



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA DE PUEBLA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
COLEGIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES FÍSICAS Y  
QUÍMICAS DE SUELOS FORESTALES Y SUELOS AGRÍCOLAS EN LA  
LOCALIDAD SANTA CATALINA TEPANAPA, TOCHIMILCO, PUEBLA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA:**

**ALONDRA ITAYECSI ARMAS CASTELLANOS**

**DIRECTORA DE TESIS:**

**DRA. JANETTE ARRIOLA MORALES**

**CO-DIRECTOR DE TESIS**

**DR. OCTAVIO OLIVARES XOMETL**

**FEBRERO 2025**

# ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN.....                           | 5  |
| JUSTIFICACIÓN .....                         | 7  |
| OBJETIVO GENERAL .....                      | 8  |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                  | 8  |
| HIPÓTESIS.....                              | 8  |
| CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO .....             | 9  |
| Suelo .....                                 | 9  |
| Suelos Agrícolas .....                      | 9  |
| Suelos Forestales .....                     | 10 |
| Calidad de suelo .....                      | 11 |
| Propiedades Físicas del Suelo.....          | 12 |
| Humedad .....                               | 12 |
| Densidad Aparente .....                     | 13 |
| Densidad Real.....                          | 13 |
| Color .....                                 | 13 |
| Coeficiente de Extensión Lineal (COLE)..... | 14 |
| Estabilidad de los Agregados .....          | 14 |
| Textura .....                               | 15 |
| Propiedades Químicas del Suelo .....        | 16 |
| pH.....                                     | 16 |
| Carbono Orgánico.....                       | 16 |
| Materia Orgánica.....                       | 17 |
| Conductividad Eléctrica.....                | 18 |
| Carbonatos .....                            | 18 |
| Bicarbonatos .....                          | 18 |
| Cloruros .....                              | 19 |
| Calcio.....                                 | 19 |
| Magnesio .....                              | 19 |
| Acidez Extraíble .....                      | 20 |
| Capacidad de Intercambio Catiónico.....     | 20 |

|   |           |
|---|-----------|
| Nitrógeno Total .....   | 20        |
| CAPÍTULO II. METODOLOGÍA .....  | 22        |
| Localización del sitio.....   | 22        |
| Muestreo de suelos .....  | 23        |
| Determinación de la densidad aparente en campo .....  | 25        |
| Preparación de la muestra .....   | 26        |
| <i>Determinaciones de las propiedades físicas del suelo.....</i>                                      | <i>27</i> |
| Determinación de humedad por gravimetría .....  | 27        |
| Determinación de la densidad aparente .....   | 28        |
| Pretratamiento de la muestra.....   | 28        |
| Determinación de la densidad real .....   | 29        |
| Determinación de color .....  | 30        |
| Determinación del Coeficiente de Extensión Lineal (COLE) .....  | 31        |
| Determinación de estabilidad de agregados .....   | 32        |
| Determinación de textura .....  | 33        |
| Determinación del porcentaje de saturación y pasta de saturación .....                                | 34        |
| Obtención del extracto de saturación .....  | 34        |
| <i>Determinaciones de las propiedades químicas del suelo .....</i>                                    | <i>35</i> |
| Determinación de pH del suelo en agua .....   | 35        |
| Determinación del pH en el extracto de saturación.....  | 36        |
| Determinación del porcentaje de carbono y materia orgánicos.....                                      | 37        |
| Determinación de conductividad eléctrica en el extracto de saturación .....                           | 38        |
| Determinación de carbonatos .....   | 38        |
| Determinación de bicarbonatos .....   | 39        |
| Determinación de cloruros .....   | 40        |
| Determinación de calcio.....  | 40        |
| Determinación de magnesio .....   | 41        |
| Determinación de acidez extraíble .....   | 42        |
| Determinación de capacidad de intercambio catiónico.....  | 43        |
| Determinación de nitrógeno total .....  | 44        |
| CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....   | 46        |
| Análisis comparativo de las propiedades físicas y químicas de los suelos forestales y agrícolas. .... | 46        |

CONCLUSIONES..... 63  
BIBLIOGRAFÍA..... 65

# INTRODUCCIÓN

El suelo no solo es la tierra que pisamos con nuestros pies cuando caminamos o corremos, es más que eso, es un universo debajo de nosotros. El suelo está vivo, sin él no existiría la agricultura, no existiría gran parte de nuestros alimentos que consumimos día con día, gracias a él se logra filtrar y almacenar agua para las plantas y sin duda alguna es un gran captador de dióxido de carbono de la atmósfera.

Lamentablemente después de muchos siglos de usar y abusar del suelo, en la actualidad se reconoce el papel que juega en el ambiente y su importancia para el mantenimiento de la vida de la mayoría de los organismos. Tal vez se puede afirmar que los suelos son el más grande recurso natural, ya que de ahí provienen directa o indirectamente, los alimentos y las materias primas. La mayoría de los suelos tardan miles o, inclusive, millones de años en formarse; esto significa que es casi imposible recuperarlos después de que han sufrido desgaste por la erosión. Así, es de vital relevancia conservarlos sanos y fértiles a través de las generaciones. (FitzPatrick, 1996) Si tenemos un suelo sano, tendremos alimentos sanos, humanos sanos, planeta sano, al final del día todo está conectado.

La población mundial está creciendo rápidamente, lo que genera la necesidad de tierras agrícolas adicionales para la producción (Barbier, 1997). El 42% de la población mundial depende de la agricultura para su sustento (Aznar-Sánchez et al., 2019)

Los impactos negativos de la degradación de la tierra, en particular los procesos acelerados de erosión del suelo causados por la deforestación, el pastoreo excesivo, la labranza convencional y las prácticas agrícolas insostenibles son bien conocidos (Borrelli et al., 2021; Nearing, 2013). Los impactos son graves no sólo por la degradación de la tierra, sino también por la pérdida de fertilidad y los impactos externos (Boardman y Poesen, 2006).

Desafortunadamente al paso de los años, los suelos agrícolas tienen un menor rendimiento y una mayor utilización de fertilizantes e insumos, se le invierte más y se produce menos. También tenemos un gran problema de educación, no todos los agricultores logran entender o no tienen los conocimientos suficientes de cómo funciona el suelo, la importancia, y los cuidados que necesita, y es por eso por lo que existen las malas prácticas agrícolas

Por otro lado otro factor muy importante que se debe considerar es la agricultura intensiva ya que puede tener efectos negativos sobre el medio ambiente en términos de pérdida de biodiversidad, aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), uso consuntivo de agua dulce, contaminación del agua debido a pesticidas y fertilizantes, erosión del suelo y degradación del suelo (Pretty et al, 2018).

En este estudio nos centraremos principalmente en realizar un análisis comparativo de suelos agrícolas y suelos forestales a través de una evaluación de sus propiedades tanto físicas como químicas, con los resultados obtenidos se logrará determinar la calidad de los diferentes usos de suelo, ya que como se ha mencionado anteriormente la agricultura intensiva y las malas prácticas agrícolas es uno de los principales factores que deterioran nuestro suelo en comparación de los suelos en su estado natural.

Por ejemplo, en las tierras cultivables la cantidad de materia orgánica del suelo (MOS) suele ser menor, en comparación con los bosques o pastizales naturales, porque las cosechas disminuyen sus aportes al suelo (Paz-González et al. 2000; Malo et al. 2005; Schulp & Veldkamp, 2008; Zhu y et al.2012). La ausencia de cobertura vegetal y la alteración de la superficie favorecen mayores índices de viento y agua. La erosión del suelo (McLauchlan 2006), que causa una pérdida de nutrientes y MOS que conduce a una disminución de la productividad del suelo, así como a una reducción de la biodiversidad del suelo, su capacidad de amortiguación, su capacidad de intercambio catiónico (CIC) y su infiltración debido a la degradación de los agregados del suelo. (Caravaca et al. 1999; Paz-González et al. 2000; Papini et al. 2011; Zhu et al. 2012).

## JUSTIFICACIÓN

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes para la vida en el planeta Tierra, uno de sus principales aportes es que sustenta la producción de alimentos. México ocupa el puesto 11 a nivel mundial en producción de alimentos y cultivos; los suelos utilizados para actividades agrícolas ocupan más de la mitad del territorio nacional, sin embargo, alrededor del 64% de los suelos mexicanos presentan un nivel de degradación, y aproximadamente el 28% de los agricultores afirman tener problemas con la fertilidad de sus suelos (INEGI, 2019).

Por otro lado, el alto aporte de productos químicos es necesario para mantener la demanda de nutrientes de la planta y la calidad de la fruta. Sin embargo, el manejo convencional (por ejemplo, labranza y aplicación de agroquímicos) aumenta la erosión y el transporte de contaminantes (Lal, 2005; Prasuhn, 2012; Van Oost et al., 2000). Asimismo los plaguicidas se utilizan para garantizar la protección de los cultivos, pero al mismo tiempo, grandes cantidades de plaguicidas terminarán como un residuo en la superficie del suelo (Silva et al., 2019).

Con base a lo mencionado anteriormente surge la importancia y relevancia de este trabajo ya que principalmente las malas prácticas agrícolas son las que generalmente tienen cambios significativos en sus propiedades físicas y químicas de sus suelos en comparación de los suelos forestales, que estos suelos son los que se encuentran en condiciones naturales. Por lo tanto, la comparación entre ambos suelos nos permitirá entender las condiciones naturales de los suelos sin la intervención humana. Adicionalmente, los resultados obtenidos nos ayudarán a determinar la calidad de estos suelos. Finalmente, esta información podría ayudar a concientizar a la comunidad agrícola y a la sociedad en general a aplicar buenas prácticas agrícolas y a la conservación de los suelos.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar las propiedades físicas y químicas de suelos forestales y suelos agrícolas, implementando las metodologías de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, para comparar sus propiedades y su efecto en la calidad.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar la zona de estudio e identificar los sitios para la toma de muestras de suelo
- Evaluar experimentalmente las propiedades físicas y químicas de los suelos forestales y agrícolas en laboratorio.
- Analizar y comparar los resultados de las muestras del suelo forestal y agrícola.
- Determinar la calidad de los suelos forestales y suelos agrícolas.

