



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“BIOMASA AÉREA Y CARBONO ORGÁNICO COMO
FACTOR DE COMPENSACIÓN EN UN ECOSISTEMA
FORESTAL FRAGMENTADO”**

TESIS

Para obtener el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

LIZBETH ANDREA ESQUIVEL MAZA

Director de Tesis: Dr. José Adrián Saldaña Munive

Puebla, Pue.

Diciembre 2024



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/094/2024
Asunto: Registro de Tema de Tesis.

C. LIZBETH ANDREA ESQUIVEL MAZA
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo título es el siguiente:

“BIOMASA AÉREA Y CARBONO ORGÁNICO COMO FACTOR DE COMPENSACIÓN EN UN ECOSISTEMA FORESTAL FRAGMENTADO”

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

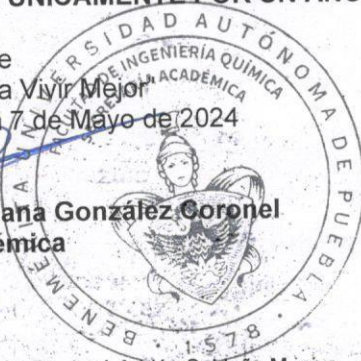
CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Director de Tesis: Dr. José Adrián Saldaña Munive.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **UNICAMENTE POR UN AÑO**.

Atentamente
“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”
H. Puebla de Z., a 7 de Mayo de 2024

Dra. Valeria Jordana González Coronel
Secretaria Académica



C.c.p. Director de Tesis: Dr. José Adrián Saldaña Munive.
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251



Autorización de Impresión de Tesis

Ingeniería Química ()
Ingeniería Ambiental (X) Matrícula: 201739909
Ingeniería en Alimentos ()
Ingeniería en Materiales ()

Al C. Sustentante Lizbeth Andrea Esquivel Maza

De acuerdo a la presentación y revisión de la tesis:

“BIOMASA AÉREA Y CARBONO ORGÁNICO COMO FACTOR DE COMPENSACIÓN EN UN ECOSISTEMA FORESTAL FRAGMENTADO”

se aprueba la impresión y empastado de la misma.

Jurado de examen profesional:

Presidente: M.I. Angel Silveti huezc Firma
Secretario: MIA. Mayte Juárez Meneses
Vocal: Dr. José Antonio Sandoval Huari

Fecha de examen: 16 de diciembre 2024

H. Puebla de Zaragoza a 21 de noviembre de 2024.

A mi mami Diana Maza.

A mi abuelito Alfonso Maza.

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos hermanos Alberto Esquivel y Fernando Esquivel, por brindarme su total apoyo y cariño en este trayecto, por su comprensión y alentarme siempre a no rendirme.

A mi querida mami Diana Maza, por su gran amor, apoyo y comprensión, por siempre creer en mí y en mi trabajo, ser mi ejemplo y guía para ser quien soy ahora.

A mi abuelito Alfonso Maza por siempre brindarme su cariño, sus consejos y cálida compañía porque parte de quien soy se lo debo a él.

A mis tíos, quienes admiro y me brindaron su total apoyo y cariño: Leticia Maza, Ricardo Aco, Gabriel Maza y Rosario Ramos.

A mi abuelita Catalina Aranda, por su cariño y compañía.

A quienes me brindaron su valiosa amistad y cariño en esta etapa universitaria: Alo, Andy, Clara, Flor, Maritza, Lupita y todos aquellos quienes me apoyaron y alentaron directa e indirectamente.

A mis amigos y compañeros de laboratorio por su apoyo y compañía en cada experimento y salida de campo: Alexis, Karen, Ara, Fabián, Javi, Manu, Fer, Sara, Pao y Jessi.

A mi asesor de tesis Dr. José Adrián Saldaña por su confianza, apoyo y enseñanzas para la realización del presente trabajo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del Problema	2
Justificación	4
Objetivos.....	5
Hipótesis.....	6
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	7
I.1 Cobertura vegetal	7
I.2 Carbono orgánico en suelo	8
I.3 Nitrógeno en suelo.....	9
I.4 Fósforo en suelo	9
I.5 Ecosistema forestal fragmentado	10
I.6 Impacto de la agricultura	11
I.7 Degradación de suelos	12
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	13
II.1 Área de estudio	13
II.2 Muestreo	17
II.2.1 Muestreo especies arbóreas	19
II.2.2 Muestreo especies arbustivas	19
II.2.3 Muestreo especies herbáceas.....	19
II.3 Análisis de laboratorio.....	20
II.3.1 Carbono orgánico por el método de Walkley y Black	20
II.3.2 Nitrógeno por el método Micro-Kjeldhal.....	21
II.3.3 Fósforo por el método de Jackson Modificado	21
II.4 Análisis de datos	22
II.4.1 Biomasa	22

II.4.2 Laboratorio	23
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
III.1 Parámetros totales en cada área	26
III.2 Factor compensación en el ecosistema.....	29
III.2.1 Comportamiento de herbáceas en cada área	32
III.3 Aporte de biomasa y contenido de C, N y P de herbáceas.....	34
III.4 Aporte de biomasa y contenido de C, N y P de arbustivas	37
III.5 Aporte de biomasa de arbóreas	40
III.6 Aporte de biomasa del cultivo de maíz y herbáceas	40
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
Conclusiones	42
Recomendaciones	44
BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXOS	53
Anexo I. Tablas de datos	53
Anexo II. Fotografías de identificación de cada especie	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Total de parcelas muestreadas en cada área	18
Tabla 2. Nomenclatura en la identificación de cada muestra	18
Tabla 3. Aporte de biomasa y contenido de CO, N y P herbáceo, arbustivo y arbóreo en cada área del año evaluado	26
Tabla 4. Parámetros por área en el año 2023 en el Cerro El Tintero, Acajete, Puebla	27
Tabla 5. ANOVA de biomasa aérea total del área de Conservación, Transición y Agrícola	29
Tabla 6. ANOVA de CO total del área de Conservación, Transición y Agrícola	29
Tabla 7. Biomasa y CO total del AC en 2023 y Biomasa y CO herbáceo del AT y AA estimados a 20 años en el ecosistema forestal fragmentado	30
Tabla 8. Arbóreas presentes en el Cerro El Tintero, Acajete, Puebla	40
Tabla 9. Datos analizados de CO, N y P de cada muestra y duplicados	53
Tabla 10. Identificación de muestras y aportes de Biomasa y contenido de CO, N y P por hectárea	57
Tabla 11. Resumen de cada especie herbácea identificada por área	59
Tabla 12. Resumen de cada especie arbustiva y arbórea identificada por área ...	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cerro El Tintero, Acajete, Puebla. Obtenida de Google Earth Pro (2023)	13
Figura 2. Área conservada, transición y agrícola del Ecosistema Forestal Fragmentado del Cerro El Tintero, Acajete, Puebla. Autoría propia (2023)	14
Figura 3. NDVI en El Cerro El Tintero, Acajete, Puebla. Obtenido de EO Browser (2023)	15
Figura 4. Composición agrícola en El Cerro El Tintero. Obtenido de EO Browser (2023)	16
Figura 5. a) Área conservada, b) área de transición y c) área agrícola del ecosistema forestal fragmentado del Cerro El Tintero, Acajete, Puebla. Autoría propia (2023)	17
Figura 6. Muestra CA1M1	62
Figura 7. Muestra CA1M2	62
Figura 8. Muestra CA1M3	62
Figura 9. Muestra CA2M1	62
Figura 10. Muestra CA2M2	62
Figura 11. Muestra CA2M3	62
Figura 12. Muestra CA2M4	62
Figura 13. Muestra CA2M5	62
Figura 14. Muestra CA2M6	62
Figura 15. Muestra CA2M7	62
Figura 16. Muestra CA3M1	62
Figura 17. Muestra CA3M2	62
Figura 18. Muestra CA3M3	63
Figura 19. Muestra CA3M4	63
Figura 20. Muestra CA3M5	63
Figura 21. Muestra CA3M6	63
Figura 22. Muestra CH1M1	63
Figura 23. Muestra CH1M2	63
Figura 24. Muestra CH1M3	63
Figura 25. Muestra CH1M4	63

Figura 26. Muestra CH2M1	63
Figura 27. Muestra CH2M2.....	63
Figura 28. Muestra CH2M3.....	63
Figura 29. Muestra CH3M1.....	63
Figura 30. Muestra CH3M2.....	63
Figura 31. Muestra CH3M3.....	63
Figura 32. Muestra CH3M4.....	63
Figura 33. Muestra CH3M5.....	63
Figura 34. Muestra TA1M1	64
Figura 35. Muestra TA1M2.....	64
Figura 36. Muestra TA2M1	64
Figura 37. Muestra TA2M2.....	64
Figura 38. Muestra TA3M1.....	64
Figura 39. Muestra TA3M2.....	64
Figura 40. Muestra TH1M1	64
Figura 41. Muestra TH1M2	64
Figura 42. Muestra TH1M3	64
Figura 43. Muestra TH2M1	64
Figura 44. Muestra TH2M2	64
Figura 45. Muestra TH2M3	64
Figura 46. Muestra TH3M1	64
Figura 47. Muestra TH3M2	64
Figura 48. Muestra TH3M3	64
Figura 49. Muestra TH3M4	64
Figura 50. Muestra AH1M1	65
Figura 51. Muestra AH1M2.....	65
Figura 52. Muestra AH1M3.....	65
Figura 53. Muestra AH1M4.....	65
Figura 54. Muestra AH1M5.....	65
Figura 55. Muestra AH1M6.....	65

Figura 56. Muestra AH1M7	65
Figura 57. Muestra AH1M8	65
Figura 58. Muestra AH1M9	65
Figura 59. Muestra AH2M1	65
Figura 60. Muestra AH2M2	65
Figura 61. Muestra AH2M3	65
Figura 62. Muestra AH2M4	65
Figura 63. Muestra AH2M5	65

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Biomasa herbácea, arbustiva y arbórea en el Ecosistema Forestal Fragmentado considerando el tiempo de crecimiento	27
Gráfico 2. Biomasa y CO total del año 2023 por área	31
Gráfico 3. Biomasa y CO total del AC en 2023 vs Biomasa y CO herbáceo del AT y AA estimados a 20 años en El Cerro El Tintero, Acajete, Puebla	31
Gráfico 4. Comportamiento de la herbácea HB en aporte de biomasa y contenido de CO.....	33
Gráfico 5. Comportamiento de la herbácea HB en contenido de nitrógeno.....	33
Gráfico 6. Comportamiento de la herbácea HB en contenido de fósforo	34
Gráfico 7. Aporte de biomasa herbácea en cada área	34
Gráfico 8. Contenido de carbono orgánico herbáceo en cada área	35
Gráfico 9. Contenido de nitrógeno herbáceo en cada área	36
Gráfico 10. Contenido de fósforo herbáceo en cada área.....	37
Gráfico 11. Aporte de biomasa arbustiva en cada área	38
Gráfico 12. Contenido de carbono orgánico arbustivo en cada área	38
Gráfico 13. Contenido de nitrógeno arbustivo en cada área	39
Gráfico 14. Contenido de fósforo arbustivo en cada área	39
Gráfico 15. Aporte de biomasa de maíz criollo y herbáceas en el área agrícola ...	41

ABREVIATURAS

AA	Área agrícola
AC	Área Conservada
ANOVA	Análisis de varianza
AT	Área de transición
CH ₄	Metano
cm	Centímetros
CO	Carbono orgánico
COS	Carbono orgánico del suelo
CO ₂	Dióxido de carbono
C/N	Relación carbono/nitrógeno
FE	Factor de expansión de fustes
g	Gramos
g/ha	Gramos por hectárea
GEI	Gases de efecto invernadero
GtC	Gigatoneladas de carbono
GtCO ₂	Gigatoneladas de dióxido de carbono
ha	Hectárea
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
K	Potasio
kg	Kilogramo
kg/ha	Kilogramos por hectárea
kgCO/ha	Kilogramos de carbono orgánico por hectárea
m	Metros
MO	Materia orgánica
MOS	Materia orgánica del suelo
N	Nitrógeno
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

P	Fósforo
RTQ	Roza-tumba-quema
S	Azufre
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

INTRODUCCIÓN

La biomasa aérea en un ecosistema forestal se define como la diversidad de especies vegetales (herbáceas, arbustivas y arbóreas) y todo lo que las constituye (tallos, hojas, flores, frutos, etc.) sobre la superficie del suelo, las raíces no se contemplan dentro de este término. Mientras que, la materia orgánica está constituida por residuos de plantas que se incorporan al suelo mediante degradación microbiana (Carvajal, s.f.).

Por otro lado, la cobertura vegetal hace referencia a la capa de vegetación que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas que van desde pastizales hasta áreas boscosas (Nieto, Jiménez y Nieto, 2016).

La conservación de cobertura vegetal y gestión de gases de efecto invernadero son cruciales en la agenda global de sostenibilidad ambiental. El equilibrio entre estos elementos y su interacción con la fragmentación de ecosistemas resulta un tema de preocupación científica y política. La biomasa, que abarca desde densos bosques hasta praderas y cultivos agrícolas, es fundamental para regular el calentamiento global, conservar la biodiversidad y mantener los servicios ecosistémicos esenciales. Sin embargo, este factor enfrenta amenazas por deforestación, degradación de suelo y fragmentación de origen antropogénico como urbanización y agricultura intensiva.

Considerando que el suelo es un gran reservorio de carbono que se almacena a través de la fotosíntesis, degradación de materia orgánica y respiración microbiana (que genera dióxido de carbono (CO_2)), su manejo inadecuado puede contribuir al calentamiento global ya que este, en vez de sumidero de carbono, se puede convertir en emisor importante de gases de efecto invernadero (GEI) (Burbano, 2018).

En ese contexto, es importante evaluar la condición de ecosistemas en cuanto a cantidad y calidad de su cobertura vegetal e integridad de sus componentes, interacciones y procesos para mantener la funcionalidad del suelo al evitar la emisión de GEI y como estrategia ante el cambio climático (SEMARNAT, 2015).

Carvajal (s.f.), en su artículo “Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia” determinó la tasa anual de captación de hortalizas, cereales, frutales y cítricos basados en datos de producción de biomasa y contenido de carbono. El estudio concluyó que la solución al calentamiento global es conservar la mayor cantidad posible de zonas con vegetación para capturar este gas.

Sánchez (2016), realizó un trabajo de investigación titulado “Evaluación del carbono almacenado en la biomasa, necromasa y carbono orgánico del suelo de tres diferentes hábitats en la Península de Osa, Costa Rica”, en el cual determina que la biomasa aérea, específicamente especies arbóreas, y suelo son los componentes que almacenan mayor cantidad de carbono en un ecosistema forestal.

En la investigación titulada “Análisis y estimación del contenido de carbono en pastizales halófilos de la zona central semi-árida de México”, Sánchez, Velasco, Meza y Pérez (2022) estimaron el contenido de biomasa aérea y subterránea, así como el contenido de carbono presente en este tipo de vegetación.

Por consiguiente, es necesario identificar el principal efecto que ocasiona la ausencia de cobertura vegetal en los ecosistemas.

Planteamiento del Problema

Actualmente, los efectos del calentamiento global se atribuyen al incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Acosta et al., 2020). Estas emisiones provienen principalmente de los sectores de energía, industria, transporte, construcción y con un 22% de actividades agrícolas, silvicultura y otros usos de suelo (IPCC, 2023), representando un desafío ambiental de gran magnitud desde mediados del siglo XX (Scivittaro et al., 2021).

Según el IPCC (2023), entre 1850 y 2019 se registró un aumento de 2400 ± 240 GtCO₂ de GEI, con más del 58% entre 1850 y 1989, mientras que el 42% restante entre 1990 y 2017. Para 2019 las concentraciones de CO₂ atmosférico

alcanzaron 410 ppm, marcando el punto más alto registrado en al menos 2 millones de años.

Dado que la vegetación captura y almacena CO₂ en forma de biomasa, a través de la fotosíntesis, o en suelo, a través de la descomposición de materia orgánica, se estima que los bosques y sistemas agroforestales están estrechamente relacionados con la mitigación del calentamiento global al ser receptores de aproximadamente 40% del carbono orgánico del suelo (COS), que es superior al carbono presente en la atmósfera y biósfera (Mena y Andrade, 2021; Gómez et al., 2021).

En tal sentido, la ausencia de cobertura vegetal en superficie indica degradación de suelo y liberación de CO₂ almacenado. A pesar de que este fenómeno puede ocurrir naturalmente en cualquier condición climática, es capaz de incrementarse y acelerarse de forma significativa por prácticas de agricultura intensiva, deforestación, pastoreo excesivo y cambios en el uso de suelo (FAO, 2019)a.

Por consiguiente, se ha registrado que las emisiones de este gas pueden aumentar en sistemas agrícolas que emplean labranza convencional debido a que disminuye la estabilidad de agregados del suelo, exponiendo el carbono orgánico acumulado a la degradación microbiana alterando así el microclima del suelo, que a su vez influye en la actividad y diversidad de la fauna del suelo (Saynes, Etchevers, Paz y Alvarado, 2016).

SEMARNAT (2018a), recomienda que antes de reforestar un sitio es ideal desyerbar o eliminar maleza para evitar la competencia entre especies por humedad y nutrientes, además considera que la época adecuada es a inicios de temporada de lluvias. No obstante, tales sugerencias minimizan la relevancia y aporte de especies no arbóreas en un ecosistema. Así como propiciar la erosión ocasionada por ausencia de cobertura vegetal durante las primeras precipitaciones de la temporada.

