



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“AGRICULTURA REGENERATIVA EN SUELOS
FORESTALES Y SU IMPORTANCIA ANTE EL
CALENTAMIENTO GLOBAL”**

TESIS

Para obtener el grado de:

LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta:

ALEXIS JOSUÉ ÁLVAREZ GÓMEZ

Director de Tesis:

DR. JOSÉ ADRIÁN SALDAÑA MUNIVE

Puebla de Zaragoza

Julio, 2025

DEDICATORIA

Dedicado, especialmente, en memoria de mi madre y mi abuelo, por haberme inculcado el amor y respeto a la naturaleza.

A G R A D E C I M I E N T O S

A mi padre, por su apoyo incondicional todo el tiempo.

A mi hermana, por ser mi gran apoyo en todo momento y nunca dejarme solo.

A mis familiares, por motivarme a no darme por vencido en mis estudios.

A mis amigos, por siempre motivarme a cumplir mis metas.

A mis amigas, por ser ese grupo incondicional de apoyo a lo largo de la carrera.

A mis colegas de laboratorio, por ser ese equipo de apoyo y por vivir buenos momentos.

A el Dr. José Adrián Saldaña Munive, por compartirme de sus conocimientos a lo largo de esta investigación.

A el Biol. Cesar Montes Reyes y familia, por permitirme realizar esta investigación en sus predios y por compartirme de sus conocimientos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
JUSTIFICACIÓN	7
OBJETIVOS	9
HIPÓTESIS	9
CAPITULO I. MARCO TEÓRICO	10
1. COBERTURA VEGETAL	10
2. SECUESTRO DE CARBONO EN EL SUELO	11
3. SUELO	11
4. CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO	12
5. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO	13
6. AGREGADOS DEL SUELO	14
7. DINÁMICA DEL SUELO	15
8. AGRICULTURA REGENERATIVA	16
CAPITULO II. METODOLOGÍA	18
1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	18
2. MUESTREO	19
3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	22
4. PROPIEDADES DEL SUELO	23

5.	CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS	24
5.1.	<i>Humedad</i>	24
5.2.	<i>Textura</i>	25
5.3.	<i>pH</i>	26
5.4.	<i>Materia orgánica</i>	27
5.5.	<i>Nitrógeno</i>	27
5.7.	<i>Potasio y C.I.C.</i>	29
5.8.	<i>Calcio y Magnesio</i>	29
5.9.	<i>Densidad aparente</i>	30
5.10.	<i>Densidad real</i>	30
6.	DETERMINACIÓN DE FORMAS DE CARBONO EN SUELOS	31
6.1.	<i>Carbono soluble en Agua Fría</i>	31
6.2.	<i>Carbono soluble en Agua Caliente</i>	32
6.3.	<i>Carbono soluble en Pirofosfato de sodio</i>	32
7.	EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE AGRICULTURA REGENERATIVA	32
	CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
	RESULTADOS	34
1.	Propiedades fisicoquímicas de suelos	34
1.1.	<i>Físicas</i>	34
1.1.1.	<i>Humedad</i>	34

1.1.2.	Textura.....	35
1.1.3.	Densidad aparente y real	36
1.2.	<i>Químicas</i>	38
1.2.1.	pH.....	38
1.2.2.	Materia Orgánica	39
1.2.3.	Nitrógeno	41
1.2.4.	Fósforo	42
1.2.5.	Potasio.....	44
1.2.6.	Calcio.....	45
1.2.7.	Magnesio	46
1.2.8.	C.I. C.	48
2.	Comparativo de la disponibilidad de formas de carbono	50
2.1.	Formas disponibles de carbono en Tlaola, Puebla.	50
2.2.	Disponibilidad de formas de carbono en Atlixco, Puebla.	52
3.	Evaluación de la implementación de agricultura regenerativa	56
	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
	CONCLUSIONES	66
	RECOMENDACIONES	68
	BIBLIOGRAFÍA	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Datos de los tres predios muestreados.</i>	21
Tabla 2. <i>Propiedades fisicoquímicas analizadas.</i>	23
Tabla 3. <i>Método utilizado para determinar las variables físicas y químicas.</i>	24
Tabla 4. Humedad del suelo	34
Tabla 5. <i>Clase textural de las muestras.</i>	35
Tabla 6. Disponibilidad de formas de carbono en Tlaola, Puebla.....	50
Tabla 7. Resultados de análisis fisicoquímicos de suelos en San Félix Almazán.....	53
Tabla 8. Disponibilidad de formas de carbono en Atlixco, Puebla.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Mapa de ubicación de la zona de estudio en la Sierra Norte de Puebla.</i>	19
Figura 2. <i>Mapa de ubicación de los predios en Chiconcuautla, Pue.</i>	22
Figura 3. Clasificación del suelo por su pH	26
Figura 4. Triángulo de Textura.....	36
Figura 5. Densidad real y aparente.....	37
Figura 6. pH del suelo.....	39
Figura 7. Porcentaje de M.O.....	41
Figura 8. Disponibilidad de N	42
Figura 9. Disponibilidad de P.....	43
Figura 10. Disponibilidad de K	45
Figura 11. Disponibilidad de Ca.	46
Figura 12. Disponibilidad de Mg.....	47
Figura 13. C.I.C.	49
Figura 14. Mapa de ubicación de San Félix Almazán. Atlixco, Puebla.....	52
Figura 15. Cobertura vegetal en el predio "Las Piedras".	58
Figura 16. Predio "Las Piedras, en oct. 2024.....	58
Figura 17. Cobertura vegetal del predio "La Curva".	59
Figura 18. Predio "La Curva". Oct. 2024	60
Figura 19. Cobertura vegetal del predio "Los Naranjos"	61
Figura 20. Predio "Los Naranjos" oct. 2024.....	61

ABREVIATURAS

H ₃ BO ₃	Ácido bórico
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
C.I. C.	Capacidad de Intercambio Catiónico
C	Carbono
CSAC	Carbono Soluble en Agua Caliente
CSAF	Carbono Soluble en Agua Fría
CSP	Carbono Soluble en Pirofosfato de sodio
Cmol	Centímol
KCN	Cianuro de potasio
NH ₂ OH·HCl	clorhidrato de hidroxilamina
CaCl ₂	Cloruro de calcio
SnCl ₂	Cloruro de estaño
NaCl	Cloruro de sodio
ρ _a	Densidad aparente
ρ _r	Densidad real
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de potasio
CO ₂	Dióxido de carbono
GEI	Gases de Efecto Invernadero
gr	Gramos
NaOH	Hidróxido de sodio
Na ₂ Si ₂ O ₃	Metasilicato de sodio
msnm	Metros sobre el nivel de mar
ml	Mililitro
mm	Milímetro
Na ₂ C ₂ O ₄	Oxalato de sodio
H ₂ O ₂	Peróxido
rpm	Repeticiones por minuto
s.f.	Sin fecha
FeSO ₄	Sulfato ferroso

INTRODUCCIÓN

La agricultura es una de las actividades antrópicas más significativas que el hombre ha realizado desde la antigüedad, debido a las necesidades alimenticias. Diversas hipótesis de sociólogos y antropólogos sugieren que fue descubierta por mujeres recolectoras; los granos fueron los primeros en domesticar (Ocampo Velásquez *et al.*, 2022).

Actualmente, sigue siendo una actividad fundamental en el medio rural en México, sin embargo, el desarrollo de estas zonas ha provocado disminución en la disponibilidad de suelos utilizados para la siembra de cultivos. De acuerdo con Cotler *et al.* (2016), la mayoría de terrenos agrícolas en México se encuentran bajo el sistema de producción de labranza intensivo, originando la pérdida de fertilidad del suelo. A su vez, Stivers (2023) enfatiza la importancia en las necesidades de las plantas, las cuales requieren de agua, nutrientes, oxígeno y de un medio físico, que le permita a la semilla germinar y a las raíces expandirse y anclarse profundamente.

Por lo cual, un suelo sano es fundamental para la producción de alimentos, ya que proporciona nutrientes esenciales y es el principal sostén para las raíces, de modo que, su calidad está directamente relacionada con la cantidad y calidad de alimentos. Además de proporcionar nutrientes esenciales, oxígeno y ser sostén para las raíces, estos cumplen una función de amortiguación, al proteger a las raíces de fluctuaciones de temperatura (FAO, 2015).

Es un recurso vital en el entorno, cuya disponibilidad está limitada debido a los procesos edáficos, y está compuesto de minerales, agua, aire y materia orgánica, así

como de microorganismos que contribuyen en procesos bióticos y abióticos; pese a ello, se ha estado afectado por diversas actividades antrópicas, tales como la implementación de monocultivos, que consiste en cultivar un solo tipo de grano o planta en un área; ésta práctica está vinculada al mal uso, manejo insostenible y desconocimiento de las características y uso del suelo, lo que representa una amenaza social, económica y ambiental (Sánchez Moreno, 2023).

De manera que, el modelo agroindustrial se distingue por la simplificación de sistemas de producción, tal como el monocultivo y el incremento de insumos externos, especialmente, fertilizantes sintéticos y agroquímicos, así como de maquinaria y semillas mejoradas. Los efectos derivados de este modelo son la alteración del uso del suelo, la degradación de su capa fértil, la contaminación y escasez de agua, de tal manera que ocasiona la contaminación por agentes agroquímicos, entre otros (Vázquez Uribe & Gerritsen, 2021).

La intensa producción agrícola ha provocado un desgaste de suelos, ocasionando el deterioro de su capacidad productiva y la posibilidad de no satisfacer las necesidades de generaciones futuras (FAO, 2015). Por tal razón, se han empleado sistemas forestales para implementar cultivos, mediante técnicas como la roza, tumba y quema, a fin de minimizar la cobertura vegetal del suelo, la cual ha sido la causa más significativa de disminución y fragmentación de hábitats y de pérdida de bosques y biodiversidad, así como la principal fuente de adición de nitrógeno y fósforo en los ecosistemas (Compta, 2011). Asimismo, Zamora Morales *et al.* (2019), mencionan que el desarrollo de actividades agropecuarias mediante prácticas inadecuadas ha llevado a los suelos a sufrir distintos grados de deterioro, además de la disminución del potencial productivo y

aumentar las emisiones de carbono edáfico en forma de CO₂, así mismo, la ONU (United Nations, s.f.-b) menciona que el desmonte libera CO₂, así como metano.

Así pues, Hernández *et al.* (2014), señalan que los ecosistemas forestales son muy relevantes, ya que poseen un alto contenido de carbono por unidad de superficie, más que otros ecosistemas, por tal razón, es fundamental considerar el manejo de bosques para la fijación de carbono. La acumulación de este elemento en suelo se produce al incorporarse restos vegetales, en forma de hojarasca o como raíces, los cuales sufren transformaciones gracias a la biota edáfica, mediante procesos de mineralización (descomposición) y humificación (neoformación); al evaluar la capacidad del suelo para secuestrar CO₂, es importante tener en cuenta la naturaleza de los compuestos orgánicos (Nava Guevara, 2022). De acuerdo con Brady & Weil (2008) la fracción lábil (fácil descomposición) y la fracción estable (resistente a la descomposición) son las más eficientes para la captura de carbono orgánico. Sin embargo, la deforestación ocasiona una pérdida (casi total) de biomasa vegetal, incluyendo entre el 40 y 50% del carbono contenido en suelo (Hernández *et al.*, 2014).

Las causas del cambio de uso del suelo son multifactoriales; los más drásticos son originados por deforestación, donde se elimina por completo la cobertura vegetal, considerada como una de las principales causas del calentamiento global, debido a que libera el carbono acumulado en suelo y su vegetación (en forma de CO₂) a la atmósfera, de tal modo que este cambio genera impactos atmosféricos y ecológicos; asimismo, eliminar dicha cobertura ocasiona que las condiciones de temperatura y humedad cambien (Santillán, 2017).

El calentamiento global afecta a la población a nivel mundial, causando alteraciones y variaciones climáticas, con fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes, como olas de calor y sequías, afectando a productores que dependen de lluvias de temporada para sus cultivos, ocasionando disminución de su producción y pérdidas económicas. La falta de cobertura vegetal ocasiona degradación de suelos, causando su erosión (United Nations., s. f.-a; United Nations., s. f.-b).

De tal manera que, es necesaria la implementación de estrategias sostenibles enfocadas en el uso del suelo, por lo cual, la agricultura regenerativa surge como alternativa a la convencional; está enfocada principalmente en la salud del suelo, teniendo como objetivo regenerar, aumentando el contenido de materia orgánica e incrementando su capacidad para almacenar más agua, haciéndolo más fértil, con lo que, se absorbe mayor cantidad de CO₂, almacenándolo en forma de carbono orgánico; sus principios son minimizar la labranza, mantener cobertura vegetal, diversificar cultivos y utilizar prácticas de manejo integrado de plagas y enfermedades; promoviendo la recuperación de suelos. Esta agricultura busca conservar el suelo y los recursos naturales, mejorar la biodiversidad, aumentar la captura de CO₂, promover su resiliencia y fomentar la interacción entre cultivos, animales y el entorno, por ello, cada vez es más relevante como parte de la solución a la crisis climática (Justamante, 2021; Sánchez Moreno, 2023; Melgarejo *et al.*, 2024).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La agricultura convencional es un modelo utilizado por el hombre para preparar el suelo; basado en la eficiencia para alcanzar una alta productividad, buscando máxima rentabilidad y utilizando semillas nativas, tratadas y/o mejoradas. En este modelo, los terrenos de cultivo son preparados con labores intensivas (Franquesa, 2016). Asimismo, requieren de la adición de compuestos químicos ricos en Nitrógeno, Fosforo y Potasio (mejor conocidos como NPK), los cuales son importantes para el desarrollo de la planta. Sin embargo, el exceso de estos nutrientes tiene efectos perjudiciales, por ejemplo, la incorporación continua de N puede minimizar la absorción de nutrientes, disminuir la descomposición de materia orgánica, alterar la concentración de cationes intercambiables, alterar la microbiota del suelo y disminuir la actividad metabólica de plantas, incrementando los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Por lo que, adicionar fertilizantes químicos puede alterar la composición y estructura de la materia orgánica del suelo, que sirve como sustrato para el crecimiento de microorganismos (Montoya *et al.*, 2020; Sánchez, 2024).

El sistema agroindustrial mundial libera 25% de emisiones anuales de GEI de origen antrópico, debido al mal uso del suelo y a las prácticas agrícolas convencionales; monocultivos, usos intensivos y extensivos del terreno, siembra de semillas transgénicas, empleo de fertilizantes y plaguicidas químicos, así como de maquinaria y sistemas de riego poco eficientes, que alteran los agroecosistemas (Quintero Castaño, 2021).

La aplicación de malas prácticas agrícolas (MPA) ha ocasionado que los suelos enfrenten más problemas. La agricultura se ha implementado en zonas no aptas, tales

como vertientes ubicadas en pendientes fuertes y pobres en nutrientes, utilizando prácticas de labranza no adecuadas, como el caso del arado y/o tractor a favor de la pendiente, degradándolo cuando la capa fértil es escasa; el surcado, previo a la siembra, remueve la capa superficial, la cual contiene materia orgánica, que se desplaza a favor de la pendiente, potenciando la erosión, a causa de la lluvia, el agua de riego o el viento. Otros tipos de MPA son la explotación forestal no sostenible (ocasionando pérdida de cobertura boscosa y alteraciones de patrones climáticos locales); quema para la siembra (libera carbono a la atmosfera o aporte de GEI); uso irracional de pesticidas; prácticas de producción de monocultivo o escasa diversidad agrícola; reducción de períodos de barbecho y la intensificación del ciclo de cultivo o cambio a otros más intensivos (Segarra, 2014).

En la Sierra Norte de Puebla, los agricultores no cuentan con capacitación ni asistencia técnica para mantener y mejorar la producción y calidad de sus cultivos; en cada ciclo agrícola del chile serrano, deforestan para establecer nuevas áreas, mediante la roza, tumba y quema, además de la fertilización excesiva y uso inadecuado de agroquímicos e insecticidas, generando una deforestación desmedida y alteraciones en las áreas conservadas, ocasionando la contaminación del agua y aire, cambio de uso de suelo y erosión (Montes Reyes, 2022). Así pues, la pérdida de cobertura vegetal causa la reducción de flora y fauna, generando impacto en los servicios ambientales, disminuyendo la diversidad ecológica, contaminación hídrica y erosión del suelo (Pezo Pezo & Ramírez, 2023).

Los cambios climatológicos, como la sequía, afectan notablemente los territorios, limitando el desarrollo agrícola y generando gran impacto a nivel ambiental, económico

y social. La agricultura convencional percibe estos efectos de manera directa, debido a que campesinos de sectores rurales dependen de la lluvia para sus ciclos agrícolas, lo cual disminuye el rendimiento de sus cultivos (Banco Mundial, 2023).