## **HIPÓTESIS**

### **Nula**

Las prácticas agrícolas no alteran significativamente las propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas en comparación con los suelos forestales en condiciones naturales.

### **Alternativa**

Las prácticas agrícolas alteran significativamente las propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas, disminuyendo su calidad en comparación con los suelos forestales, que permanecen en condiciones naturales.

# CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

## Suelo

La palabra suelo proviene del latín “*Solum*” que significa suelo, tierra o parcela. El contacto del hombre con el suelo es tan universal que cada persona tiene su propio concepto de su naturaleza. Para un ingeniero, puede ser un material de construcción o de fundación donde edificar (Thompson, L. M., Troeh, F. R., 1982). Desde el punto de vista del agricultor, es el sitio para ubicar sus semillas y producir sus cosechas (Worthen, 1949). Los primeros geólogos pronto concluyeron que el suelo es una roca meteorizada (Thompson, L. M., Troeh, F. R., 1982).

Los suelos naturales son cuerpos formados por la acción de diferentes factores y se componen de cuatro sustancias principales: minerales, materia orgánica, aire y agua (Hartemink & McBratney, 2008). El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas (FAO, 2024).

El suelo sostiene la vida vegetal. Debe brindar a las plantas el soporte físico; para ello tiene que ser penetrable por las raíces y debe abastecer de agua a las mismas; entonces, debe permitir que el agua de lluvia se infiltre, almacenando parte de ella en condiciones que permitan su utilización por las plantas. Debe suministrar a las raíces el oxígeno que necesitan para su respiración, por lo que tiene que permitir la renovación y circulación del aire. Debe abastecer a las plantas de los nutrientes minerales que requieren; para ello tiene que contener a esos nutrimentos en forma tales que puedan ser utilizados por las plantas o ser capaz de almacenar los nutrientes que se le añaden (Barioglio, 2013).

El suelo provee una gran variedad de microambientes para las bacterias, protozoarios, artrópodos y nemátodos, cuya participación es fundamental en los ciclos biogeoquímicos. En el caso particular del ciclo del carbono, y debido a la importancia de este gas en el contexto del cambio climático, la capacidad de almacenamiento del suelo se convierte en un elemento clave en el ciclo global de este elemento. Se ha estimado que los suelos contienen mucho más carbono que el que se encuentra en la vegetación y cerca de dos veces más que el que se encuentra en la atmósfera (Amudson et al., 2015).

## Suelos Agrícolas

Los suelos agrícolas desempeñan un papel vital en el sustento de la sociedad humana a través de la producción de alimentos y el funcionamiento de los ecosistemas (Mao, X., Sun, J., Shaghaleh, H., Jiang, X., Yu, H., Zhai, S., y Hamoud, 2023).

Estos suelos, además de cumplir funciones ecológicas importantes, deben reunir ciertas características que los convierten en un medio idóneo para el crecimiento de los cultivos.

En primer lugar, es fundamental que el suelo agrícola sea fértil, con una importante composición de humus (o la sección orgánica del suelo), el suelo agrícola debe contar con nutrientes principales tales como los nitratos, amonio, fósforo, potasio, sulfato, magnesio, calcio, sodio, cloruro y otros como el hierro, el cobre, el manganeso, aunque estos últimos en menor proporción. Todos estos nutrientes pueden ser reforzados y agregados de manera artificial a través de fertilizadores que se aplican en las zonas que más lo necesitan (Bembibre,2011).

Sin embargo el manejo convencional del suelo, con vocación forestal, que se destina a la agricultura se caracteriza por el uso de prácticas como el barbecho, la aplicación de biocidas y fertilizantes industriales (Postgate, 2000), que favorecen los rendimientos, pero también alteran las características físicas, químicas y biológicas del suelo (Martikainen, 1984; Chartres, 1987; Priha y Smolander, 1995; Chen *et al.*, 2001b). Ya que alrededor del 33 % de los suelos agrícolas del mundo están degradados debido a su mala gestión o sobreexplotación, lo que afecta el sustento de más de 1.500 millones de personas (Stavi y Lal, 2015,Nabiollahi *et al.*, 2017,Davis *et al.*, 2023,Müller *et al.*, 2023).

Dicha degradación no solo afecta la degradación física y química del suelo, sino también afecta negativamente a la biodiversidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos (Juhos *et al.*, 2019,Naorem *et al.*, 2023,Mamabolo *et al.*, 2024,Khasi *et al.*, 2024). En el mismo sentido, en el caso de los impactos hacia los microorganismos, éstos se ven afectados por la aplicación de agroquímicos reduciendo la presencia de invertebrados, microorganismos e insectos, responsables de la descomposición y del ciclo de nutrientes, entre ellos, las bacterias fijadoras del nitrógeno, hongos micorrizales, lombrices y termitas (UNEP, 2006). Un claro ejemplo de esta degradación es el uso intensivo de la labranza, que acelera la erosión del suelo, agota la materia orgánica y la fertilidad del suelo y disminuye la biodiversidad del suelo, lo que conduce a una degradación del suelo que finalmente culmina en una disminución del rendimiento (Lal, 1993).

Por último, es importante destacar que la agricultura, además de afectar los suelos, utiliza alrededor del 70% de agua dulce disponible (Gleick *et al.*, 2010), y ha sido identificadas como un importante contribuyente a la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (IPCC, 2019).

## **Suelos Forestales**

Los suelos forestales, en los que la formación del suelo ha sido influenciada por la vegetación forestal, se caracterizan generalmente por árboles de raíces profundas, importantes "capas de hojarasca" u horizontes O, reciclaje de materia orgánica y

nutrientes, incluida la madera, y una amplia variedad de organismos que viven en el suelo (Boyle & Powers, 2013). Gracias a la cubierta y estructura forestal se presenta un microclima característico que aloja gran diversidad de microorganismos estos en conjunto con los procesos de formación, asociación de organismos específicos de la vegetación forestal y de la capa de hojarasca se diferencian de otros suelos (Salas, 1987; FAO, 2015).

En este contexto, los suelos juegan un papel crucial en la biogeoquímica de los ecosistemas forestales. Los suelos forestales son importantes fuente de nutrientes incluyendo nitrógeno (N), azufre (S), fósforo (P), calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg) y algunos micronutrientes (Jansen, B.; Nierop, K. G. J.; Verstraten, M. 2005, Johnson, C. E. 2002). El hierro (Fe) es uno de los elementos más frecuentes en las rocas, y en los suelos forestales y agrícolas.

La materia orgánica (MO) es importante en suelos forestales ya que representa un depósito de varios elementos esenciales, favorece buena estructura del suelo, es una fuente de cationes intercambiables, evita cambios bruscos de pH, promueve buena aireación e incrementa la cantidad de agua disponible en el suelo (Whittaker et al 1968, Hanawalt and Whittaker. 1977: Barton, 1994).

Los suelos naturalmente cubiertos de vegetación conservan su fertilidad. Un ejemplo es el bosque: las raíces de los árboles sujetan la tierra, el follaje de las copas suaviza el impacto de la lluvia y la fuerza del viento. Las hojas secas que caen (hojarasca), junto con los animales muertos y sus excrementos, se pudren y son descompuestas por los microorganismos, formando *humus*. El humus es un abono orgánico que enriquece el suelo, aumenta la porosidad superficial, absorbe el agua lentamente y la retiene. Así, el suelo permanece húmedo por más tiempo, el agua no se escurre por su superficie y no se produce arrastre de tierra (FAO, 1996).

Además, la sombra de los árboles permite el desarrollo de otras especies vegetales que no pueden crecer a pleno sol, como los helechos, orquídeas, musgos y líquenes (FAO, 1996). Los bosques proporcionan diversos productos y servicios, incluidos combustible, madera, sustento, bioproductos y regulaciones de gases de efecto invernadero (Melillo, 2021), el mantenimiento del suministro de aire y agua, el almacenamiento de carbono, el ciclo de nutrientes y la preservación de la diversidad genética y de especies (UNCC,2021).

### **Calidad de suelo**

La calidad del suelo se define como la capacidad del suelo para sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental y promover la salud de las plantas y los animales dentro de los límites de los ecosistemas y el uso de la tierra (Bunemann y et al.,

2018,Rinot et al., 2019). Para la evaluación de la calidad del suelo se han elegido las propiedades físicas, químicas y biológicas que influyen en la producción de cultivos y que son vulnerables a las actividades humanas y las variaciones ambientales (Lu et al., 2024). Estos indicadores reflejan de manera integral el impacto de prácticas específicas de gestión agrícola en el ecosistema. Por ejemplo, la estructura del suelo afecta la infiltración y aireación del agua, la disponibilidad de nutrientes influye directamente en el crecimiento de los cultivos y el contenido de materia orgánica es un indicador clave de la fertilidad del suelo y su capacidad para secuestrar carbono (Song et al., 2024). La actividad microbiana, a su vez, es un componente vital del ciclo de nutrientes y contribuye a la resistencia y resiliencia del suelo a los factores estresantes ambientales (Zheng et al., 2024).

