaleza. (2008). Memorias del taller realizado en el Campus Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.camafu.org.mx/wp-content/uploads/2017/12/Priorids_Investg_eBook_OK.pdf
- Fragoso, P. (2003). Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio Cerro Grande municipio de Tancítaro Michoacán, México. Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Agrobiología.
- Frêne, C., & Oyarzún, C. (2014). Manejo Integrado de Cuencas Forestales. *Ecología Forestal: Bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile*. Ediciones Universidad Austral de Chile, Ediciones Universidad Austral de Chile, 297-308.
- García-Silvera, E. E., Meléndez-Mogollón, I., Berrios-Rivas, A. T., & Pérez, A. (2021). Impacto del cambio climático en la salud humana. *Revista Venezolana de Salud Pública*, 9(2), 9-18.
- Garriga Pérez, L. (2018). Efecte de la gestió forestal post incendi en els mamífers a l'incendi del Vilar de Blanes. 45 P.
- Giardina, F., Konings, A. G., Kennedy, D., Alemohammad, S. H., Oliveira, R. S., Uriarte, M., & Gentine, P. (2018). Tall Amazonian forests are less sensitive to precipitation variability. *Nature Geoscience*, 11(6), 405-409.

- Gómez-Mendoza, F. F., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2021). Fuego, mortalidad y rebrotación en especies forestales de la Sierra Norte de Puebla. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732148-e2732148.
- González Cueto, I. C., C. E. González Cueto, & Herrera Suárez, M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2).
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93215937011>
- González-Tagle, M. A., Schwendenmann, L., Pérez, J. J., & Schulz, R. (2008). Forest structure and woody plant species composition along a fire chronosequence in mixed pine–oak forest in the Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico. *Forest Ecology and Management*, 256(1-2), 161-167.
- Gutiérrez, A. G., Armesto, J. J., Diaz, M. F., & Huth, A. (2014). Increased drought impacts on temperate rainforests from southern South America: Results of a process-based, dynamic forest model. *PloS one*, 9(7), e103226.
- Hernández-Pérez, A. L., Pérez-Miranda, R., Padilla, V. J. A., Romero-Sánchez, M. E., & González-Hernández, A. (2017). Modelación espacial de *Andricus quercus laurinus* Melika & Pujade-Villar (Hymenoptera: Cynipidae) En bosques de encino bajo escenarios de cambio climático en México. *Entomología Mexicana*, 4, 544-549.
- INECC, & PNUD. (2017). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Estudio para la identificación, caracterización y evaluación del balance entre las emisiones de GEIs y las zonas de captura y almacenamiento de carbono en zonas de ecosistemas costero/marinos del Pacífico, Golfo de México y la Península de Yucatán (Carbono azul). Proyecto 85488 “Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, 430 pp. Programa Mexicano del Carbono, A.C. México.
- INEGI. (2018). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Conjunto Nacional de Uso de Suelo y Vegetación a escala 1: 250,000, Serie V. DGG-INEGI, México.
- Jadán, O., Quizhpe, W., Pacheco, E., Aguirre, Z., González, M., Ponce, E., & Peña, D. (2017). Riqueza florística y carbono almacenado en tres pisos altitudinales de bosques amazónicos, Zamora Chinchipe, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 7(1).
- Jaramillo, V. J. (2004). El ciclo global del carbono. *Cambio climático: una visión desde México*, 77.
- Jiménez, A., Gabriel, J., & Tapia, M. (2020). *Ecología forestal: Una mirada desde la UNESUM*.