Estudios realizados por la Universidad Nacional Autónoma de México, mencionan que el 44.9% del suelo mexicano presenta algún tipo de degradación (química, hídrica, física o eólica) y, además, el 92.7% de la superficie afectada muestra pérdidas de fertilidad. Por su parte, la Comisión Nacional de Zonas Áridas, menciona que la presión demográfica ha intensificado la degradación de terrenos, ocasionando la deforestación, además de la pérdida de materia orgánica, carbón del suelo, cobertura vegetal y biodiversidad, a causa del cambio de uso del suelo (Torres, 2023).

JUSTIFICACIÓN

La agricultura regenerativa no solo busca la sostenibilidad, también, pretende mejorar activamente la salud de los ecosistemas; se caracteriza por buscar la regeneración del suelo y su entorno, utilizando prácticas como la rotación de cultivos, cero labranza, preservación de cobertura vegetal y la biodiversidad. El objetivo en este tipo de agricultura es mejorar la calidad del suelo, aumentando la materia orgánica, fomentando la vida microbiana, y su capacidad de capturar carbono del ambiente, ayudando a combatir el calentamiento global (Cubero, 2023).

La salud del suelo está relacionada con la sostenibilidad total del sistema alimentario; en la calidad nutricional de las plantas y animales. Por esta razón, la regeneración, estimulación y preservación de la fertilidad del suelo, favorece la producción de alimentos

saludables y nutritivos, al utilizar recursos propios y optimizar los recursos naturales (Justamante, 2021; Valle del Conde 2024).

La cubierta vegetal es importante para conservar al suelo del impacto de la lluvia, mantenerlo bajo sombra y con alto porcentaje de humedad posible para el reciclaje de nutrientes. La agricultura regenerativa es un modelo innovador, que incorpora nuevos conocimientos científicos sobre el funcionamiento del suelo y la nutrición vegetal, con ayuda de prácticas que se caracterizan por eliminar labranza intensiva (que ocasiona el rompimiento de estructura del suelo); mantiene la cubierta vegetal, evitando descubrir el suelo, su erosión; aumenta la diversidad y la producción de plantas; combina la agricultura y ganadería, aprovechando animales de pastoreo para control de cubierta vegetal como fuente de alimentación, del mismo modo utiliza el estiércol y, planifica el aprovechamiento del agua evitando el uso de maquinaria pesada, fertilizantes, pesticidas y abonos químicos (Justamante, 2021; FAO, 2022; Jaramillo, 2024).

Las buenas prácticas agrícolas contribuyen a una mayor producción, conservación de recursos naturales y a la mitigación del cambio climático; una gestión adecuada en suelos potencializa su capacidad de captura de carbono (hasta un 25% de las emisiones de combustibles fósiles), permitiendo mantener la temperatura global por debajo de los 1.5 °C (IICA, 2023).

De tal modo que es importante considerar los Objetivos del Desarrollo Sustentable para salvaguardar el planeta y mejorar la vida y las perspectivas de las personas; por ello, se consideran primordialmente los objetivos 13 (Acción por el clima) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres), debido a que es imperativo efectuar un cambio en la relación de la humanidad con la naturaleza.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar el efecto de la preservación de cobertura vegetal en los sistemas agrícolas y agroforestales, implementando la agricultura regenerativa como una estrategia de adaptación ante el calentamiento global.

Objetivos Específicos

- Medir el efecto de la preservación de cobertura vegetal a través del análisis físico químico en tres suelos agroforestales de la comunidad de Tlaola, Puebla.
- Evaluar y comparar la disponibilidad de formas de carbono en suelos con agricultura tradicional en Atlixco y Tlaola, Puebla.
- Evaluar la implementación de agricultura regenerativa.

HIPÓTESIS

La preservación de cobertura vegetal, en sistemas agrícolas y forestales, es importante para mejorar la fertilidad de suelos, el contenido de materia orgánica y ayudar a la mitigación del calentamiento global al disminuir las emisiones de CO₂.

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO

1. COBERTURA VEGETAL

Rincón Romero *et al.* (2012), definen la cobertura vegetal como “la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, que contiene una gran variedad de biomasa con diferentes características fisonómicas y ambientales, que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales”. De igual forma, la CONABIO (2022) menciona que el término de “cobertura del suelo” se refiere a la descripción del material físico en la superficie de la Tierra.

La variación de cobertura vegetal muestra cómo la configuración del paisaje es dinámica y expresa el resultado de la interacción entre los ecosistemas y las comunidades que lo habitan; las dinámicas humanas, como expansión de la frontera agrícola, el cambio de uso del suelo y el urbanismo, modifican e influyen de manera constante en las relaciones ecológicas de bosques, ríos y de los ecosistemas en general (Nieto *et al.*, 2016).

La cubierta viva o inerte aporta gran capacidad sobre el suelo, actuando como capa de revestimiento, evitando la erosión física que se origina al tenerlo descubierto y, por lo tanto, se prevé su pérdida. La cobertura conlleva una barrera física para la escorrentía en zonas con pendiente; lo que evita la pérdida de suelo, provocado por la erosión que ocasiona el agua que corre en superficies, cuya acción provoca regueros y cárcavas. El mantener cobertura sobre la superficie del suelo, supone también una pantalla ante la incidencia directa de los rayos del Sol, reduciendo la insolación sobre este, por lo cual,

se disminuye la evaporación del agua retenida en el suelo; además, tiene gran aporte de nutrientes y biomasa al suelo, por lo cual, no solo eleva la biodiversidad del ecosistema agrario, además, favorece la autorregulación de este, evitando la aparición de plagas y favoreciendo su sostenibilidad (Climagri, 2015).

2. SECUESTRO DE CARBONO EN EL SUELO

Cherlinka (2024) describe el secuestro de carbono en el suelo (SOC) como el proceso de transferir CO₂ al suelo en forma de carbono orgánico; comienza con la fotosíntesis, cuando la planta convierte el CO₂ en compuestos orgánicos, para posteriormente incorporarlos al suelo a través de los residuos vegetales y los exudados radiculares. El SOC es el carbono contenido en la materia orgánica, que procede de plantas, animales y microorganismos (asimismo como de los subproductos de la actividad animal y microbiana), el cual continúa a medida que los compuestos orgánicos se incorporan al suelo en forma de plantas muertas o las hojas, las cuales, al descomponerse se transforman con la ayuda de organismos subterráneos. Al aumentar el carbono orgánico se absorbe eficazmente el CO₂ (gas de efecto invernadero que atrapa el calor en la atmósfera), por lo tanto, el SOC es una forma natural de mitigar el impacto del cambio climático.

3. SUELO

El portal Naturaliza (2019) define al suelo como la capa superior de la corteza terrestre, que está compuesta por minerales, materia orgánica, aire, agua y una amplia variedad biológica; esta capa se forma a lo largo de siglos, debido a la intervención de

diversos factores, tales como la desintegración de las rocas de la superficie a través de la acción del agua, los cambios de temperatura, el viento y la transformación de las materias orgánicas. Por ende, el suelo es un recurso natural, no renovable; su composición le proporciona propiedades físicas, químicas y biológicas. El progreso de las plantas se ve afectado por el equilibrio entre la humedad y la aireación. En consecuencia, las características físicas de los suelos determinan su capacidad de sostenimiento, facilidad para penetrar raíces, circulación del aire, capacidad de almacenamiento de agua, drenaje y retención de nutrientes, entre otras (INTAGRI, 2017).

El suelo se ha considerado como un sumidero de carbono, debido a su capacidad para almacenar este elemento de forma orgánica e inorgánica. No obstante, para lograr su acumulación en los suelos, es imperativo llevar a cabo medidas de manejo adecuadas. A causa del incremento de actividades, tales como la deforestación, el pastoreo y la agricultura, se ha incrementado la liberación de carbono hacia la atmósfera, lo que ha acelerado el calentamiento global (Hernández *et al.*, 2014).

4. CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

El carbono orgánico del suelo (COS) es el elemento que se encuentra en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos y, por lo cual, es esencial en el ciclo global de carbono. El COS es el compuesto principal de la materia orgánica del suelo (MOS) y constituye el combustible de cualquier suelo. La MOS contribuye en funciones clave del suelo, debido a que son fundamentales para la estabilización de la estructura del suelo, retención y liberación de nutrientes vegetales y permite la infiltración y almacenamiento de agua en el suelo. La pérdida de

COS indica un cierto grado de degradación del suelo, además, de afectar su salud y la producción de alimentos, ocasiona también un agravamiento del cambio climático. Al descomponerse la MOS, se emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera, por lo cual, si llegase a ocurrir en concentraciones demasiado altas, los suelos pueden contribuir al calentamiento global. No obstante, muchos suelos tienen el potencial de aumentar sus reservas de COS, mitigando así el cambio climático, reduciendo la concentración de CO₂ en el suelo y la atmósfera (Global Soil Partnership, 2018).

5. MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Aunque el suelo está compuesto por diversos materiales, la fracción principal es mineral; la materia orgánica del suelo es esencial para las funciones de un suelo sano, tales como producción primaria, purificación y regulación del agua, el secuestro y regulación del carbono, la biodiversidad y ciclo de nutrientes, los cuales dependen en gran medida de la MOS. La fracción orgánica del suelo está compuesta por un 58% de carbono, el cual se secuestra a través de actividad fotosintética de las plantas. En consecuencia, el nivel de MOS no solo es esencial para el ámbito ecológico y alimentario, sino también para el clima, el medio ambiente y la sociedad en su conjunto. Cuando hay un aumento de materia orgánica, se produce un incremento de la capacidad de intercambio catiónico y, en consecuencia, una mejor dinámica de nutrientes (Grand & Michel, 2020).

De igual manera, se indica que el humus tiene un impacto en las propiedades físicas del suelo, generando agregados y proporcionando estabilidad estructural, al unirse a las arcillas y constituyendo el complejo de cambio. Esto favorece la penetración del agua y

su retención, disminuyendo la erosión y el intercambio gaseoso. En cuanto a las propiedades químicas, se incrementa la capacidad de transformación del suelo, la reserva de nutrientes para la vegetación y la capacidad tampón. Este efecto propicia la acción de los abonos minerales y facilita su absorción mediante la membrana celular de las raíces (Julca Otiniano *et al.*, 2006).

Desde la perspectiva de Docampo (2010), la mayor parte de materia orgánica se encuentra cerca de la superficie del suelo, mientras que las partes aéreas de las plantas que no se cosechan permanecen en la superficie y las raíces se transforman en materia orgánica cuando sus células pierden funcionalidad o mueren. La mesofauna del suelo (lombrices, insectos) contiene los residuos más profundos en el suelo, lo que propicia la concentración de MOS en los primeros 15 y 20 centímetros del suelo.

6. AGREGADOS DEL SUELO

Torres Guerrero *et al.* (2013), mencionan que la agregación del suelo se origina de la floculación, cementación y reacomodo de las partículas de este, y se controla por el contenido de COS, la biota, las asociaciones iónicas y el contenido de arcillas y carbonatos. La formación y estabilización de agregados se produce mediante la unión de materia orgánica particulada única a excreciones de microorganismos y mucus de lombrices, por lo tanto, si la actividad microbiana disminuye, disminuye la formación de agregados y eventualmente se generarán perturbaciones.

La textura y estructura del suelo está influida por la disposición y estado de agregación de sus partículas (arena, limo y arcilla), las cuales se unen a través de componentes húmicos del suelo, secreciones de microorganismos y raíces (Edalife,

2023). Los agregados del suelo lo mantienen estructurado, consistente y con porosidad para el paso de nutrientes, aire y agua. Cuando no se mantiene la estructura del suelo, se compacta, lo que perjudica la formación del sistema radicular de la planta, haciéndola susceptible a la erosión. Por consiguiente, la estabilidad de agregados indica la resistencia que presentan las partículas del suelo en comparación con las fuerzas de desagregación, lo que influye en la estructura de estas y, en consecuencia, en la infiltración de agua, la aireación del suelo, la actividad biológica, el secuestro o emisión de carbono y la erosión del suelo. De igual manera, desempeña un papel crucial en la eficacia de la erosionabilidad del suelo, es decir, su mayor o menor sensibilidad hacia la erosión. Cuando hay agregados de baja estabilidad, pueden romperse al menor impacto, por ejemplo, por gotas de lluvia. La destrucción de los agregados reduce la porosidad, dificultando la infiltración y aumentando la escorrentía del agua superficial, induciendo una mayor pérdida del suelo (TECNAL, s.f.).

7. DINÁMICA DEL SUELO

La dinámica del suelo comprende procesos y mecanismos que influyen en la dinámica del COS, tales como interacciones entre el clima, planta, suelo y la microbiología, así como el ciclo de nutrientes. Los microorganismos son fundamentales en la nutrición y salud de las plantas, en los procesos de fertilidad, estructura, degradación de contaminantes orgánicos y la remediación de sustancias tóxicas, así como en procesos ecológicos esenciales, tales como el ciclo biogeoquímico del carbono, N, P y azufre, el secuestro de carbono, la mitigación del metano, la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Por consiguiente, la captura y utilización de carbono se

impulsa por los microbios del suelo, los cuales generan MOS químicamente diversa y estable, siendo mayormente presente en suelos con mayor abundancia de hongos y una producción de biomasa microbiana más eficiente. Al incrementar la diversidad de vegetación, se incrementará la diversidad microbiana en suelo, debido a que distintas plantas absorben diferentes sustancias para alimentar a múltiples microorganismos. La diversidad vegetal determina la composición y funcionamiento de la biomasa del suelo, lo que a su vez aumenta la biomasa microbiana del suelo, particularmente hongos; al aumentar su proporción, se produce un incremento en la captura de carbono (Sánchez, 2021).

8. AGRICULTURA REGENERATIVA

De acuerdo con el manual de Agricultura Regenerativa en SAFM (2023), es una filosofía y enfoque agrícola que se centra en la restauración y mejora de la salud del suelo, la biodiversidad y la integridad del ecosistema en su conjunto; se basa en el respeto y entendimiento profundo de los procesos naturales que sustentan la vida en la tierra. Se centra en principios como la maximización de la diversidad biológica, la incorporación de materia orgánica, la promoción de ciclos naturales de nutrientes y la integración de cultivos y ganado; con el objetivo de reconstruir la salud del suelo y la capacidad para retener agua y nutrientes, reducir la erosión y mejorar la resiliencia del sistema ante desafíos climáticos y de manejo.

Asimismo, Cedeño *et al.* (2023), señalan que la agricultura regenerativa tiene como propósito mejorar la calidad del suelo y fomentar una actividad sostenible, que emplea la preservación de suelos como punto de partida para asegurar múltiples servicios

ecosistémicos, con el fin de mejorar las dimensiones medioambiental, económica y social, para una producción alimentaria sostenible. También mencionan que los principios fundamentales son preservar la cobertura vegetal, preservar las raíces vivas y fomentar la diversidad de cultivos, compostaje de residuos de cosecha, disminución de insumos sintéticos y retención de rastrojos. Esperando, a través del empleo de estos principios, reducir el consumo de agua, disminuir la emisión de GEI, reducir el riesgo de degradación del suelo y evitar la contaminación del medio ambiente.

CAPITULO II. METODOLOGÍA

1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación se realizó en la región de la Sierra Norte de Puebla, entre el municipio de Tlaola y Chiconcuautla, Puebla (Fig. 1). Por la proximidad al municipio de Tlaola, con coordenadas UTM 611304.52 E y 2226750.80 N, se consideraron los factores climatológicos de la zona.

El relieve de la región es bastante accidentado e irregular, con presencia de sierras pequeñas, dando lugar a una topografía de montañas paralelas, por lo cual, tiene una altitud oscilante entre los 400 y 1,700 msnm, en consecuencia, se afirma que 99% del territorio está compuesto por Sierra Alta Escarpada y 1% por Sierra Volcánica de Ladera Tendida. El clima en la región es semicálido húmedo con lluvias todo el año. Presenta una temperatura semicálida húmeda en el 99% de la región (principalmente en agosto y septiembre) y 1% de temperatura templada; con un rango entre los 11 y 30 °C; ocasionalmente presenta temperaturas mínimas de -7 °C y máximas de 34 °C. El rango de precipitación oscila entre 2,400 - 2,600 mm. En el municipio se han identificado 6 tipos de suelos, siendo: 38% Litosol, los cuales no son aptos para cultivos, pero sí fértiles en pastizales; 29% Acrisol, ligeros y con alta capacidad de retención de agua (recomendable para explotación forestal o parques acuáticos); 13% Luvisol, rico en nutrientes y fertilidad que oscila entre media y alta; 12% Feozem con alta fertilidad para actividad agropecuaria y cultivos de raíces someras de la región; 1% Andosol y 1% Fluvisol, de origen aluvial, mostrando variabilidad en la fertilidad, debido a que los cultivos dependen más del clima

que de las características de este tipo de suelo. Un 57% del uso del suelo es destinado a la agricultura de temporal, rodeando las zonas urbanas, mientras tanto, el 5% se destina al empleo de áreas habitables urbanas. Además, 32% de la vegetación son bosques y 6% pastizales para la actividad pecuaria. Debido a lo anterior, el uso potencial del suelo en la región, el 6% es apto para la agricultura con tracción animal continua, y el 37% para la agricultura manual continua. El 57% restante no es apto para este uso. En lo pecuario, 6% es adecuado para establecer áreas cultivadas de tracción animal y 37% en aprovechamiento de bosque o vegetación natural diferente de pastizal. El 57% no es adaptable al fin (H. Ayuntamiento de Tlaola, 2022).