La calidad del suelo representa la fortaleza de su salud, disponibilidad y capacidad de restauración, lo que refleja la función integral del suelo (Bastida et al., 2008). La buena calidad del suelo puede conservar nutrientes, favorecer el crecimiento de las plantas, aumentar el rendimiento de los cultivos, mantener diversos servicios ecosistémicos y el desarrollo sostenible regional (Drobnik et al., 2018).

Por lo tanto, determinar, monitorear y mejorar la calidad del suelo es importante para abordar las necesidades futuras de alimentos, garantizar la calidad del aire y del agua, mantener la salud de las plantas, los animales, los seres humanos y el medio ambiente, y mitigar los impactos del cambio climático. Se han realizado varios estudios para comprender y mejorar los cambios en la calidad del suelo en todo el mundo (Murthy and Author, 2023).

## **Propiedades Físicas del Suelo**

López y Estrada (2015) definen como propiedades físicas del suelo aquellas que pueden observarse y/o medirse sin alterar químicamente la composición del suelo.

La condición física de un suelo determina, la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes (Rucks, García, Kaplán, Ponce de León, & Hill, 2004).

## **Humedad**

La humedad del suelo se refiere a la cantidad de agua presente en el suelo, lo cual es esencial para el crecimiento de las plantas (Martorell, 2023). Por lo tanto, la humedad del suelo es necesaria para que la fotosíntesis se realice, ya que, si la planta pierde demasiada agua, las estomas se cerrarán y se detendrá este proceso. Si esto sucede, la planta no podrá absorber más CO<sub>2</sub> y por consecuencia, su crecimiento disminuirá (Van Eijk, 2016).

La humedad que entra al suelo proviene principalmente de la precipitación, la lluvia y la nieve, y contiene cantidades abundantes de CO<sub>2</sub> disuelto. Una parte de la humedad se utiliza en varias reacciones químicas del suelo y otra parte se retiene; sin embargo, la mayoría se pierde en el drenado y la evapotranspiración (FitzPatrick, 1996).

### **Densidad Aparente**

La densidad de volumen o densidad aparente se define como el peso seco del suelo por unidad de volumen de suelo inalterado, tal cual se encuentra en su emplazamiento natural, incluyendo el espacio poroso (Pinot, 2000). Arshad et al. (1996) citado por el USDA (1999), afirman que la densidad aparente del suelo puede servir como un indicador de la compactación y de las restricciones al crecimiento de las raíces.

Los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las raíces. Los valores altos de densidad aparente son propios de suelos compactos y poco porosos, con aireación deficiente e infiltración lenta del agua, lo cual puede provocar anegamiento, anoxia y que las raíces tengan dificultades para elongarse y penetrar hasta alcanzar el agua y los nutrientes necesarios. En estas condiciones, el desarrollo y crecimiento de las plantas es impedido o retardado consistentemente (Donoso, 1992).

### **Densidad Real**

Densidad real (DR) La densidad real del suelo es la relación que existe entre el peso de éste, en seco (P<sub>ss</sub>) y el volumen real o sea el volumen de sus partículas (V<sub>p</sub>). Usualmente se expresa en g/cm<sup>3</sup> (Foth, 1897).

Su valor cambia en función del tipo de minerales del material madre y de la cantidad de materia orgánica del suelo. Puesto que la materia orgánica pesa mucho menos que un volumen igual de sólidos minerales, la cantidad de ese constituyente en un suelo afecta marcadamente a la densidad de las partículas.

Como consecuencia, los suelos superficiales poseen generalmente una densidad de partículas más baja que la del subsuelo (Buckman y Brady, 1977).

### **Color**

El estudio del color del suelo es una de las características morfológicas más importantes, la más obvia y fácil de determinar, permite identificar clases de suelos, es el atributo más relevante utilizado en la separación de horizontes y tiene una estrecha relación con los principales componentes sólidos de este recurso (Soil Survey Division Staff, 1999). El color de un suelo puede deberse a condiciones que estén sucediendo actualmente en el suelo, o a condiciones pasadas, material generador y estado de intemperización de los minerales (indican el efecto de uno o más de los factores de formación), (Honorato, 2000).

La capa superficial del suelo con altos niveles de materia orgánica y nitrógeno tiende a tener un color oscuro (Baumann et al., 2016, Pretorius et al., 2017) y se considera fértil y adecuado para el cultivo (Escadafal, 1993, Moritsuka et al., 2019).

Los suelos rojos generalmente son más evolucionados y han tenido intensa meteorización (Honorato, 2000). La presencia de minerales de hierro hace que la capa superficial del suelo parezca "roja" (Sahwan et al., 2021), y los diferentes colores de los minerales de hierro (por ejemplo, hematita,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; y magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) dentro del perfil del suelo son indicativos de las propiedades de aireación y drenaje del suelo.

Los suelos amarillos contienen mucha arcilla y poca materia orgánica, por lo que hay que fertilizar fuertemente los cultivos (Marconi, 2012).

Los suelos de colores claros o gris claro usualmente tienen alto contenido de arena o son calcáreos.

Las zonas azulosas o grisáceas y moteado de color rojizo oxidado indica pobre drenaje y pérdida de buena aireación.

Las zonas blanquecinas, líneas, redes o moteados en color blanco siguiendo grietas pueden indicar un alto contenido de carbonato de calcio (Honorato, 2000).

### **Coefficiente de Extensión Lineal (COLE)**

Ciertos suelos tienen la capacidad de expandirse en forma significativa cuando se humedecen y de contraerse y agrietarse cuando se secan, lo que está relacionado con un contenido relativamente alto de arcillas expandibles.

Esta cualidad se cuantifica mediante el uso de un coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) (Commegna, Aguirre & Santamaría, 2005).

La determinación del coeficiente de extensibilidad lineal es utilizada para evaluar la contracción de los suelos a través de índices de contracción, para así relacionarlo con características químicas, físicas y mineralógicas del suelo (Grossmann et al., 1968; Dörner et al., 2009). El COLE define una deformación unidimensional del suelo desde la saturación hasta que el suelo se seca. El suelo cambia su volumen a medida que se seca y se toma como límite de mojado el estado saturado del suelo. La magnitud de la contracción se va definiendo de acuerdo con los distintos poros que presenta el suelo (Grossman et al., 1968, citados por Peng et al., 2007).

### **Estabilidad de los Agregados**

Los agregados del suelo, como unidades fundamentales de suelo, están estrechamente asociados con la densidad aparente del suelo, la porosidad total del suelo, la retención

de agua, los microorganismos del suelo, la erosión del suelo y del viento y la calidad del suelo. En consecuencia, se los reconoce como indicadores adecuados de la productividad y la salud del suelo (Mikha et al., 2024, Santos et al., 2022, Tagar et al., 2020). Una buena estructura del suelo depende de la estabilidad de los agregados del suelo, lo que ofrece numerosas ventajas para el funcionamiento esencial del ecosistema del suelo.

La agregación del suelo es el resultado de la floculación, sedimentación y el reacomodo de las partículas del mismo (Six et al., 2000) y es controlada por el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), la biota, las asociaciones iónicas y el contenido de arcillas y carbonatos (Duiker et al., 2003). Según (Six et al., 2000) la formación y estabilización de agregados se lleva a cabo por la unión de materia orgánica particulada (MOP) unida a excreciones de microorganismos y mucus de lombrices. Si la actividad microbiana decrece, disminuye la formación de agregados y eventualmente se generarán perturbaciones.

### **Textura**

De acuerdo con la USDA (1999) “es un indicador que permite determinar la velocidad de consumo de agua, almacenaje de agua, laborabilidad y amplitud de aireación”.

Se define como el porcentaje relativo de separaciones del suelo o partículas primarias, conformando la fase sólida del suelo mineral y han sido clasificadas en tres grupos de acuerdo con su diámetro: arena, limo y arcilla (Phogat et al., 2015).

La textura del suelo es una de las propiedades físicas fundamentales que influye en otras propiedades como la estabilidad del suelo, la erosión, la compactación, la labranza, la capacidad de retención de agua, la permeabilidad, el contenido de humedad, la profundidad de las raíces de las plantas, la disponibilidad de nutrientes y la fertilidad (Saxton et al., 1986; Cecillon et al., 2009; Gómez y col., 2013; Tumsavaş et al., 2019).

El suelo arcilloso tiene partículas pequeñas que tienen menos de 0.002 mm de diámetro (Mobilian y Craft, 2022). Tiene una alta capacidad de retención de agua y puede retener nutrientes de manera efectiva debido a la gran área superficial de las partículas de arcilla. El suelo arcilloso tiene un drenaje deficiente y el exceso de agua puede provocar anegamiento (Finch y Lane, 2014).

Los suelos arcillosos son suelos muy impermeables y con muy mala aireación, ya que su principal característica es la existencia de gran cantidad de microporos. Son difíciles de trabajar, pues son muy plásticos cuando están húmedos y compactos cuando están secos. La presencia de altos contenidos de materia orgánica compensa, en parte, estas desventajas (Navarro, Pérez, y Navarro, 2022).

El suelo arenoso tiene partículas más grandes que van desde 0.05 a 2 mm de diámetro (Mobilier y Craft, 2022 ).El suelo arenoso no puede retener agua y nutrientes tan eficazmente como el suelo arcilloso o limoso debido al mayor tamaño de partícula y la baja área superficial (Yost y Hartemink, 2019). Son suelos que poseen buenas propiedades físicas, muy permeables, pues en ellos predominan los macroporos. Facilita así el drenaje y el eficaz movimiento del aire (Navarro, Pérez, y Navarro, 2022).