- Kahl, T., Arnstadt, T., Baber, K., Bässler, C., Bauhus, J., Borken, W., Buscot, F., Floren, A., Heibl, C., & Hessenmöller, D. (2017). Wood decay rates of 13 temperate tree species in relation to wood properties, enzyme activities and organismic diversities. *Forest Ecology and Management*, 391, 86-95.
- Kane, D., & Solutions, L. (2015). Carbon sequestration potential on agricultural lands: A review of current science and available practices. National Sustainable Agriculture Coalition Breakthrough Strategies and Solutions, LLC, 1-35.
- Kaufmann, K., Shlisky, A., & Kent, B. (2003). Integrating scientific knowledge into social and economic decisions for ecologically sound fire and restoration management. Proceedings of the 3rd International Wildland Fire Conference, Sydney, Australia.[online] URL: [http://www. fire. uni-freiburg. de/summit-2003/3-IWFC/Papers/3-IWFC-062-Kaufmann. pdf](http://www.fire.uni-freiburg.de/summit-2003/3-IWFC/Papers/3-IWFC-062-Kaufmann.pdf).
- Kelly, L. T., Giljohann, K. M., Duane, A., Aquilué, N., Archibald, S., Batllori, E., Bennett, A. F., Buckland, S. T., Canelles, Q., & Clarke, M. F. (2020). Fire and biodiversity in the Anthropocene. *Science*, 370(6519).
- Kent, M., & Coker, P. (1992). *Vegetation description and analysis, a practical approach*—John Wiley & Sons. New York, 319.
- Khouri, E. A., & Prendes, J. O. (2006). Efectos del fuego prescrito sobre matorral en las propiedades del suelo. *Invest. Agrar. Sist. Recur. For*, 15(3), 262-270.
- Kozłowski, T. T., & Pallardy, S. G. (1996). *Physiology of woody plants*. Elsevier.
- Lal, R., Negassa, W., & Lorenz, K. (2015). Carbon sequestration in soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 15, 79-86.
- Le Quéré, C., Raupach, M., Canadell, J., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T., Doney, S., Feely, R., & Foster, P. (2009). Trends in the sources and sinks of carbon dioxide, *Nat*.
- Lonsdale, J., Xenakis, G., Mencuccini, M., & Perks, M. (2015). A comparison of models for quantifying growth and standing carbon in UK Scots pine forests. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 8(5), 596.
- López Martínez, J. I., Treviño Garza, E. J., Aguirre Calderón, O. A., Buendía Rodríguez, E., & Ramos Reyes, J. C. (2017). Recuperación del estrato arbóreo de un ecosistema de alta montaña impactado por el fuego. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(41), 164-182.
- Martínez Santiago, D., Caballero Cruz, P., Filio Hernández, E., Garzón Trinidad, A., Ortiz Barrios, R., Cruz Santiago, O. L., Aparicio Cuevas, I., & Sandoval García, C. (2021). Guía de densidad para el manejo de rodales naturales de *Pinus rudis* Endl. En Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(64), 23-44.

- Martínez-López, J., & Acosta-Ramos, A. (2014). Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del diámetro del tocón para *Quercus laurina*, en Ixtlán, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 20(1), 59-70.
- Mataix-Solera, J., & Guerrero, C. (2007). Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*, 5-40.
- Méndez Osorio, C., Mora Donjuán, C. A., Alanís Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., & Pequeño Ledezma, M. Á. (2018). Fitodiversidad y estructura de un bosque de pino-encino en la Sierra Madre del Sur, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(50), 35-53.
- Moctezuma, M. Á. L., Trejo, D. A. R., Cortés, F. S., Chávez, V. A. S., & Sánchez, D. G. (2015). TOLERANCIA AL FUEGO EN *Quercus magnoliifolia*1. *Revista Árvore*, 39, 523-533.
- Molinas, M. L., V., D. (1993). «Lignotuber ontogeny in the cork-oak (*Quercus suber*; Fagaceae). I. Late embryo. ». 80, 172-181.
- Monreal, C., Etchevers, J., Acosta, M., Hidalgo, C., Padilla, J., López, R., Jiménez, L., & Velázquez, A. (2005). A method for measuring above-and below-ground C stocks in hillside landscapes. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(Special Issue), 523-530.
- Moreno, K., Salleses, L. F., Quiñones Martorello, A., Fernandez, M. E., & Gyenge, J. (2020). *Incendios Forestales: Factores que incrementan riesgos y cómo prevenirlos*. Ediciones INTA.
- National Oceanic & Atmospheric Administration. (2021). Tendencias del dióxido de carbono atmosférico. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html#mlo>
- Norma oficial Mexicana-021. (s. f.). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-RECNAT-2000, QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACION DE SUELOS. ESTUDIOS, MUESTREO Y ANALISIS INDICE.
- Orgiazzi, A., Bardgett, R. D., & Barrios, E. (2016). *Global soil biodiversity atlas*. European Commission.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ipcc.
- 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. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993.