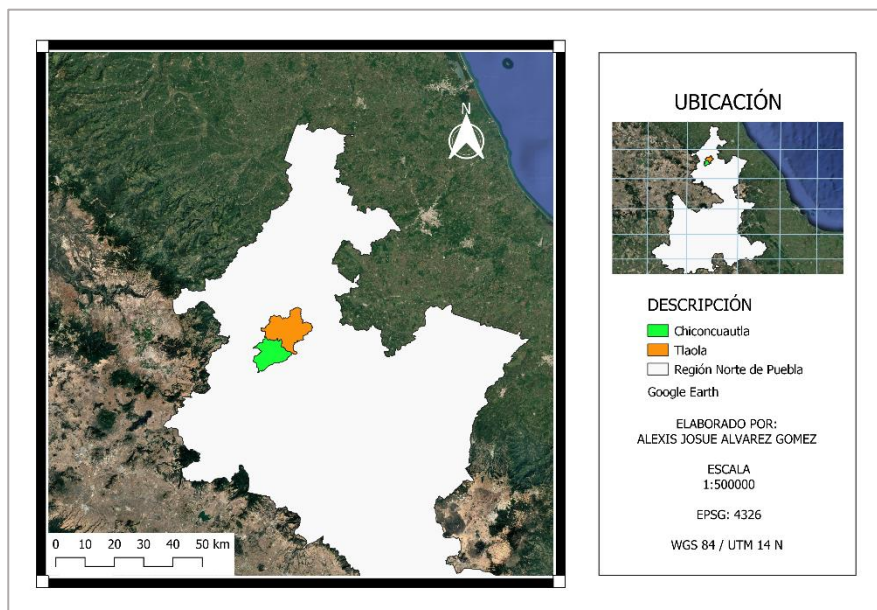


Figura 1. *Mapa de ubicación de la zona de estudio en la Sierra Norte de Puebla.*

2. MUESTREO

Se realizó el muestreo de tres predios (Fig. 2), situados en el cerro Tzintlacolta, ubicado en las limitaciones de Tlaola y Chiconcuautla; ubicados en un sistema forestal




fragmentado, donde se aplicó la quema de cobertura vegetal previo a cada ciclo de producción, por más de 20 años. Los muestreos se realizaron en tres periodos específicos: primero (1), en el mes de agosto; segundo (2), en el mes de marzo y, tercero (3) en octubre; así pues, 1 corresponde a 1 mes, 2 a 7 meses y 3 a 14 meses posteriores del inicio de realizar la presente investigación. Se eligió este lapso para para evaluar las propiedades fisicoquímicas del suelo y su efecto en este. Asimismo, cabe resaltar que la condición climática en estos meses, con base en el portal Weather spark, es: seco y fresco en marzo; lluvioso y nublado en agosto, y con precipitaciones moderadas y temperaturas regulares en octubre.

Considerando a diversos autores; como menciona Van Konijnenburg (2006), los suelos pueden tardar miles de años en formarse, no obstante, en breve tiempo pueden perderse o degradarse debido a diversos factores, tales como las prácticas agrícolas inadecuadas. Además, en este lapso, como señala Molina (2007), se puede determinar el grado de suficiencia o deficiencia de nutrientes del suelo.

Al inicio de la presente investigación, en el mes de agosto, los predios mantenían distinta condición de cobertura. El predio “Las Piedras” presentaba residuos de cosecha, en “La Curva” se implementaba la rotación de cultivo, donde la temporada pasada se cosechó chile serrano, dejando la cobertura vegetal del predio, y en “Los Naranjos” se preservaba el cultivo de cafetal de sombra, especie cafetalera de la región, junto a árboles de naranjo y especies arbóreas nativas.

Los predios se nombraron con base en un punto de referencia, para su geolocalización. La Tabla 1 detalla las características de cada uno de los predios.

Tabla 1. Datos de los tres predios muestreados.

Predio	Las Piedras	La Curva	Los Naranjos
Uso de suelo	Rotación de cultivos	Ex chilar	Cafetal
Vegetación			
Área (m²)	77	77	77
Altitud (msnm)	1.339	1.297	1.292
Latitud (m) N	2226068.00	2226252.19	2226260.78
Longitud (m) E	611550.00	611729.81	611686.49

Nota: La altitud se consideró con base en los datos de geolocalización en Google Earth Pro.

La toma de muestras de suelo se realizó de acuerdo con lo planteado por Mendoza & Espinoza (2017). Utilizando el muestreo de tipo simple, se limitaron las áreas de cada predio, seleccionando puntos estratégicos con base en la cobertura presente. Se tomaron las muestras de suelo a una profundidad entre los 15 – 25 cm, aproximadamente, debido al relieve de la zona. Además, se contempló lo planteado por Santos *et al.* (2014), con relación a los cultivos anuales, ya que en esta región se cultiva maíz, chile y otros cultivos de temporada, asimismo, cafetales de sombra y árboles cítricos.

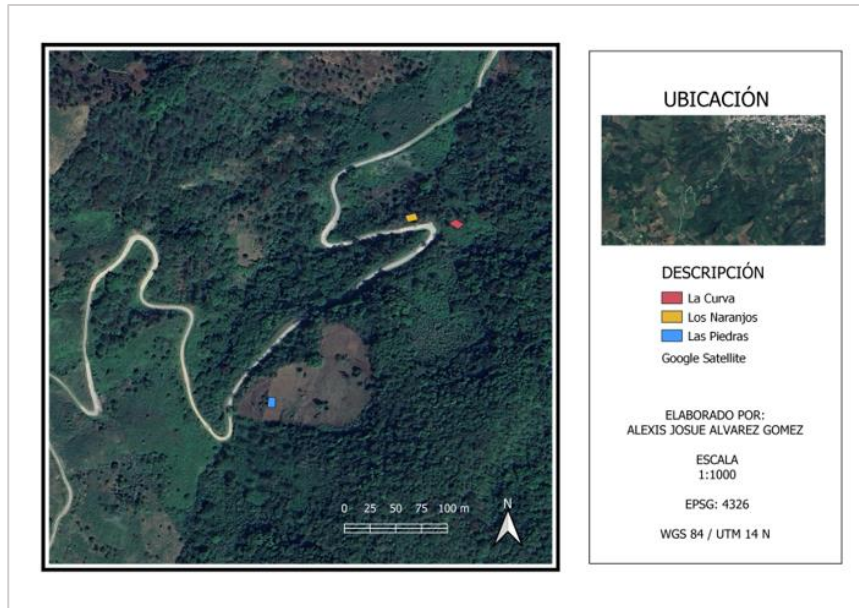


Figura 2. Mapa de ubicación de los predios en Chiconcuautla, Pue.

3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

La preparación de las muestras, para su análisis en el laboratorio, se realizó conforme a lo establecido en la NOM 021 RECNAT 2000 (SEMARNAT, 2002), con base en el apartado 7, y conforme a los puntos 3 a 7 (pp., 11 - 12).

3.1. Secado: se extendieron las muestras de suelo en charolas de plástico, debidamente etiquetadas, y se secaron durante un día a la sombra y a temperatura ambiente.

3.2. Tamizado y pesado: Una vez secas las muestras, se retiraron rocas y/o material orgánico presente; se tamizaron con un tamiz de 2 mm de diámetro (malla 10) para dejar pasar las tres fracciones del suelo: arena, limo y arcillas. Una vez tamizadas, y debidamente homogeneizadas, se extrajeron submuestras

para cada determinación analítica, con una espátula y pesada con una balanza digital o analítica, según el caso.

4. PROPIEDADES DEL SUELO

El análisis de suelos es una herramienta útil para detectar problemas nutricionales y establecer recomendaciones de fertilización. Este procedimiento se caracteriza por ser rápido y eficiente. Su interpretación se fundamenta en la correlación con el crecimiento de la planta, debido a que depende de la concentración de nutrientes que la beneficia o la afecta (Molina, 2007)

Por lo cual, se determinaron las siguientes propiedades fisicoquímicas (Tabla 2) a cada una de las muestras.

Tabla 2. *Propiedades fisicoquímicas analizadas.*

Propiedad	Físico	Abrev.	Químico	Abrev.
	Humedad		pH	
	Textura		Materia orgánica	M.O.
	Densidad aparente	ρ_a	Nitrógeno	N
Parámetro analizado	Densidad real	ρ_r	Fósforo	P
			Potasio	K
			Calcio	Ca
			Magnesio	Mg
			Capacidad de Intercambio Catiónico	C.I. C.

5. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

La metodología del análisis fisicoquímico del suelo es fundamental para evaluar sus propiedades y características; por ello, a continuación, se describen las técnicas utilizadas (Tabla 3) para realizar los análisis físicos y químicos del suelo en la presente investigación.

Tabla 3. Método utilizado para determinar las variables físicas y químicas.

Variable	Método
Física	
Humedad	Gravimétrico
Textura	Bouyoucos
ρ_a	Probeta
ρ_r	Picnómetro
Química	
pH	Potenciómetro (relación 1:2.5)
M. O.	Walkley y Black
N	Kjeldahl
P	Bray I
K	Espectrometría de emisión de flama
Ca	Versenato (EDTA)
Mg	Versenato (EDTA)
C.I. C.	Espectrofotometría de absorción atómica de Na

5.1. Humedad

Se determinó el contenido de humedad de las muestras considerando la diferencia de peso entre la masa del suelo húmedo y seco, hasta obtener un peso constante. Se pesaron charolas de aluminio en el horno a 180 °C hasta obtener peso constante,

posteriormente se les agregó 20 gramos de suelo para así volver a dejar en el horno (misma temperatura) por un lapso de 24 horas. Pasado este lapso, se volvieron a pesar las charolas con el suelo seco hasta obtener un peso constante.

Se calculó el porcentaje de humedad con la siguiente fórmula:

$$(Ec. 1) \quad \theta g = \frac{(PB + Psh) - (PB + Pss)}{(PB + Pss) - PB}$$

Donde:

θg = contenido de humedad gravimétrica expresado en porcentaje (%).

PB = Peso del bote con tapa (g).

Psh = Peso del suelo húmedo (g).

PB + Psh = Peso del bote más peso del suelo húmedo (g).

PB + Pss = Peso del bote más peso del suelo seco (g).

5.2. *Textura*

Se le dio tratamiento previo con H₂O₂ al 8% a 70 gr de suelo (tamizado y homogeneizado), para eliminar la materia orgánica presente (hasta que dejó de hacer efervescencia); y posteriormente se dejó durante 24 horas en la estufa para secarse. Finalizado el proceso, se tomaron 50 gr de muestra; se le agregó Na₂C₂O₄ y Na₂Si₂O₃ con la finalidad de separar las fracciones; se agregó una cantidad de agua destilada (hasta la segunda ranura del vaso de agitación), inmediatamente, se colocó en agitación durante 10 minutos. Una vez pasado el tiempo, se dispuso en una probeta de 1000 ml y se agitó por un minuto para homogeneizar la muestra; transcurridos 40 segundos, se realizó la primera lectura con el hidrómetro de Bouyoucos y, al mismo tiempo, se comprobó la temperatura

(factor de corrección). Se dejó reposar 2 horas y se repitió el paso anterior, considerándolo como la segunda lectura. El factor de corrección, en la temperatura, se realiza cuando es mayor o menor a los 20 °C.

La cuantificación de datos se realizó de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$(Ec. 2) \% \text{ de limos} + \% \text{ de arcillas} = \frac{\text{primera lectura}}{\text{gr de suelo}} \times 100$$

$$(Ec. 3) \% \text{ de arena} = 100 - (\% \text{ de limos} + \% \text{ de arcillas})$$

$$(Ec. 4) \% \text{ de arcillas} = \frac{\text{segunda lectura}}{\text{gr de suelo}} \times 100$$

5.3. pH

Para el pH de la muestra de suelo, se realizó una mezcla de 10 gr de este con 25 ml de agua destilada, poniéndose en agitación constante por 30 minutos, con la finalidad de homogeneizar la mezcla. Finalmente, con el potenciómetro (calibrado), se calculó el pH de acuerdo con la siguiente escala.

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Figura 3. *Clasificación del suelo por su pH*

Nota: Escala obtenida de la NOM – 021 – RECNAT – 2000. Método AS-02 determinación de pH.

5.4. *Materia orgánica*

Se pesaron 0.1 gr de la muestra en una balanza analítica; se agregó en un matraz Erlenmeyer de 500 ml; 5 ml de $K_2Cr_2O_7$ 1 N con una bureta para mayor precisión. Con una probeta se le adicionó 10 ml de H_2SO_4 concentrado (en la campana de extracción, y se colocó en una superficie de madera) y se dejó reposar 30 minutos. Posteriormente, se adicionaron 100 ml de agua destilada, 5 ml de H_3PO_4 y 5 gotas de indicador bariosulfonato de difenilamina, finalmente se tituló con $FeSO_4$ 0.5 N.

La cuantificación de datos se realizó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(Ec. 5) \% \text{ de M. O.} = \frac{5 - (\text{ml de } FeSO_4 \times N_{\text{real}})}{\text{gr de la muestra}} \times 0.69$$

Donde:

5 = dicromato agregado.

N = normalidad real de $FeSO_4$.

0.69 = constante.

5.5. *Nitrógeno*

La digestión de las muestras se realizó en condiciones ácidas; en un tubo de digestión se agregó 0.1 gr de muestra de suelo (pesado en una balanza analítica), junto a 1 gr de mezcla catalizadora; se le adicionó 2 ml de H_2SO_4 concentrado en la campana de extracción y se mezcló perfectamente; este proceso oxida toda la materia orgánica, dejando en su mayor parte amonio. Este proceso se realizó a una temperatura de $360^\circ C$ por un tiempo de 4 horas o, en su caso, hasta obtener un color amarillo paja o gris claro. Posteriormente se dejó

enfriar y se enjuagaron los tubos de digestión con un poco de agua destilada para agregarlos al destilador Kjeldahl. La destilación en el Kjeldahl es un proceso por arrastre de vapor; el amoniaco destilado (50 ml, aprox.) se recibió en un matraz de 125 ml con 8 ml de H₃BO₃ al 4% y 3 gotas de indicador mixto. Finalmente, se tituló con H₂SO₄ 0.025 N.

La cuantificación de datos se realizó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(Ec. 6) \text{ \% de N} \\ = \frac{(\text{ml de H}_2\text{SO}_4 \text{ muestra} - \text{ml de H}_2\text{SO}_4 \text{ del blanco}) \times N \times 14.007 \times 100}{\text{mg de la muestra}}$$

5.6. *Fósforo*

Se utilizó 1 gr de la muestra de suelo; se agregó en un tubo con 7 ml de solución extractora y se agitó por 1 minuto, con la finalidad de separar todos los iones presentes en la muestra, seguido, se filtró con papel filtro hasta obtener una mezcla transparente. Posteriormente se preparó otra disolución con molibdato de amonio, agua destilada y una alícuota de la muestra; se prepararon un blanco y cuatro estándares para poder generar una curva de calibración y así poder determinar la concentración de fósforo. En este proceso, se requiere de una solución madre de SnCl₂, la cual debe ser preparada al momento de realizar la muestra, ya que de lo contrario no es funcional para poder realizar la determinación de absorbancia en los estándares y en las muestras para realizar la curva de calibración.

5.7. *Potasio y C.I.C.*

Se agregó 1 gr de suelo en un tubo de centrifuga, y se le realizaron cinco lavados con NaCl y se centrifugo durante 5 minutos a 3000 rpm; se realizaron otros 5 lavados con alcohol etílico para dejarlo libre de NaCl. Por último, se realizaron otros cinco lavados con CaCl₂ y se volvió a centrifugar. Se filtró entre cada lavado, obteniendo un líquido transparente y limpio de residuos de suelo.

Para determinar la cantidad presente, se tomó una alícuota de 10 ml del filtrado; el K se determinó por espectrometría de emisión de flama, en cuanto a la C.I.C. se determinó con el equipo de espectrofotometría de absorción atómica, para determinar Na⁺, con una serie de estándares.