El suelo limoso contiene partículas que son más grandes que la arcilla, pero más pequeñas que la arena, con un diámetro entre 0,002 y 0,05 mm (Mobilier y Craft, 2022). El suelo limoso tiene una capacidad moderada de retención de agua y un buen drenaje. Tiene una textura suave y fina y es fácil de trabajar. El suelo limoso es generalmente fértil y tiene buenas capacidades de retención de nutrientes (Dike & Apte, 2024).

## **Propiedades Químicas del Suelo**

### **pH**

El pH del suelo expresa la actividad de los iones hidrógeno en la solución del suelo. Esto te indica si tu suelo es ÁCIDO, NEUTRO o ALCALINO.

El pH del suelo es un parámetro importante que influye en diferentes factores del suelo, afectando el crecimiento de las plantas (FAO,2021).

El pH del suelo varía en respuesta a factores inherentes (topografía, materiales parentales geológicos y su meteorización en respuesta al clima y factores de gestión), aplicaciones de fertilizantes, eliminación de materiales vegetales cosechados (que influyen en las actividades biológicas de los microorganismos) y niveles de materia orgánica del suelo (Shi et al., 2022: Vašák et al., 2015).

El pH del suelo influye en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, es decir, este factor puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados (Benton, 2003).

Los valores de pH debajo del neutro generan deficiencias de nitrógeno, potasio, calcio y magnesio; mientras que valores mayores a 7 disminuyen la disponibilidad del hierro, manganeso, zinc y cobre (Barbaro, 2019).

### **Carbono Orgánico**

El C orgánico del suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, en forma de humus y en formas muy condensadas de composición próxima al C elemental (Jackson, 1964). La cantidad de

COS almacenada en un suelo depende del equilibrio que existe entre la cantidad de carbono que entra y la que sale del suelo como gases de respiración basados en carbono, procedentes de la mineralización microbiana y, en menor medida, de la lixiviación del suelo, erosión o deposición del suelo (Lefèvre et al., 2017).

Los suelos con un alto contenido de carbono son más propensos a tener una alta productividad y pueden filtrar y purificar mejor el agua. El agua almacenada en el suelo sirve como fuente para 90 por ciento de la producción agrícola mundial y representa alrededor del 65 por ciento del agua dulce del planeta (FAO, 2017)

## **Materia Orgánica**

Está formada por los animales y vegetales muertos y excrementos presentes en el suelo, que por acción del clima y algunos microorganismos se descomponen y se convierten con el tiempo en humus\* (elementos y compuestos químicos) aprovechable por los vegetales. El humus se encuentra bien mezclado con la arcilla, formando el complejo arcilla-humus, de gran beneficio alimenticio para las plantas y que es la base de todas las actividades que se realizan en el suelo.

La materia orgánica del suelo procede de los restos de organismos caídos sobre su superficie, principalmente hojas y residuos de plantas (Marconi, 2012).

La materia orgánica del suelo contiene cerca del 5% de N total, pero también contiene otros elementos esenciales para las plantas, tales como fósforo, magnesio, calcio, azufre y micronutrientes (Anónimo, 1988; Graetz, 1997).

Los beneficios que se obtienen al utilizar materia orgánica se pueden resumir de la siguiente manera:

- a) Mejora y estabiliza la estructura.
- b) Aumenta la capacidad de retención de agua.
- c) Aumenta la CIC.
- d) Mejora las condiciones para el crecimiento microbiano.
- e) Sirve como reservorio de nutrientes.
- f) Disminuye la toxicidad del aluminio.
- g) Mejora la capa de cultivo.
- h) Absorbe y desactiva pesticidas orgánicos (Fitzpatrick, 1996).
- i) Los residuos orgánicos en la superficie del suelo reducen el impacto de las gotas de lluvia y favorecen la infiltración lenta del agua (Ortiz, 2019).
- j) Las cubiertas de residuos orgánicos bajan la temperatura del suelo en el verano y lo conservan más caliente en el invierno.
- k) Las pérdidas de agua por evaporación son menores cuando se dispone de cubiertas de residuos orgánicos en el suelo (Ortiz, 2019).

## **Conductividad Eléctrica**

La conductividad eléctrica (CE) del suelo es la capacidad de conducir la corriente eléctrica, la cual depende de la cantidad de iones positivos y negativos que se encuentran en la solución del suelo, por eso la CE de la solución de suelo es un indicador del contenido de sales. La CE comúnmente se mide en el laboratorio, en el extracto de pasta de saturación (Warrick y Nielsen, 1981).

La CE del suelo es una medida afectada por la combinación de contenido de agua del suelo, contenido de sales disueltas, contenido de arcillas, mineralogía y temperatura del suelo (Tarr *et al.*, 2005).

La salinidad resulta de la existencia de materiales no orgánicos disueltos en la fase acuosa del suelo, incluyendo sales disueltas y listas para disolverse, iones cargados ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), no iones e iones compuestos que generan pares iónicos. Las sustancias que causan salinidad en el suelo son conductoras de electricidad y podrían identificarse al pasar corriente eléctrica a través del suelo (Rhoades, Corwin y Lesch, 1999 ).

## **Carbonatos**

El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), la dolomita [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ], y la calcita de magnesio [ $\text{Ca}_{1-y}\text{Mg}_y\text{CO}_3$ ] son los minerales carbonatados más comunes. Ellos representan más del 90 por ciento de los carbonatos naturales (Lal, 2006). La calcita es la forma más dominante en el suelo. La aragonita y la siderita también se encuentran en algunos suelos específicos. Los carbonatos son comunes en muchos suelos del mundo, especialmente en suelos áridos, semiáridos y subhúmedos (Lal, 2006). Su origen puede ser primario (heredado de la litogénica) o secundario (pedogénico) (Loeppert and Suarez, 1996).

Los carbonatos generalmente son una fuente importante de Ca y Mg, nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas (Casanova, 2005).

## **Bicarbonatos**

El bicarbonato se origina a partir de calcita como material madre y es una forma de ácido carbónico. El bicarbonato tiende a aumentar el pH con el tiempo y a precipitar iones con carga positiva, en particular calcio, hierro y magnesio (Mason, 2020).

Los cationes dominantes en suelos afectados por salinidad son Sodio ( $\text{Na}^+$ ), Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Potasio ( $\text{K}^+$ ) y los aniones dominantes son Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (Richards, 1954). Los suelos afectados por salinidad con altas cantidades de iones de sodio son conocidos como suelos sódicos.

Las altas concentraciones de sodio en los suelos no sólo perjudican a las plantas directamente, sino también degradan la estructura del suelo, disminuyendo la porosidad y la permeabilidad del agua (Jenks y Hasegawa, 2005).

### **Cloruros**

El cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) es el principal anión en la mayoría de los suelos salinos (Wenrong et al., 2010). Normalmente, todos los suelos contienen cantidades suficientes de cloruros para satisfacer las necesidades de las plantas, (Navarro, 2003) pero una alta concentración de  $\text{Cl}^-$  en el suelo puede provocar reacciones extremas entre iones afectando el rendimiento de los cultivos (Fageria, 2001). El Na y Cl son igualmente importantes, ya que ambos pueden ser tóxicos para las plantas si se acumulan en altas concentraciones en el citoplasma (Teakle y Tyerman, 2010; Tavakkoli *et al.*, 2011).

El ion cloruro en el suelo está asociado a distintos cationes como sodio, potasio, calcio y magnesio, procedentes de la meteorización de las rocas, aguas de riego y fertilización mineral (Arrieche, Ruiz, León, 2013).

### **Calcio**

El calcio es un componente esencial de los suelos y las plantas y juega un papel clave en la estructura y función de los ecosistemas (Xu et al, 2021).

El calcio, en el suelo y en las plantas, se encuentra en forma de catión divalente  $\text{Ca}^{++}$ . El calcio es un componente estructural de la pared celular y, por lo tanto, es vital para la formación de nuevas células. La deficiencia de calcio no sólo restringe el crecimiento de tallos, hojas, etcétera, sino que también limita el de las raíces (Thompson & Troeh, 1982b)

Generalmente es el catión dominante en el suelo y la adsorción de este ion puede estimular la formación de agregados al favorecer el proceso de floculación. Es por ello por lo que se dice que el  $\text{Ca}^{+2}$  juega un papel fundamental en la estructura del suelo (Conti, 1998).

### **Magnesio**

Las plantas lo absorben de la solución del suelo como ion magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ). El magnesio es un elemento sumamente móvil dentro de la planta (Kass, 1979).

El magnesio es parte de la molécula de clorofila, siendo esencial en el proceso de fotosíntesis para la producción de carbohidratos (Tisdale y Nelson, 1993), teniendo gran influencia en el peso del grano y responsable del color verde de la planta.

Los suelos, generalmente contienen menos magnesio que calcio, debido a que el primero no es absorbido tan fuertemente como el  $\text{Ca}^{+2}$  por los coloides del suelo y puede perderse más fácilmente por lixiviación (Castillo, 2012). Las deficiencias de  $\text{Mg}^{+2}$  se presentan principalmente en suelos arenosos o de baja capacidad de intercambio catiónico (CIC).

### **Acidez Extraíble**

Se entiende por acidez del suelo la condición de este en la cual existe una acumulación de elementos tóxicos (Al, Fe y Mn), a menudo asociada a una fertilidad natural baja (deficiencia de fósforo, cationes y elementos menores) (Molina 1998).

Además, la acidez del suelo puede ser causada por la remoción de nutrientes por parte de las plantas, que al remover los cationes básicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) de la superficie, liberan hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) para mantener el equilibrio en el interior del suelo, con lo cual se acidifica el pH (CIMMYT, 2016).