Con lo anterior, se plantea enfatizar la importancia de la cobertura vegetal en suelos como medida básica de protección.

Justificación

El cambio de uso de suelo y fragmentación de ecosistemas forestales ocasionan disminución de superficies verdes, pérdida de calidad del hábitat y cambios en las condiciones bióticas y abióticas (Farnum, 2019). La falta de cobertura vegetal deja al suelo expuesto a la radiación solar directa, alterando la temperatura de la superficie, la humedad y la actividad microbiana, además de propiciar la erosión hídrica y eólica del sitio. Esto trae como consecuencia la disminución de materia orgánica que se incorpora al suelo, afectando la estabilidad de agregados y con ello la estructura del suelo. Se afecta la regulación de los procesos de flujo y transporte de nutrientes, la aireación y la capacidad de filtrar y drenar. Por último, tales afectaciones involucran la actividad de fauna, diversidad de especies y rigidez al medio de enraizamiento (García, 2008).

La disminución de productividad agrícola, degradación de funciones de ecosistemas, aumento de riesgo hidrogeológico, deslizamientos o inundaciones y pérdidas significativas de biodiversidad, entre otras, son efectos de la erosión en suelo. Se estima que este fenómeno puede llevar a una pérdida de hasta 50% del rendimiento de cultivos agrícolas (FAO, 2019b).

La agricultura tradicional se caracteriza por la falta de buenas prácticas de manejo de suelo, provocando contaminación y erosión (Gelasio et al., 2012). La FAO ha señalado que una de las causas principales de la degradación de suelos en América es la aplicación de técnicas de labranza inadecuadas, con el consiguiente deterioro de propiedades físicas, químicas y biológicas, así como disminución de rendimientos agrícolas y deterioro del medio ambiente. Se calcula que son responsables del 25% de emisiones antropogénicas de CO₂, 55-60% del total de emisiones de metano (CH₄) y 65-80% de los flujos totales de óxido nitroso (N₂O) (Saynes, Etchevers, Paz y Alvarado, 2016).

En México, los ecosistemas forestales cubren cerca del 34% de la superficie, mientras que superficies cultivadas alcanzan del 14 al 16% y los pastizales inducidos o cultivados abarcan el 9.8% (Saynes, Etchevers, Paz y Alvarado, 2016). En el país la desertificación y degradación de suelos se debe principalmente al sobrepastoreo, cambio de uso, deforestación, labranza post cosecha y mal manejo.

De acuerdo con Gómez et al. (2021), la presencia de COS y materia orgánica del suelo (MOS) se utilizan como indicadores de calidad, de manera que son fundamentales para mantener la fertilidad y productividad del ecosistema al influir en propiedades físicas y químicas del suelo como porosidad, retención de agua y reservorios de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y potasio (K) en la biomasa. Consecuentemente, evaluar los niveles de carbono almacenados en suelo y biomasa promueve su secuestro como estrategia efectiva para reducir el CO₂ atmosférico y a su vez mejorar la calidad del suelo.

Teniendo en cuenta la falta de cobertura vegetal y el mal manejo de suelo con aumento de GEI a la atmósfera que contribuyen al calentamiento global, se considera alternativa incrementar la captura de carbono en biomasa y suelo mediante la preservación de ecosistemas forestales. No obstante, a diferencia de especies arbóreas cuyo desarrollo es lento, es esencial contemplar el manejo de especies de rápido crecimiento para aumentar notablemente la captura en un periodo más corto (Acosta et al., 2020).

Por otro lado, el presente trabajo se enfoca en la dinámica de la biomasa aérea como factor de evaluación de las condiciones de recuperación de un ecosistema forestal fragmentado bajo los siguientes objetivos.

Objetivos

General

Analizar la relación entre biomasa aérea y carbono orgánico como factor de compensación en un ecosistema forestal fragmentado.

Específicos

- Seleccionar y caracterizar las áreas de estudio en el Cerro El Tintero, Acajete, Puebla.
- Medir el volumen de biomasa aérea de especies herbáceas y arbustivas a través del peso fresco y peso seco.
- Estimar el volumen de biomasa aérea de especies arbóreas a través de métodos no destructivos.
- Calcular el contenido de carbono de cada especie en cada área de estudio.
- Relacionar la biomasa y su calidad con las distintas áreas de interés.

Hipótesis

El volumen de biomasa herbácea y arbustiva compensa el volumen de biomasa y contenido de carbono orgánico arbóreo después de su pérdida en el ecosistema.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

I.1 Cobertura vegetal

La formación de biomasa ocurre a través del proceso de fotosíntesis mediante la energía solar. Las plantas que contienen clorofila transforman el CO₂ y agua, que contiene productos minerales, en glucosa, carbohidratos, oxígeno y otros compuestos orgánicos. Tales compuestos se utilizan para formar estructuras celulares en la planta como hojas, tallos, raíces, etc. (SEMARNAT, 2018b; Wodzicki, 2001). La biomasa al descomponerse se integra al suelo como materia orgánica, humus o en CO₂ producto de la respiración de microorganismos que la descomponen (Carvajal, s.f.).

Es importante considerar el proceso dinámico y secuencial de sucesión ecológica que ocurre naturalmente durante la maduración de un ecosistema. Las comunidades en etapa temprana son dominadas por especies más simples de rápido crecimiento y fácil distribución como herbáceas, a medida que progresa la sucesión, estas son superadas por otras especies más complejas con mayor autoorganización estructural y funcional como arbustos y árboles (Flores y Monroy, 2022).

Las comunidades vegetales determinan la aptitud de los ecosistemas para acumular biomasa y materia orgánica en un periodo de tiempo. Es relevante en el contexto del cambio climático porque en el ciclo biogeoquímico del carbono las estimaciones de almacenamiento y liberación dependen de la vegetación, su edad, cambio de uso de suelo y tipo de ecosistema, comprendiendo de esta forma el valor ambiental positivo del carbono almacenado (Romero, Velasco, Meza y Pérez, 2022). De acuerdo con la FAO, la biomasa forestal del planeta es capaz de almacenar 289 gigatoneladas de carbono (GtC), mientras que De Jong, Olgún, Rojas, Maldonado y Paz (2018) mencionan que la biomasa y materia orgánica almacenan entre 456 GtC a 500 GtC. En contraste, estimaciones de 2004 muestran que la deforestación mundial contribuyó aproximadamente con el 17% de la emisión total de GEI hacia la atmósfera (SEMARNAT, 2015).

Mantener cobertura vegetal en suelos, especialmente aquellos destinados a la agricultura, brinda las siguientes ventajas, según la FAO (2022):

- Protección al suelo, evitando su erosión.
- Adición de materia orgánica.
- Captura de carbono.
- Mejora la estructura del suelo.
- Retención del mayor porcentaje de humedad posible.
- Movilización y reutilización de nutrientes.
- Disminución del riesgo de compactación.
- Control de malezas y plagas.

I.2 Carbono orgánico en suelo

El carbono orgánico constituye el principal componente de la materia orgánica del suelo, de ahí que comúnmente se consideren equivalentes ambos términos (Carrasco, 2015).

La materia orgánica es un complejo aglomerado de distintas formas de carbono como carbohidratos, ligninas y proteínas. Los microorganismos que se encargan de descomponerla forman dióxido de carbono o humus ante la presencia de residuos más resistentes (Osorio, Haro, Carrillo y Negrete, 2022; Muñoz, Delgado y Lucas, 2021). La formación de humus permite formar agregados y dar estabilidad estructural al suelo, este se une a las arcillas y favorece la penetración del agua y su retención, favoreciendo el intercambio gaseoso. La cantidad de humus depende de factores como la incorporación de nuevos restos orgánicos al suelo y su velocidad de oxidación química y biológica, velocidad de descomposición, textura del suelo, aireación, humedad y factores climáticos (Julca, Meneses, Blas y Bello, 2006).

El ciclo del carbono engloba procesos bioquímicos como fotosíntesis y respiración; físico-químicos como disolución de CO₂ en agua; químicos por meteorización de silicatos, dilución y precipitación de carbonatos; y físicos mediante erosión, transporte y deposición (Carrasco, 2015).

El C se dispone en suelo en formas orgánicas (FO) e inorgánicas (FI). Aquellas que provienen de la biota y se encuentran en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos o bien en forma de humus y compuestos condensados, integran las FO. Mientras que las FI se dividen en FI sólidas, originadas por carbonatación de calcio, y FI solubles, formadas por CO₂ disuelto. Sin embargo, se deben considerar las formas gaseosas como CO₂, CO o CH₄ presentes en la atmósfera del suelo (Carrasco, 2015).

SEMARNAT (2015) refiere que el carbono almacenado en la vegetación es producto de su fijación a través del proceso de fotosíntesis. Sin embargo, este proyecto se enfoca en la captura de dióxido de carbono que se da principalmente por respiración de microorganismos del suelo, en lugar de absorberse directamente de la atmósfera. De ahí que, se considere indispensable para la regulación del clima, el mantenimiento de la estabilidad del suelo, disponibilidad de nutrientes, capacidad de retención de agua y biodiversidad edáfica (Muñoz, Delgado y Lucas, 2021).

I.3 Nitrógeno en suelo

El ciclo del nitrógeno se compone por interacciones de distintas formas de N con suelo, organismos y atmósfera. El aprovechamiento de este elemento por las plantas ocurre a través del proceso de fijación biológica. La mineralización convierte formas orgánicas en inorgánicas y estas últimas pueden ser absorbidas por raíces de plantas o microorganismos que, vuelven a incorporar el N a forma orgánica por inmovilización (Osorio, Haro, Carrillo y Negrete, 2022).

I.4 Fósforo en suelo

Las plantas y biomasa microbiana absorben el fosfato liberado de los minerales y, de esta forma, lo incorporan en la materia orgánica y sedimentos, depositándose nuevamente en formas minerales poco solubles. La principal fuente de compuestos orgánicos de fósforo la constituyen residuos vegetales,

animales y microorganismos al liberar y mineralizar compuestos como ácidos nucleicos, fosfolípidos y ésteres (Osorio, Haro, Carrillo y Negrete, 2022).

I.5 Ecosistema forestal fragmentado

Ocurre cuando se remueve parte de la vegetación original de una zona, por fenómenos naturales o actividades antropogénicas, esto implica reducción de su superficie, pérdida de calidad del hábitat y cambios en condiciones bióticas y abióticas. En otros términos, un ecosistema forestal fragmentado se refiere a un área boscosa que ha sido dividida o subdividida en porciones más pequeñas ante la intervención humana por deforestación, expansión agrícola, urbanización, entre otras. En lugar de formar un bloque continuo de bosque, se presenta como fragmentos dispersos (SEMARNAT, 2015; Martínez et al., 2011; Otavo y Echeverría, 2017).

Navarro, González, Flores y Amparán (2015) señalan que las consecuencias de la fragmentación son extinción local o regional de especies, pérdida de recursos genéticos, aumento en ocurrencia de plagas, disminución en polinización, alteración de procesos de formación de suelos y erosión, disminución en la recarga de mantos acuíferos y alteración de ciclos biogeoquímicos, entre otros.

Identificar el estado de transformación de un paisaje permite una adecuada planificación, manejo y restauración de este, ya que indica el grado de integridad o funcionalidad y los principales atributos que requieren ser mantenidos o mejorados para conservar la biodiversidad (Otavo y Echeverría, 2017). Así, se plantea la necesidad de mitigar y adaptar al cambio climático el sector forestal y agropecuario, ya que el carbono presente en pastizales, matorrales, sector agrícola y otros, oscila en 40% en los ecosistemas terrestres (De Jong, Olguín, Rojas, Maldonado y Paz, 2018).

I.6 Impacto de la agricultura

Las prácticas agrícolas tradicionales transmitidas de generación en generación representan un legado de conocimientos y técnicas adaptadas a las condiciones locales y recursos disponibles de cada región. Sin embargo, en su momento, actividades como Roza-Tumba-Quema (RTQ), barbecho, rastra, entre otros, fueron replicadas y difundidas sin ninguna evaluación científica del impacto en la calidad del suelo y desarrollo de cultivos al destruir su estructura, dejarlo sin protección vegetal por largos periodos y exponerlo a la acción erosiva del viento y agua (Gamero, Delgadillo, Cortés, Velasco y Velasco, 2020; Martínez, Osuna y Espinosa, 2020).

Como señala FAO ((s.f.)a), la biota del suelo puede verse afectada por cambios de pH; la relación bacteriana: fúngica y C/N que se alteran ante la adición de fertilizantes y abonos, así como la pérdida de agregados mediante el laboreo que ocasiona reducción de hifas fúngicas. En cuanto a las afectaciones de cultivos por desarrollo de plagas, son consecuencia de la destrucción de la cubierta vegetal (FAO, 2022).

México ha sufrido degradación y pérdida de gran parte de sus ecosistemas terrestres al ser transformados en campos agrícolas, pastizales inducidos y zonas urbanas. En 2011, las áreas agrícolas y pastizales cubrían cerca de 51.7 millones de hectáreas, 26% del territorio, dentro del cual 63% correspondía a terrenos agrícolas y 37% a pastizales inducidos y cultivados (SEMARNAT, 2015). En 2022, del total de hectáreas en área rural (192 millones de hectáreas), 88.4 millones de has (46.1%) correspondían a suelo con uso o vocación agropecuaria, teniendo en cuenta que la superficie total del país es de 196.5 millones de hectáreas (INEGI, 2023).

La materia orgánica es el principal indicador de salud del suelo y, con ello, la producción agrícola, por lo que incrementar su porcentaje permite mejorar la estructura para dar respuesta a la seguridad alimentaria ante los siniestros climáticos y la reducción de GEI (Martínez, Osuna y Espinosa, 2020).

Por consiguiente, la agricultura de conservación fomenta el mantenimiento de una cobertura permanente, laboreo mínimo de suelo y diversificación de

especies vegetales cuyo objetivo es potenciar la biodiversidad y procesos biológicos naturales (FAO, 2022).

I.7 Degradación de suelos

SEMARNAT (2008) define la degradación de suelo cuando disminuye la productividad biológica o biodiversidad de un ecosistema ocasionada por procesos antropogénicos. Mientras que, FAO ((s.f.)b), la define como proceso de transformación de una extensión característica a un espacio con menos vida, propiciando destrucción del ecosistema, reducción de la capacidad para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios.

Las principales consecuencias son erosión, pérdida de estructura, materia orgánica y nutrientes, acidez, salinidad, modificación en la textura cuando las partículas más finas (limos y arcillas) son arrastradas, disminución de aireación y capacidad de infiltración y retención de humedad (FAO, 2019; Mólgora, 2013).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

II.1 Área de estudio

El Cerro El Tintero se localiza en la comunidad de Santa Isabel Tepetzala, Acajete, Puebla. Se ubica en las coordenadas 19° 00' 30" y 19° 11' 06" de latitud norte y los meridianos 97° 53' 54" y 98° 00' 00" de longitud occidental. Cuenta con 176.70 km de extensión y una altitud entre 2,280 y 3,260 msnm. El clima que presenta es templado a subhúmedo con lluvias en verano, contando con una temperatura media anual de 15.2°C y 886 mm de precipitación (Nava, 2022).

Es una formación morfológica derivada de la Malinche, cuya cobertura es un bosque de pino-encino, con la especie *Quercus* como dominante. Adicionalmente, presenta un suelo de tipo arenosol.

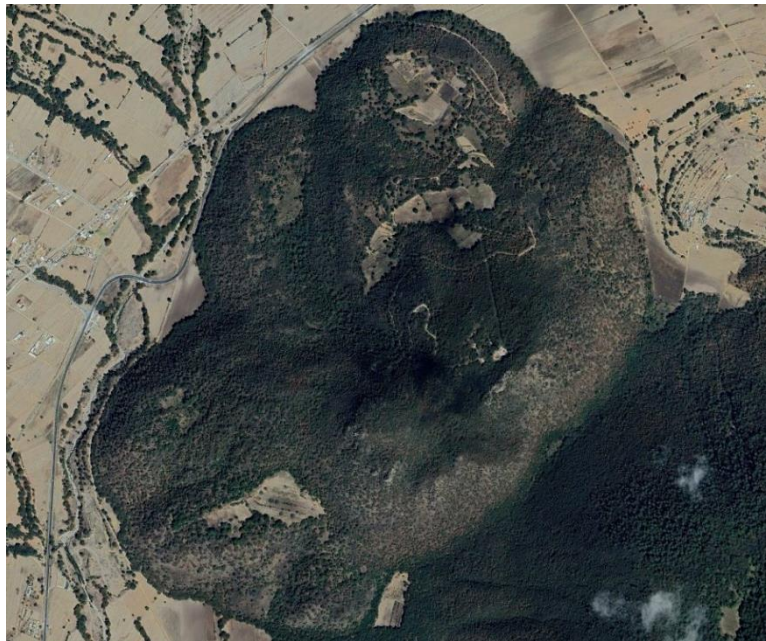


Figura 1. Cerro El Tintero, Acajete, Puebla. Obtenida de Google Earth Pro (2023)

Se trata de un ecosistema forestal fragmentado debido a la intervención humana, dando lugar a la aparición de tres áreas distintivas: conservada, transición y agrícola. La primera se mantiene sin alteración en suelo y especies; la segunda, se caracteriza por las perturbaciones naturales o antropogénicas,

presentando una mezcla de especies vegetales de ecosistemas adyacentes y la ausencia de especies arbóreas; el área agrícola se distingue por la constante intervención humana y actividades agrícolas, como la eliminación de cobertura vegetal, arado, monocultivo, impidiendo la diversificación de la vegetación y manteniendo el suelo expuesto durante ciertos periodos (Nava, 2022).