5.8. *Calcio y Magnesio*

En un tubo de centrifuga se agregó 1 gr de suelo; se le agregaron 5 ml con acetato de amonio 1 N pH 7, mezclando con un agitador de vidrio, enjuagando el agitador con otros 5 ml para evitar dejar residuos de la muestra y centrifugándolo durante 5 minutos a 3000 rpm (repetiendo 5 veces este proceso). En cada repetición se decantó con papel filtro en un frasco.

Una vez realizados los lavados, se aplicó la metodología adecuada para determinar Mg⁺⁺ y Ca⁺⁺.

Para calcular la cantidad presente de Magnesio (Mg⁺⁺) en la muestra, se procedió de la siguiente manera: se tomó una alícuota de 10 ml y se agregaron en un matraz Erlenmeyer de 125 ml, 10 ml de solución buffer pH 10, 5 gotas de KCN al 2% y 5 gotas de NH₂OH·HCl y 3 gotas de indicador de negro de eriocromo T, finalmente se tituló con EDTA hasta virar de purpura a azul. Mientras que, para

determinar la cantidad de Calcio (Ca^{++}), se tomó una alícuota de 10 ml del filtrado, agregándole 5 ml de NaOH al 10 %, agregando murexida como indicador y se tituló con EDTA hasta obtener un vire de rosa a lila.

La cuantificación de datos, para ambos iones, se realizó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(Ec. 7) \text{Ca}^{++} \text{ o } \text{Mg}^{++} = \frac{\text{ml de EDTA} \times 5 \times N}{\text{gr de la muestra}} \times 100$$

5.9. *Densidad aparente*

Se peso una probeta de 10 ml vacía; y se le agregó suelo hasta el volumen y se golpeó ligeramente 10 veces sobre la superficie de la mesa sobre una franela, volviendo a aforar. Posteriormente, se volvió a pesar la probeta con el suelo; se le resto el peso de la probeta para realizar los cálculos.

La cuantificación de datos se realizó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(Ec. 8) D_{ap} = \frac{\text{peso del suelo}}{\text{Volumen}}$$

5.10. *Densidad real*

Se puso a peso constante el picnómetro. Una vez obtenido, se le agregaron 5 gr de suelo y se pesó; se le agregó una tercera parte de agua destilada con una piceta y se le aplicó un movimiento de rotación suave para desalojar el aire. Se dejó reposar hasta desplazar las burbujas de aire presentes; se aforó y se volvió a pesar. Finalmente, se lavó el picnómetro y se secó en la estufa hasta obtener su peso constante, dejándolo enfriar y se llenó de agua destilada para volver a pesarlo.

La cuantificación de datos se realizó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(Ec. 9) D_{\text{real}} = \frac{S}{S + A - (s + a)}$$

Donde:

S = peso del suelo.

A = peso del agua.

s + a = peso del agua y suelo mezclado.

6. DETERMINACIÓN DE FORMAS DE CARBONO EN SUELOS

La determinación de la disponibilidad de formas de carbono, presentes en las muestras de suelo, se realizó con base en la metodología empleada por Nava Guevara (2022). Al mismo tiempo, se realizaron ajustes para una mayor precisión de resultados, tal y como a continuación se describe.

6.1. *Carbono soluble en Agua Fría*

Para determinar el CSAF se diluyó 1 gr de suelo en 10 ml de agua desionizada, para posteriormente agitar durante 30 minutos y centrifugar durante 20 minutos; se filtró con una membrana de 45 μm para obtener el extracto de carbono soluble en agua fría (temperatura ambiente). Los restos de suelo se guardaron para obtener el carbono soluble en agua caliente; y el extracto se analizó mediante el método de Walkley y Black para obtener el porcentaje de carbono en agua fría.

6.2. *Carbono soluble en Agua Caliente*

El sedimento sobrante de la metodología para obtener el CSAF se disolvió en 10 ml de agua desionizada, agitándose por 10 segundos; se repitió el proceso de centrifugado y filtrado ocupados para la obtención de esta forma (CSAC); una vez que se obtuvo el extracto, se analizó mediante el mismo método para obtener el %.

6.3. *Carbono soluble en Pirofosfato de sodio*

Para obtener el CSP se realizó una dilución de suelo en Pirofosfato de sodio hidratado (1:10); se agitó 25 minutos, se centrifugó durante 5 minutos más, posteriormente se decantó hasta obtener el extracto para analizarlo y así obtener el porcentaje de las formas de CSP.

Se realizó una modificación a la metodología de Walkley y Black, reduciendo al 10% las cantidades, para realizar la determinación.

La cuantificación del % de carbono se realizó con la ecuación 5 y 10.

$$(Ec. 10)\% \text{ de carbono} = \frac{\% \text{ de M.O.}}{1.724}$$

7. EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE AGRICULTURA REGENERATIVA

Se implementó la agricultura regenerativa en los predios analizados, conservando principalmente cobertura vegetal y evitando la preparación del suelo, asimismo, en el predio “Las Piedras” se consideró la rotación de cultivos previo a dejar la cobertura propia del área; en “La Curva” se mantuvieron las especies

herbáceas sin alteración del suelo y con un antecedente de uso para chile serrano; en “Los Naranjos” se preservó la cobertura, manteniendo las condiciones derivada del cultivo de naranjos, cafetales de sombra y especies nativas, tal y como se detalla en el apartado de resultados.

Utilizando Google Earth Pro se generaron polígonos, con un área total de 77 m², donde se analizaron los cambios de cobertura vegetal mediante el uso de imágenes satelitales históricas. Siguiendo la metodología empleada por Avilés Ramírez (2018), se eligieron 7 años específicos, los cuales fueron: 2007, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024.

Se contempló el año 2007 como la base de cambio en el uso de suelo, además de que es el año más antiguo registrado en el programa. Asimismo, se contemplaron cuatro meses en específico, con base en las imágenes satelitales registradas, contemplando enero, febrero, octubre y diciembre, con el fin de comprender las condiciones ambientales.

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS

1. Propiedades fisicoquímicas de suelos

1.1. Físicas

1.1.1. Humedad

La humedad del suelo se determinó mediante el método gravimétrico y los resultados se presentan en la Tabla 4.

El cambio en el porcentaje de humedad de cada predio se relaciona con la cantidad y tipo de cobertura vegetal al momento, siendo notorio el aumento en el predio “Las Piedras” donde, en el primer periodo presentaba cobertura seca, a diferencia del tercero, donde se encontraba diversificado y con un alto porcentaje de especies herbáceas; en “La Curva” aumento la cantidad de especies arbustivas y herbáceas presentes entre el primer y tercer periodo y en “Los Naranjos” se preservó la cobertura de manera similar entre cada periodo del estudio.

Tabla 4. Humedad del suelo.

Periodo	Humedad (%)	
	1	3
Predio		
Las Piedras	8.5	10.1
La Curva	8.2	10.9
Los Naranjos	8.5	9.5

1.1.2. Textura

La textura del suelo se determinó con el método de Bouyoucos y los resultados se observan en la Tabla 5.

Los suelos presentaron una clase textural del tipo Franco – Arcilloso, con base en el triángulo textural del suelo propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés). El predio “La Curva” presentó un porcentaje mayor de arena que los predios “Las Piedras” y “Los Naranjos”; en cuanto al contenido de arcilla, el predio “Las Piedras” presentó un porcentaje mayor con respecto a los predios “La Curva” y “Los Naranjos”; mientras que, el predio “Los Naranjos” presentó un mayor porcentaje de contenido de limo a diferencia de los predios “Las Piedras” y “La Curva”.

Tabla 5. Clase textural de las muestras.

Predio	Componente			Clase textural
	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	
Las piedras	27.2	31	41.8	Franco - Arcilloso
La curva	29.2	28.8	42	Franco - Arcilloso
Los naranjos	27	28.8	44.2	Franco - Arcilloso

La Figura 4 ilustra los triángulos de textura de cada predio, apreciándose detalladamente la distribución de las tres porciones de partículas, las cuales les confieren características únicas, tales como la capacidad de drenado, aireación o de químicos, como la fertilidad, de esta manera, la textura del suelo es una propiedad fundamental que influye en las propiedades físicas y químicas; comprenderla es

crucial para evaluar la fertilidad y manejo adecuado del suelo. También, se aprecia que los suelos tienden a ser más del tipo Franco que Arcilloso.

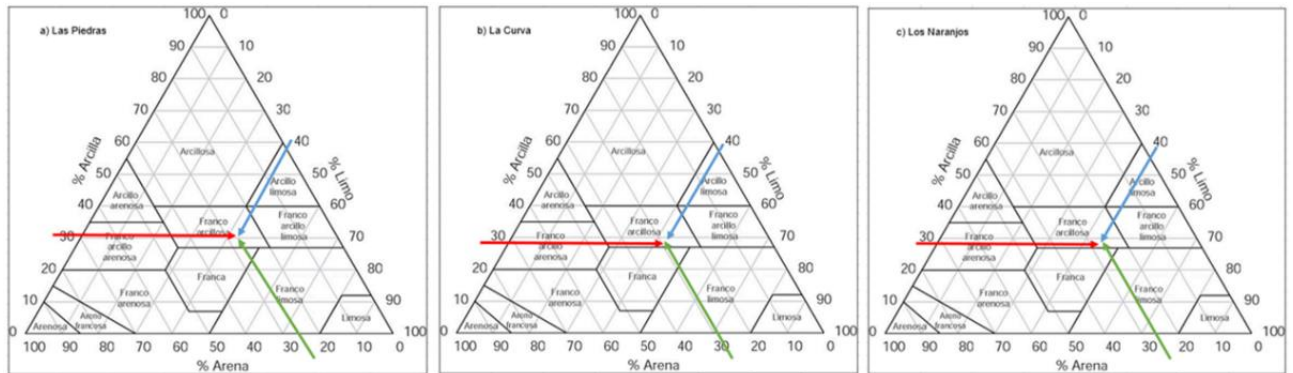


Figura 4. Triángulo de Textura.

1.1.3. Densidad aparente y real

La p_a y p_r del suelo se determinaron por el método de la probeta y picnómetro, respectivamente, en los tres periodos. La Figura 5 ilustra y detalla los datos obtenidos.

El aumento de cobertura vegetal, en periodos húmedos, produce una mayor agregación y estimula la actividad biológica, contribuyendo a formación de agregados más estables, reteniendo mayor humedad; mientras que, en periodos calurosos, ayuda a reducir la erosión del suelo, contribuyendo a mantener la estructura y porosidad del suelo.

La p_a (Fig. 5a) tiende a disminuir al aumentar la cantidad de M.O. del suelo, debido a que la materia orgánica tiene una densidad menor que la de los minerales del suelo; la disminución de la densidad aparente se debe a la mejora de su estructura, la capacidad de retención de agua y al aumento de la porosidad del suelo. Factores que influyen en la relación de $M.O./p_a$, son el tipo de suelo y su composición mineral, el contenido de

humedad y los procesos de expansión/contracción (Hossne, 2008). En cuanto a la ρ_r (Fig. 5b), el aumentar el porcentaje de materia orgánica puede disminuirla ligeramente, esto se debe a que la materia orgánica del suelo tiene una menor densidad en comparación con los minerales del suelo (Moorberg & Crouse, 2022).

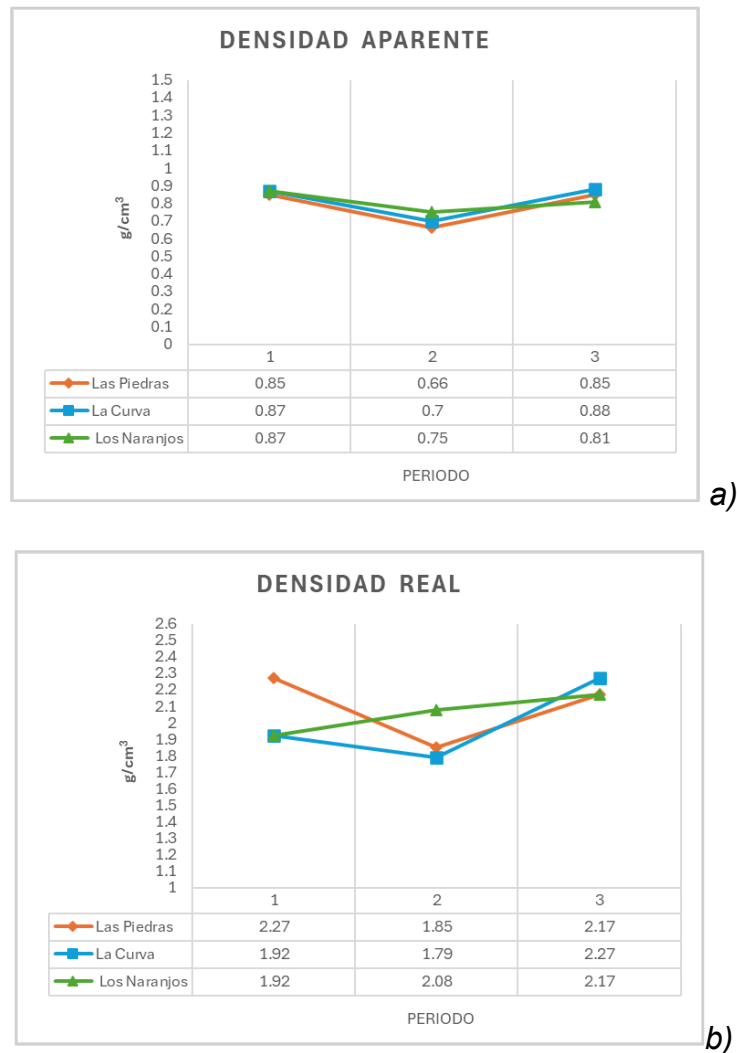


Figura 5. Densidad real y aparente.

1.2. Químicas

1.2.1. pH

El pH del suelo se determinó con el método del potenciómetro (relación 1:2.5) en los tres periodos. La Figura 6 ilustra y detalla los datos obtenidos.

El desarrollo de cobertura vegetal, en periodos húmedos, incrementa la cantidad de M.O., ocasionando la acidificación del suelo, reduciendo su pH; además, estimula la actividad biológica, descomponiendo la M.O., liberando ácidos orgánicos que pueden reducir el pH. Por el contrario, en periodos calurosos, la cobertura ayuda a reducir la erosión del suelo, manteniendo su fertilidad y estabilizando su pH.

Por lo cual, aumentar el porcentaje de M.O. tiene efectos significativos en el pH al descomponerse en el suelo, dependiendo de la naturaleza y su contenido, así como del pH inicial; cuando es ácido, suele aumentar el pH al libera ácidos orgánicos (ácido húmico y ácido fúlvico) que contribuyen a la acidificación del suelo, Por otro lado, cuando es alcalino, puede liberar bases como el amoníaco que contribuye a la alcalinización (Martínez *et al.*, 2008).

En suelos forestales, aumentar la M.O. puede reducir la acidez del suelo al unirse a los iones de hidrógeno (H^+) y aluminio (Al_3^+), pudiendo aumentar el pH del suelo. Por el contrario, al disminuirla, puede aumentar su acidez, debido a que reduce la capacidad tampón del suelo y se incrementa la disponibilidad de H^+ , afectando la disponibilidad de nutrientes (Skylberg *et al.*, 2001; Brady & Weil, 2008; Cruz Macías *et al.*, 2020).

En cuanto a los valores de pH obtenidos en los predios, con base en la Figura 3, fueron los siguientes: “Las Piedras” en el primer periodo fue de ligeramente ácido a

neutro; en el segundo ácido y ligeramente alcalino al tercero; la cobertura vegetal del predio se preservó en el segundo y tercer periodo, permitiendo una reincorporación de C orgánico. En “La Curva” fue ligeramente alcalino al primer y tercer periodo, mientras que en segundo se consideró ligeramente ácido a neutro; donde, la preservación de cobertura vegetal arbustiva permaneció sin mucha alteración. En “Los Naranjos” el primer periodo fue ligeramente ácido o neutro, asimismo en el segundo (un poco más ácido) y ligeramente alcalino en el tercero; donde se preservaron las especies arbóreas, específicamente naranjos y cafetales de sombra.