### **Capacidad de Intercambio Catiónico**

La CIC es la carga eléctrica negativa de las arcillas y materia orgánica del suelo y puede ser permanente o dependiente del pH, en función del tipo de arcilla (López-Báez et al., 2019)

La capacidad de intercambio catiónico es un indicador muy importante de la fertilidad del suelo,) es la cantidad de cargas negativas presentes en los minerales y la composición orgánica del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas), representa la cantidad de cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K,  $\text{NH}_4$  etc.) (Arévalo y Gauggel, 2014).

La CIC indica la disponibilidad y cantidad de nutrientes, la habilidad de los suelos de retener cationes, su pH potencial entre otros indicadores químicos de suelos. Una baja CIC hace referencia a la baja habilidad de ese suelo de retener nutrientes, es característico de los suelos arenosos o pobres en materia orgánica (FAO, 2015).

### **Nitrógeno Total**

El NT es uno de los elementos más importantes para la nutrición de las plantas y es una propiedad fundamental para evaluar la fertilidad del suelo (Jarquín, 2011). En la naturaleza existen dos fuentes principales de reservas de nitrógeno para las plantas, la primera es el nitrógeno atmosférico, representa el 78% del aire total disponible en la tierra, se encuentra en la atmósfera principalmente en forma molecular ( $\text{N}_2$ ), pero en pequeñas cantidades en las siguientes formas: óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

Otra fuente importante de nitrógeno es la materia orgánica del suelo, ya que se sabe que alrededor del 90% al 95% del nitrógeno total en el suelo se encuentra en forma de compuestos orgánicos. Sin embargo, el nitrógeno en forma orgánica no puede ser absorbido directamente por las plantas, sino que debe convertirse en forma inorgánica. El nitrógeno inorgánico absorbible está en forma de nitratos y amonio; ambos representan el 2% del nitrógeno total del suelo (Centeno, 2022; Perdomo & Barbazán, 2000).

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

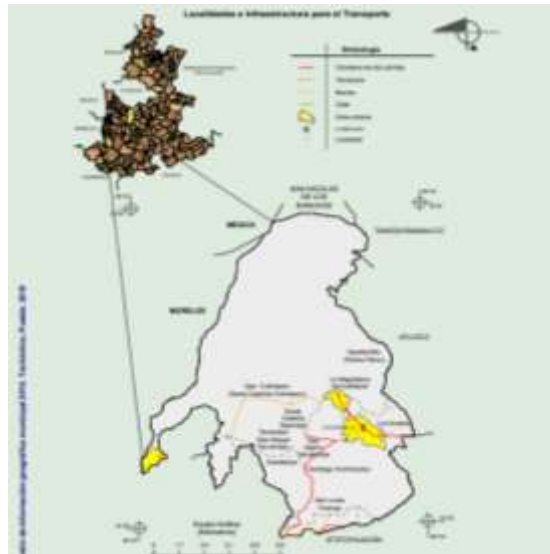
Para la determinación de las propiedades físicas y químicas de los suelos forestales y agrícolas, se implementó las metodologías de la Norma Oficial Mexicana, NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis. Evaluación de la conformidad para muestreo de suelo. Así mismo se utilizó Soil Survey Laboratory Methods Manual/ USDA.

El proceso incluyó muestreo, determinaciones experimentales y análisis de laboratorio. Cabe señalar que se realizaron duplicados de cada muestra, tanto para los suelos forestales como para los agrícolas y se trabajó con muestras compuestas.

### Localización del sitio

Esta investigación se desarrolló en tres terrenos de cultivo y tres sitios forestales diferentes, ubicados en la Localidad de Santa Catalina Tepanapa, perteneciente al municipio de Tochimilco, Puebla, en la región central de México (18° 50' y 19° 02' latitud norte y los meridianos 97° 18' y 97° 27' de longitud oeste) a una altitud de 2 280 m (INEGI, 2009).

Cabe destacar que en Tochimilco el principal tipo de uso de suelo es el agrícola, siendo la agricultura la que abarca la mayor superficie (43.89 %). Por otro lado, el área que no es utilizada para la agricultura está ocupada principalmente por bosques, los cuales representan el 43.01 % de la superficie (INEGI, 2010).



**Mapa 1.** Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Tochimilco, Puebla

Fuente: INEGI. Marco Geoestadístico 2010, versión 4.3.

INEGI. Información Topográfica Digital Escala 1:250 000 serie II

## Muestreo de suelos

Una vez definida la zona de estudio, se procedió a realizar el muestreo de suelos utilizando el método AS-01 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. Esta investigación se llevó a cabo en dos áreas de diferentes usos de suelo ubicadas en la Localidad de Santa Catalina Tepanapa, en el municipio de Tochimilco, Puebla. El muestreo se realizó en abril del 2024, durante la temporada de primavera (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Para registrar la ubicación precisa de cada punto de muestreo, se utilizaron coordenadas obtenidas a través de la herramienta Google Earth, proporcionadas de forma detallada en la siguiente tabla.

*Tabla 1. Puntos de muestreo de los suelos*

| Punto de muestreo      | Latitud Norte       | Longitud Oeste      |
|------------------------|---------------------|---------------------|
| <b>M<sub>1</sub>SF</b> | <b>18°53'44.45"</b> | <b>98°37'23.59"</b> |
| <b>M<sub>2</sub>SF</b> | <b>18°53'44.30"</b> | <b>98°37'20.92"</b> |
| <b>M<sub>3</sub>SF</b> | <b>18°53'43.94"</b> | <b>98°37'19.97"</b> |
| <b>M<sub>4</sub>SA</b> | <b>18°53'49.05"</b> | <b>98°37'1.69"</b>  |
| <b>M<sub>5</sub>SA</b> | <b>18°53'46.18"</b> | <b>98°36'57.11"</b> |
| <b>M<sub>6</sub>SA</b> | <b>18°53'40.76"</b> | <b>98°36'58.12"</b> |

*Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth Pro 7.3.6, (2024).*

En la figura 1, se muestran los 6 puntos de muestreo de los suelos, donde el M<sub>1</sub>SF, M<sub>2</sub>SF y M<sub>3</sub>SF corresponden a los suelos forestales y M<sub>4</sub>SA, M<sub>5</sub>SA, y M<sub>6</sub>SA corresponden a los suelos agrícolas.



**Figura 1:** Ubicación de los sitios de muestreo en la Localidad de Santa Catalina Tepanapa, en el municipio de Tochimilco, Puebla.

Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth Pro 7.3.6, (2024)

Para la determinación de las propiedades del suelo, el muestreo se realizó de forma aleatoria, donde se utilizó una pala para jardinería y se procedió a tomar la muestra de los diferentes suelos, a una profundidad aproximada de 15 a 20 cm. Al concluir el muestreo, cada muestra se colocó en una bolsa de plástico hermética (tipo Ziploc), la cual fue etiquetada con las coordenadas del sitio de extracción y la fecha de recolección.

Es importante mencionar que los tres terrenos de cultivo han sido trabajados durante aproximadamente 15 años. El terreno de la muestra 4 se destina a cultivo temporal, donde generalmente siembran maíz, frijol y amaranto. Por otro lado, los terrenos de las muestras 5 y 6 son cultivados mediante riego, con siembras de flor nube y alhelí, y en ocasiones también maíz, ambos terrenos son sometidos a fumigación.

Todos los terrenos son fertilizados con fertilizantes químicos y labrados con la ayuda de animales. Además, durante la preparación de los suelos, se utiliza estiércol de res para mejorar su fertilidad.



**Figura 2:** Vista del Sitio forestal correspondiente a la muestra 1  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 3:** Vista del Sitio forestal correspondiente a la muestra 2  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 4:** Vista del Sitio forestal correspondiente a la muestra 3  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 5:** Vista del terreno correspondiente a la muestra 4  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 6:** Vista del terreno correspondiente a la muestra 5  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 7:** Vista del terreno correspondiente a la muestra 6  
Fuente: Elaboración propia

## **Determinación de la densidad aparente en campo**

Para esta determinación se lavó y se secó perfectamente un cilindro metálico de volumen conocido, primero se retiró la vegetación de la superficie antes de tomar la muestra y se colocó el cilindro invertido en el perfil del suelo, con ayuda de una pala de jardín, se retiró el exceso de suelo para que quedara el ras del cilindro, procurando no alterar la estructura natural del suelo.

Los cilindros con las muestras de suelo fueron colocados en bolsas herméticas para conservar su humedad y luego transportados al laboratorio.

Al llegar al laboratorio los cilindros con muestras de suelo fueron pesados, posteriormente los cilindros fueron secados y pesados sin muestras, finalmente se obtuvieron los datos necesarios y se procedió a realizar los cálculos.

Para esta determinación se tomó como referencia el método de: Porta Casanellas Jaume y López-Acevedo Reguerin Marta. (Porta Casanellas Jaume & López-Acevedo Reguerin, 2005).



**Figura 8:** Cilindro metálico con muestra de suelo

*Fuente: Elaboración propia*

### **Preparación de la muestra**

Una vez finalizado el muestreo de los suelos, se procedió a trasladarlas al laboratorio para realizar las determinaciones correspondientes, utilizando el método AS-01 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Durante el traslado, se tomaron precauciones para evitar el efecto de factores externos, como la humedad, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, luz, calor y otros materiales que pudieran cambiar la naturaleza de la muestra.

Posteriormente, se realizó el secado de las muestras, el cual se utilizaron unas charolas en las que se colocaron las muestras de suelo previamente homogeneizadas y etiquetadas. Las muestras de suelo fueron metidas a la estufa, en donde se dejaron secar por aproximadamente 3 días, sin embargo, diariamente se fueron mezclando con ayuda de una espátula para asegurar un secado uniforme. Luego del secado, se continuó retirando las raíces y rocas grandes que traían dichas muestras. No fue necesario hacer uso de la molienda, pero si se tamizaron haciendo pasar el suelo por un tamiz con aberturas de dos mm de diámetro (malla 10) de acero inoxidable.