Figura 2. Área conservada, transición y agrícola del Ecosistema Forestal Fragmentado del Cerro El Tintero, Acajete, Puebla. Autoría propia (2023)

En la *Figura 1* se observan superficies con tonalidades café, lo que indica ausencia de cobertura vegetal y áreas destinadas a la agricultura, así como la distribución que comienza a las faldas del cerro y continúa hacia la cima de este. Aquellas tonalidades verde oscuro se asocian con cobertura vegetal donde predominan especies arbóreas. Por otro lado, en la *Figura 2* se observan las tres áreas características de un ecosistema forestal fragmentado: en primer plano se ubica el área agrícola (AA), en segundo plano se observa el área de transición (AT) y, por último, en la parte superior del cerro se ubica el área conservada (AC).

Para evidenciar con mayor precisión las tres áreas descritas, se utiliza el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) que monitorea y cuantifica la vegetación y cambios en la cobertura/ uso del suelo (INEGI, s.f.). Este índice ofrece una medida del estado de salud de la vegetación, basado en que las plantas reflejan la luz de ciertas longitudes de onda. Cuenta con una escala de -1 y +1, donde los valores negativos (cerca de -1) corresponden a cuerpos de agua, mientras que valores en torno a cero (entre -0.1 y +0.1) suelen indicar zonas sin vegetación como roca, arena o nieve. Los valores positivos, pero no tan grandes, corresponden a arbustos y herbáceas (aproximadamente entre +0.2 y +0.4). Por último, las cifras más elevadas describen los bosques templados y las selvas tropicales (EO Browser, s.f.). De ahí que, en la *Figura 3* se identifique que la tonalidad verde oscuro corresponde al área conservada, aquellas entre 0.2 y 0.4 corresponden al área de transición y, por último, los tonos más claros indican el área agrícola por ausencia de cobertura vegetal.

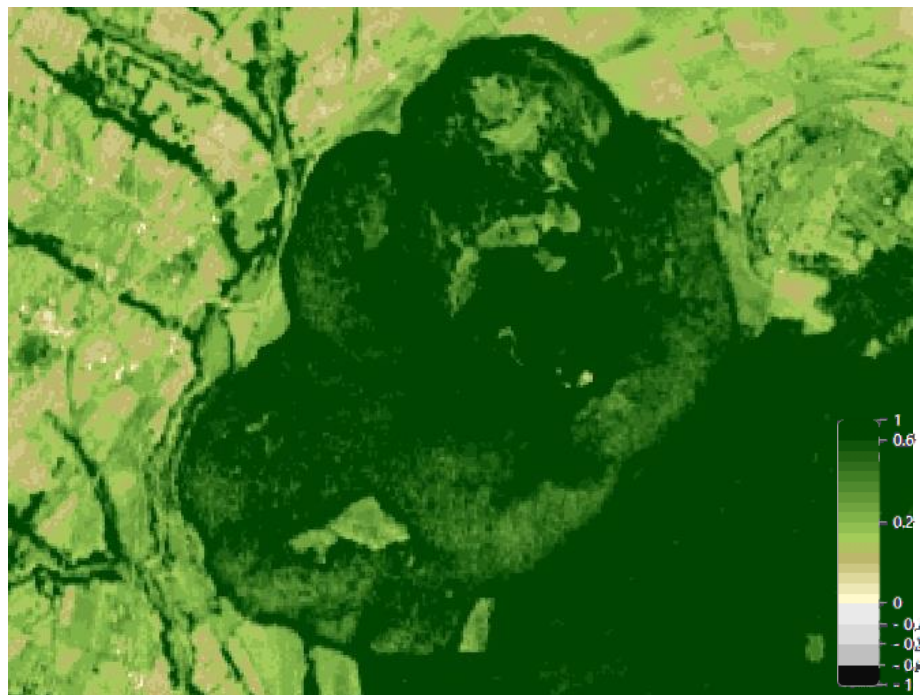


Figura 3. NDVI en El Cerro El Tintero, Acajete, Puebla. Obtenido de EO Browser (2023)

Por medio de la misma aplicación de EO Browser y la visualización de *Composición agrícola*, que emplea bandas de infrarrojo de onda corta, infrarrojo

cercano y azul, se realza la vegetación densa y monitoriza la salud de esta, mostrando la cobertura en verde fosforescente y el suelo desnudo en color magenta. En la *Figura 4* se aprecia el AC con tonalidad verde fosforescente, el AT se interpreta con tonalidades verde opaco y el AA se identifica con tonalidades magenta y café.

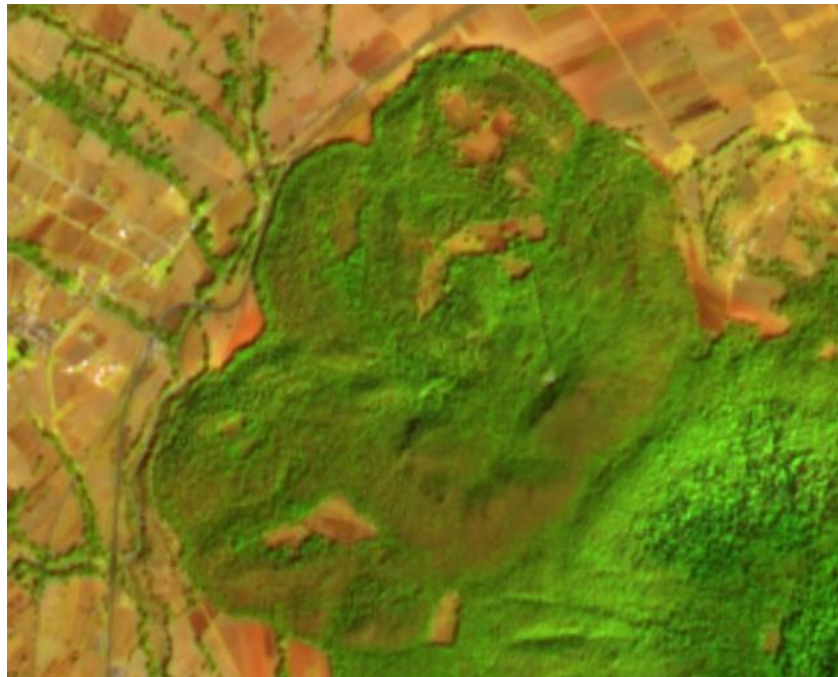
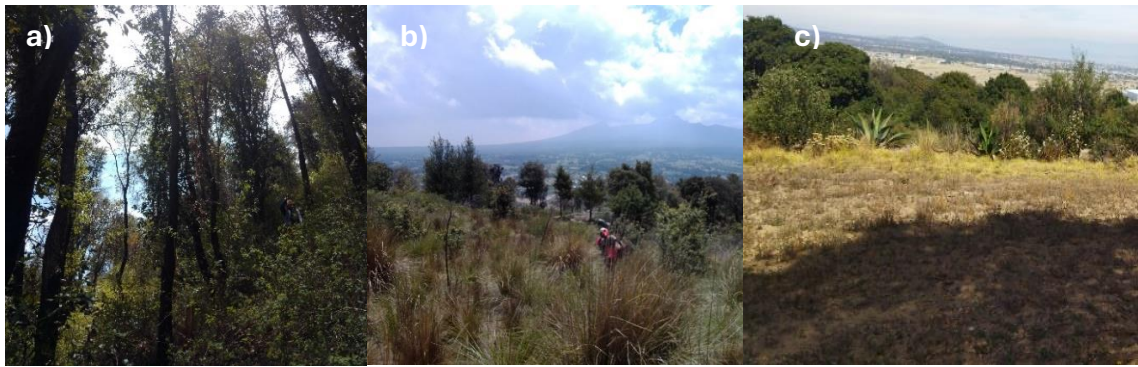


Figura 4. Composición agrícola en El Cerro El Tintero. Obtenido de EO Browser (2023)

En la *Figura 5* se muestran las tres áreas de interés, destacando la presencia de herbáceas, arbustos y árboles en el AC; herbáceas y arbustos en el AT y únicamente herbáceas, sin contemplar las especies de cultivos inducidos, en el AA.



NaOH-Figura 5. a) Área conservada, b) área de transición y c) área agrícola del ecosistema forestal fragmentado del Cerro El Tintero, Acajete, Puebla. Autoría propia (2023)

II.2 Muestreo

El muestreo se realizó en los meses de enero, julio y noviembre. Para estimar el volumen de biomasa vegetal en las tres áreas de interés, se realizaron dos métodos distintos acorde al tipo de especie. Se empleó técnica no destructiva para especies arbóreas y técnica destructiva para herbáceas y arbustivas.

Con apoyo del NDVI del ecosistema, se delimitaron con lazo y estacas de madera tres parcelas temporales en cada área de interés (conservada, transición y agrícola) de 100 m², dentro de las cuales se acordonó un área de 1 m², se procuró que la distancia entre cada parcela no fuera considerable, tal como se muestra en la *Tabla 1*. Se destinó las parcelas de mayor tamaño para la recolección de datos para especies arbóreas y arbustivas, mientras que las parcelas más pequeñas para herbáceas.

Tabla 1. Total de parcelas muestreadas en cada área

Área	Parcela	Coordenadas
Conservada	Sitio 1	19° 09' 40.0" N 97° 55' 20.5" O
	Sitio 2	19° 09' 41.2" N 97° 55' 19.4" O
	Sitio 3	19° 09' 42.3" N 97° 55' 19.8" O
Transición	Sitio 1	19° 09' 41.1" N 97° 55' 22.2" O
	Sitio 2	19° 09' 40.4" N 97° 55' 20.1" O
	Sitio 3	19° 09' 41.5" N 97° 55' 21.7" O
Agrícola	Sitio 1	19° 09' 43.3" N 97° 55' 22.6" O
	Sitio 2	19° 09' 45.4" N 97° 55' 22.9" O
	Sitio 3	19° 09' 46.0" N 97° 55' 23.4" O

La identificación de cada muestra se realizó según el área, la especie y el sitio del que se obtuvo, como se indica en la *Tabla 2*:

Tabla 2. Nomenclatura en la identificación de cada muestra

Nomenclatura		Significado
Área:	C; T; A	Conservada; Transición; Agrícola
Sitio:	1; 2; 3	Sitio 1; sitio 2; sitio 3
Especie:	H; A; X	Herbácea; Arbustiva; Arbórea
Muestra:	M1; M2; M3...	Muestra 1; Muestra 2; Muestra 3...
Ejemplo:	CH1M1	Área C onservada H erbácea Sitio 1 Muestra 1

II.2.1 Muestreo especies arbóreas

Dentro de la parcela de 100 m² se identificó aquellas especies con características físicas similares y se contabilizó el total de cada clase o grupo identificado; se consideró el tipo de tronco, su textura y color, así como la forma de las hojas, el color, los bordes y el tamaño, por último, se observó el tipo de bellotas de cada árbol. Posteriormente, acorde a la metodología descrita por Rojas y Villers (2008), para determinar el volumen de biomasa arbórea se tomaron medidas del diámetro a la altura del pecho (DAP), es decir a 1.30 m y se clasificó en aquellos mayores o iguales a 10 cm y menores a 10 cm de diámetro. Al ser un método no destructivo, la altura se estimó con ayuda de un clisímetro, tomando distancia de 15 m desde la base del árbol, considerando la pendiente y la cantidad de arbustos que dificultaron el paso para tomar la distancia adecuada en un tiempo corto.

II.2.2 Muestreo especies arbustivas

Dentro de la misma parcela de 100 m² se identificó aquellos arbustos con características similares acorde al tipo de rama por su tamaño, textura, así como el tipo de hojas en cuanto a color, bordes, textura y tamaño, para finalmente considerar el tipo de flor por el color, forma, tamaño y disposición en las ramas. Una vez identificados, se contabilizó por cada grupo el total de arbustos, procurando no confundir aquellos semejantes, pero con distinto borde de hoja, así como no confundir el número de arbustos en un mismo espacio. Por último, se seleccionó un arbusto representativo de cada grupo y se dispuso en bolsas de papel, previamente pesadas, para obtener el peso fresco de cada especie representativa.

II.2.3 Muestreo especies herbáceas

La parcela de 1 m² fue exclusivamente para contabilizar el total de herbáceas acorde a su categoría. Se contabilizó el total de aquellas que compartían características del tipo de tallo por color y textura, el tipo de hoja por color, textura, bordes, tamaño y disposición, el tipo de flor, si era el caso, en

cuanto a la forma, cantidad de pétalos, color y tamaño. Se tomaron réplicas suficientes, dependiendo el tamaño de cada planta, en bolsas de papel para obtener un volumen representativo de cada muestra y al mismo tiempo se obtuvo su peso fresco.

II.3 Análisis de laboratorio

Finalizando el muestreo en campo, se tomaron fotografías de cada muestra para su identificación. Luego, se eliminó humedad en el horno a 80°C durante 48 horas. Pasado el tiempo de secado se obtuvo el peso seco de cada muestra.

Previo al análisis de carbono orgánico, nitrógeno y fósforo se trituró la muestra de cada ejemplar para su homogeneización mediante mortero o molino manual, esto dependió de la dificultad de trituración y volumen de muestra, ya que aquellas especies de poco volumen no era posible triturarlas con molino manual, por lo que se utilizó el mortero, sin embargo, por la naturaleza de sus tejidos resultó en ocasiones complicado homogeneizar la muestra en un tiempo óptimo. Además, con el uso de molino las muestras se trituraron más de dos veces para obtener el menor tamaño posible y facilitar la homogeneización.

Por último, a cada muestra se le realizaron duplicados de los análisis que se describen a continuación.

II.3.1 Carbono orgánico por el método de Walkley y Black

Mediante el método de Walkley y Black para determinación de carbono orgánico se realizó digestión de 0.003 g de la muestra en un matraz Erlenmeyer 500 mL con una solución oxidante de 10 mL de ácido sulfúrico concentrado con 5 mL de dicromato de potasio 1 N. El peso de la muestra se determinó luego de observar que al momento de agregar dicromato de potasio 1N con cantidades mayores, la solución se tornaba verde, indicando una reducción completa del dicromato de potasio, por lo que se optó por disminuir el tamaño de la muestra hasta 0.003 gramos lo que evitaba el consumo total del dicromato de potasio.

Después de la digestión, se agregaron 100 mL de agua destilada y 5 mL de ácido fosfórico para facilitar la reacción del dicromato de potasio con los compuestos orgánicos presentes en la muestra. Finalmente, se adicionó indicador bariosulfonato de difenilamina y se tituló con sulfato ferroso 0.5 N que reaccionó con cualquier exceso de dicromato de potasio no consumido durante la oxidación.

El contenido de carbono orgánico se calculó a partir del volumen de dicromato de potasio presente durante la titulación.

II.3.2 Nitrógeno por el método Micro-Kjeldhal

Se determinó nitrógeno a través de la digestión de 0.03 g de la muestra con 2 mL de ácido sulfúrico y calor (360°C) en presencia de 1 g de mezcla catalizadora, convirtiendo nitrógeno-proteína a sulfato ácido de amonio. Acto seguido, se neutralizó la solución con hidróxido de sodio-tiosulfato de sodio, en la que se liberó amoníaco y fue destilado por arrastre de vapor hasta una solución de 6 mL de ácido bórico con 3 gotas de indicador rojo de metilo en verde de bromocresol que formó un complejo boro-amoniaco. El destilado se interrumpió cuando se obtuvo aproximadamente 50 mL. Por último, se cuantificó el nitrógeno titulando con ácido sulfúrico 0.025 N hasta virar a un tono violeta.

II.3.3 Fósforo por el método de Jackson Modificado

En tubo para digestión se colocaron 0.5 g de la muestra con 3.5 mL de ácido sulfúrico concentrado y 3.5 mL de peróxido de hidrógeno al 30%. Como protección se colocó un embudo y se llevó a digestión durante 30 minutos a 360°C. Pasado el tiempo estimado se adicionaron 2 mL de peróxido de hidrógeno y repitió nuevamente la digestión hasta obtener un líquido claro o transparente. Una vez concluido lo anterior, se diluyó con 20 mL de agua destilada y aforó a 50 mL.

Previo a la lectura de fósforo (P), en el espectrofotómetro se preparó una curva de calibración de 0, 2, 4, 8, 12 y 18 ppm de P con una solución patrón de

100 ppm. Por último, se adicionó vanadomolibdico a la muestra y, esta como los estándares tuvieron un volumen final de 10 mL para luego disponerlo en las celdas fotométricas.

El método se basa en la formación de un complejo que se genera cuando se agrega un exceso de iones molibdato a una solución ácida de iones vanadato y ortofosfatos. El color amarillo es atribuido a la sustitución de los oxígenos del fosfato por los radicales oxivanadio y oximolibdeno.