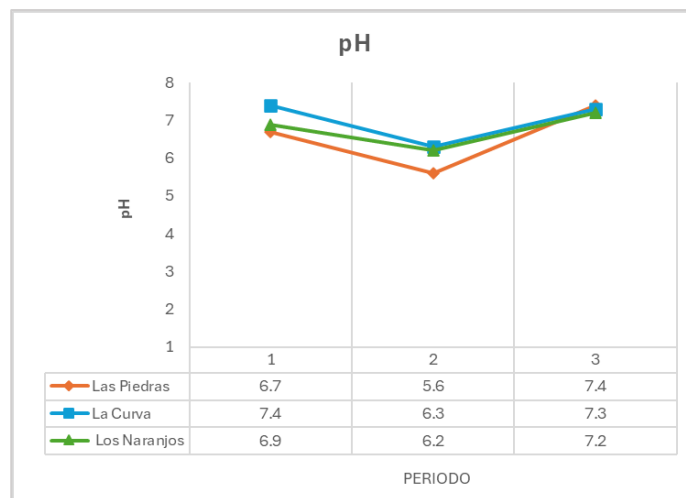


Figura 6. pH del suelo

1.2.2. Materia Orgánica

El porcentaje de materia orgánica se determinó con el método de Walkley y Black en los tres periodos. La Figura 7 ilustra y detalla los datos obtenidos.

La implementación de agricultura regenerativa mediante el control de cobertura vegetal (“Los Naranjos”), rotación de cultivo (“Las Piedras”) y preservar el suelo cubierto (“La Curva”), desde 2019, ha permitido el aporte de M.O.

El desarrollo de cobertura vegetal, en periodos húmedos, genera un aumento significativo de M.O., al haber mayor aporte de biomasa, además, la humedad y temperatura estimulan la actividad biológica a descomponer e incorporar la M.O. al suelo. En cambio, en periodos calurosos, el incremento de M.O. es moderado, al haber menor humedad, poca disponibilidad de biomasa y menor actividad biológica.

El aporte de biomasa mediante la diversificación de especies herbáceas en “Las Piedras”, permitió el aprovechamiento de M.O., mejorando la disponibilidad de nutrientes y humedad. En “La Curva” preservó sus especies arbustivas en un mayor tiempo, con un aprovechamiento de M.O. al tener menor alteración. En “Los Naranjos” se controló el desarrollo de cobertura a cierta altura, además, en este predio se preservan especies arbóreas.

En los sistemas forestales la vegetación es fundamental para el aprovechamiento de materia orgánica, lo cual dependerá de la cantidad disponible, calidad y presencia de microorganismos beneficiosos. De esta manera, el aporte de M.O. de las especies herbáceas, arbustivas y arbóreas es distinta, así como su aprovechamiento en el suelo; el aporte de biomasa de la vegetación herbácea (hojas, tallos y raíces) es de rápida descomposición, al igual que la liberación de nutrientes al suelo; en cuanto al aporte de la vegetación arbustiva (hojas, ramas y raíces) su descomposición y liberación de nutrientes es de manera moderada, permitiendo que este aporte de M.O. mejore la estructura del suelo, aumentando su porosidad y aeración. En la vegetación arbórea, su aporte de biomasa (hojas, ramas y troncos, así como de frutos) se descompone más lentamente, ocasionado que el aprovechamiento de nutrientes sea lento (Lal, 2004; Brady & Weil, 2008). Las especies herbáceas permiten una mayor protección al suelo,

recubriéndolo y disminuyendo su exposición directa a factores ambientales, con lo cual, se tiene una recuperación de M.O. y aporte de nutrientes en periodos más cortos en los sistemas forestales fragmentados (Esquivel Maza, 2024).

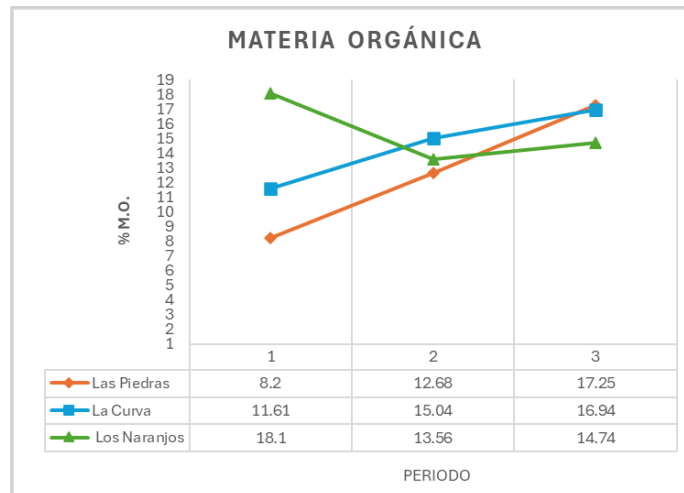


Figura 7. Porcentaje de M.O.

1.2.3. Nitrógeno

La disponibilidad de nitrógeno en el suelo se determinó con el método de Kjeldahl en los tres periodos. La Figura 8 ilustra y detalla los datos obtenidos.

El desarrollo de cobertura vegetal, en periodos húmedos, puede contribuir a una disminución de N en el suelo, al haber más precipitación, aumentando su lixiviación, además, las plantas absorben N, reduciendo su disponibilidad para otras. Por el contrario, en periodos calurosos, contribuye a un aumento moderado de N, al haber menor precipitación, reduciendo su lixiviación y permitiendo su acumulación en el suelo.

De manera que, aumentar el % de M.O. en suelos forestales, aumenta la fijación biológica de N, al estimular los microorganismos fijadores de N, aumentando la retención de N en el suelo, al formar complejos orgánicos que reducen su lixiviación. Sin embargo,

cuando hay exceso de M.O. lleva a una mayor inmovilización de N, debido a la estimulación de microorganismos que utilizan N para descomponer la M.O. Así pues, la cantidad de N que se libera en la descomposición de la MOS influye en la cantidad de N consumida por los microorganismos y en la tasa de mineralización; cuando la relación C/N de la M.O. es alta, puede llevar a la inmovilización del N, por el contrario, cuando es baja puede aumentar la mineralización del N aumentando su lixiviación, cuando hay formación de nitrato (Fontaine *et al.*, 2003; Jandl *et al.*, 2007; Reed *et al.*, 2011; Sardar *et al.*, 2023).

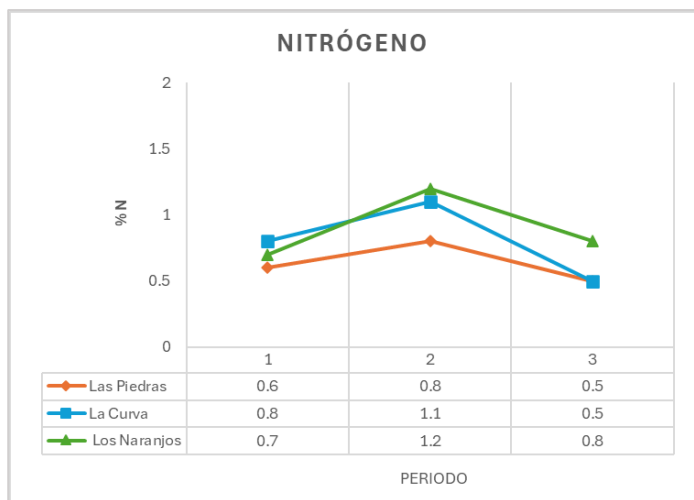


Figura 8. Disponibilidad de N

1.2.4. Fósforo

La disponibilidad de fósforo en el suelo se determinó con el método de Bray I en los tres periodos. La Figura 9 ilustra y detalla los datos obtenidos.

El desarrollo de cobertura vegetal, en periodos húmedos, contribuye a una disminución del P, al aumentar la lixiviación; además, el P puede fijarse al suelo en formas no disponibles para las plantas, lo que reduce su disponibilidad. No obstante, en este

periodo, la descomposición de M.O. libera P, aumentando su disponibilidad en el suelo. A diferencia de, en los periodos calurosos, la disminución del P se debe a la limitación de recursos, reduciendo la disponibilidad de P para las plantas.

La aplicación de gallinaza (fuente de P orgánico e inorgánico) puede aumentar directamente su disponibilidad, por su contenido de M.O. Al aumentar, el P disminuye por la estimulación de actividad microbiana y formación de complejos con iones de P, por el contrario, el aumento se debe a que la M.O. es fuente de P orgánico, el cual se mineraliza a formas inorgánicas disponibles para las plantas. En suelos forestales, la M.O aumenta la disponibilidad de P al estimular la actividad microbiana, mineralizando P orgánico; asimismo, puede influir la química del suelo, reduciendo la sorción de P en los minerales del suelo y aumentando su disponibilidad. Por otro lado, disminuye cuando la M.O. es rica en C y baja en P, causando su inmovilización por parte de los microorganismos y la formación de complejos estables, limitando su liberación (Salas *et al.*, 2003; Olander & Vitousek, 2004; Richardson & Simpson, 2011).

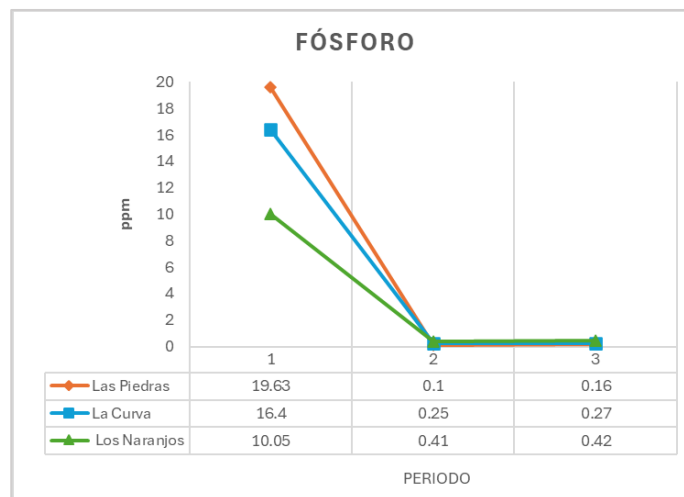


Figura 9. Disponibilidad de P.

1.2.5. Potasio

La disponibilidad de potasio en el suelo se determinó con el método de espectrometría de emisión de flama, en los tres periodos. La Figura 10 ilustra y detalla los datos obtenidos.

El desarrollo de cobertura vegetal, en periodos húmedos, puede contribuir a una disminución del K, debido a una mayor precipitación, aumentando su lixiviación, además, las plantas pueden absorber más K, disminuyendo su disponibilidad en el suelo. No obstante, en este periodo, la descomposición de M.O. contribuye al aumento de su disponibilidad. En cambio, en periodos calurosos, este aumento de cobertura puede contribuir a una disminución, debido a la limitación de recursos, reduciendo la disponibilidad de K para las plantas.

La aplicación de gallinaza favorece aportando nutrientes como el K; su disponibilidad varía dependiendo del método de aplicación. Aumentar el % de M.O en el suelo, la disminuye al estimular la actividad microbiana, llevando a una mayor inmovilización. Sin embargo, la descomposición de M.O. libera K, aumentando su disponibilidad en suelo. En suelos forestales, aumentar la M.O. puede disminuir esta disponibilidad, debido a la inmovilización microbiana, la lixiviación y la formación de complejos con la M.O. (Tripler *et al.*, 2006; Rengel & Damon, 2008).

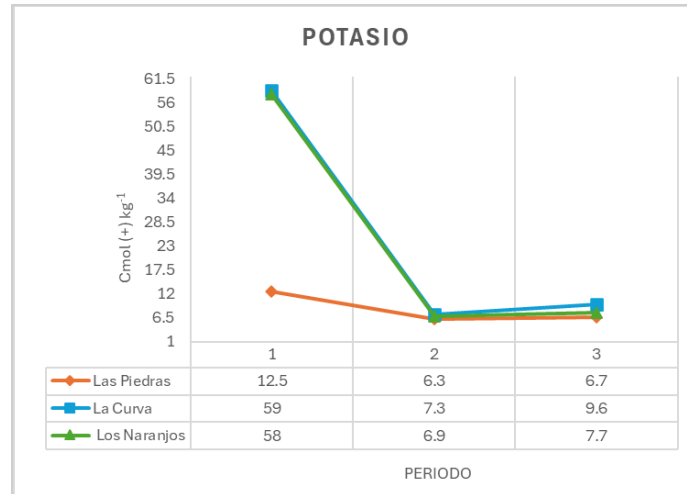


Figura 10. Disponibilidad de K

1.2.6. Calcio

La disponibilidad de calcio en el suelo se determinó con el método de Versenato (EDTA) en los tres periodos. La Figura 11 ilustra y detalla los datos obtenidos.

El desarrollo de cobertura vegetal, en periodos húmedos, contribuye a la disminución del Ca, ya que aumenta su lixiviación y hay mayor absorción por las plantas, no obstante, puede aumentar su disponibilidad por la descomposición de M.O., además, las plantas pueden absorberlo y liberarlo a través de la descomposición de sus residuos. Por el contrario, en periodos calurosos, este aumento de cobertura lo disminuye, ya que las plantas pueden absorberlo en mayor cantidad, además, la limitación de recursos, disminuyen su disponibilidad para otras plantas; sin embargo, puede aumentar, debido a la reducción de la lixiviación, permitiendo su acumulación en el suelo.

En suelos forestales la M.O. mejora la estructura del suelo, permitiendo mantener el Ca disponible durante períodos más largos; a medida que los microorganismos

descomponen la M.O., los nutrientes se mineralizan y se vuelven disponibles. No obstante, la M.O. puede influir en la química del suelo y aumentar su lixiviación, especialmente en suelos con alta permeabilidad o en condiciones de alta precipitación, al formar complejos solubles con el Ca, desplazándolo a capas más profundas o fuera del perfil del suelo; el exceso de M.O. puede disminuir el Ca al estimular la actividad microbiana, causando mayor inmovilización y al formar complejos insolubles con iones de Ca, los cuales pueden precipitar y quedar retenidos en el suelo en formas no disponibles para las plantas (Tripler *et al.*, 2006).

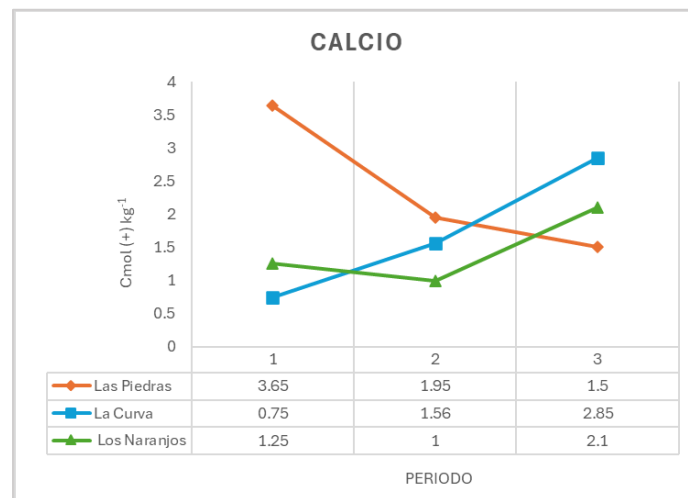


Figura 11. Disponibilidad de Ca.

1.2.7. Magnesio

La disponibilidad de Magnesio en el suelo se determinó con el método de Versenato (EDTA) en los tres periodos. La Figura 12 ilustra y detalla los datos obtenidos.

El desarrollo de cobertura vegetal, en periodos húmedos, el Mg disminuye al aumentar su lixiviación y al haber mayor absorción; no obstante, su aumento se debe a que la M.O. se descompone, liberando Mg, así como por su reciclaje, a través de la

descomposición de residuos de plantas. En cambio, en periodos calurosos, el aumento de cobertura contribuye a una mayor disponibilidad, al haber menor lixiviación, permitiendo su almacenamiento; por el contrario, disminuye por la limitación de recursos y la absorción por las plantas.

El aumento de M.O. estimula el crecimiento de microorganismos y plantas, aumentando la competencia por nutrientes (incluyendo el Mg); al igual que con otros nutrientes, la formación de complejos orgánicos disminuye su disponibilidad en el suelo. No obstante, la actividad de los microorganismos, al descomponer la M.O. liberan nutrientes, aumentándola.

La M.O. tiene una alta C.I.C, permitiéndole retener y liberar cationes como el Mg^{2+} , por lo cual, aumentar la M.O. en suelos forestales mejora la capacidad del suelo para retener nutrientes y liberarlos gradualmente. Además, la relación M.O./Mg en suelos forestales puede variar, dependiendo de factores como la presencia de microorganismos específicos que pueden influir en la disponibilidad de nutrientes y de la composición química de la M.O., y su capacidad para retenerlos y liberarlos (Vásquez Acuña, 2019).

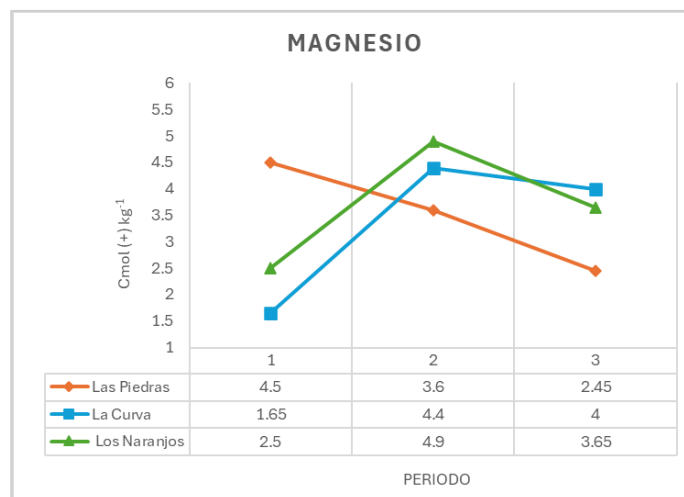


Figura 12. Disponibilidad de Mg.