Finalmente se guardaron las muestras en botes sellados, con aproximadamente 1 kilogramo de suelo por muestra, con su correspondiente etiqueta y almacenados en un lugar seco.



**Figura 9:** Muestras de suelo en bolsas de plástico hermética  
Fuente: Elaboración propia

## ***Determinaciones de las propiedades físicas del suelo***

### **Determinación de humedad por gravimetría**

La determinación de la humedad se realizó siguiendo el método AS-05 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2000).

Para este análisis, se utilizó la misma muestra de suelo que fue recolectada y empleada en la determinación de la densidad aparente en campo. Primero se utilizó una charola de aluminio lavada, secada y pesada, donde se colocaron las muestras que fueron traídas de campo, posteriormente, las muestras se introdujeron en una estufa y se secaron a una temperatura constante durante aproximadamente 24 horas, hasta que se eliminó completamente la humedad. Se registraron los datos de las muestras húmedas y secas, y con los datos obtenidos se procedió a realizar los cálculos.



**Figura 10:** Balanza granataria utilizada para determinar la humedad de la muestra de suelo  
Fuente: Elaboración propia

## Determinación de la densidad aparente

Para esta determinación se tomó como referencia el método de: Porta Casanellas Jaume y López-Acevedo Reguerin Marta. (Porta Casanellas Jaume & López-Acevedo Reguerin, 2005).

Se utilizó una probeta de 10 mL, la cual se verificó que estuviera completamente limpia, seca y sin residuos de humedad. Posteriormente, utilizando una espátula se colocó suelo en el interior de la probeta, hasta alcanzar la marca de 10 mL.

Luego, con movimientos controlados de arriba abajo, se golpeó la probeta contra la mesa del laboratorio cuidadosamente a modo de que se acomoden las partículas de suelo, esto se repitió aproximadamente 10 veces. Después se rellenó nuevamente la probeta hasta cubrir la marca de 10 mL, finalmente se pesó la probeta con el suelo, con los datos obtenidos se realizan los cálculos correspondientes.



*Figura 11: Probeta con muestra de suelo  
Fuente: Elaboración propia*

## Pretratamiento de la muestra

Para el pretratamiento de la muestra se realizó siguiendo el método AS-09 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

En vasos de precipitados de 500 mL se colocaron aproximadamente 40 gramos de suelo tamizado. A estas muestras se les agregó peróxido de hidrógeno al 30 % aplicándolo 3 o 4 veces al día durante aproximadamente una semana. Esto se realizó debido a que algunas muestras de suelo contienen alta cantidad de materia orgánica, lo cual provocaba una reacción cada vez que se aplicaba el peróxido.

Finalmente, cuando ya no se observaron reacciones, se dio por concluido el tratamiento y se consideró eliminada la materia orgánica del suelo.



**Figura 12:** Muestra de suelo reaccionando al tratamiento de peróxido de hidrogeno al 30 %  
Fuente: Elaboración propia

### **Determinación de la densidad real**

Para la determinación de la densidad real se realizó siguiendo el método AS-04 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Una vez que la muestra de suelo pretratada estuvo lista, se utilizó para la determinación correspondiente. Se utilizó un picnómetro limpio y seco que previamente ya había sido lavado y secado metiéndolo a una estufa hasta que tuvo un peso constante, y después se anotó el peso del picnómetro seco. Luego, en el interior del picnómetro se colocaron 5 g de suelo haciendo uso de un embudo de plástico. Para evitar humedad y/o grasa se utilizaron guantes para poder manipular el picnómetro.

Posteriormente, se le adiciono agua destilada hervida recientemente y fría hasta llenar la mitad del volumen del picnómetro, este se giró suavemente hasta eliminar cualquier burbuja de aire, y luego se completó con agua hasta alcanzar el aforo y se pesó nuevamente en una balanza analítica. En seguida se le midió la temperatura. Después el suelo y el agua fueron desechados y el picnómetro se secó nuevamente.

Finalmente, se volvió a llenar el picnómetro con agua destilada hasta el aforo y se pesó nuevamente y en seguida se le volvió a tomar la temperatura. Con los datos obtenidos se realizaron los cálculos.



**Figura 13:** Pícnometro con suelo y agua destilada.  
Fuente: Elaboración propia

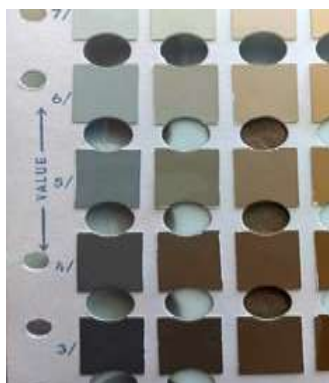
### Determinación de color

Para la determinación del color del suelo se realizó siguiendo el método AS-22 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

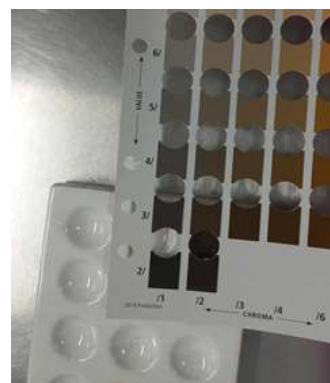
Para determinar el color del suelo, se tomó una pequeña cantidad de suelo tamizado y con ayuda de una espátula, se colocó en los huecos de unas placas de porcelana, después se tomó la cápsula de porcelana y se colocó debajo de la página de la tabla de Munsell, ubicando la muestra de suelo por debajo de cada orificio de la carta junto al cual se tiene la tarjetita con el color. Se recorrieron las páginas de la carta hasta identificar el color que presentaba la mayor similitud tanto del suelo como con la tarjeta. Este procedimiento se repitió con una muestra de suelo humedecido con agua destilada, teniendo cuidado de no saturar ni exceder en la cantidad de agua. Para ambas muestras, en seco y en húmedo, se registraron los valores de "Value" y "Chroma" obtenidos en la carta de Munsell.



**a)**



**b)**



**c)**

**Figura 14:** Determinación de color.

a) Placa de porcelana con muestras de suelo húmedo y seco.

b) Utilizando las tablas de Munsell para la determinación de color en suelo seco.

c) Utilizando las tablas de Munsell para la determinación de color en suelo húmedo.

## Determinación del Coeficiente de Extensión Lineal (COLE)

Para la determinación del Coeficiente de Extensión Lineal se realizó siguiendo la metodología indicada en Soil Survey Laboratory Methods Manual. (Burt, 2004).

Primero se midió el diámetro de una caja Petri limpia y seca, luego sin utilizar la tapa, se llenó la caja hasta el borde con muestra de suelo previamente tamizada, la cual se humedece poco a poco con agua desmineralizada hasta obtener una pasta de saturación. Finalmente, las muestras de suelo en las cajas Petri se dejaron secar a temperatura ambiente sobre la mesa del laboratorio. Una vez que el suelo estaba completamente seco, se midieron con una regla las grietas transversales formadas. Los datos obtenidos fueron utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



**Figura 15:** Muestra de suelo en saturación  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 16:**  $M_1SF$  seco en placa Petri para el análisis de COLE  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 17:**  $M_2SF$  seco en placa Petri para el análisis de COLE  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 18:**  $M_3SF$  seco en placa Petri para el análisis de COLE  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 19:**  $M_4SA$  seco en placa Petri para el análisis de COLE  
Fuente: Elaboración propia



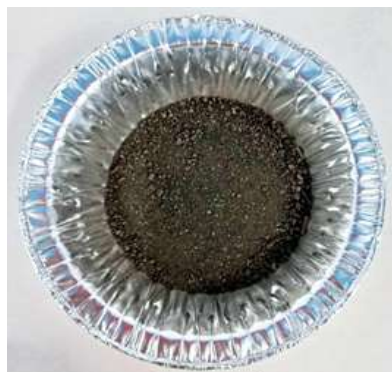
**Figura 20:**  $M_5SA$  seco en placa Petri para el análisis de COLE  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 21:** *M<sub>6</sub>SA seco en placa Petri para el análisis de COLE*  
*Fuente: Elaboración propia*

### **Determinación de estabilidad de agregados**

Para la determinación de estabilidad de agregados se realizó siguiendo la metodología indicada en Soil Survey Laboratory Methods Manual. (Burt, 2004). Se pesaron 20 g de suelo y se colocaron en un tamiz. Luego, se llenó un recipiente con agua y se sumergió el tamiz con la muestra de suelo, asegurando que la superficie del agua quedará aproximadamente 5 cm por encima de la muestra de suelo. Después se realizaron oscilaciones verticales durante 3 minutos. Posteriormente el suelo restante en el tamiz se transfirió a un vaso de vidrio de peso conocido y se colocó en una estufa para secarlo. Finalmente, cuando el suelo estuvo completamente seco se pesó junto con el vaso de vidrio. Con los datos obtenidos, se realizaron los cálculos correspondientes.



**Figura 22:** *Muestra de suelo seco antes de colocarlo en un tamiz*  
*Fuente: Elaboración propia*



**Figura 23:** *Muestra de suelo seco después de las oscilaciones en el tamiz*  
*Fuente: Elaboración propia*

## Determinación de textura

Para la determinación de la textura del suelo se realizó siguiendo el método AS-09 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Se pesaron 25 g de suelo pretratado y se colocaron en un vaso de precipitado de 250 mL, luego se añadió agua hasta cubrir la superficie con una lámina de 2 cm. Con ayuda de una probeta, se agregaron 10 mL de solución hexametáfosfato de sodio al 5 %. Posteriormente el vaso se colocó en una parrilla eléctrica y se añadió un agitador magnético, y por un tiempo de 30 minutos se dejó en agitación.