II.4 Análisis de datos

II.4.1 Biomasa

- Arbóreas

Siguiendo la metodología de Rojas y Villers (2008), para estimar la biomasa arbórea, en primera instancia, se obtuvo el volumen de cada ejemplar, como se muestra en la ecuación 1:

$$V = (DAP)^2 * \left(\frac{\pi}{4}\right) * h * CM \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

V: Volumen (m^3)

DAP: Diámetro a la altura del pecho (*m*)

$\pi/4 = 0.7854$

h: Altura del árbol (*m*)

CM: Coeficiente mórfico forestal = 0.7

Posteriormente, como se muestra en la ecuación 2, este se multiplicó por la densidad básica de la madera, tomando los valores de 0.67 g/cm³ y 0.65 g/cm³ propuestos por Benjamín et al (2015) para *Quercus crassifolia* y *Quercus laurina*, respectivamente. Así mismo, el resultado fue multiplicado por la constante del Factor de Expansión de fustes (FE), sugeridas por Ruiz et al (2014), siendo 1.189

para *Quercus crassifolia* y 1.172 para *Quercus laurina* con la finalidad de incluir otros componentes de la biomasa, que no se pueden conseguir por mediciones directas, como el número de ramas y follaje.

$$B = V * Db * FE \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

B: Biomasa (t)

V: Volumen (m³)

Db: Densidad básica de la madera (t/m³)

FE: Factor de Expansión de fustes

- Arbustivas y herbáceas

El valor de biomasa se consideró directamente del peso fresco tomado en campo de cada especie representativa. Al tratarse de biomasa área, se excluyó la raíz del pesaje.

Para estimar la biomasa total de cada especie (herbáceas, arbustos y arbóreas), se consideró el valor de biomasa de cada muestra representativa y el número total de individuos en cada sitio.

Por último, los resultados obtenidos se estimaron a toneladas por hectárea (t/ha), puesto que lo descrito anteriormente proyecta resultados de toneladas o gramos en 100 m² o 1m², en caso de herbáceas.

II.4.2 Laboratorio

- Carbono orgánico

Se calcula a través del método propuesto por Walkley y Black en 1934, donde inicialmente se obtiene el porcentaje de materia orgánica, a través de la siguiente ecuación:

$$\%MO = \frac{5 - (mL \text{ de } FeSO_4 * N_{real})}{g \text{ de la muestra}} * 0.69 \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

5: mL de dicromato de potasio agregados

N_{real} : Normalidad real de $FeSO_4$

La N_{real} se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$N_{real} = \frac{10 * 0.5}{mL \text{ de } FeSO_4 \text{ gastados en el blanco}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Finalmente, por medio de la Ecuación 5, se calcula el porcentaje de carbono orgánico:

$$\%CO = \frac{\%MO}{1.724} \quad \text{Ecuación 5}$$

- Nitrógeno

A través de la ecuación siguiente se obtuvo el porcentaje de nitrógeno total de la muestra analizada:

$$\%N_{total} = \frac{(mL H_2SO_4 M - mL H_2SO_4 B) * N * 14.007 * 100}{mg \text{ de la muestra}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

M : Muestra

N : Normalidad real de H_2SO_4 diluido

Para calcular la normalidad real de H_2SO_4 :

$$N_{H_2SO_4} = \frac{0.050 g}{53} * \frac{1}{V_{H_2SO_4}(\text{Litros})} \quad \text{Ecuación 7}$$

- Fósforo

La concentración de fósforo en cada muestra se obtuvo a partir de la curva de calibración de los estándares preparados, donde se midió la absorbancia de estos y de la muestra analizada, posteriormente se interpolaron los datos.

Todos los datos obtenidos se procesaron en el programa Excel con el complemento Real Statistics, donde se estimaron a toneladas por hectárea. Las variables se analizaron con ANOVA de un factor ($\alpha = 0.1$) para determinar diferencias en el aporte de biomasa y cantidad de carbono de cada especie, los resultados mostraron diferencias significativas. Por último, mediante gráficas de barras, se comparó cada parámetro en las tres áreas y se evaluó el comportamiento de recuperación del ecosistema.

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

III.1 Parámetros totales en cada área

En la *Tabla 3* se desglosa el aporte de biomasa y contenido de carbono orgánico, nitrógeno, fósforo y relación C/N herbáceo (H), arbustivo (A) y arbóreo (X) en los sitios de interés.

Tabla 3. Aporte de biomasa y contenido de CO, N y P herbáceo, arbustivo y arbóreo en cada área del año evaluado

Área-especie	Biomasa total (kg/ha)	CO total (kg/ha)	N total (kg/ha)	P total (g/ha)	Relación C/N
Conservada-Herbácea	1852.00	686.46	26.24	5.99	26.16
Transición-Herbácea	9749.06	4779.06	60.98	20.80	78.37
Agrícola-Herbácea	9097.00	3616.96	101.98	26.69	35.47
Conservada-Arbustiva	2987.36	2612.55	19.23	6.39	135.89
Transición-Arbustiva	89.05	44.32	0.75	0.18	58.98
Conservada-Arbórea	289928.74	144964.37	-	-	-

Los parámetros de biomasa y carbono orgánico de herbáceas en el área conservada (AC) son menores al área de transición (AT) y agrícola (AA), debido a que bajo el dosel arbóreo existen diferencias de luz por la formación de claros, afectando la distribución de especies herbáceas y arbustivas (Damascos y Rapoport, 2002), mientras que el AT presenta los valores más elevados, atribuidos al proceso de recuperación. Dado que el AA sufre constantes alteraciones, como labranza del suelo, los resultados son bajos. Por otro lado, el contenido de nitrógeno y fósforo es mayor en el sitio agrícola y disminuye hasta el AC. En cuanto a especies arbustivas, el área sin alterar presenta los niveles más altos que el AT en cada parámetro evaluado. En el *Gráfico 1* se observa el comportamiento de biomasa de cada especie en las tres áreas, teniendo en cuenta la escala del lado izquierdo como el aporte de kg/ha solo de arbóreas y la escala del lado derecho para herbáceas y arbustivas. El gráfico muestra la

cantidad de biomasa determinada durante el estudio, considerando el tiempo de crecimiento de cada especie, es decir, la biomasa acumulada de las especies arbóreas es mayor que la del resto, ya que estas tardaron años en alcanzar el volumen y tamaño evaluados en la salida de campo, mientras que las herbáceas suelen ser plantas anuales.

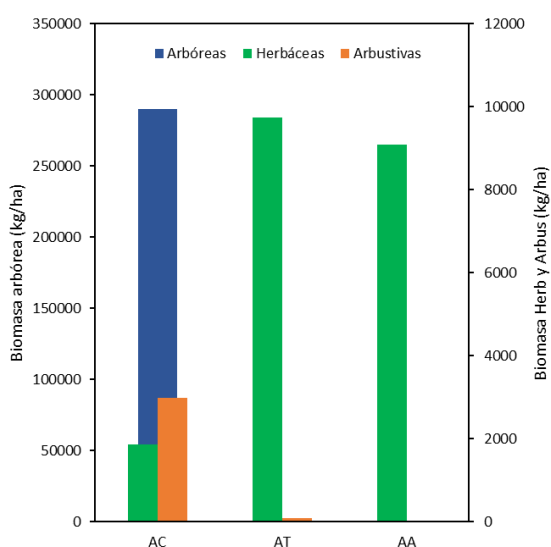


Gráfico 1. Biomasa herbácea, arbustiva y arbórea en el Ecosistema Forestal Fragmentado considerando el tiempo de crecimiento

Los datos totales de biomasa, C, N y P en cada área se muestran en la *Tabla 4*. Estos involucran los resultados de herbáceas, arbustos y árboles.

Tabla 4. Parámetros por área en el año 2023 en el Cerro El Tintero, Acajete, Puebla

Área	Biomasa total (kg/ha)	CO total (kg/ha)	N total (kg/ha)	P total (g/ha)	Relación C/N
Conservada	294768.09	148263.38	45.46*	12.38*	72.56*
Transición	9838.10	4823.38	61.73	20.97	78.14
Agrícola	9097.00	3616.96	101.98	26.69	35.47

* Resultados sin considerar especies arbóreas.

El carbono y nitrógeno están estrechamente relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas (Zheng, 2009; Aguirre, Piraneque y Cruz, 2022). Autores como Sinaluisa, León, Peralta y Suárez (2022) señalan que el rendimiento de un cultivo posterior a un cultivo de cobertura está influenciado por la relación carbono/nitrógeno (C/N) de la biomasa del primer cultivo, en ese sentido, el rendimiento de las plantas que suplen a las pioneras en un ecosistema se ve afectado por la relación C/N de estas. Se determina por el contenido de carbono (C) y nitrógeno total (N), se trata de un indicador de la mineralización de la materia orgánica del suelo que correlaciona con las propiedades edáficas (Soto, Hernández, Luna, Ortiz y García, 2016).

El carbono fijado por la biomasa representa el 50-60% de la materia orgánica, por lo que es normal que el porcentaje de nitrógeno sea menor que el porcentaje de carbono (Martínez y Leyva, 2014). Es importante señalar que la cantidad de C está estrechamente relacionada con el volumen de biomasa, por lo que el AC y AT muestran valores altos de C/N a comparación del AA como consecuencia de que en los sitios destinados a la agricultura se aprovecha casi la totalidad de biomasa producida, por lo que el C es bajo y la alta presencia de N es por el constante uso de fertilizantes (Izquierdo, 2017). Sumado a lo anterior, se debe considerar la relación C/N del suelo para conocer la velocidad de proliferación de microorganismos y la rapidez con que la materia orgánica se mineraliza para determinar la tasa de nitrógeno disponible para las plantas, puesto que podría interpretarse que la materia orgánica se descompone lentamente y hay mayor inmovilización de N en la microbiota en los sitios conservado y de transición (Gamarra et al., 2017; Álvarez, 2001). Sin embargo, la alta relación C/N de estas dos áreas se atribuye a la complejidad de estructuras de cada especie, es decir, los arbustos tienen un mayor orden estructural que las herbáceas, por lo que la degradación es más lenta, además que existe una mayor concentración de biomasa aérea y como consecuencia de materia orgánica sobre la capa más superficial del suelo.

Se realizó un ANOVA ($\alpha = 0.1$) a los datos de biomasa y carbono orgánico de cada área, los resultados mostraron diferencias significativas, tal como se muestra en las tablas 5 y 6. De igual manera se realizó la prueba de Tuckey para

ambos parámetros cuyos resultados se muestran en la *Tabla 12 y 13* del Anexo I. El área conservada muestra un mayor contenido de biomasa, seguida por el área de transición y, por último, el área agrícola. En carbono orgánico, el AT tiene un aporte mayor al del AA. En cuanto a nitrógeno y fósforo, el sitio agrícola cuenta con los valores más altos, considerando que los datos en el AC no incluyen los de especies arbóreas, por lo que en las tres áreas se evalúa únicamente el de especies herbáceas y arbustivas. Dichos resultados en el AA se atribuyen al constante uso de fertilizantes en suelos agrícolas, por lo que se consideran como resultado de la contaminación del sitio (Izquierdo, 2017).

Tabla 5. ANOVA de biomasa aérea total del área de Conservación, Transición y Agrícola

Sources	SS	df	MS	F	P value	Alpha 0.1		
						Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Groups	55795867639	2	27897933819	4.952398668	0.053687024	0.622755331	1.284834447	0.46760675
Within Groups	33799298914	6	5633216486					
Total	89595166553	8	11199395819					

Tabla 6. ANOVA de CO total del área de Conservación, Transición y Agrícola

Sources	SS	df	MS	F	P value	Alpha 0.1		
						Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Groups	14121510641	2	7060755321	4.977765407	0.053176528	0.623954849	1.288120777	0.46919975
Within Groups	8510753010	6	1418458835					
Total	22632263651	8	2829032956					

III.2 Factor compensación en el ecosistema

Considerando a las herbáceas como especies pioneras capaces de realizar una colonización y dominar el dosel en un 80% los primeros 50 años de vida (Sánchez, Ramírez, Andrade y Rodríguez, s.f.), así como contar con altas concentraciones foliares de nutrientes y de renovación del follaje de las capas debido a su ciclo de vida más corto en comparación con especies arbóreas (Velasco, 2022), se optó por estimar el aporte de biomasa y cantidad de carbono orgánico de estas al ecosistema en un periodo de 20 años en el AT y AA, tal como se muestra en la *Tabla 7*, manteniendo como referencia los datos del AC sin realizar la estimación a esta área. El motivo de considerar ese tiempo de proyección se debe a que no se conoce con certeza los años de crecimiento de

cada especie arbórea estudiada y como mencionan Álvarez, Williams y Amelia (2014) algunos árboles, entre ellos *Quercus sp*, disminuyen el incremento de altura y diámetro entre los 8 y 13 años. Además, basándose en el principio de sucesión ecológica, gran parte de las plantas pioneras disminuyen su volumen una vez que especies de mayor orden estructural generan cambios en las condiciones abióticas (Martínez y García, 2008). Por lo que, se realizó una comparación entre el aporte herbáceo del área de transición y agrícola proyectada a 20 años y la biomasa y CO total (herbáceo, arbustivo y arbóreo) del año evaluado del área conservada. De esta forma, los resultados se muestran sin considerar la diferencia del factor de crecimiento de cada ejemplar.

Tabla 7. Biomasa y CO total del AC en 2023 y Biomasa y CO herbáceo del AT y AA estimados a 20 años en el ecosistema forestal fragmentado

Área	Biomasa (kg/ha)	CO (kg/ha)
Conservada	294768.09	148263.38
Transición	196762.00	96467.60
Agrícola	181940.00	72339.15

Como se mencionó, la estimación se realizó únicamente para especies herbáceas del área de transición y agrícola, ya que el área conservada se toma como referencia de un ecosistema en equilibrio no perturbado. En el *Gráfico 2* se observa el comportamiento de cada parámetro en las distintas áreas en el año evaluado. En el *Gráfico 3* se muestra el comportamiento de resiliencia proyectado a 20 años del AT y AA en comparación con AC.

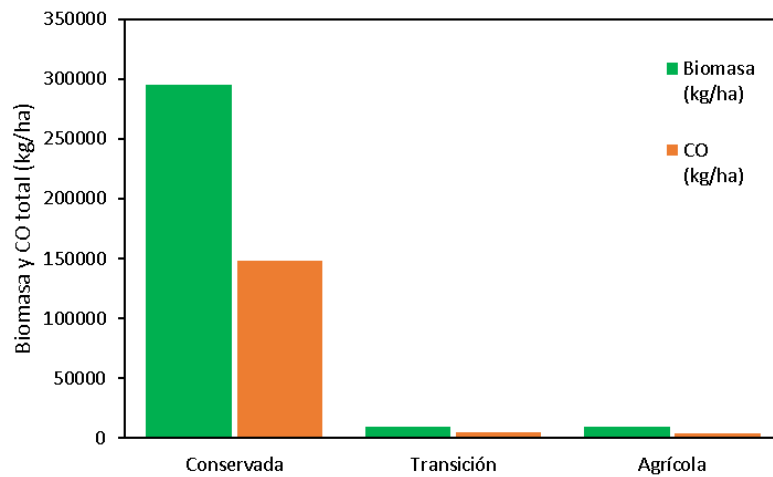


Gráfico 2. Biomasa y CO total del año 2023 por área

El aporte de biomasa y contenido de carbono orgánico en AT y AA es menor en comparación con AC, debido a la ausencia de especies arbóreas en ambos sitios y arbustos en el área agrícola.

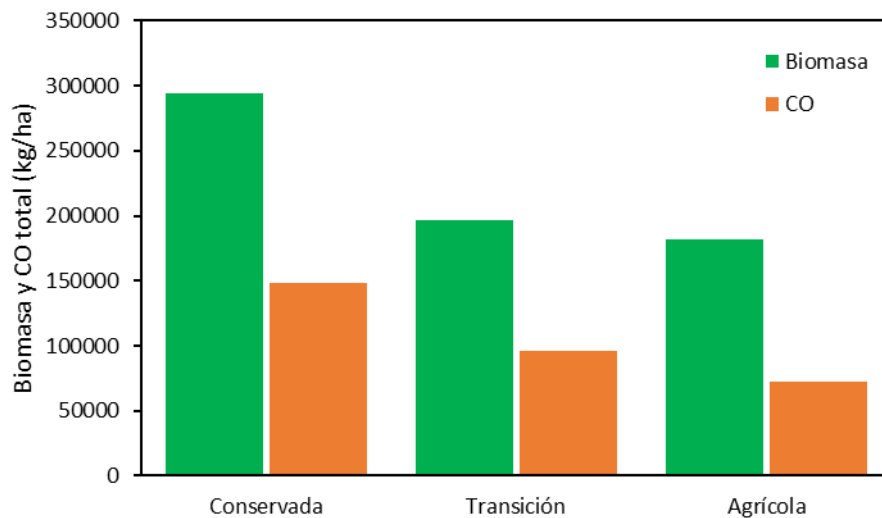


Gráfico 3. Biomasa y CO total del AC en 2023 vs Biomasa y CO herbáceo del AT y AA estimados a 20 años en El Cerro El Tintero, Acajete, Puebla

Dada la facilidad del reciclaje eficiente de nutrientes por parte de herbáceas en un ecosistema (Velasco, 2022), es como se proyecta el comportamiento de

estas en sitios perturbados y en resiliencia. En el gráfico se analiza que el área de transición presenta un volumen de biomasa mayor como respuesta a su capacidad de recuperación y adaptación para restaurar su funcionalidad y estructura (Mayo, Romo y Medina, 2018). Por otro lado, el área que sufre constantes alteraciones de igual forma muestra un incremento en biomasa y CO₂, sin embargo, se debe considerar que, con el tiempo, la degradación del suelo llevará a la pérdida de propiedades, afectando la estabilidad, fertilidad y producción de biomasa, por lo que la proyección se realizó bajo la premisa de un sitio agrícola en recuperación sin futuras alteraciones como deshierbe, RTQ, arado, entre otros. Ambos sitios a pesar de no igualar al AC en biomasa y carbono orgánico muestran la importancia que tienen las especies de menor tamaño en sitios sin presencia arbórea, al contribuir con cobertura vegetal que protege al suelo de la radiación solar, mantiene la humedad y actividad microbiana, evita la erosión y aporta materia orgánica que se relaciona con la estabilidad de agregados y estructura del suelo, permitiendo un correcto transporte de nutrientes, capacidad de filtración y drenaje e impidiendo la compactación (García, 2008). De esta forma contribuyen en el secuestro de carbono y disminución del calentamiento global.