1.2.8. C.I. C.

La Capacidad de Intercambio Catiónico en suelo se determinó con el método de espectrofotometría de absorción atómica, para determinar Na, en los tres periodos. La Figura 13 ilustra y detalla los datos obtenidos.

La disminución de la C.I.C., en periodos húmedos, se asocia con el aumento de cobertura vegetal, ya que puede aumentar la lixiviación de cationes, reduciendo su disponibilidad para su intercambio; además, la descomposición de M.O. puede reducir la cantidad de sitios de intercambio catiónico en el suelo. Sin embargo, su aumento está relacionado con el aumento de M.O.; ya que mejora de la estructura del suelo, permitiendo mejor retención de agua y nutrientes, aumentando su C.I.C. Por el contrario, el periodos calurosos, la C.I.C. disminuye por la limitación de recursos, reduciendo la actividad biológica, por ende, a un menor aporte de M.O.

Aunque la M.O. está asociada con un aumento en la C.I.C. debido a la carga negativa y su capacidad de retener cationes, hay situaciones en que podría disminuir al aumentarse en suelos forestales. La M.O. puede bloquear o cubrir sitios de intercambio en partículas del suelo, reduciendo la accesibilidad para los cationes, y la C.I.C. efectiva. La descomposición de M.O. puede liberar ácidos orgánicos que pueden alterar el pH del suelo, afectándola, ya que, en ciertos rangos de pH, esta puede disminuir debido a la protonación de grupos funcionales. Asimismo, la calidad (composición química y grado de humificación) puede influir en su capacidad para retener cationes, es decir, la M.O. poco descompuesta o de baja calidad puede tener menos sitios de intercambio disponible, disminuyendo su C.I.C., además, puede formar complejos con minerales de

arcilla, alterando su capacidad de retener cationes (Brady & Weil, 2008; Vásquez Acuña, 2019; Rengel *et al.*, 2022)

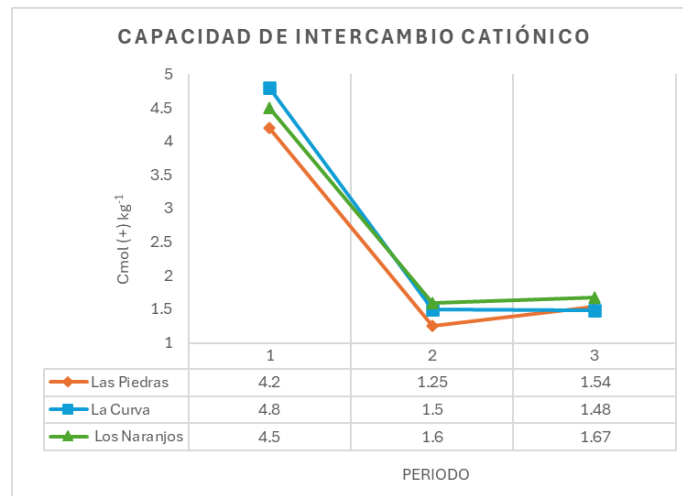


Figura 13. C.I.C.

Con base en lo anterior, podemos resaltar que las propiedades físicas y químicas presentaron variaciones en los tres periodos analizados. Además, es importante destacar que, la aplicación de malas prácticas agrícolas (como la roza, tumba y quema) en ecosistemas forestales causa graves impactos negativos en la disponibilidad de nutrientes, causando alteración en la dinámica del suelo.

De acuerdo con la NOM 021 RECNAT 2000, los propiedades físicas y químicas adecuadas para un suelo de bosque mesófilo de montaña son: ρ_a : 0.5 – 1.0g/cm³; ρ_r : 2.5 – 2.7 g/cm³; pH: 4.5 – 6.5; M.O.: 5 - 15%; N: 5 – 15%; P: 50 – 150 ppm; Ca: 2 – 5 cmol(+)/kg; Mg: 0.5 – 2 cmol(+)/kg y C.I.C.: 15 – 30 cmol(+)/kg, ya que este tipo suelo es rico en M.O., sin embargo, estos valores permisibles se consideran de manera general, dado que los rangos varían según la región, tipo de suelo y vegetación predominante.

2. Comparativo de la disponibilidad de formas de carbono

2.1. Formas disponibles de carbono en Tlaola, Puebla.

La disponibilidad de formas de carbono se determinó con el extracto de materia orgánica, determinando su solubilidad en agua fría, caliente y en pirofosfato de sodio, en los tres periodos. La Tabla 6 resume los resultados obtenidos.

Tabla 6. Disponibilidad de formas de carbono en Tlaola, Puebla.

Periodo		1	2	3
% CSAF				
TLAOM1	Las Piedras	0.8996	0.9253	1.8591
TLAOM2	La Curva	0.9060	0.9317	1.5868
TLAOM3	Los Naranjos	0.9124	0.9124	1.6549
% CSAC				
TLAOM4	Las Piedras	0.7781	0.6821	1.2216
TLAOM5	La Curva	0.7514	0.7781	1.4830
TLAOM6	Los Naranjos	0.7941	0.7834	1.1423
% CSP				
TLAOM7	Las Piedras	0.7213	0.7554	1.1778
TLAOM8	La Curva	0.7456	0.7408	1.1410
TLAOM9	Los Naranjos	0.7602	0.7456	1.2146

Nota: La numeración de la nomenclatura, corresponde a la muestra en cada predio, dependiendo el número del análisis realizado en los tres periodos.

La dinámica del carbono en el suelo es un proceso complejo que involucra el tipo de vegetación, clima, relieve, textura y estructura del suelo. Las formas de carbono en el suelo son: carbono lábil (CSAF), formas de carbono fácilmente disponibles para los microorganismos del suelo; carbono pasivo (CSAC), son formas de carbono más

estables y resistentes a la descomposición y carbono complejo (CSP), son formas de carbono asociadas con los minerales del suelo o presentes en formas complejas.

El aumento del CSAF indica una mayor actividad microbiana y una mayor descomposición de M.O., mientras que, su disminución puede indicar menor actividad microbiana, por lo cual, hay menor descomposición de M.O. En cuanto a el CSAC, el aumento puede indicar mayor estabilidad del carbono en el suelo y menor susceptibilidad a la descomposición, por otro lado, su disminución puede indicar una mayor descomposición del carbono estable y una mayor liberación de carbono lábil. La disponibilidad del CSP puede indicar cambios en la formación y descomposición de compuestos orgánicos complejos.

Smolander & Kitunen (2002) encontraron que en suelos forestales el % de CSAF varía entre 0.5% y 2.5% y el % de CSAC varía entre 1% y 5% del carbono total del suelo, sin embargo, estos porcentajes varían según la vegetación. Asimismo, autores como Ghani *et al.* (2003) y Gregorich *et al.* (2006), consideran que el CSAF evalúa la disponibilidad de carbono para los microorganismos, el cual está relacionado con propiedades del suelo (textura, estructura y fertilidad) y el CSAC evalúa la cantidad de carbono orgánico pasivo del suelo. Así pues, el uso de solventes permite determinar la disponibilidad de las formas de carbono del suelo; de manera que, el agua fría permite evaluar la fracción de carbono orgánico lábil ; el agua caliente el carbono orgánico pasivo y el pirofosfato de sodio el carbono orgánico complejo (Gregorich *et al.*, 2006; Acosta Mireles *et al.*, 2009; Romaniuk *et al.*, 2021).

También, cabe resaltar que la fragmentación de suelos forestales afecta la dinámica del carbono en el suelo, ya que genera cambios de cobertura y microfauna.

2.2. Disponibilidad de formas de carbono en Atlixco, Puebla.

La investigación se realizó en la localidad de San Félix Almazán, con coordenadas UTM 565173.77 E y 2088501.9 N, situado en la región del Valle de Atlixco y Matamoros, Puebla (Fig. 14), a 1,801 msnm. Se delimitaron cuatro zonas del predio, nombrándolas con base en su cobertura vegetal para identificar las muestras, las cuales fueron: M1 – Alfalfa, M2 – Terciopelo, M3 – Forraje y M4 – Suelo descubierto; el nombre se asignó con base en su cobertura vegetal. El muestreo del suelo fue mediante el método de muestra compuesta, tomando cinco puntos estratégicos, de acuerdo con el área total, para establecer la calidad del suelo. El tipo de agricultura utilizada en esta región es la convencional, empleando el uso de tractor para surcar y preparar el suelo antes de cultivar (como la M4, que presentaba remoción del Horizonte O), asimismo se aplican agroquímicos y fertilizantes para maximizar la cosecha. Cabe resaltar que en esta región solo se realizó una sola toma de muestras.

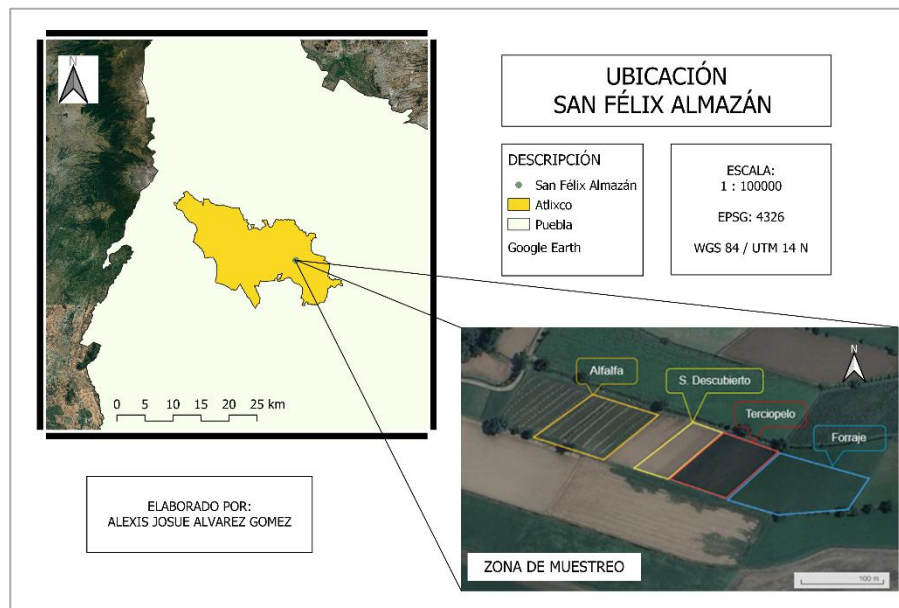


Figura 14. Mapa de ubicación de San Félix Almazán. Atlixco, Puebla.

La Tabla 7 detalla las propiedades fisicoquímicas de suelos de cada predio.

Tabla 7. Resultados de análisis fisicoquímicos de suelos en San Félix Almazán.

Determinación	Unidad	Predio			
		M1	M2	M3	M4
Físicas					
Textura		Fr – Ar	Fr – Ar	Fr – Ar	Fr – Ar
ρ_a	g/cm ³	1.14	1.1	1.11	1.08
ρ_r	g/cm ³	2.27	2.5	2.38	2.63
Químicas					
pH		7.33	7.09	7.32	6.69
M. O.	%	2.65	2	2.32	1.84
N	%	0.14	0.14	2.31	0.18
P	ppm	7.46	6.73	1.93	4.03
K	Cmol (+) kg ⁻¹	0.223	0.309	0.203	0.25
Ca	Cmol (+) kg ⁻¹	3.15	2.2	1.5	5.8
Mg	Cmol (+) kg ⁻¹	3.9	2.9	2.25	6.5
C.I.C.	Cmol (+) kg ⁻¹	16.53	14.44	16.75	15.88

Nota: Fr – Ar: Franco Arenoso

Para determinar la disponibilidad de formas de carbono se realizó conforme a la metodología empleada en las muestras de la Sierra Norte, detallando los resultados en la Tabla 8.

Tabla 8. Disponibilidad de formas de carbono en Atlixco, Puebla.

Predio	Nomenclatura	Porcentaje		
		CSAF	CSAC	CSP
M1 – Alfalfa	ATLXM1	1.4294	4.2882	1.4294
M2 – Terciopelo	ATLXM2	1.5295	2.8588	1.9297
M3 – Forraje	ATLXM3	1.4294	4.2882	1.4294
M4 – Descubierta	ATLXM4	1.5987	6.4234	2.5161

Nota: el numero de la nomenclatura se asignó para diferenciar la muestra de cada predio.

La muestra ATLXM4 presentó mayor % de CSAF, CSAC y CSP, reteniendo las formas intermedias por mayor tiempo. En cuando a las muestras ATLXM1 y ATLXM3

presentan % de CSAF, CSAC y CSP valores similares, ya que ambos predios cuentan con cobertura vegetal que propicia la dinámica del carbono en el suelo, mediante la actividad biológica. La muestra ATLXM2 presentó mayor % de CSAC, con lo que podemos inferir que tiene mayor disponibilidad de carbono. Con base en los datos obtenidos, se resalta la importancia de preservar la cobertura vegetal (ATLXM1 y ATLXM3), ya que permite la disponibilidad y mayor movilidad, y aprovechamiento, de carbono orgánico en el suelo.

En relación con lo anterior, en Tlaola (Sierra Norte), la fragmentación de los sistemas forestales afecta la dinámica del carbono en el suelo debido a cambios en la vegetación, la microfauna y microflora, de modo que, la quema repetida de cobertura vegetal reduce la biomasa aérea, reduciendo la disponibilidad de M.O., disminuyendo la diversificación de micro y macrofauna y de vegetación, afectando la resiliencia del ecosistema. Asimismo, eliminar la cobertura vegetal afecta la estructura y composición del suelo, causando una mayor porosidad, ocasionando una menor capacidad de retención de humedad; aumentando la erosión del suelo, impactando gravemente en el ciclo del carbono, además de liberar carbono orgánico en forma de CO₂, lo cual contribuye al calentamiento global. Además, factores como el clima y relieve tienen un papel crucial, debido a que la pendiente del terreno puede afectar la erosión del suelo y la pérdida de M.O., mientras que, el clima influye en la dinámica del carbono en el suelo, con periodos que reducen la actividad microbiana y la descomposición de M.O. Por otro lado, implementar la agricultura regenerativa, cuidando la cobertura vegetal en los últimos dos años, ha permitido la recuperación de M.O. y la biodiversidad en el suelo, con lo cual, la disponibilidad de formas de carbono se han recuperado; el C lábil puede

haber aumentado en este lapso por la recuperación de la vegetación y la incorporación de materia orgánica fresca en el suelo; el C pasivo (o intermedio) puede ser bajo, debido a la quema de cobertura que se practicaba, reduciendo la cantidad de M.O. estable en el suelo, mientras tanto, el C complejo puede haber aumentado por la formación de compuestos orgánicos complejos a partir de la materia orgánica incorporada.

En cuanto a la región de Atlixco, la rotación de cultivos ha permitido el aprovechamiento del carbono orgánico por actividad biológica, influyendo en la disponibilidad de formas de carbono en el suelo. Por lo que, considerando las condiciones de cobertura en los suelos, se intuye que los que presentan cobertura contribuyen a la acumulación de C lábil, mientras que, la M3 permite la acumulación de C lábil y complejo, y la disponibilidad de formas de carbono en la M4 puede indicar que el suelo tiene buena estructura y función. No obstante, es necesario realizar más estudios para comprender la dinámica del carbono, ya que la aplicación constante de agroquímicos tiene un efecto negativo en el suelo.

Muñoz Iniestra *et al.* (2008), mencionan que eliminar la cobertura vegetal de un suelo forestal tiene graves consecuencias en sus propiedades físicas, tales como: la disminución de infiltración del agua debido a la formación de costras y sellado de poros, aumento de la densidad aparente y aumento de la porosidad en las primeras capas del suelo. Además, Hernández *et al.* (2014), enfatizan que la deforestación provoca la pérdida del 40 - 50% del carbono contenido en el suelo; esto depende de factores relacionados con su formación, sufriendo modificaciones por los cambios de uso y manejo del suelo, y factores climáticos que permiten explicar su almacenamiento. Así mismo, Galicia *et al.* (2016), mencionan que la deforestación y degradación de suelos

forestales genera emisiones netas de CO₂ a la atmósfera, además, señalan que la M.O. es crucial para su calidad, ya que participa en la estabilización de su estructura.