- Peters, E. B., Wythers, K. R., Zhang, S., Bradford, J. B., & Reich, P. B. (2013). Potential climate change impacts on temperate forest ecosystem processes. *Canadian Journal of Forest Research*, 43(10), 939-950.
- Quintero-Gradilla, S. D., Jardel-Peláez, E. J., Cuevas-Guzmán, R., García-Oliva, F., & Martínez-Yrizar, A. (2019). Cambio postincendio en la estructura y composición del estrato arbóreo y carga de combustibles en un bosque de *Pinus douglasiana* de México. *Madera y bosques*, 25(3).
- Raj Aryal, D., Gómez Castro, H., Carmen García, N. del, José Ruiz, O. de J., Molina Paniagua, L. F., Jiménez Trujillo, J. A., Venegas Venegas, J. A., Pinto Ruiz, R., Ley de Coss, A., & Guevara Hernández, F. (2018). Potencial de almacenamiento de carbono en áreas forestales en un sistema ganadero. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(48), 150-180.
- Ramachandran Nair, P., Mohan Kumar, B., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of plant nutrition and soil science*, 172(1), 10-23.
- Rodríguez Trejo, D. A., Martínez Muñoz, P., & Lara, P. J. M. (2019). Efectos del fuego en el arbolado de un bosque tropical de pino y en el de una selva baja caducifolia en Villaflores, Chiapas. *Ciencia Florestal*, 29, 1033-1047.
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Treviño-Garza, E. J., & Razo-Zárate, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*, 5(3), 317-327.
- Rugnitz Tito, M., Chacón León, M., & Porro, R. (2009). Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Ministerio de Agricultura, Lima (Peru).
- Sanabria, C. A. V. (2015). Efecto de las actividades agropecuarias y forestales en el almacenamiento de carbono en ecosistemas de Villaflores, Chiapas.
- Sánchez Correa, J. J. (2011). Caracterización funcional de especies arbóreas relacionada con la recuperación del bosque tras el impacto del huracán Félix, y sus implicaciones en el manejo sostenible del recurso forestal, RAAN, Nicaragua. Proyecto Finnfor I y Finnfor II-CATIE.
- Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y bosques*, 14(1), 107-120.
- Santibañez-Andrade, G., Castillo-Argüero, S., & Martínez-Orea, Y. (2015). Evaluación del estado de conservación de la vegetación de los bosques de una cuenca heterogénea del Valle de México. *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 299-313.

- Sayer, M. A. S., & Haywood, J. D. (2006). Fine root production and carbohydrate concentrations of mature longleaf pine (*Pinus palustris* P. Mill.) as affected by season of prescribed fire and drought. *Trees*, 20(2), 165.
- SEMARNAT. (2000). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Selva El Ocote. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, D. F. México. 1(1), 220 p.
- SEMARNAT. (2001). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Estadísticas e indicadores de los recursos forestales. México, D. F.
- SEMARNAT. (2009). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Cuarto Informe Nacional de México al Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB). 1, 189 P.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 96.
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *nature*, 163(4148), 688-688.
- Sorensen, T. A. (1948). A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. *Biol. Skar.*, 5, 1-34.
- Thiele-Bruhn, S., Bloem, J., de Vries, F. T., Kalbitz, K., & Wagg, C. (2012). Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 523-528.
- TNC. (2004). The Nature Conservancy. El fuego, los ecosistemas y la gente. Una evaluación preliminar del fuego como un tema global de conservación. El fuego, los ecosistemas y la gente. Una evaluación preliminar del fuego como un tema global de conservación. 12 p. 12 p.
- Trejo, D. A. R., Muñoz, P. M., Luna, J. A. P., Lara, P. J. M., & López, J. D. C. (2019). Instructivo de quemas prescritas para el manejo integral del fuego O en el municipio de Villaflores y la Reserva de la Biosfera La Sepultura, Chiapas. 183.
- UACH–SEMARNAP. (1999). Universidad Autónoma Chapingo–Secretaría de Medio Ambiente Atlas forestal. México, D. F. México. 101 p.
- Urrutia-Estrada, J., Fuentes-Ramírez, A., & Hauenstein, E. (2018). Differences in floristic composition of *Araucaria-Nothofagus* forests affected by mixed levels of fire severity. *Gayana Botánica*, 75(2), 625-638.
- Valencia-A, S. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Botanical Sciences*, 75, 33-53.
- Valladares, F. (2006). La disponibilidad de luz bajo el dosel de los bosques y matorrales ibéricos estimada mediante fotografía hemisfé... *Ecología*, 20, 11-30.