III.2.1 Comportamiento de herbáceas en cada área

La herbácea caracterizada como *HB* mostró presencia en las tres áreas estudiadas. El comportamiento varió en cada una y se muestra en las gráficas siguientes:

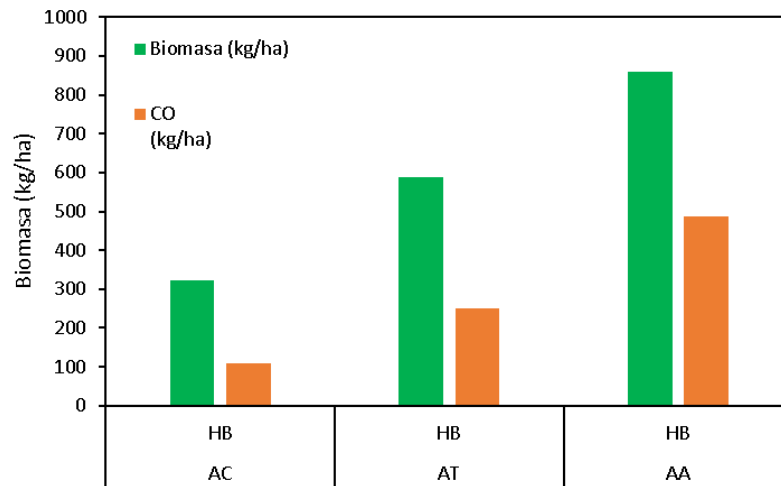


Gráfico 4. Comportamiento de la herbácea HB en aporte de biomasa y contenido de CO

Se identifica que la cantidad de biomasa aportada es mayor en el sitio que sufre constantes alteraciones del suelo. Mientras que, en el área con cierto grado de recuperación, este valor continúa siendo elevado en comparación con el sitio no perturbado. Esto muestra que, en sitios sin cobertura arbórea, las especies herbáceas se distribuyen en mayor proporción, desempeñando un papel crucial en la protección y recuperación del suelo.

Por otro lado, la cantidad de nitrógeno (Gráfico 5) y fósforo (Gráfico 6) tiene el mismo comportamiento que el anterior, atribuido al mismo efecto regenerativo.

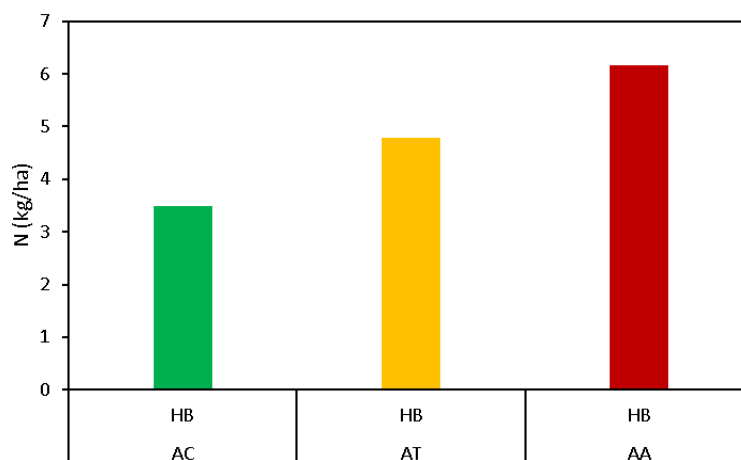


Gráfico 5. Comportamiento de la herbácea HB en contenido de nitrógeno

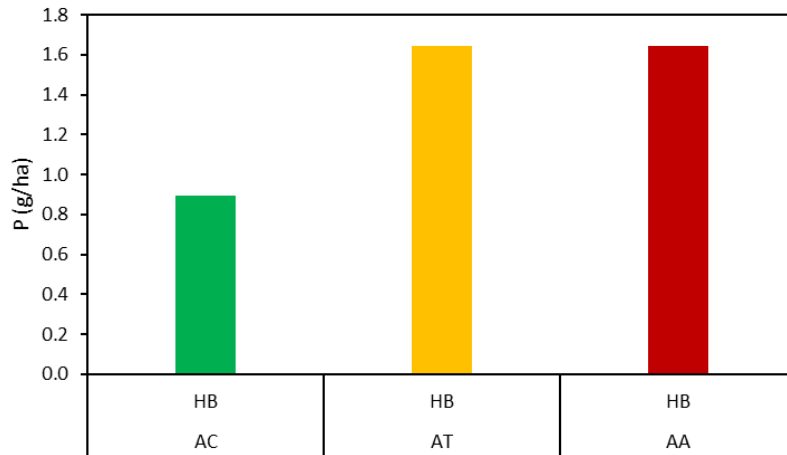


Gráfico 6. Comportamiento de la herbácea HB en contenido de fósforo

III.3 Aporte de biomasa y contenido de C, N y P de herbáceas

En los gráficos siguientes se compara aquellas especies herbáceas con un aporte mayor de biomasa y contenido de carbono orgánico, nitrógeno y fósforo al ecosistema en comparación del resto. Determinar estos parámetros en las especies permite evaluar su rendimiento ecológico, el cual contribuye en la regeneración de un ecosistema, comenzando por el suelo, cuando la biomasa se integra como materia orgánica y la cantidad CO, N y P con esta (Aguirre, Piraneque y Cruz, 2022).

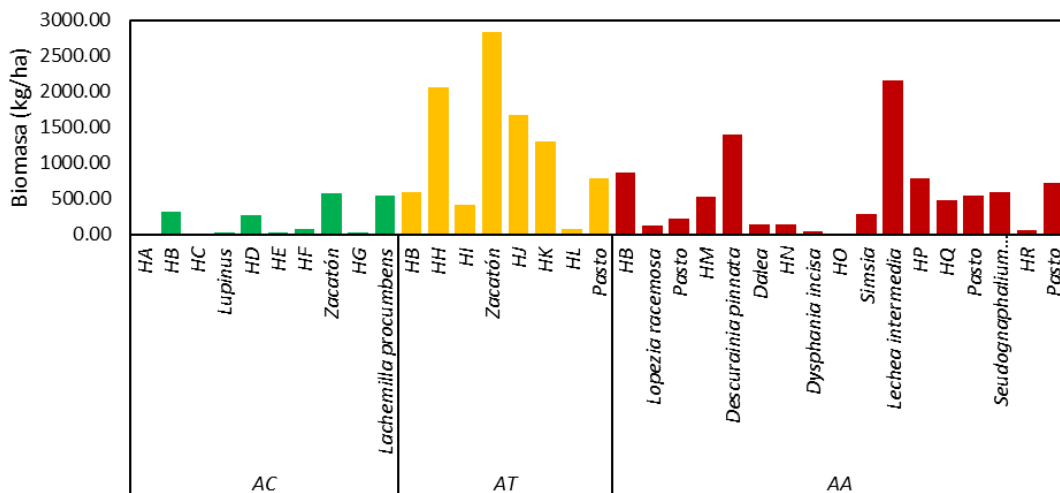


Gráfico 7. Aporte de biomasa herbácea en cada área

En el área conservada la especie *Zacatón* aporta mayor biomasa aérea, al igual que en el área de transición con 573.33 kg/ha y 2828.22 kg/ha, respectivamente, mientras que en el área agrícola es *Lechea intermedia* con 2148.67 kg/ha. Identificar especies con una producción mayor de biomasa permite seleccionar aquellas con la capacidad de cubrir la superficie del suelo en un periodo más corto y contribuir en la regeneración de este y el ecosistema.

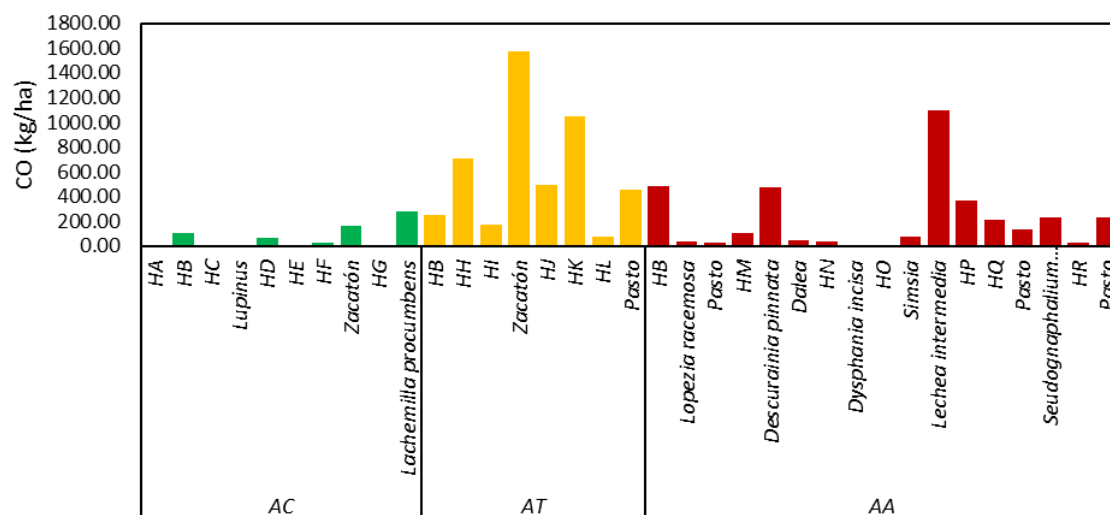


Gráfico 8. Contenido de carbono orgánico herbáceo en cada área

La vegetación representa uno de los principales sumideros de carbono y cuanto mayor cobertura vegetal, mayor el secuestro de este elemento que contribuye en la mitigación del calentamiento global (CONAFOR, 2023). En el *Gráfico 8* se observa que del área conservada la especie *Lachemilla procumbens* contiene mayor carbono orgánico que el resto con 281.64 kgCO/ha, aunque el valor se encuentra muy por debajo de las especies en las demás áreas: *Zacatón* con 1570.61 kgCO/ha y *Lechea intermedia* con 1097.63 kgCO/ha del área de transición y agrícola, respectivamente.

Por otro lado, en el *Gráfico 9* se observa aquellas especies que destacan por su contenido de nitrógeno, siendo esto importante para seleccionar aquellas con un mayor rendimiento para el proceso de recuperación de un área perturbada.

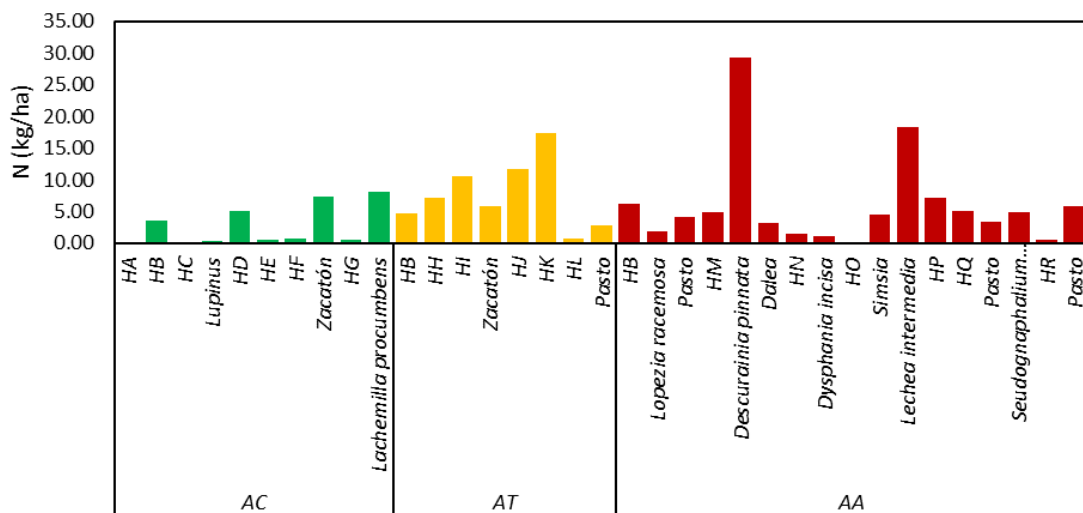


Gráfico 9. Contenido de nitrógeno herbáceo en cada área

Descurainia pinnata del área agrícola destaca sobre todas las especies analizadas con 29.25 kgN/ha. El comportamiento en el AA muestra una notable variabilidad del contenido de nitrógeno en cada planta, producto de la fertilización, ya que las herbáceas que asimilan mejor el fertilizante crecen con mayor velocidad, predominando sobre otras ocasionando que desaparezcan (Martínez et al., 2011)b, dicho comportamiento se observa con las especies *Descurainia pinnata* y *Lechea intermedia* por la cantidad de biomasa y nitrógeno superior al resto. La herbácea *HK* en el AT tiene un mayor contenido de nitrógeno con 17.36 kgN/ha, en esta área la mayoría de especies contiene niveles altos de nitrógeno a excepción de los ejemplares *HL* y *Pasto*. Por último, en el AC destacan pocas especies, siendo *Lachemilla procumbens* con mayor contenido de 8.17 kgN/ha.

Así como el N, el fósforo también tiene un papel importante en la dinámica de la cobertura vegetal, ya que es limitante para el crecimiento de las plantas por su participación en casi todos los procesos metabólicos, incluyendo la respiración y fotosíntesis (Mixquititla y Villegas, 2016). En el Gráfico 10 se analiza el comportamiento de cada ejemplar.

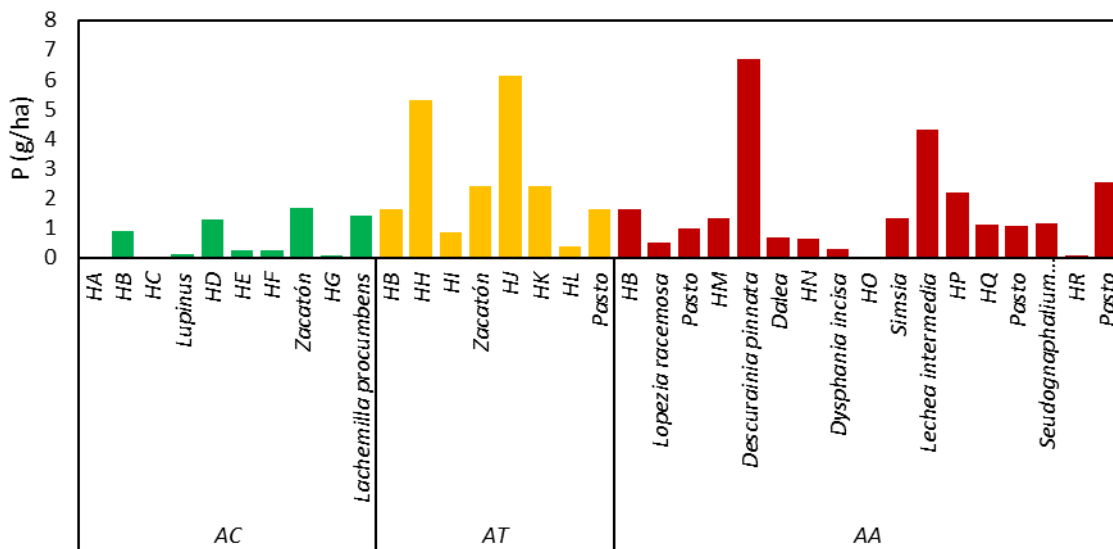


Gráfico 10. Contenido de fósforo herbáceo en cada área

En el AC la especie con mayor contenido es *Zacatón* con 1.66 gP/ha, en cambio en el AT destacan *HH* y *HJ* con 5.32 gP/ha y 6.12 gP/ha, respectivamente. En el AA las especies con contenido de fósforo mayor son *Descurainia pinnata* con 6.68 gP/ha y *Lechea intermedia* con 4.33 gP/ha.

III.4 Aporte de biomasa y contenido de C, N y P de arbustivas

En los gráficos siguientes se identifica aquellas especies arbustivas con un aporte mayor de biomasa, contenido de carbono orgánico, nitrógeno y fósforo en cada área de estudio.

En campo, en el área conservada la cantidad de cobertura arbustiva era evidente bajo los claros de mayor tamaño del dosel arbóreo, esto evidencia el comportamiento del ecosistema para generar cobertura vegetal como protección al suelo ante una mayor exposición de luz solar y lluvia en ese tipo de espacios. En el *Gráfico 11* el arbusto con mayor aporte de biomasa es *Verbesina virgata* con 929.48 kg/ha, mientras que en el área de transición el aporte no es tan grande, debido al proceso de recuperación del sitio donde la prioridad principal es la protección inmediata del suelo, por lo que predominan las herbáceas.