Nava Guevara (2022) enfatiza que el CSAF se considera como indicador de la recuperación y de formas complejas como el CSP; el CSAC es indicador de la pérdida de carbono pasivo en la parte superficial del suelo, mientras que el CSP es un indicador de recuperación en el suelo, además de que aumenta en áreas conservadas y de transición.

Es importante comprender que la alteración de áreas forestales, como Tlaola, implica un mayor impacto ambiental. Por ello, es relevante comprender los tres tipos de áreas que derivan de la deforestación de estos ecosistemas. *Área conservada* es aquella que mantiene su cobertura original, como bosque y vegetación natural; *área en transición* son zonas que tienen cambios en su cobertura vegetal y uso de suelo (como la transición de áreas forestales a agrícolas) y *área deforestada (agrícola)*, son áreas que han perdido su cobertura forestal original por actividades como la agricultura o la explotación forestal (Zamora Elizalde *et al.*, 2020).

3. Evaluación de la implementación de agricultura regenerativa

Se implementaron conceptos enfocados a la agricultura regenerativa como estrategia para recuperar zonas forestales deforestadas por malas prácticas agrícolas tradicionales de la Sierra Norte, con el objetivo de preservar el bosque mesófilo de montaña, en Tlaola, Puebla. En los tres predios se realizó conservación de cobertura vegetal, en un lapso de mayor al de cultivo (aproximadamente a 3 años), En el predio “Las Piedras” con antecedentes de rotación de cultivos, en “La Curva” con siembra y

cosecha anterior de chile serrano, y en “Los Naranjos” con cultivos de café de sombra, naranjos y especies arbóreas nativas, permitiendo practicas agroforestales e incorporación de biomasa aérea en el suelo.

Además, utilizando imágenes históricas de Google Earth Pro, se evaluó el cambio de cobertura en distintos años, evaluando el proceso de deforestación o conservación de la cobertura vegetal en cada área forestal, donde se encuentran los predios analizados. Se consideró un área de 77 m² en cada predio, para comprender el efecto de la deforestación y recuperación.

La Figura 15 ilustra los cambios de cobertura vegetal del predio “Las Piedras”; la imagen A (2007) muestra una zona con predominio de suelo, casi descubierto. Las imágenes B (2019) y C (2020) revelan un aumento considerable de cobertura. Las imágenes D (2021) y E (2022) exponen una disminución de cobertura, siendo mayor en 2021; la imagen F (2023) tiene condiciones similares a la imagen E, considerando el tiempo entre ellas. La imagen G (2024) muestra una zona con mayor exposición del suelo, sin embargo, la Figura 16 muestra la recuperación de cobertura, permitiendo la diversificación vegetal.

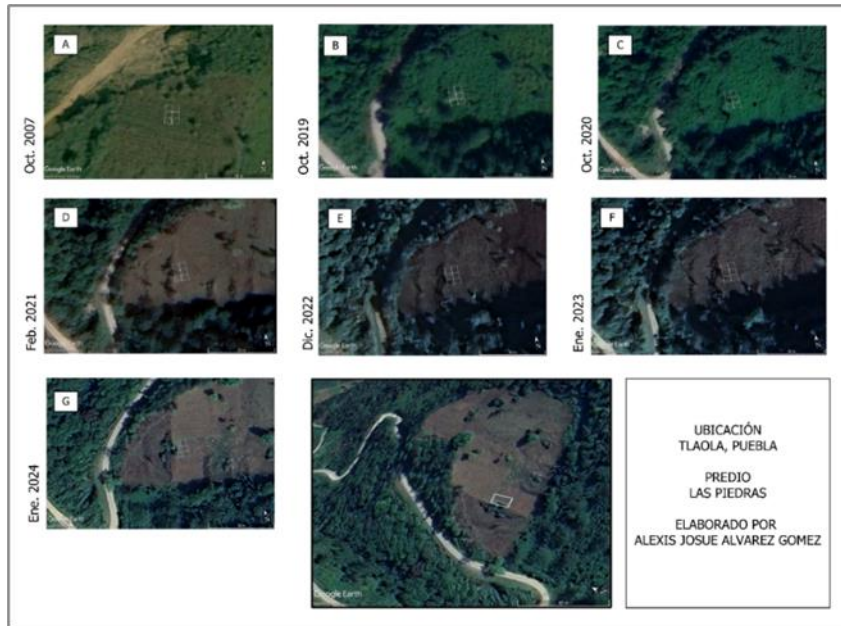


Figura 15. Cobertura vegetal en el predio "Las Piedras".



Figura 16. Predio "Las Piedras, en oct. 2024

La Figura 17 ilustra el cambio de cobertura vegetal del predio "La Curva". La imagen A (2007) muestra una zona con cobertura vegetal completa, con diversificación entre especies arbóreas y arbustivas; la imagen B (2019) expone una disminución de

especies arbóreas. La imagen C (2020) no se aprecia con claridad, debido a las condiciones ambientales, no obstante, desde un ángulo distinto, se muestra una buena preservación de cobertura. Las imágenes D (2021) y E (2022) revelan una preservación densa de cobertura en ambos años. La imagen F (2023) presenta la misma condición en su cobertura que la imagen E, por la poca diferencia de tiempo. En la imagen G (2024) se puede apreciar que presenta condiciones similares que en 2019. La Figura 18 ilustra la recuperación de vegetación en el predio.



Figura 17. Cobertura vegetal del predio "La Curva".



Figura 18. *Predio "La Curva". Oct. 2024*

La Figura 19 ilustra los cambios en cobertura vegetal del predio "Los Naranjos". La imagen A (2007) presenta un suelo cubierto por especies herbáceas y arbustivas. Las imágenes B (2019) y C (2020) presentan una cobertura más densa, con presencia de especies arbóreas y herbáceas. La imagen D (2021) expone una pérdida de cobertura, exponiendo el suelo, sin embargo, las especies arbóreas y herbáceas se preservan con la misma densidad. En la imagen E (2022) se aprecia una recuperación de cobertura y, presencia de árboles jóvenes cercano a la zona de estudio. La imagen F (2023), presenta condiciones similares a la imagen E. La imagen G (2024) exhibe una disminución de especies arbóreas, preservando especies arbustivas y árboles jóvenes. La Figura 20 ilustra la diversificación de especies vegetales, apreciándose especies arbóreas (naranjos y cafetales de sombra).

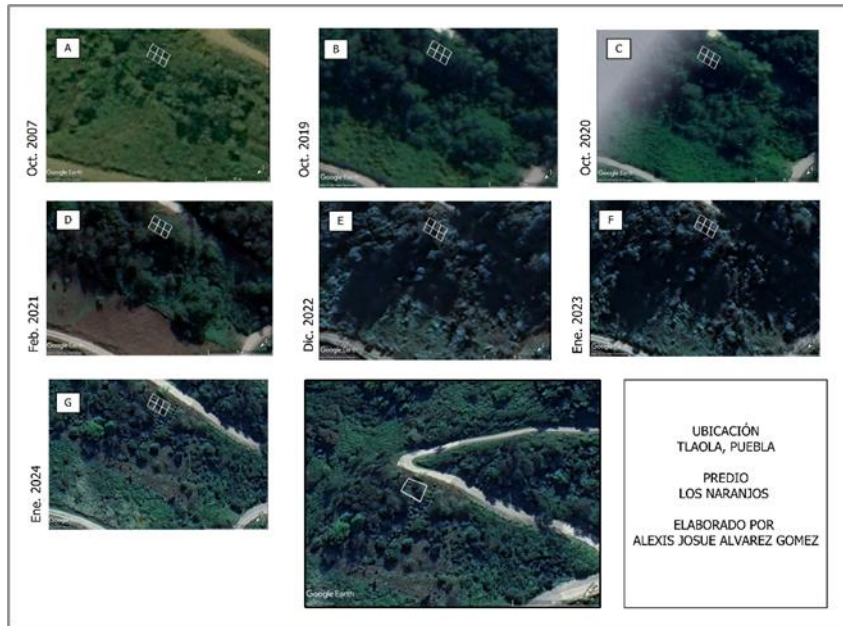


Figura 19. Cobertura vegetal del predio "Los Naranjos".



Figura 20. Predio "Los Naranjos" oct. 2024.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las propiedades físicas y químicas variaron notablemente en los tres predios durante los tres periodos analizados.

Las densidades (aparente y real) de los tres predios variaron en el lapso analizado, de tal manera que preservaron condiciones adecuadas para la retención y aprovechamiento de M.O., mejorando la estructura y composición del suelo, el cual es de textura Franco – Arcilloso. Con base en la NOM 021 RECNAT 2000, los valores obtenidos son adecuados para suelos forestales, mientras que, Alvarez & Alcocer (2020) mencionan que el aumento de M.O. mejora la densidad real, mejorando la captación y almacenamiento de agua. Así mismo, Antúnez (2015) menciona que la densidad real y aparente adecuadas para un suelo Franco – Arcilloso es de 2.65 g/cm^3 y 1.33 g/cm^3 , respectivamente. Comprobamos la anterior con la humedad del suelo, la cual aumentó notablemente en el lapso analizado, destacando la importancia de preservar cubiertos los suelos, así mismo, la importancia del aporte de biomasa aérea.

Salamanca & Sadeghian (2006) enfatiza que la densidad aparente, está estrechamente relacionada con la capacidad de campo, la distribución de agregados del suelo y la M.O., por lo cual mejora su capacidad de retener humedad.

Por lo cual, el % de M.O. aumentó en el lapso de 14 meses; cabe resaltar que varió según el tipo de vegetación predominante en cada predio; en “Las Piedras” herbáceas, en “Los Naranjos” arbustivas y en “Los Naranjos” arbórea. Así pues, el pH del suelo presentó variaciones, con rangos ligeramente ácidos, ligeramente alcalinos y a los 14 meses un rango neutro. Martínez *et al.* (2008), mencionan que la M.O. presente

en el suelo afecta el pH, por los diversos grupos activos, generando grados de acidez a las bases de cambio y al contenido de N presente en los residuos orgánicos, aportados al suelo; mientras tanto, Espidio Balbuena (2020) refiere que a mayor altitud el pH incrementa (y viceversa), también indica que la incorporación de estiércoles y abonos orgánicos son los principales factores que incrementan el contenido de M.O. Hueso González *et al.* (2018), enfatizan que el pH afecta la disponibilidad de nutrientes en sus formas químicas.

Así pues, la disponibilidad de nutrientes en los predios varió durante el lapso analizado. El N total en los tres predios varió (aumentó y disminuyó) considerablemente, sin mostrar un patrón claro. El P y K disminuyó considerablemente a los 7 meses, no obstante, a los 14 meses aumentó muy poco, implicando poca disponibilidad de nutrientes para las plantas. En cuanto al Ca y Mg, en “Las Piedras” disminuyeron en este lapso, pudiendo indicar una disminución de la C.I.C.; en “La Curva” y “Los Naranjos” aumentaron notablemente en este lapso, pudiendo indicar una mejora en su C.I.C. Con lo cual, podemos destacar que la especie vegetal influye en la disponibilidad de nutrientes en el suelo, a través de la absorción y liberación de estos, la fijación de N y, así mismo, en su C.I.C.

En el estudio realizado por Espidio Balbuena (2020) destaca que la disponibilidad de nutrientes varía debido a la asociación con otros cultivos, por ejemplo: el sistema Afa (asociación frutales y cultivos anuales) presentó deficiencia de P, Ca y Mg (moderadamente bajo) y su contenido de M.O. mediana; el sistema Amfr (Asociación maíz – frijol con recolección de otras especies) tuvo una tendencia de rangos entre media a alto con mayor necesidad en la mejora de P; en cuanto al sistema de cultivo Uc

(Unicultivo cafeto) hubo niveles de bajo a moderadamente alto de macro y meso nutrientes y de alto a muy alto en micro elementos, con mayor necesidad de mejora de K, Ca y Mg. Por lo anterior, se infiere que el incremento de M.O., de acuerdo con el tipo de especie vegetal, permite mayor o menor disponibilidad de nutrientes en el suelo. Por su parte, Contreras Cruz *et al.* (2019) mencionan que el uso de insecticidas y herbicidas tiene efecto negativo en el pH, así como en el K, Ca, C.I.C. y la conductividad eléctrica; además, enfatiza que las prácticas agroecológicas tienen un efecto positivo sobre la producción y calidad del suelo. Asimismo, el portal Mundoagro (2022) enfatiza el efecto del pH sobre los distintos procesos del suelo; el pH determina la C.I.C. en suelos de carga variable, afectando la disponibilidad de nutrientes y la actividad biológica; por otra parte, la mineralización de la M.O. (por actividad biológica) puede acidificar el suelo, más cuando tiene una C.I.C. baja; así mismo, mediante este proceso aumenta las concentraciones de CO₂ y la nitrificación del amonio (NH₄).

En cuanto a la disponibilidad de formas carbono orgánico del suelo, en Tlaola, se ve afectada a causa de la quema (eliminación) de cobertura vegetal de manera repetida. Esta causa que se pierda el carbono orgánico almacenado en la vegetación y el suelo, reduciendo su cantidad disponible; asimismo, la quema repetida puede degradar la MOS, reduciendo su capacidad para retener carbono y nutrientes; también puede aumentar la erosión del suelo, ocasionando la pérdida de carbono orgánico y nutrientes (Bond & Keeley, 2005).

Cotler *et al.* (2016), indican que los sistemas de conservación (labranza cero, mínima o siembra directa) aumentan el COS, no obstante, cuando los residuos de cultivo quedan en superficie, disminuye el contacto con microorganismos, ocasionando que su

descomposición sea lenta y aumente la cantidad de carbono orgánico retenido. Por su parte, Galicia (2016) menciona que las fracciones de MOS se utilizan para estimar los diferentes almacenes de COS, enfatizando la importancia de la actividad biológica, la cual permite un almacenamiento activo de MOS, mientras tanto, un almacenamiento pasivo se debe a mecanismos complejos. Así mismo, Hernández Ramos et al. (2017) afirma que la biomasa aérea es fundamental para determinar la cantidad de carbono almacenada en la cubierta forestal.

Implementar estrategias como la agricultura regenerativa, permite mejorar la estructura y composición del suelo. Casar (2021) señala la importancia de la agricultura regenerativa como alternativa para un futuro sostenible, ya que propicia la actividad biológica en el suelo. Igualmente, Prades (2022), destaca que la agricultura regenerativa incrementa la biodiversidad, devolviendo el carbono y reciclando nutrientes, vitalizando el suelo, también destaca que el carbono en el suelo incremento de 1.65 a 4.05% y 3.70% a los 6 y 12 meses posteriores al implementar la agricultura regenerativa. Mientras tanto, Sánchez (2021) menciona que la agricultura regenerativa, como sistema complejo (planta-suelo-microorganismo), es una herramienta efectiva para mitigar el calentamiento global, mediante el secuestro de carbono, permitiendo reducir en un alto porcentaje el exceso de CO₂. En tal sentido, preservar la cobertura vegetal mejora la composición y estructura del suelo, mejorando sus propiedades fisicoquímicas, disponibilidad de nutrientes y su C.I.C., así como una técnica eficiente para el secuestro de CO₂.

CONCLUSIONES

En conclusión, los resultados de esta investigación demuestran que:

- La quema de cobertura vegetal de suelos forestales tiene graves efectos, causando alteración en la disponibilidad de nutrientes y pérdida del COS.
- La preservación de cobertura vegetal del suelo permite la adición y retención de M.O., siendo crucial en la disponibilidad de nutrientes.
- La M.O. es importante en la dinámica de nutrientes, la fertilidad y la disponibilidad de carbono lábil del suelo, reduciendo las emisiones de CO₂.
- La implementación de agricultura regenerativa en suelos forestales fragmentados, mediante prácticas que promueven el aumento de M.O., mejoran la salud del suelo, la fertilidad y reducen la erosión, contribuyendo a mitigar el calentamiento global.
- La agricultura regenerativa promueve la producción sustentable de alimentos, disminuyendo el uso de insumos agrícolas.
- Preservar el suelo con cubierta vegetal y la rotación de cultivos, permite el aumentar la presencia del COS.

En cuanto a las propiedades fisicoquímicas de los predios, se puede concluir que:

- La preservación de cobertura vegetal permite que la dinámica de nutrientes se vea favorecida por la actividad biológica.

- La especie vegetal predominante es importante para el aporte de biomasa, además, la disponibilidad está relacionada con la calidad y cantidad de M.O.
- La relación M.O./pH tiene efecto en la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

De la implementación de agricultura regenerativa, se concluye que:

- Es una estrategia eficiente para la recuperación de suelos a través del mantenimiento de la cobertura vegetal en suelos forestales fragmentados.
- El control de cobertura y rotación de cultivos permite que la M.O. se integre al suelo de manera eficiente, mejorando la estructura del suelo.
- El uso de herramientas como Google Earth Pro, permite analizar y evaluar los cambios de cobertura vegetal del suelo, permitiendo señalar el daño causado por malas prácticas agrícolas, así como el monitoreo y evaluación de la gestión del suelo, y promover la sustentabilidad de los ecosistemas.

RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis físico, químico y biológico, con un método de muestreo a distintas profundidades con muestras compuestas, en el área total de cada predio.
- Estimar el potencial de secuestro de carbono y de emisiones de CO₂ en suelos forestales fragmentados.
- Revisar la dinámica de incorporación y descomposición de materia orgánica.
- Generar un inventario de las técnicas de producción agrícola en suelos de Tlaola, Puebla.
- Implementar prácticas de conservación y regenerativas en suelos con mayor pérdida de cobertura vegetal y con pendiente, con metas a corto y mediano plazo.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Díaz Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114.

Agricultura regenerativa en SAFM. (2023). <https://repositorio.iica.int/items/b2b554d6-d792-4752-89e8-47d398385f6e>

Alvarez, A. A., & Alcocer, M. A. (2020). Evaluación comparativa de la calidad de suelos en sistemas agroforestales dinámicos versus sistemas convencionales en el semiárido de Cochabamba, Bolivia. *Evaluación de sistemas agroforestales dinámicos en el semiárido de Cochabamba*, 105.

Antúnez B., A., Felmer, S., Vidal S., M., Morales J., R., Fuentes F., F., Coz, E. (2015). Propiedades físico -hídricas del suelo en el cultivo del maíz grano. Rengo: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 312. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7894>

Avilés Ramírez, G. A.. (2018). USO DEL GOOGLE EARTH™ PARA EVALUAR LA PÉRDIDA DE CUBIERTA VEGETAL EN CHINÁ, CAMPECHE, MÉXICO. *Agro Productividad*, 10(5). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1025>

Banco Mundial. (2023). Agricultura y alimentos. [Bancomundial.org](https://www.bancomundial.org). <https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview>

- Bond, W. J., & Keeley, J. E. (2005). Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in ecology & evolution*, 20(7), 387-394.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (Vol. 13, pp. 662-710). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Casar, L. P. (2021). Agricultura regenerativa: aliada para un futuro sostenible. Ediciones INTA.
- Cedeño, C., Flores, E., Leiva, J., & Fábrega, J. (2023). Potenciando la Agricultura Regenerativa a Través de la Enseñanza-Aprendizaje sobre Calidad de Suelos en IPTs de Educación Media en Panamá. In *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología–APANAC* (pp. 349-255).
- Cherlinka, V. (2024). Secuestro de carbono en el suelo: descubriendo su potencial. *EOS Data Analytics*. <https://eos.com/es/blog/secuestro-de-carbono-en-suelo/>
- Climagri. (2015). COBERTURAVEGETAL. Climagri.eu. <http://climagri.eu/index.php/es/cobertura-vegetal>
- Compta, K. (2011). *El avance de la agricultura es la mayor causa de deforestación – Escuela de Nutrición*. <https://nutricion.fcm.unc.edu.ar/el-avance-de-la-agricultura-es-la-mayor-causa-de-deforestacion/>
- CONABIO. (2022). Monitoreo de la cobertura de suelo | Biodiversidad Mexicana. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/cobertura-suelo>

- Contreras Cruz, A., Sánchez Morales, P., Romero Arenas, O., Rivera Tapia, J. A., Ocampo Fletes, I., & Parraguirre Lezama, J. F. C. (2019). Prácticas agroecológicas y su influencia en la fertilidad del suelo en la región cafetalera de Xolotla, Puebla. *Acta universitaria*, 29.
- Cotler, H., Martínez, M., & Etchevers, J. D. (2016). Carbono orgánico en suelos agrícolas de México: Investigación y políticas públicas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 125-138. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792016000100125&lng=es&tlng=es.
- Cruz Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., & Gordillo-Curiel, A. (2020). Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 475-480. Epub 12 de enero de 2021. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>
- Cubero, V. (2023). *Cuáles y cómo son los distintos tipos de agricultura sostenible*. Plataforma Tierra. <https://www.plataformatierra.es/innovacion/cuales-como-tipos-agricultura-sostenible>
- Docampo, R. (2010). La importancia de la materia orgánica del suelo y su manejo en producción frutícola. *Serie Actividades de Difusión*, 687.
- Edalife. (2023). *Los agregados del suelo: Indispensables para su fertilidad - Edalife*. Edalife. <https://www.edalife.es/los-agregados-del-suelo-indispensables-para-su-fertilidad/>

- Espidio Balbuena, J. (2020). *Sistemas de producción, prácticas y saberes agroecológicos: Estudio de caso en la Sierra Norte de Puebla* (Doctoral dissertation).
- Esquivel Maza, L. A. (2024). Biomasa aérea y carbono orgánico como factor de compensación en un ecosistema forestal fragmentado.
- FAO. (2015). Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/>
- FAO. (2022). *Agricultura de conservación: Cobertura vegetal del suelo*. Fao.org. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/in-practice/soil-organic-cover/es/>
- Fontaine, S., Mariotti, A., & Abbadie, L. (2003). The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6), 837-843.
- Franquesa, M. (2016). Agricultura Convencional. *Agroptima*. <https://blog.agroptima.com/es/blog/agricultura-convencional/>
- Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra latinoamericana*, 34(1), 1-29.
- Ghani, A., Dexter, M., & Perrott, K. W. (2003). Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil biology and biochemistry*, 35(9), 1231-1243.

Global Soil Partnership. (2018). Mapa de carbono orgánico del suelo. FAO. Roma, Italia.
5 p.

Grand, A., & Michel, V. (2020). *MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO*. Orgprints.org.
<https://orgprints.org/id/eprint/43417/7/MATERIA%20ORGA%CC%81NICA%20DEL%20SUELO.pdf>

Gregorich, E. G., Beare, M. H., McKim, U. F., & Skjemstad, J. O. (2006). Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 70(3), 975-985.

H. Ayuntamiento de Tlaola. (2022). PLAN DE DESARROLLO MUNICIPAL 2022-2024. Gob.mx. <https://www.tlaola.gob.mx/gobierno/planDesarrollo>

Hernández Ramos, J., Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., Tamarit-Urias, J. C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., Peduzzi, A., & Carrero, O. (2017). Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia*, 51(8), 921-938.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000800921&lng=es&tlng=es.

Hernández, J. E., Tirado, D., & Beltrán, I. (2014). Captura de carbono en los suelos. *Padi Boletín científico del ICBI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*.

Hossne, A. J. (2008). La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*, 26(3).

Hueso González, P., Martínez-Murillo, J. F., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2018). Técnicas de restauración de suelos basadas en el uso de residuos orgánicos: seis años de beneficios sobre las propiedades de un suelo forestal.

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2023). Agricultura regenerativa es herramienta fundamental para afrontar crisis climática, afirman en debate organizado por el IICA en Diálogo Internacional Borlaug. lica.int.

INTAGRI. (2017). Propiedades Físicas del Suelo y el Crecimiento de las Plantas. Serie Suelos. Núm. 29. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p.

Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., ... & Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 137(3-4), 253-268.

Jaramillo, S. (2024). La Agricultura Regenerativa: un nuevo enfoque para la producción sostenible de café en Colombia. *Memorias Seminario Científico Cenicafé*, 75, e750711_1-e750711_1.

Julca Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., & Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61.

Justamante, Á. (2021). ¿Qué es la agricultura regenerativa? *CREAF*. <https://www.creaf.cat/es/articulos/que-es-la-agricultura-regenerativa>

- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1-2), 1-22.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.
- Melgarejo, J., López-Ortiz, M. I., & Fernández-Aracil, P. (2024). Reflexiones sobre la agricultura regenerativa y su impacto sobre la alimentación y el medioambiente.
- Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). Guía técnica para muestreo de suelos.
- Molina, E. (2007). Análisis de suelos y su interpretación. *San José, CR, CIA-UCR-Amino Grow International*.
- Montes Reyes, C. (2022). Potencial productivo y calidad de chile serrano autóctono en el municipio de Tlaola, Puebla.
- Montoya, S. A. M., Mora, A. M., & Vásquez, C. J. F. (2020). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 58-68.
- Moorberg, C. J., & Crouse, D. A. (2021). *Soils Laboratory Manual*. Pressbooks. <https://kstatelibraries.pressbooks.pub/soilslabmanual/>
- Mundoagro. (2022). El pH: indicador clave de la calidad del suelo por su influencia en aspectos químicos y biológicos - Mundoagro. *Mundoagro*. <https://mundoagro.cl/el-ph-indicador-clave-de-la-calidad-del-suelo-por-su-influencia-en-aspectos-quimicos-y-biologicos/>

- Muñoz Iniestra, D. J., López, G. F., Hernández, M. M., Soler, A. A., & López, G. J.. (2009). Impacto de la pérdida de la vegetación sobre las propiedades de un suelo aluvial. *Terra Latinoamericana*, 27(3), 237-246. Recuperado en 23 de mayo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000300008&lng=es&tlng=es.
- Naturaliza. (2019). *Suelos: espacio de biodiversidad y generación de vida*. Suelos: Espacio de Biodiversidad y Generación de Vida. <https://www.naturalizaeducacion.org/blog/suelos-espacio-de-biodiversidad-y-generacion-de-vida>
- Nava Guevara, E. (2022). Dinámica del carbono en suelos de un ecosistema forestal fragmentado y evaluación de indicadores ambientales de cambio.
- Nieto, O. A., Jiménez, L. F., & Nieto, M. (2016). Variación de coberturas forestales y ocupación del territorio en el municipio de Armenia 1939-1999. *Luna azul*, (42), 319-340.
- Ocampo Velásquez, V. R., Rojas Reséndiz, A. L., & Villagómez Aranda, A. L. (2022). Breve historia de la agricultura. *Manejo del estrés vegetal como una estrategia para una agricultura sostenible* (pp. 13-52). Editorial Universidad de Almería (edual).
- Olander, L. P., & Vitousek, P. M. (2004). Biological and geochemical sinks for phosphorus in soil from a wet tropical forest. *Ecosystems*, 7, 404-419.

- Pezo Pezo, S. M., & Ramírez Flores, G. P. (2023). Análisis de pérdida de cobertura vegetal y su impacto ambiental en el Área de Conservación Regional (ACR), provincia de San Martín.
- Prades, F. M. C. (2022). Aplicación de los principios de la Agricultura Regenerativa para aumentar los niveles de nutrientes en el suelo y enfrentar una emergencia de seguridad alimentaria y nutricional local en Guanacaste, Costa Rica. *Revista REGENERATIO*, 1(2), 17-28.
- Quintero Castaño, Y. A. (2021). La agricultura regenerativa como una alternativa para la conservación de los suelos degradados a causa del sistema agroindustrial en Colombia.
- Reed, S. C., Cleveland, C. C., & Townsend, A. R. (2011). Functional ecology of free-living nitrogen fixation: a contemporary perspective. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 42(1), 489-512.
- Rengel, Z., & Damon, P. M. (2008). Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 624-636. 58, 115-123.
- Rengel, Z., Cakmak, I., & White, P. J. (Eds.). (2022). *Marschner's mineral nutrition of plants*. Academic press.
- Richardson, A. E., & Simpson, R. J. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant physiology*, 156(3), 989-996.
- Rincón Romero, M., Jarvis, A., & Mulligan, M. (2012). Cobertura vegetal en Colombia. *Renata*, 6(4) , 12-26.

- Romaniuk, R. I., Venece, M., Cosentino, V., Alvarez, C. R., Ciarlo, E. A., Rimski Korsakov, H., & Lupi, A. M. (2021). Dinámica del carbono lábil del suelo en sistemas forestales de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en la Mesopotamia Argentina. *Bosque (Valdivia)*, 42(3), 343-351.
- Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2006). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana.
- Salas, A. M., Elliott, E. T., Westfall, D. G., Cole, C. V., & Six, J. (2003). The Role of Particulate Organic Matter in Phosphorus Cycling. *Soil Science Society Of America Journal*, 67(1), 181-189. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1810a>
- Sánchez Moreno, D. E. (2023). Análisis de la agricultura regenerativa como práctica sostenible para la gestión y uso del suelo en Colombia.
- Sánchez, D. G. (2021). Prácticas de agricultura regenerativa para la fijación de carbono en suelos en la mitigación del cambio climático.
- Sánchez, S. (2024). *Potencia Tu Cultivo, con los Nutrientes NPK - BC Fertilis*. BC Fertilis. <https://bcfertilis.com/actualidad/potencia-cultivo-nutrientes-npk-plantas/>
- Santillán, M. (2017). Alterar el suelo contribuye al cambio climático. *México, México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <http://ciencia.unam.mx/leer/633/alterar-el-suelo-contribuye-al-cambio-climatico>*.
- Santos, B., Saavedra, O., Suárez, T., Coello, Á., & Solaz, C. (2014). ¿ Cómo tomar muestras de suelos?. *Información Técnica. Servicio Técnico de Agricultura y Desarrollo Rural. Cabildo de Tenerife*.

- Sardar, M. F., Younas, F., Farooqi, Z. U. R., & Li, Y. (2023). Soil nitrogen dynamics in natural forest ecosystem: a review. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1144930.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de diciembre de 2002. México, D. F., México. 73 p.
- Segarra, P. (2014). Sinergias entre degradación de la tierra y cambio climático en los paisajes agrarios del Ecuador. Mecanismo Mundial de la CNUCLD–Ministerio del Ambiente–ECOPAR. Quito–Ecuador.
- Skyllberg, U., Raulund-Rasmussen, K., & Borggaard, O. K. (2001). pH buffering in acidic soils developed under *Picea abies* and *Quercus robur*—effects of soil organic matter, adsorbed cations and soil solution ionic strength. *Biogeochemistry*, 56, 51-74.
- Smolander, A., & Kitunen, V. (2002). Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic C and N in relation to tree species. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(5), 651-660.
- Stivers, L. (2023). Introducción a los Suelos: El Manejo de los Suelos. Psu.edu. <https://extension.psu.edu/introduccion-a-los-suelos-el-manejo-de-los-suelos>
- TECNAL. (s.f.). *Determinación de la estabilidad de los agregados del suelo.*- Determinación de la estabilidad de los agregados del suelo.

https://tecnal.com.br/es/blog/308_determinacion_de_la_estabilidad_de_los_agregados_del_suelo

Torres Guerrero, C. A., Etchevers, J. D., Fuentes-Ponce, M. H., Govaerts, B., León-González, F. D., & Herrera, J. M. (2013). Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra latinoamericana*, 31(1), 71-84.

Torres, B. (2023). *Desertificación y sequía agravan al planeta - UNAM Global*. UNAM Global - de la Comunidad Para la Comunidad. https://unamglobal.unam.mx/global_revista/desertificacion-y-sequia-agravan-al-planeta/

Tripler, C. E., Kaushal, S. S., Likens, G. E., & Walter, M. T. (2006). Patterns in potassium dynamics in forest ecosystems. *Ecology Letters*, 9(4), 451-466. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00891.x>

United Nations. (s. f.-a). *Causas y efectos del cambio climático | Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

United Nations. (s. f.-b). *¿Qué es el cambio climático? | Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change#:~:text=Las%20consecuencias%20del%20cambio%20clim%C3%A1tico,y%20disminuci%C3%B3n%20de%20la%20biodiversidad.>

Valle del Conde. (2024). Valle del Conde. <https://valledelconde.com/nuestro-olivar/>

Van Konijnenburg, A. (2006). *Agricultura orgánica. El suelo. Sus componente físicos*. EEA Valle Inferior, IDEVI-INTA.

Vásquez Acuña, D. (2019). Características físicas y químicas de un suelo con especies forestales y su relación con los microorganismos.

Vázquez Uribe, S. R., & Gerritsen, P. R. (2021). Transición agroecológica y dinámica de uso de suelo agrícola en la cuenca media del Río Ayuquila-Armería en el sur del Estado de Jalisco: un acercamiento. *Investigaciones geográficas*, (106).

Weather Spark. (s. f.). *El clima en Tlaola, el tiempo por mes, temperatura promedio (México)*. <https://es.weatherspark.com/y/7819/Clima-promedio-en-Tlaola-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Zamora Elizalde, M. C., Buendía Espinoza, J. C., Martínez Hernández, P. A., & García Nuñez, R. M. (2020). Diagnóstico del uso del suelo y vegetación en la microcuenca Tula, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(1), 57-68. Epub 02 de marzo de 2021. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2213>

Zamora Morales, Bertha P., Mendoza-Cariño, Mayra, Sangerman-Jarquín, Dora Ma., Quevedo Nolasco, Abel, & Navarro Bravo, Agustín. (2019). La investigación científica en México: secuestro de carbono orgánico en suelos agrícolas y de agostadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(1), 155-164. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1733>.