- Van Wagner, C. (1982). Practical aspects of the line intersect method.
- Vaquero Almárcegui, E., & Badía Villas, D. (2016). Efectos directos e inmediatos de una quema prescrita de erizón (*Echinopartum horridum*) sobre las propiedades físicas y químicas del suelo (Torla, Pirineo Central).
- Vargas, I. A. D., Castillo, J. M. D., Cabrera, G. C. L., Leonel, H. F., & Peña, L. A. F. (2016). Cuantificación de carbono radical *Morella pubescens* H. & B. Ex Willd Wilbur en dos agroecosistemas (Nariño, Colombia). *Colombia forestal*, 19(2), 209-218.
- Vargas Rodríguez, J. J. (2017). Incendios forestales en Quito: Acción humana o acción de la naturaleza.
- Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., & Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North-Western Mexico. *Forests*, 8(8), 269.
- Verhulst, N., François, I., & Govaerts, B. (2015). Agricultura de conservación y captura de carbono en el suelo: Entre el mito y la realidad del agricultor.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Weart, S. R. (2008). *The discovery of global warming*. Harvard University Press.
- Wright, J., DeLaMater, D., Simha, A., Ury, E., & Ficken, C. (2021). Changes in Prescribed Fire Frequency Alter Ecosystem Carbon Dynamics. *Ecosystems*, 24(3), 640-651.
- Yescas-Coronado, P., Álvarez-Reyna, V. de P., Segura-Castruita, M. Á., García-Carrillo, M., Hernández-Hernández, V., & González-Cervantes, G. (2018). Variabilidad Espacial del Carbono Orgánico e Inorgánico del Suelo en la Comarca Lagunera, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 591-610.
- Zaninovich, S. C. (2017). Dinámica y almacenamiento del carbono en la necromasa y el suelo de ecosistemas forestales: Efecto de la degradación del bosque nativo y su reemplazo por plantaciones de *Pinus taeda* L. en el NE de Argentina.
- Zavala, L. M. M., de Celis Silvia, R., & López, A. J. (2014). How wildfires affect soil properties. A brief review. *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters*, 40, 311-331.

8. ANEXOS

Cuadro 19. Coeficientes para modelo matemático (% COS)

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados Beta	t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B		Orden cero	Correlaciones	
	B	Error estándar				Límite inferior	Límite superior		Parcial	Parte
(Constante)	5.704	2.180		2.617	0.040	0.370	11.038			
Tipo_Quema	-0.019	0.246	-0.023	-0.077	0.941	-0.620	0.582	-0.280	-0.032	-0.010
Elevación	-0.004	0.001	-0.544	-2.703	0.035	-0.007	0.000	-0.375	-0.741	-0.351
Ganadería	-0.456	0.329	-0.308	-1.385	0.215	-1.261	0.350	-0.415	-0.492	-0.180
Edad	-0.303	0.134	-0.650	-2.257	0.065	-0.632	0.025	-0.109	-0.678	-0.294
DA	0.845	1.180	0.196	0.717	0.501	-2.041	3.732	0.112	0.281	0.093
C_Btotal	-0.002	0.005	-0.066	-0.374	0.721	-0.015	0.011	0.381	-0.151	-0.049
Altura	0.161	0.072	0.462	2.242	0.066	-0.015	0.337	0.284	0.675	0.292
D_Copa	0.010	0.004	0.650	2.941	0.026	0.002	0.019	0.406	0.768	0.382
MM	0.162	0.077	0.469	2.109	0.079	-0.026	0.351	0.147	0.652	0.274
% de pendiente	-0.018	0.015	-0.353	-1.222	0.267	-0.055	0.018	-0.125	-0.447	-0.159
Accesibilidad	0.000	0.000	0.862	3.747	0.010	0.000	0.001	0.060	0.837	0.487
Tipo_Bosque	-0.031	0.168	-0.037	-0.186	0.859	-0.441	0.379	-0.221	-0.076	-0.024
Shannon	-0.550	0.389	-0.405	-1.415	0.207	-1.502	0.401	0.189	-0.500	-0.184
Simpson	0.022	0.756	0.008	0.029	0.978	-1.829	1.873	0.024	0.012	0.004

a. Variable dependiente: % COS

Cuadro 20. Coeficientes para modelo matemático (MM)