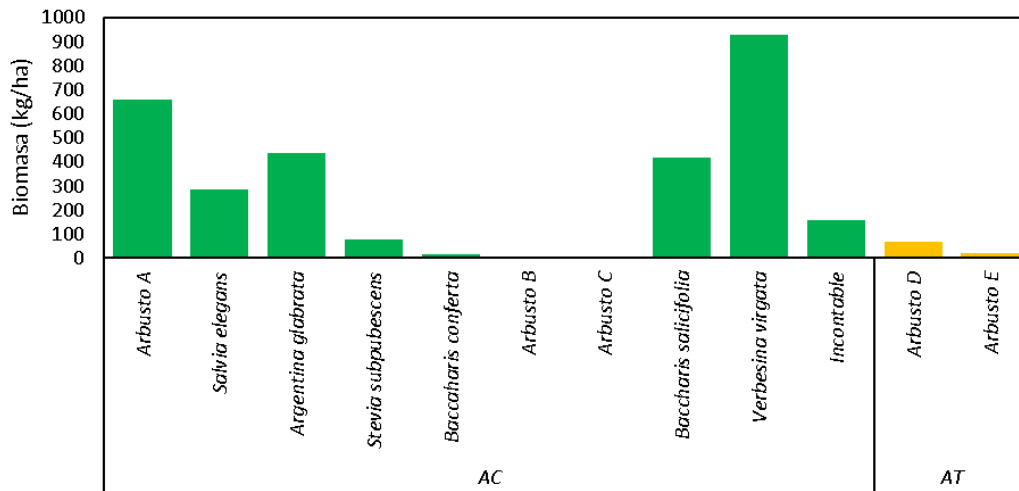


Gráfico 11. Aporte de biomasa arbustiva en cada área

En el Gráfico 12 la especie con mayor contenido de carbono orgánico es *Verbesina virgata* con 1476.21 kg/ha, mientras que en el AT es *Arbusto D* con 36.33 kg/ha. Comparando estos resultados con los del gráfico anterior, se observa que las especies como *Arbusto A* y *Argentina glabrata* tienen gran capacidad de cubrir una superficie, pero una baja eficiencia en capturar y almacenar el carbono en sus tejidos. Por otro lado, *Verbesina virgata* mantiene elevado su aporte en biomasa y contenido de carbono orgánico, por lo que resultaría útil en la recuperación de un área degradada para este tipo de ecosistema.

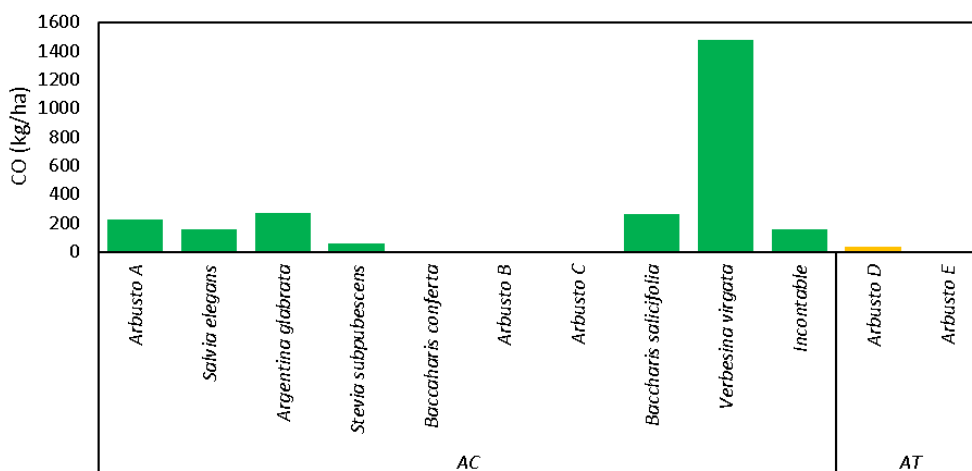


Gráfico 12. Contenido de carbono orgánico arbustivo en cada área

El nitrógeno de cada especie se muestra a continuación, teniendo a *Verbesina virgata* y *Arbusto A* como aquellas con mayor contenido del área conservada. En el AT el *Arbusto D* cuenta con mayor N que el *Arbusto E*.

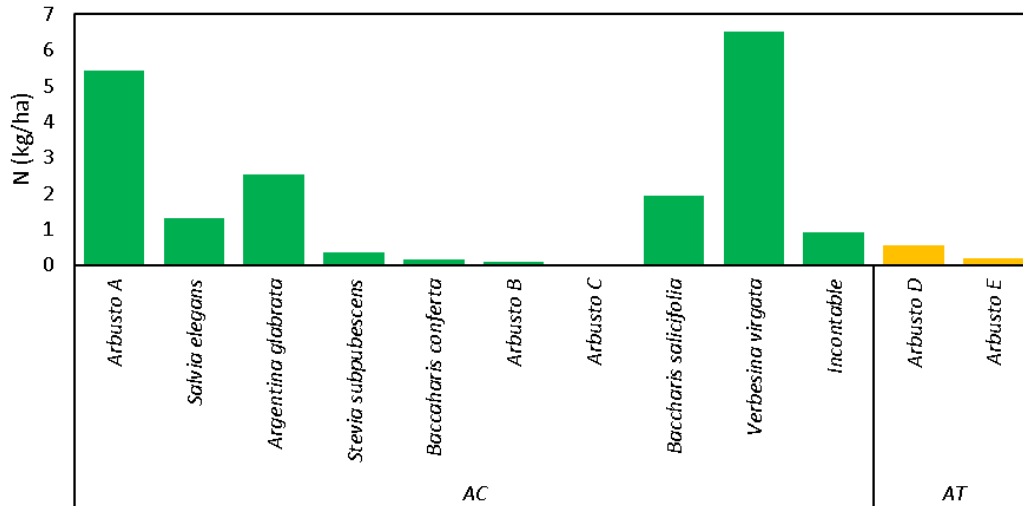


Gráfico 13. Contenido de nitrógeno arbustivo en cada área

Por último, del Gráfico 14, el arbusto con mayor contenido de fósforo es *Verbesina virgata* con 1.71 g/ha y el de menor contenido es *Arbusto C*.

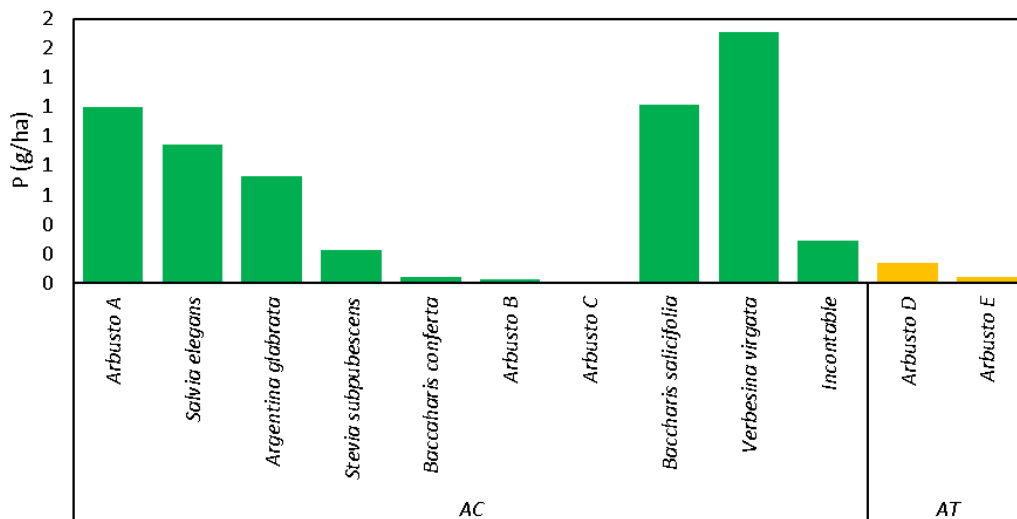


Gráfico 14. Contenido de fósforo arbustivo en cada área

III.5 Aporte de biomasa de arbóreas

La presencia de especies arbóreas se encontró únicamente en el área conservada y con los resultados totales de cada área, descritos anteriormente, se ratifica su importancia en los ecosistemas por la cantidad de biomasa que aportan y el carbono que almacenan que contribuye en la disminución del calentamiento global. En la tabla siguiente se muestran las características determinadas en campo para el presente estudio.

Tabla 8. Arbóreas presentes en el Cerro El Tintero, Acajete, Puebla

Especie	Estadístico	Altura (m)	DAP (cm)	Biomasa (kg)
<i>Quercus crassifolia</i> (n=7)	Mínimo	10.9	13.05	80
	Máximo	27.96	34.17	1390.00
	Promedio	18.05	22.07	471.00
<i>Quercus laurina</i> (n=2)	Mínimo	26.88	22.28	670
	Máximo	32.25	31.67	1120
	Promedio	29.57	26.98	895

Los resultados anteriores tienen similitud con los datos obtenidos por Ruiz et al (2014) en su investigación de *Ecuaciones de biomasa aérea para Quercus laurina y Q. crassifolia en Oaxaca*.

III.6 Aporte de biomasa del cultivo de maíz y herbáceas

En algunas partes del estado de Puebla, como Acajete, se cultiva el maíz criollo al ser resistente a las plagas y adaptarse a las regiones con condiciones climáticas más frías (AGRICULTURA, 2024). De acuerdo con Elizondo y Boschini (2002) la biomasa promedio del maíz criollo es de 102,817 kg/ha. En el *Gráfico 15* se compara esta cantidad con la biomasa herbácea del área agrícola, mostrando que el cultivo de maíz aporta mayor biomasa que las herbáceas muestreadas. Sin embargo, a pesar de tener mayor cobertura vegetal al suelo, esta no se integra al mismo como materia orgánica, ya que se aprovecha el cultivo casi en su totalidad, por lo que todos los nutrientes y carbono que contiene

el maíz no contribuyen en la recuperación del suelo, siendo este el problema para suelos agrícolas, en los que con el tiempo se ocasiona su deterioro, erosión, pérdida de nutrientes, reducción de la productividad agrícola, elevando los costos de producción, limitando así la autosuficiencia, seguridad y soberanía alimentaria (Corona y Galeana, 2020).

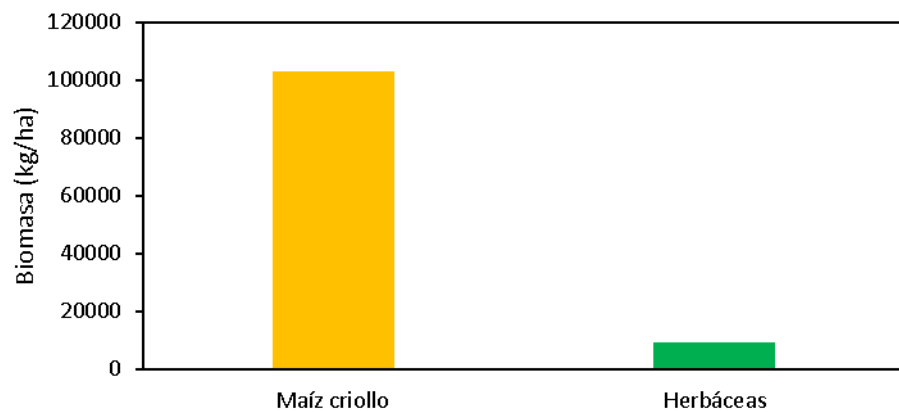


Gráfico 15. Aporte de biomasa de maíz criollo y herbáceas en el área agrícola

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

A partir del análisis de los resultados, se concluye lo siguiente:

- El proceso de recuperación de un ecosistema es evidente con la presencia de especies herbáceas cuyo objetivo es cubrir para proteger y aportar nutrimentos al suelo en periodos más cortos que especies arbustivas y arbóreas.
- El área agrícola que sufre constantes alteraciones de suelo, como pérdida de cobertura, orgánicos, estabilidad, entre otros, presenta únicamente biomasa de tipo herbácea, ya que por las prácticas como labranza y explotación continua, no se permite el desarrollo total de la vegetación que busca compensar los daños causados.
- Existe mayor diversidad herbácea en el AA, sin embargo, se atribuye a que por la naturaleza del muestreo gran parte de estas no contaban con las características suficientes para su correcta identificación.
- El área de transición es muestra que durante el proceso de recuperación existe una alta y diversa cobertura vegetal herbácea, así como la presencia de arbustos. Asumiendo que, con un manejo adecuado, es posible acelerar el proceso de introducción de especies de mayor orden estructural, como las arbóreas, facilitando así la recuperación de gran parte de las condiciones originales del ecosistema.
- El área conservada se caracteriza por contar con la mayor diversidad de cobertura con la presencia de herbáceas, arbustos y árboles. En el sitio también fue evidente que acorde a las condiciones y necesidades del suelo se presentaba la vegetación característica, es decir, bajo claros de mayor tamaño predominan arbustos, mientras que en los de menor tamaño hierbas, pero teniendo como dosel predominante el arbóreo.
- El rendimiento ecológico de herbáceas en el área agrícola y de transición permite identificar aquellas con la capacidad de contribuir y acelerar la regeneración de un ecosistema.

- Algunas herbáceas del AA, como *Descurainia pinnata* destacan por su contenido de Nitrógeno y fósforo, pero su aporte de biomasa es un poco más bajo que el de *Lechea intermedia*. Así como la especie *Zacatón* del área de transición, cuyo contenido de biomasa y carbono es alto, pero en N y P es menor que el resto. De ahí la importancia de la diversidad de especies herbáceas en un sitio en recuperación, puesto que algunas aportan mayor contenido de biomasa y otras contienen mayores nutrimentos de nitrógeno y fósforo esenciales para el desarrollo de la vegetación.
- En arbustos el contenido de biomasa y carbono orgánico varía considerablemente entre especies, sin embargo, *Verbesina virgata* del área conservada destaca por mantener un alto contenido de biomasa, CO, N y P, lo cual representa la posibilidad de utilizar esta especie en aquellos sitios que se pretenda acelerar el proceso de recuperación.
- El aporte de biomasa y contenido de CO de especies arbóreas es significativo en el ecosistema, sin embargo, se debe considerar el factor tiempo de crecimiento de estos, ya que es más lento que herbáceas y arbustos, por lo que durante su desarrollo es importante procurar la diversa cobertura vegetal en los sitios que se pretenda reforestar. De esta forma la captura de CO₂, el reciclamiento de nutrientes y la estabilidad del suelo se protegen durante el desarrollo del dosel arbóreo. Garantizando una contribución más eficiente en la reducción del calentamiento global.
- El contenido de biomasa del cultivo de maíz criollo es mayor al de las herbáceas muestreadas en campo, sin embargo, esa cobertura no es constante y no se integra al suelo, por lo que no contribuye directamente en su recuperación, almacenamiento de carbono y reciclamiento de nutrientes.

Recomendaciones

- Determinar la relación C/N del suelo en cada sitio y analizar su capacidad respecto a la mineralización de materia orgánica. Así mismo, evidenciar que la cantidad de N y P del área agrícola es producto del uso de fertilizantes.
- Estimar la cantidad de nitrógeno y fósforo para las especies arbóreas mediante técnicas poco destructivas y completar el aporte de estas al ecosistema.
- La presente investigación tiene como resultado que es posible acelerar la dinámica de regeneración en un ecosistema si se propicia la cobertura vegetal con herbáceas endémicas de rendimiento ecológico. Para ello, es necesario considerar las condiciones y tipo de suelo, ya que de ello depende si la propagación se realizaría de manera directa en el sitio o por medio de plántulas.
- Se debe considerar para la recolección de semillas muestras representativas de más de una población por especie, es importante que estas provengan del hábitat similar al sitio que se va a restaurar.
- Considerar el tiempo de sobrevivencia de las semillas una vez recolectadas, esto depende de su calidad inicial, la cual varía por daños físicos que presente la semilla como infestación por insectos, así como también el potencial de almacenamiento y la tolerancia al secado.
- Se recomienda evaluar la recuperación de los suelos agrícolas manteniendo una cobertura vegetal diversa herbácea.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M. et al. (2020). Carbono en suelo, hierbas y arbustos en una plantación forestal en Jalisco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(6). México, ME:1377-87. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2427>
- AGRICULTURA. (2024). *Hoja de maíz: un valor añadido*. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/es/articulos/hoja-de-maiz-un-valor-anadido?idiom=es>
- Aguirre, S., Piraneque, N. y Cruz, R. (2022). Relación entre nutrientes con carbono, nitrógeno y materia orgánica en suelos de la zona bananera de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 13(2), 93-111. <https://doi.org/10.22490/21456453.5186>
- Álvarez, C., Williams, G. y Amelia, R. (2014). *Experiencias sobre restauración ecológica en la Región del Bosque de Niebla del centro de Veracruz*. Recuperado de <https://www.uv.mx/personal/rpedraza/files/2014/11/Cap-5-Libro-Monta%C3%83%C2%B1a.pdf>
- Álvarez, J. (2001). Descomposición y ciclo de nutrientes en ecosistemas terrestres en México. *ACTA ZOOLOGICA MEXICANA*. (N.S.), 11-27. <https://doi.org/10.21829/azm.2001.8401843>
- Benjamín, J. et al. (2015). *Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación*. Madera y bosques. 21(spe). 77-216.
- Burbano, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 34(1): 82-96. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>
- Carrasco, B. (2015). *Secuestro de carbono y emisiones de CO₂ en ecosistemas forestales gallegos: materia orgánica edáfica y cambio global*. [Tesis doctoral]. Universidad de Santiago de Compostela.