Al finalizar el tiempo de agitación, el contenido se transfirió a una probeta de 1000 mL, enjuagando el vaso de precipitado con ayuda de una piceta. Luego, se añadió agua destilada hasta alcanzar aproximadamente los 900 mL, se suspendió el suelo con un agitador manual durante un minuto.

A continuación, se tomaron las lecturas del hidrómetro a los 40 segundos junto con la temperatura. Se dejó reposar y después de 2 horas se tomó la segunda lectura del hidrómetro y nuevamente se registró la temperatura. Estos datos fueron anotados y posteriormente utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



**Figura 24:** Probetas con muestra de suelo en reposo para determinar la textura  
Fuente: Elaboración propia



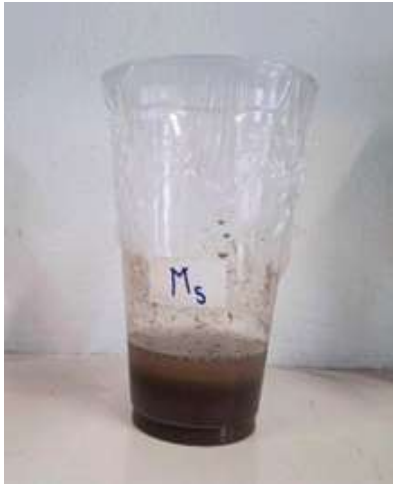
**Figura 25:** Lectura del hidrómetro a los 40 segundos  
Fuente: Elaboración propia

## **Determinación del porcentaje de saturación y pasta de saturación**

Para la determinación del porcentaje y pasta de saturación del suelo, se utilizó el método AS-17, descrito en la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Para iniciar, se utilizó un recipiente, cuyo peso era conocido, y se pesaron 100 g de suelo tamizado, los cuales fueron colocados en el recipiente. Posteriormente, se agregó agua destilada al suelo, mezclándolo cuidadosamente con una espátula, hasta alcanzar el punto de saturación.

Una vez que se logró la saturación, el recipiente se selló y se dejó en reposo por aproximadamente 48 horas, finalmente, el recipiente cerrado se almacenó para después obtener el extracto de saturación. Todos los datos obtenidos en este proceso fueron anotados y utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



***Figura 26:** Recipiente con muestra de suelo saturado en reposo*

*Fuente: Elaboración propia*

## **Obtención del extracto de saturación**

Para obtener el extracto de saturación, se siguió el método AS-16 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Después de un reposo de 48 horas de la pasta de saturación, se inició el proceso de extracción. Se utilizó un embudo Büchner conectado a un matraz Kitasato uniéndose con plastilina a fin de evitar pérdida de vacío. El matraz se conectó mediante una manguera a una bomba de vacío, y se colocó un papel filtro en el embudo para la filtración.

Luego, se vertió la pasta de saturación lentamente en el embudo para iniciar la extracción, finalmente el extracto obtenido se midió y se transfirió a frascos esterilizados, previamente etiquetados, los cuales fueron almacenados en el refrigerador para su uso en las siguientes determinaciones.



**Figura 27:** Proceso para la obtención del extracto de saturación  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 28:** Extracto de las muestras de saturación  
Fuente: Elaboración propia

## ***Determinaciones de las propiedades químicas del suelo***

### **Determinación de pH del suelo en agua**

Para determinar el pH del suelo en agua, se utilizó el método AS-02 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Se pesaron 10 g de suelo y se colocaron en un vaso de precipitado de 50 mL, después se le agregaron 20 mL de agua destilada al vaso con el suelo, la mezcla se agitó durante

30 minutos utilizando un agitador magnético sobre una parrilla eléctrica y se dejó en reposo por 15 minutos.

Previo a la medición del pH, se calibró el medidor de pH con soluciones reguladoras de pH 4.00, 7.00 y 10.00 asegurando enjuagar los electrodos con agua destilada antes de iniciar las lecturas de las muestras.

Finalmente, una vez calibrado el potenciómetro, se midió el pH de las muestras y se registraron los valores obtenidos.



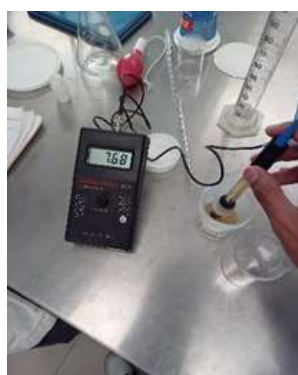
**Figura 29:** Determinando el pH del suelo en agua

Fuente: Elaboración propia

### **Determinación del pH en el extracto de saturación**

Para determinar el pH en el extracto de saturación, se utilizó el método AS-02 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Para esta determinación, se utilizó el extracto de saturación previamente obtenido. Antes de comenzar el análisis, se enjuaga el electrodo con agua destilada para asegurar su limpieza. Una vez limpio y calibrado, el electrodo se sumergió en el de extracto de saturación, cuidando que solo la parte del electrodo del potenciómetro quedará cubierto, finalmente se registraron las lecturas una vez que estas se estabilizaron.



**Figura 30:** Determinando el pH en el extracto de saturación

Fuente: Elaboración propia

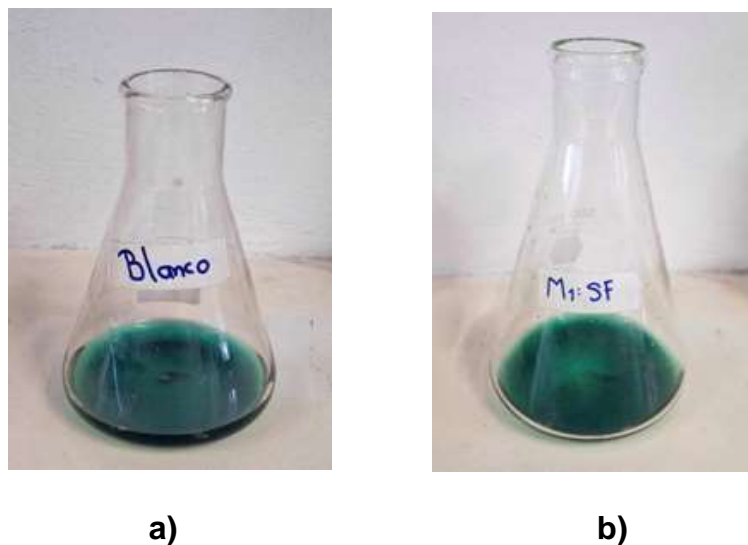
## Determinación del porcentaje de carbono y materia orgánicos

Para la determinación del porcentaje de carbono y materia orgánicos se realizó siguiendo el método AS-07 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

En el procedimiento, fue necesario preparar un blanco. Posteriormente, en un matraz Erlenmeyer de 500 mL, se colocaron 0.1 g de suelo previamente tamizado. A esta muestra se le añadieron exactamente 10 mL de solución de  $K_2Cr_2O_7$  1N usando una bureta, girando el matraz cuidadosamente para asegurar el contacto uniforme del reactivo con el suelo, después el matraz fue colocado sobre una tabla de madera dentro de una campana de extracción. Luego con una probeta, se agregaron lentamente 10 mL de  $H_2SO_4$  concentrado, girando nuevamente el matraz para facilitar la mezcla homogénea. Se dejó reposar durante 30 minutos sobre la tabla de madera y en la campana de extracción.

Transcurrido el tiempo de reposo, se añadieron 5 mL de  $H_3PO_4$  concentrado con una probeta. Posteriormente se le agregaron 3 gotas de indicador difenilamina.

Finalmente, la muestra se tituló con solución de sulfato ferroso 1M hasta que viro a verde claro. Todos los datos obtenidos en el procedimiento fueron registrados y utilizados para calcular el porcentaje de carbono orgánico y materia orgánica.



**Figura 31:** Determinación de carbono orgánico y materia orgánica

a) Blanco después de la titulación

b) Muestra de suelo después de la titulación

Fuente: Elaboración propia

## Determinación de conductividad eléctrica en el extracto de saturación

Para la determinación de la conductividad eléctrica se realizó siguiendo el método AS-18 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Previo al procedimiento, se limpió el conductímetro con agua destilada y se secó cuidadosamente. Una vez limpio, el equipo se colocó en una probeta con el extracto de saturación previamente obtenido.

Las mediciones se registraron cuando las lecturas se estabilizaron. Al finalizar, el conductímetro se enjuagó nuevamente con agua destilada y se secó para dejarlo listo para las siguientes determinaciones. Todos los datos obtenidos fueron registrados y utilizados para el análisis.



**Figura 32:** Conductímetro utilizado para determinar la conductividad eléctrica de las muestras de suelo  
Fuente: Elaboración propia.

## Determinación de carbonatos

Para la determinación de carbonatos del suelo se realizó siguiendo el método AS-29 de NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

El procedimiento se realizó en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, en el cual se pipetea 3 mL de una alícuota del extracto de saturación. Se añadieron 3 gotas de indicador fenolftaleína, sin embargo, no se observó ningún cambio de color a tonalidades rosadas, lo cual indicó la ausencia de carbonatos en la muestra. Por lo tanto, el valor de carbonatos se reportó como cero, y no fue necesario realizar una titulación.