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	95.0% intervalo de confianza para B		Correlaciones		
	B	Error estándar	Beta			Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Parte
(Constante)	-19.414	10.078		-1.926	0.102	-44.074	5.246			
Tipo_Quema	-0.403	0.974	-0.170	-0.414	0.693	-2.786	1.980	-0.297	-0.167	-0.075
Elevación	0.012	0.007	0.565	1.627	0.155	-0.006	0.029	-0.014	0.553	0.294
Ganadería	0.248	1.517	0.058	0.164	0.875	-3.463	3.959	-0.058	0.067	0.030
Edad	1.322	0.497	0.981	2.660	0.038	0.106	2.539	0.199	0.736	0.481
DA	-0.466	4.936	-0.037	-0.094	0.928	-12.545	11.613	0.103	-0.039	-0.017
C_Btotal	0.007	0.021	0.079	0.320	0.760	-0.045	0.058	0.062	0.130	0.058
Altura	-0.425	0.351	-0.422	-1.212	0.271	-1.284	0.433	0.286	-0.444	-0.219
D_Copa	-0.039	0.016	-0.831	-2.447	0.050	-0.077	0.000	-0.382	-0.707	-0.442
% de pendiente	0.117	0.047	0.782	2.476	0.048	0.001	0.233	0.179	0.711	0.448
Accesibilidad	-0.001	0.001	-0.647	-1.241	0.261	-0.003	0.001	0.047	-0.452	-0.224
Tipo_Bosque	0.170	0.672	0.070	0.253	0.809	-1.474	1.814	-0.153	0.103	0.046
Shannon	2.358	1.527	0.601	1.544	0.174	-1.379	6.095	0.263	0.533	0.279
Simpson	1.876	2.943	0.240	0.638	0.547	-5.324	9.077	-0.080	0.252	0.115
% COS	2.623	1.244	0.907	2.109	0.079	-0.420	5.666	0.147	0.652	0.381

a. Variable dependiente: MM

Cuadro 21. Coeficientes para modelo matemático (carbono en biomasa total)

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados			95.0% intervalo de confianza para B		Correlaciones		
	B	Error estándar	Beta	t	Sig.	Límite inferior	Límite superior	Orden cero	Parcial	Parte
(Constante)	77.593	244.993		0.317	0.762	-521.883	677.069			
Tipo_Quema	0.655	19.026	0.024	0.034	0.974	-45.899	47.209	-0.226	0.014	0.010
Elevación	-0.090	0.160	-0.374	-0.559	0.597	-0.482	0.303	-0.223	-0.222	-0.166
Ganadería	-25.634	27.357	-0.512	-0.937	0.385	-92.573	41.305	-0.500	-0.357	-0.279
Edad	-2.419	14.105	-0.154	-0.171	0.869	-36.933	32.095	0.149	-0.070	-0.051
DA	77.386	89.788	0.531	0.862	0.422	-142.317	297.089	0.414	0.332	0.257
Altura	1.258	7.527	0.107	0.167	0.873	-17.159	19.675	0.324	0.068	0.050
D_Copa	0.284	0.414	0.523	0.687	0.518	-0.728	1.296	0.459	0.270	0.205
% de pendiente	0.078	1.295	0.044	0.060	0.954	-3.092	3.247	-0.238	0.024	0.018
Accesibilidad	0.010	0.016	0.542	0.578	0.584	-0.031	0.050	-0.328	0.230	0.172
Tipo_Bosque	-3.988	12.911	-0.140	-0.309	0.768	-35.581	27.605	-0.015	-0.125	-0.092
Shannon	-6.597	34.682	-0.144	-0.190	0.855	-91.460	78.266	0.236	-0.077	-0.057
Simpson	-0.932	58.588	-0.010	-0.016	0.988	-144.292	142.428	-0.104	-0.006	-0.005
% COS	-11.704	31.255	-0.346	-0.374	0.721	-88.182	64.775	0.381	-0.151	-0.112
MM	2.497	7.800	0.213	0.320	0.760	-16.588	21.582	0.062	0.130	0.095

a. Variable dependiente: C_Btotal