- Carvajal, M. (s.f.). *Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos de la región de Murcia*. Recuperado de http://www.lessco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_espanol.pdf
- CONAFOR. (2023). *¿Cuánto carbono secuestran los ecosistemas forestales?* Recuperado de <https://www.gob.mx/conafor/articulos/cuanto-carbono-secuestran-los-ecosistemas-forestales>
- Corona, A. y Galeana, J. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones geográficas*. <https://doi.org/10.14350/rig.59976>
- Damascos, M. y Rapoport, E. (2002). Diferencias en la flora herbácea y arbustiva entre claros y áreas bajo dosel en un bosque de *Nothofagus pumilio* en Argentina. *Revista Chilena de Historia Natural*. 75: 465-47. <https://www.scielo.cl/pdf/rchnat/v75n3/art01.pdf>
- De Jong B, Olguín M., Rojas F., Maldonado V. y Paz F. (2018). Base de datos de la biomasa de los sitios del inventario Nacional Forestal y de Suelo del ciclo 2004-2007. *Elementos para políticas públicas*. 2(2):69-84. Recuperado de <https://www.elementospolib.org/ojs/index.php/epp/article/view/19/17>
- Elizondo, J. y Boschini, C. (2002). Producción de forraje con maíz criollo y maíz híbrido. *Agronomía Mesoamericana*. 13(1): 13-17. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/13227/12502>
- EO Browser. (s.f.). <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=10&lat=41.9&lng=12.5&themeld=DEFAULT-THEME&toTime=2024-07-30T22%3A01%3A21.357Z>
- FAO. (2019a). *Control de la erosión del suelo*. Recuperado de <https://www.iaea.org/es/temas/control-de-la-erosion-del-suelo>
- FAO. (2019b). *Proceedings of the Global Symposium on Soil Erosion 2019*. Roma. Recuperado de <https://www.fao.org/3/ca5582en/CA5582EN.pdf>

- FAO. (2022). *Agricultura de Conservación*. Recuperado de <https://www.fao.org/conservation-agriculture/in-practice/soil-organic-cover/es/>
- FAO. ((s.f.)a). *La biodiversidad del Suelo, Conservación del suelo y Agricultura*. Recuperado de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-biodiversity/conservacion-del-suelo-y-agricultura/es/>
- FAO. ((s.f.)b). *Simposio Mundial sobre la Erosión del Suelo*. Recuperado de <https://www.fao.org/about/meetings/soil-erosion-symposium/key-messages/es/>
- Farnum, F. (2019). Caracterización de un bosque fragmentado en un área adyacente a la carretera Boyd Roosevelt, provincia de Colón, Panamá. *Colón, Ciencias, Tecnología y Negocios*. 6(2):31-43. https://revistas.up.ac.pa/index.php/revista_colon_ctn/article/view/1016/873
- Flores, Y. y Monroy, A. (2022). Sucesión ecológica en un matorral xerófilo: una hipótesis explicativa. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25, e479. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.479>
- Gamarra, C., et al. (2017). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 9(46). DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>
- Gamero, A., Delgadillo, J., Cortés, J., Velasco, J. y Velasco, C. (2020). Propiedades del suelo afectadas por el tiempo de descanso en un sistema de roza-tumba-quema. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*. 7(1), e2098. <https://doi.org/10.19136/era.a7nl.2098>
- García, A. (2008). *La materia orgánica (MOS) y su papel en lucha contra la degradación del suelo*. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Memorias (Vol. 18).

- Gelasio S. et al. (2012). Degradación físico-química de suelos agrícolas en San Pedro Lagunillas, Nayarit. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 15: 323-328.
- Gómez, J. et al. (2021). Carbono orgánico del suelo y su relación con la biomasa radical de *Quercus* sp. *Madera y bosques*. 27(spe). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742445>
- INEGI. (2023). *Censo Agropecuario 2022*. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/cagf/2022/doc/CA2022_RONAL.pdf
- INEGI. (s.f.). Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/investigacion/ndvi/>
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Izquierdo, J. (2017). *Contaminación de los suelos agrícolas provocados por el uso de los agroquímicos en la Parroquia San Joaquín*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Julca, A., Meneses, L., Blas, R. y Bello, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia* (Arica). 24(1): 49-61. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Martínez, A. y Leyva, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*. 35(1), 11-20. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v35n1/ctr02114.pdf>
- Martínez et al. (2011). Efectos de la fragmentación de los bosques sobre los líquenes epífitos en la Región Mediterránea. *Ecosistemas*. 20(2): 54-67. Recuperado de <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=692>

- Martínez et al. (2011b). *El exceso de nitratos: un problema actual en la agricultura*. Recuperado de https://www.academia.edu/download/39849131/el_exceso_de_nitratos_un_problema_actual_en_la_agricultura.pdf
- Martínez, E., Fuentes, J. y Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*. 88(1), 68-96. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Martínez, M., Osuna, E. y Espinosa, M. (2020). Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 10(4): 765-778. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1640>
- Martínez, M. y García, X. (2008). Demografía de plantas y regeneración de selvas en campos degradados. En: Sánchez, L., Galindo, J. y Díaz, F. *Ecología, manejo y conservación de los ecosistemas de montaña en México*. 1ª ed. (pp. 73-92). CONABIO, Universidad Veracruzana y MUNDIPRENSA MÉXICO, S.A. de C.V.
- Mayo, M., Romo, R. y Medina, P. (2018). Tasa relativa de crecimiento de herbáceas con potencial de restauración en suelos degradados del bosque La Primavera, Jalisco, México. *Acta universitaria*. 28(2), 58-66. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1930>
- Mena, V. y Andrade, H. (2021). Potencial de reducción de emisiones y captura de carbono en bosques y sistemas agroforestales con cacao en el Pacífico colombiano. *Revista de Biología Tropical*. 69(4): 1252-1263. <https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v69i4.45927>
- Mixquititla, G. y Villegas, O. (2016). Importancia de los fosfatos y fosfitos en la nutrición de cultivos. *Acta Agrícola y Pecuaria*. 2(3):55-61.
- Mólgora, A. (2013). *Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica en cafetales de sombra del centro de Veracruz*. [Tesis de maestría]. INECOL

- Muñoz, M., Delgado, M. y Lucas, M. (2021). La biodiversidad y el carbono orgánico del suelo son esenciales para revertir la desertificación. *Ecosistemas*. 30(3): 2238. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2238>
- Navarro, M., González, L., Flores, R. y Amparán, R. (2015). *Fragmentación y sus implicaciones. Análisis y reflexión documental*. Universidad de Guadalajara.
- Nieto, O., Jiménez, L. y Nieto, M. (2016). Variación de coberturas forestales y ocupación del territorio en el municipio de Armenia 1939-1999. *Luna Azul*. (42): 319-340. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.42.19>
- Osorio, M., Haro, J., Carrillo, W. y Negrete, J. (2022). Suelos: caracterización e importancia. 1^a ed.: *La Plata*. <https://puertomaderoeditorial.com.ar/index.php/pmea/catalog/view/7/64/81>
- Otavo, S. y Echeverría, C. (2017). Fragmentación progresiva y pérdida de hábitat de bosques naturales en uno de los hotspot mundiales de biodiversidad. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88(4): 924-935. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.041>
- Rojas, F. y Villers, L. (2008). Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala – Puebla. *Revista Ciencia Forestal en México*. 33(104).
- Romero, M., Velasco, E., Meza, D. y Pérez, R. (2022). Análisis y estimación del contenido de carbono en pastizales halófilos de la zona central semi-árida de México. *Terra Latinoamericana*. 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1007>
- Ruiz, F. et al (2014). Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y bosques*. 20(2). 33-48.
- Sánchez, D. (2016). *Evaluación del carbono almacenado en la biomasa, necromasa y carbono orgánico del suelo de tres diferentes hábitats en la*

Península de Osa, Costa Rica. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de Costa Rica.

Sánchez, L., Ramírez, E., Andrade, A. y Rodríguez, P. (s.f.). Ecología, florística y restauración del bosque mesófilo de montaña. En: Sánchez, L., Galindo, J. y Díaz, F. *Ecología, manejo y conservación de los ecosistemas de montaña en México*. 1ª ed. (pp. 9-32). CONABIO, Universidad Veracruzana y MUNDI-PRENSA MÉXICO, S.A. de C.V.

Sánchez, M., Velasco, E., Meza, D. y Pérez, R. (2022). Análisis y estimación del contenido de carbono en pastizales halófilos de la zona central semi-árida de México. *Terra Latinoamericana*. 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1007>

Saynes, V., Etchevers, J., Paz, F. y Alvarado, L. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México. *Terra Latinoamericana*. 34(1): 83-96. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100083&lng=es&tlng=es

Scivittaro, W. et al. (2021). *Emisiones de gases de efecto invernadero en producción de arroz de riego*. Recuperado de <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1133230/1/Capitulo-Walkyria-TOMO-II.pdf>

SEMARNAT. (2008). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. Capítulo 3 Suelos. Recuperado de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008/00_intros/pdf.html

SEMARNAT. (2015). *Informe de la Situación del Medio Ambiente*. Recuperado de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf

SEMARNAT. (2018a). *Qué hacer antes de reforestar*. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-hacer-antes-de-reforestar>

- SEMARNAT. (2018b). *¿Qué es la energía de la biomasa?* Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-energia-de-biomasa?idiom=es>
- Sinaluisa, F., León, J., Peralta, M. y Suárez, A. (2022). Valoración de la relación C/N de dos cultivos de cobertura Vicia (*Vicia stenophylla*) y Centeno (*Seecale cereale*) en tres localidades de la provincia de Chimborazo. *Polo del Conocimiento*. 67(7): 1683-1695. Doi: 10.23857/pc.v7i2.3673
- Soto, E., Hernández, M., Luna, H., Ortiz, E. y García, E. (2016). Evaluación del contenido de materia orgánica en suelos agrícolas y su relación carbono/nitrógeno. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 3(5): 98-105. <http://reibci.org/publicados/2016/oct/1800105.pdf>
- Velasco, M. (2022). *Estructura, composición y diversidad del bosque de pino-encino en un gradiente altitudinal en Miguel Hidalgo, San Antonio Huitepec, Oaxaca*. Recuperado de http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/4812/Velasco_Luis_MU_MC_Ciencias_Forestales_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Wodzicki, K. (2001). *El ciclo del carbono*. Recuperado de <https://www.ldeo.columbia.edu/users/gregory/CicloCarbono.pdf>
- Zheng, Z. (2009). Carbon and nitrogen nutrient balance signaling in plants. *Plant Signaling and Behavior*. 4(7): 584-591. <https://doi.org/10.4161/psb.4.7.8540>

ANEXOS

Anexo I. Tablas de datos

Tabla 9. Datos analizados de CO, N y P de cada muestra y duplicados

Muestra		%CO	%N	P (ppm)
CH1	M1 ₁	13.75	1.00	-
	M1 ₂	41.26	-	-
	M2 ₁	27.51	0.82	2.80
	M2 ₂	20.63	-	2.99
	M3 ₁	20.63	1.17	1.90
	M3 ₂	13.75	-	-
	M4 ₁	34.38	1.52	4.90
	M4 ₂	27.51	-	-
CH2	M1 ₁	33.02	1.87	4.86
	M1 ₂	19.81	-	-
	M2 ₁	33.02	1.63	3.64
	M2 ₂	19.81	-	-
	M3 ₁	33.02	1.17	3.28
	M3 ₂	33.02	-	-
CH3	M1 ₁	19.62	1.28	2.89
	M1 ₂	39.24	-	-
	M2 ₁	58.86	2.29	3.45
	M2 ₂	-	-	-
	M3 ₁	45.78	1.28	1.75
	M3 ₂	-	1.98	-
	M4 ₁	52.32	1.52	2.63
	M4 ₂	-	-	-
	M5 ₁	39.24	1.28	2.70
	M5 ₂	-	1.17	2.73
TH1	M1 ₁	34.38	0.35	2.86
	M1 ₂	34.38	0.35	2.28
	M2 ₁	48.14	1.75	2.10
	M2 ₂	34.38	3.39	-
	M3 ₁	13.61	0.23	1.47
	M3 ₂	27.51	-	2.14

TH2	M1 ₁	46.23	0.82	2.80
	M1 ₂	39.63	-	-
	M2 ₁	33.02	0.70	3.67
	M2 ₂	26.42	-	-
	M3 ₁	46.23	1.87	2.38
	M3 ₂	46.23	-	-
	M4 ₁	52.84	0.23	2.71
	M4 ₂	52.84	0.35	-
TH3	M1 ₁	127.06	0.35	1.88
	M1 ₂	-	-	-
	M2 ₁	69.88	1.28	2.17
	M2 ₂	95.29	-	1.42
	M3 ₁	95.29	0.82	4.65
	M3 ₂	-	0.82	-
	M4 ₁	57.18	0.35	2.08
	M4 ₂	-	-	-
AH1	M1 ₁	34.03	1.40	4.01
	M1 ₂	27.23	-	-
	M2 ₁	6.81	1.98	4.60
	M2 ₂	20.42	1.63	4.22
	M3 ₁	13.61	0.93	2.60
	M3 ₂	27.23	-	-
	M4 ₁	27.23	2.10	4.80
	M4 ₂	40.84	-	-
	M5 ₁	27.23	2.33	3.19
	M5 ₂	34.03	-	-
	M6 ₁	6.81	1.05	4.53
	M6 ₂	40.84	-	-
	M7 ₁	33.02	2.92	2.57
	M7 ₂	19.81	-	-
	M8 ₁	26.42	1.28	3.25
	M8 ₂	39.63	-	-
	M9 ₁	19.81	1.87	4.62
	M9 ₂	33.02	1.17	-

AH2	M1 ₁	46.00	0.70	2.09
	M1 ₂	69.01	-	1.71
	M2 ₁	28.75	0.93	2.74
	M2 ₂	40.25	-	-
	M3 ₁	34.50	0.93	2.68
	M3 ₂	57.50	0.82	-
	M4 ₁	34.50	1.05	2.34
	M4 ₂	51.75	-	-
	M5 ₁	34.50	0.58	1.96
	M5 ₂	17.25	0.70	-
AH3	M1 ₁	38.86	0.82	1.94
	M1 ₂	-	-	-
	M2 ₁	58.29	0.82	1.70
	M2 ₂	-	-	-
	M3 ₁	45.33	0.93	2.14
	M3 ₂	-	-	1.91
	M4 ₁	45.33	0.82	1.09
	M4 ₂	32.38	-	-
	M5 ₁	45.33	0.93	2.89
	M5 ₂	51.81	-	-
	M6 ₁	32.38	0.82	3.50
M6 ₂	-	0.82	-	
CA1	M1 ₁	55.01	1.28	4.53
	M1 ₂	27.51	-	3.85
	M2 ₁	34.38	0.12	3.35
	M2 ₂	55.01	-	-
	M3 ₁	27.51	0.58	2.77
	M3 ₂	48.14	0.47	-

CA2	M1 ₁	19.81	0.82	2.06
	M1 ₂	26.42	-	3.13
	M2 ₁	26.42	0.93	2.77
	M2 ₂	33.02	0.82	-
	M3 ₁	39.63	0.93	2.98
	M3 ₂	33.02	0.93	-
	M4 ₁	59.44	0.58	2.36
	M4 ₂	59.44	-	-
	M5 ₁	46.23	0.35	3.13
	M5 ₂	66.04	0.35	3.52
	M6 ₁	59.44	0.47	2.98
	M6 ₂	66.04	-	2.11
	M7 ₁	59.44	0.47	2.92
	M7 ₂	66.04	-	-
CA3	M1 ₁	71.94	0.58	1.65
	M1 ₂	52.32	-	-
	M2 ₁	45.78	1.05	2.96
	M2 ₂	45.78	1.28	-
	M3 ₁	52.32	1.17	2.07
	M3 ₂	-	-	-
	M4 ₁	158.82	0.70	1.84
	M4 ₂	-	-	-
	M5 ₁	76.23	0.47	3.02
	M5 ₂	-	-	-
	M6 ₁	101.65	0.58	1.84
	M6 ₂	-	-	1.81
TA1	M1 ₁	34.03	1.28	1.87
	M1 ₂	20.42	1.40	1.15
	M2 ₁	40.84	1.05	3.23
	M2 ₂	34.03	-	-
TA2	M1 ₁	46.23	0.93	1.93
	M1 ₂	52.84	1.05	-
	M2 ₁	33.02	0.93	1.72
	M2 ₂	46.23	1.05	-
TA3	M1 ₁	50.82	0.35	1.18
	M1 ₂	69.88	-	-
	M2 ₁	69.88	0.35	1.91
	M2 ₂	25.41	-	2.01

Tabla 10. Identificación de muestras y aportes de Biomasa y contenido de CO, N y P por hectárea

Muestra	Especie	Biomasa (kg/ha)	CO (kg/ha)	N (kg/ha)	P (g/ha)	Relación C/N	
CH1	M1	<i>Herbácea A*</i>	1.67	0.46	0.02	0	27.49
	M2	Herbácea B*	218.67	52.63	1.79	0.63	29.46
	M3	<i>Herbácea C*</i>	4.67	0.80	0.05	0.04	14.73
	M4	<i>Lupinus</i>	21.67	6.70	0.33	0.11	20.39
CH2	M1	<i>Herbácea D*</i>	268.00	70.80	5.01	1.30	14.15
	M2	<i>Herbácea E*</i>	21.67	5.72	0.35	0.15	16.17
	M3	<i>Herbácea F*</i>	71.00	23.45	0.83	0.23	28.29
CH3	M1	Zacatón	573.33	168.73	7.36	1.66	22.92
	M2	<i>Herbácea G*</i>	20.67	12.16	0.47	0.09	25.71
	M3	<i>Herbácea E*</i>	40.00	18.31	0.65	0.36	28.01
	M4	<i>Lachemilla procumbens</i>	538.33	281.64	8.17	1.42	34.48
	M5	Herbácea B*	425.00	166.76	5.21	1.15	32.02
TH1	M1	<i>Herbácea H*</i>	2066.67	710.61	7.24	5.32	98.19
	M2	<i>Herbácea I*</i>	415.33	171.37	10.67	0.87	16.07
	M3	Zacatón	5056	1039.53	5.90	0.0091	176.14
TH2	M1	Herbácea B*	586.67	251.85	4.79	1.64	52.54
	M2	<i>Herbácea J*</i>	1666.67	495.34	11.67	6.12	42.44
	M3	<i>Herbácea K*</i>	190.67	88.15	3.56	0.45	24.75
	M4	Zacatón	921.67	486.97	2.69	2.50	181.06
TH3	M1	Zacatón	2507.00	3185.34	8.78	4.71	362.84
	M2	<i>Herbácea K*</i>	2427.00	2004.40	31.16	4.36	64.32
	M3	<i>Herbácea L*</i>	83.33	79.41	0.68	0.39	116.63
	M4	<i>Pasto</i>	793.33	453.60	2.78	1.65	163.28
AH1	M1	<i>Lopezia racemosa</i>	131.00	40.13	1.83	0.52	21.87
	M2	<i>Pasto</i>	224.00	30.49	4.05	0.99	7.52
	M3	<i>Herbácea M*</i>	520.67	106.32	4.86	1.35	21.87
	M4	<i>Descurainia pinnata</i>	1392.00	473.74	29.25	6.68	16.20
	M5	<i>Dalea</i>	141.00	43.19	3.29	0.67	13.12
	M6	<i>Herbácea N*</i>	145.00	34.54	1.52	0.66	22.68
	M7	<i>Dysphania incisa</i>	38.67	10.21	1.13	0.31	9.05
	M8	<i>Herbácea O*</i>	13.33	4.40	0.17	0.05	25.72
	M9	<i>Simsia</i>	292.00	77.14	4.43	1.35	17.41

AH2	M1	<i>Herbácea B*</i>	1610.00	925.82	11.28	3.06	82.11
	M2	<i>Lechea intermedia</i>	1301.33	449.00	12.15	3.56	36.95
	M3	Herbácea P*	712.00	327.55	6.23	1.91	52.55
	M4	<i>Herbácea Q*</i>	483.33	208.45	5.08	1.13	41.05
	M5	<i>Pasto</i>	536.67	138.87	3.45	1.05	40.31
AH3	M1	<i>seudognaphalium viscosum</i>	594.67	231.07	4.86	1.15	47.56
	M2	Lechea intermedia	2996.00	1746.26	24.48	5.10	71.34
	M3	Herbácea B*	110.67	50.17	1.03	0.23	48.55
	M4	<i>Herbácea R*</i>	66.67	25.90	0.54	0.07	47.56
	M5	<i>Herbácea P*</i>	861.33	418.37	8.04	2.49	52.02
	M6	<i>Pasto</i>	722.33	233.90	5.90	2.53	39.63
CA1	M1	<i>Arbusto A*</i>	245.41	101.26	3.15	1.03	32.14
	M2	<i>Salvia elegans</i>	0.75	0.33	0.00	0.003	382.95
	M3	<i>Argentina glabrata</i>	17.67	6.68	0.09	0.05	72.01
CA2	M1	<i>Stevia subpubescens</i>	8.76	2.02	0.07	0.02	28.29
	M2	<i>Baccharis conferta</i>	16.13	4.79	0.14	0.04	33.95
	M3	<i>Arbusto B*</i>	8.90	3.23	0.08	0.03	38.90
	M4	<i>Arbusto C*</i>	1.96	1.16	0.01	0.005	101.85
	M5	<i>Salvia elegans</i>	502.34	282.00	1.76	1.67	160.31
	M6	<i>Argentina glabrata</i>	24.34	15.27	0.11	0.06	134.38
	M7	<i>Baccharis salicifolia</i>	416.50	261.32	1.94	1.22	134.38
CA3	M1	<i>Argentina glabrata</i>	848.73	527.29	4.95	1.40	106.45
	M2	<i>Salvia elegans</i>	72.33	33.11	0.84	0.21	39.22
	M3	<i>Arbusto A*</i>	658.88	344.71	7.69	1.37	44.82
	M4	<i>verbessina virgata</i>	929.48	1476.21	6.51	1.71	226.78
	M5	<i>Stevia subpubescens</i>	141.98	108.23	0.66	0.43	163.28
	M6	<i>Incontable</i>	156.30	158.87	0.91	0.29	174.16
TA1	M1	<i>Arbusto D*</i>	9.21	2.51	0.12	0.01	20.28
	M2	<i>Arbusto E*</i>	1.37	0.51	0.01	0.004	35.64

TA2	M1	<i>Arbusto D*</i>	98.49	48.79	0.98	0.23	49.92
	M2	<i>Arbusto E*</i>	38.50	15.26	0.38	0.08	39.94
TA3	M1	<i>Arbusto D*</i>	39.55	23.87	0.14	0.05	172.35
	M2	<i>Arbusto E*</i>	1.56	0.74	0.01	0.003	136.07
CX1	M1	<i>Quercus crassifolia</i>	28418.84	14209.42	-	-	-
CX2	M1	<i>Quercus crassifolia</i>	101440.58	50720.29	-	-	-
	M2	<i>Quercus laurina</i>	180037.63	90018.82	-	-	-
CX3	M1	<i>Quercus crassifolia</i>	199813.89	99906.95	-	-	-

*Especies no identificadas

Tabla 11. Resumen de cada especie herbácea identificada por área

Muestra	Especie	Biomasa (kg/ha)	CO (kg/ha)	N (kg/ha)	P (g/ha)	Relación C/N
AC	<i>HA</i>	1.67	0.46	0.02	0	27.49
	<i>HB</i>	321.83	109.70	3.50	0.89	31.36
	<i>HC</i>	4.67	0.80	0.05	0.04	14.73
	<i>Lupinus</i>	21.67	6.70	0.33	0.11	20.39
	<i>HD</i>	268.00	70.80	5.01	1.30	14.15
	<i>HE</i>	30.83	12.02	0.50	0.25	23.85
	<i>HF</i>	71.00	23.45	0.83	0.23	28.29
	<i>Zacatón</i>	573.33	168.73	7.36	1.66	22.92
	<i>HG</i>	20.67	12.16	0.47	0.09	25.71
	<i>Lachemilla procumbens</i>	538.33	281.64	8.17	1.42	34.48
AT	<i>HB</i>	586.67	251.85	4.79	1.64	52.54
	<i>HH</i>	2066.67	710.61	7.24	5.32	98.19
	<i>HI</i>	415.33	171.37	10.67	0.87	16.07
	<i>Zacatón</i>	2828.22	1570.61	5.79	2.41	271.26
	<i>HJ</i>	1666.67	495.34	11.67	6.12	42.44
	<i>HK</i>	1308.83	1046.27	17.36	2.41	60.26
	<i>HL</i>	83.33	79.41	0.68	0.39	116.63
	<i>Pasto</i>	793.33	453.60	2.78	1.65	163.28

AA	HB	860.33	488.00	6.15	1.65	79.29
	<i>Lopezia racemosa</i>	131.00	40.13	1.83	0.52	21.87
	<i>Pasto</i>	224.00	30.49	4.05	0.99	7.52
	<i>HM</i>	520.67	106.32	4.86	1.35	21.87
	<i>Descurainia pinnata</i>	1392.00	473.74	29.25	6.68	16.20
	<i>Dalea</i>	141.00	43.19	3.29	0.67	13.12
	<i>HN</i>	145.00	34.54	1.52	0.66	22.68
	<i>Dysphania incisa</i>	38.67	10.21	1.13	0.31	9.05
	<i>HO</i>	13.33	4.40	0.17	0.05	25.72
	<i>Simsia</i>	292.00	77.14	4.43	1.35	17.41
	<i>Lechea intermedia</i>	2148.67	1097.63	18.32	4.33	59.93
	<i>HP</i>	786.67	372.96	7.14	2.20	52.25
	<i>HQ</i>	483.33	208.45	5.08	1.13	41.05
	<i>Pasto</i>	536.67	138.87	3.45	1.05	40.31
	<i>Seudognaphalium viscosum</i>	594.67	231.07	4.86	1.15	47.56
	<i>HR</i>	66.67	25.90	0.54	0.07	47.56
<i>Pasto</i>	722.33	233.90	5.90	2.53	39.63	

Tabla 12. Resumen de cada especie arbustiva y arbórea identificada por área

Muestra	Especie	Biomasa (kg/ha)	CO (kg/ha)	N (kg/ha)	P (g/ha)	Relación C/N
AC Arbustiva	<i>Arbusto A</i>	658.88	222.98	5.42	1.20	41.13
	<i>Salvia elegans</i>	287.33	157.56	1.30	0.94	121.04
	<i>Argentina glabrata</i>	436.54	271.28	2.53	0.73	107.08
	<i>Stevia subpubescens</i>	75.37	55.13	0.37	0.23	150.13
	<i>Baccharis conferta</i>	16.13	4.79	0.14	0.04	33.95
	<i>Arbusto B</i>	8.90	3.23	0.08	0.03	38.90
	<i>Arbusto C</i>	1.96	1.16	0.01	0.005	101.85
	<i>Baccharis salicifolia</i>	416.50	261.32	1.94	1.22	134.38
	<i>Verbesina virgata</i>	929.48	1476.21	6.51	1.71	226.78
	<i>Incontable</i>	156.30	158.87	0.91	0.29	174.16
AT Arbustiva	<i>Arbusto D</i>	69.02	36.33	0.56	0.14	65.12
	<i>Arbusto E</i>	20.03	8.00	0.19	0.04	41.29
AC Arbórea	<i>Quercus crassifolia</i>	109891.11	54945.55	-	-	-
	<i>Quercus laurina</i>	180037.63	180037.63	-	-	-

Tabla 13. Prueba Tuckey de biomasa aérea total del área de Conservación, Transición y Agrícola

		Alpha 0.1							
group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
Conservada	Transición	166354.345	43332.8839	3.838986241	12175.9442	320532.746	0.0777467	154178.401	2.21643974
Conservada	Agrícola	167691.122	43332.88	3.869835266	13512.7214	321869.523	0.07563572	154178.401	2.23425043
Transición	Agrícola	1336.77722	43332.88	0.030849025	-152841.624	155515.178	0.99973771	154178.401	0.01781069

Tabla 14. Prueba Tuckey de CO total del área de Conservación, Transición y Agrícola

		Alpha 0.1							
group 1	group 2	mean	std err	q-stat	lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
Conservada	Transición	83577.9302	21744.4156	3.843650322	6211.29933	160944.561	0.07742363	77366.6309	2.21913255
Conservada	Agrícola	84471.5436	21744.4156	3.884746549	7104.91276	161838.174	0.07463691	77366.6309	2.24285947
Transición	Agrícola	893.613429	21744.4156	0.041096226	-76473.0174	78260.2443	0.99953458	77366.6309	0.02372692

Anexo II. Fotografías de identificación de cada especie



Figura 6. Muestra
CA1M1



Figura 7. Muestra
CA1M2



Figura 8. Muestra
CA1M3



Figura 9. Muestra
CA2M1



Figura 10.
Muestra CA2M2



Figura 11.
Muestra CA2M3



Figura 12.
Muestra CA2M4



Figura 13.
Muestra CA2M5



Figura 14.
Muestra CA2M6



Figura 15.
Muestra CA2M7



Figura 16.
Muestra CA3M1



Figura 17.
Muestra CA3M2



Figura 18.
Muestra CA3M3



Figura 19.
Muestra CA3M4



Figura 20.
Muestra CA3M5



Figura 21.
Muestra CA3M6

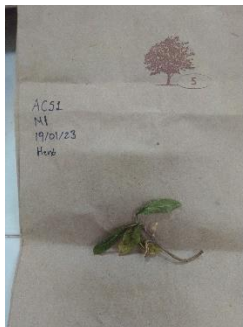


Figura 22.
Muestra CH1M1



Figura 23.
Muestra CH1M2



Figura 24.
Muestra CH1M3

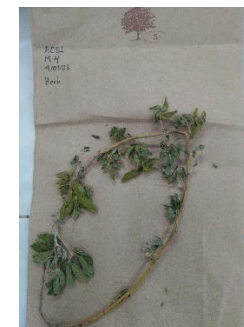


Figura 25.
Muestra CH1M4



Figura 26.
Muestra CH2M1

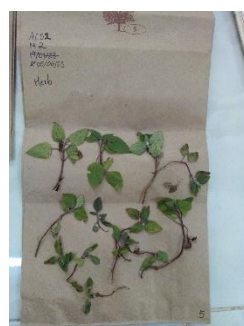


Figura 27.
Muestra CH2M2



Figura 28.
Muestra CH2M3

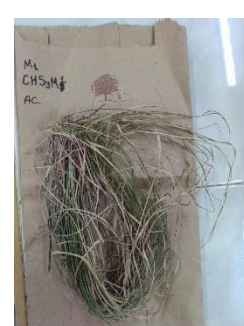


Figura 29.
Muestra CH3M1



Figura 30.
Muestra CH3M2



Figura 31.
Muestra CH3M3



Figura 32.
Muestra CH3M4



Figura 33.
Muestra CH3M5



Figura 34.
Muestra TA1M1



Figura 35.
Muestra TA1M2



Figura 36.
Muestra TA2M1



Figura 37.
Muestra TA2M2

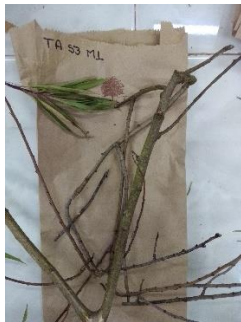


Figura 38.
Muestra TA3M1



Figura 39.
Muestra TA3M2



Figura 40.
Muestra TH1M1



Figura 41.
Muestra TH1M2



Figura 42.
Muestra TH1M3



Figura 43.
Muestra TH2M1



Figura 44.
Muestra TH2M2



Figura 45.
Muestra TH2M3



Figura 46.
Muestra TH3M1



Figura 47.
Muestra TH3M2



Figura 48.
Muestra TH3M3

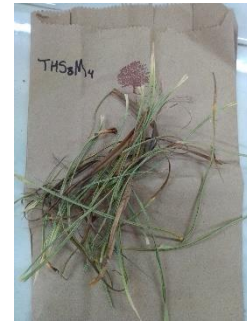


Figura 49.
Muestra TH3M4



Figura 50.
Muestra AH1M1

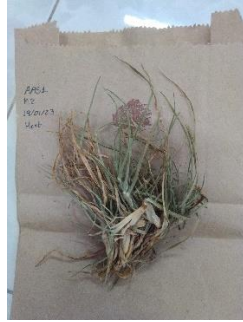


Figura 51.
Muestra AH1M2



Figura 52.
Muestra AH1M3



Figura 53.
Muestra AH1M4



Figura 54.
Muestra AH1M5



Figura 55.
Muestra AH1M6



Figura 56.
Muestra AH1M7

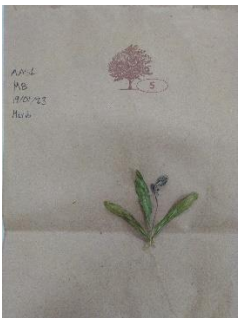


Figura 57.
Muestra AH1M8



Figura 58.
Muestra AH1M9



Figura 59.
Muestra AH2M1

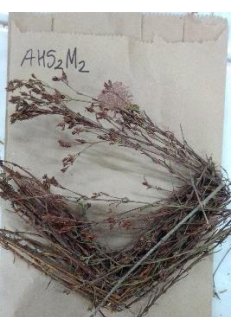


Figura 60.
Muestra AH2M2

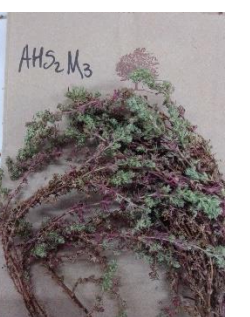


Figura 61.
Muestra AH2M3

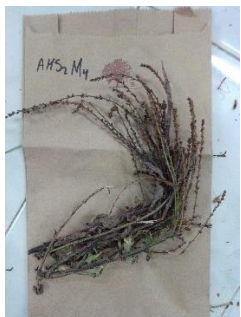


Figura 62.
Muestra AH2M4



Figura 63.
Muestra AH2M5