La muestra fue reservada para su posterior análisis de bicarbonatos. Los datos fueron registrados y utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



**Figura 33:** Matracas con ausencia de carbonatos en el suelo  
Fuente: Elaboración propia

### Determinación de bicarbonatos

Para la determinación de bicarbonatos del suelo se realizó siguiendo el método AS-20 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

A la muestra obtenida tras la determinación de carbonatos se le añadieron 2 gotas de indicador naranjado de metilo, después se procedió a titular la muestra con solución de ácido sulfúrico 0.05 N hasta que se llegó al vire de color canela. Los datos obtenidos fueron registrados y utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



a)



b)

**Figura 34:** Determinación de bicarbonatos

a) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo forestal

b) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo agrícola

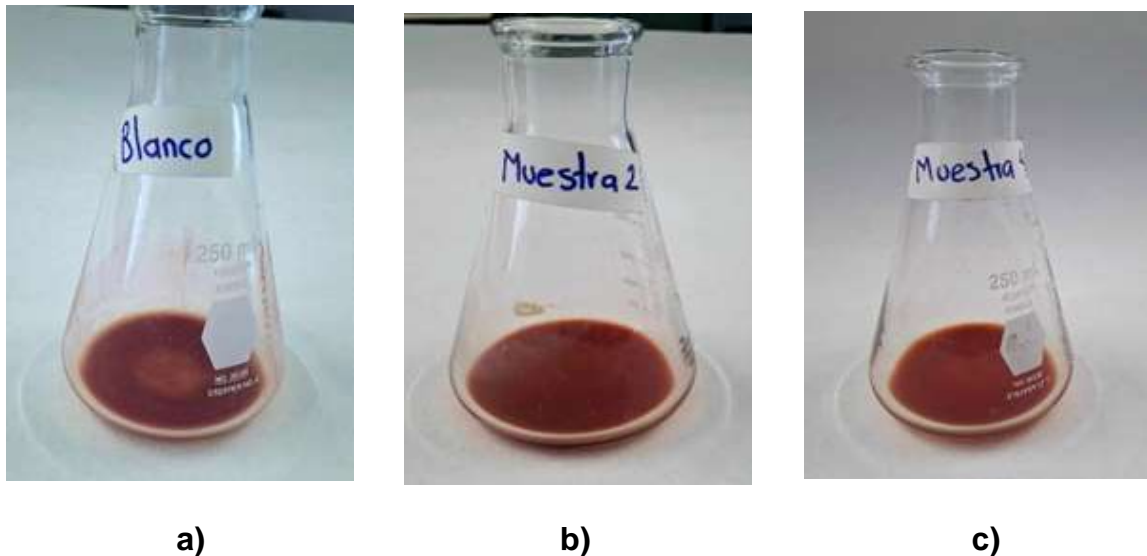
Fuente: Elaboración propia

## Determinación de cloruros

Para la determinación de cloruros del suelo se realizó siguiendo el método AS-20 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Para este análisis fue necesario correr un blanco, posteriormente se utilizó un matraz Erlenmeyer de 250 mL, en el cual se pipetea 3 mL de una alícuota del extracto de saturación. Posteriormente se le agregan 10 gotas de indicador de  $K_2CrO_4$  y se agita constantemente.

Finalmente, se tituló la muestra con solución de  $AgNO_3$  0.05 N hasta que viro, pasando de un color amarillo a rojo vinoso. Los datos obtenidos fueron registrados para realizar los cálculos correspondientes.



**Figura 35:** Determinación de cloruros

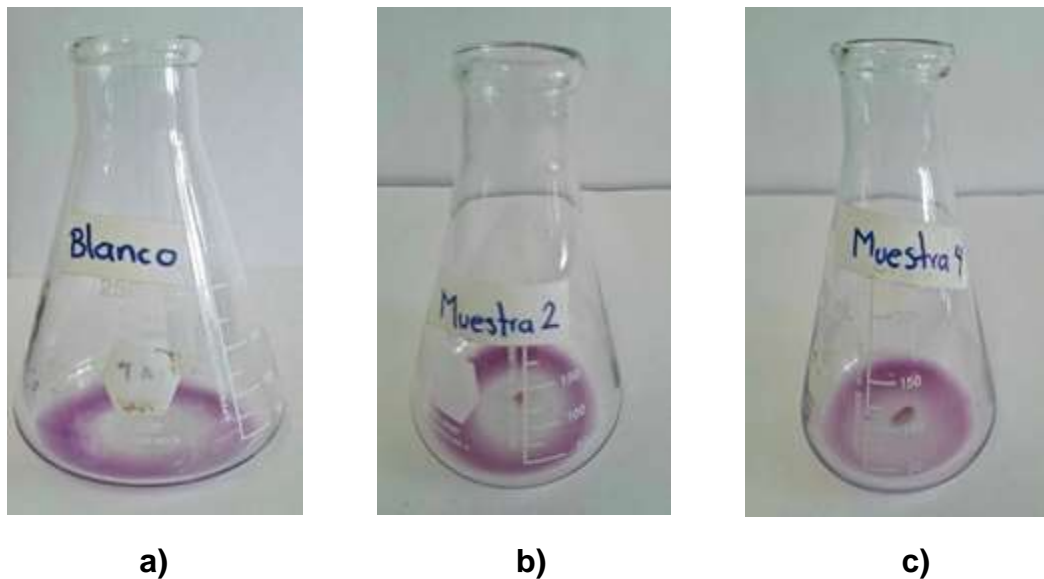
- a) Resultado final del proceso de titulación utilizando un blanco de referencia
- b) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo forestal
- c) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo agrícola

Fuente: Elaboración propia

## Determinación de calcio

Para la determinación del calcio se realizó siguiendo la metodología indicada en Soil Survey Laboratory Methods Manual. (Burt, 2004).

Para realizar este análisis, se comenzó preparando un blanco como referencia, posteriormente se utilizó un matraz Erlenmeyer de 250 mL, en el cual se pipetea 3 mL de una alícuota del extracto de saturación. Posteriormente se le agregaron 5 gotas de dietilditiocarbamato al 1 % y se le agregó también 1 gota de solución de hidróxido de sodio 4 N, manteniendo una agitación constante para asegurar la mezcla homogénea de los reactivos. Luego se le agregó 7 mg de murexida al matraz y se continuó mezclando. Finalmente se tituló con solución de EDTA de rosa hasta el punto final de color lavanda. La muestra fue reservada para su posterior análisis de magnesio. Los datos fueron registrados y utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



**Figura 36:** Determinación de calcio

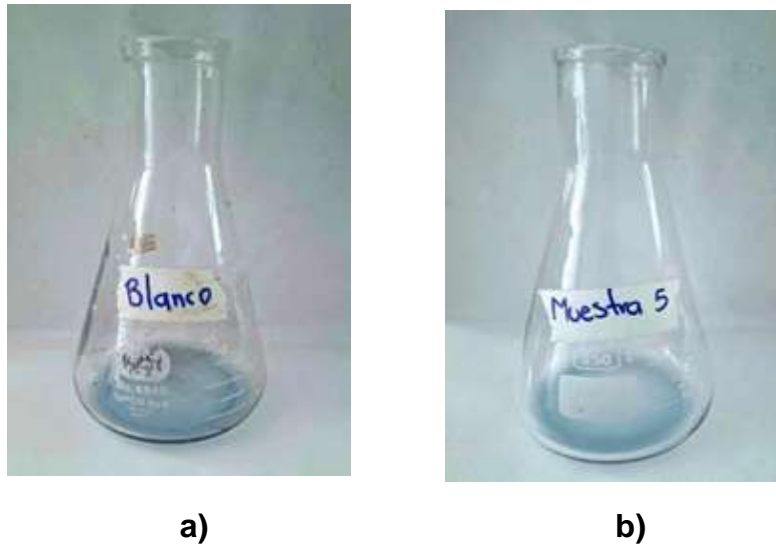
- a) Resultado final del proceso de titulación utilizando un blanco de referencia
  - b) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo forestal
  - c) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo agrícola
- Fuente: Elaboración propia

## Determinación de magnesio

Para la determinación de magnesio se realizó siguiendo la metodología indicada en Soil Survey Laboratory Methods Manual. (Burt, 2004).

A la muestra obtenida tras la determinación de calcio se le añadieron 3 gotas de HCl concentrado y se agitó hasta que la murexida se destruyó. Posteriormente se le agregaron 3 mL de solución buffer de  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $\text{NH}_4\text{OH}$ , y se continuó la agitación. Después se le agregó 1 gota de indicador negro de Eriocromo T.

Finalmente se tituló usando solución de EDTA al 0.1 N hasta que viró a un color azul claro. Todos los datos fueron registrados y utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



**Figura 37:** Determinación de magnesio

- a) Resultado final del proceso de titulación utilizando un blanco de referencia
- b) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo agrícola

Fuente: Elaboración propia

### **Determinación de acidez extraíble**

Para la determinación de acidez extraíble del suelo se realizó siguiendo el método AS-32 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (la NOM-021-SEMARNAT-2000).

Para realizar este análisis, se comenzó preparando un blanco como referencia. Después se pesaron 10 g de suelo previamente tamizado, los cuales se colocaron en un embudo con papel filtro. Posteriormente en un matraz Erlenmeyer de 250 mL se colocó el embudo con papel filtro y la muestra de suelo y se le agregaron 30 mL de solución BaCl<sub>2</sub>- TEA, permitiendo que la solución reaccionara con el suelo y se filtra.

Después de un tiempo de espera, cuando ya no se obtenía filtrado, se retiró el embudo con la muestra. Al extracto resultante se le agregaron 2 gotas de indicador rojo de metilo, y se tituló con una solución de HCl 1 N hasta que viro de amarillo a rojo.

La muestra de suelo en el embudo se conservó para su posterior utilización en la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Finalmente, todos los datos obtenidos fueron registrados y utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



a)

b)

c)

**Figura 38:** Determinación de acidez extraíble

- a) Resultado final del proceso de titulación utilizando un blanco de referencia
- b) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo forestal
- c) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo agrícola

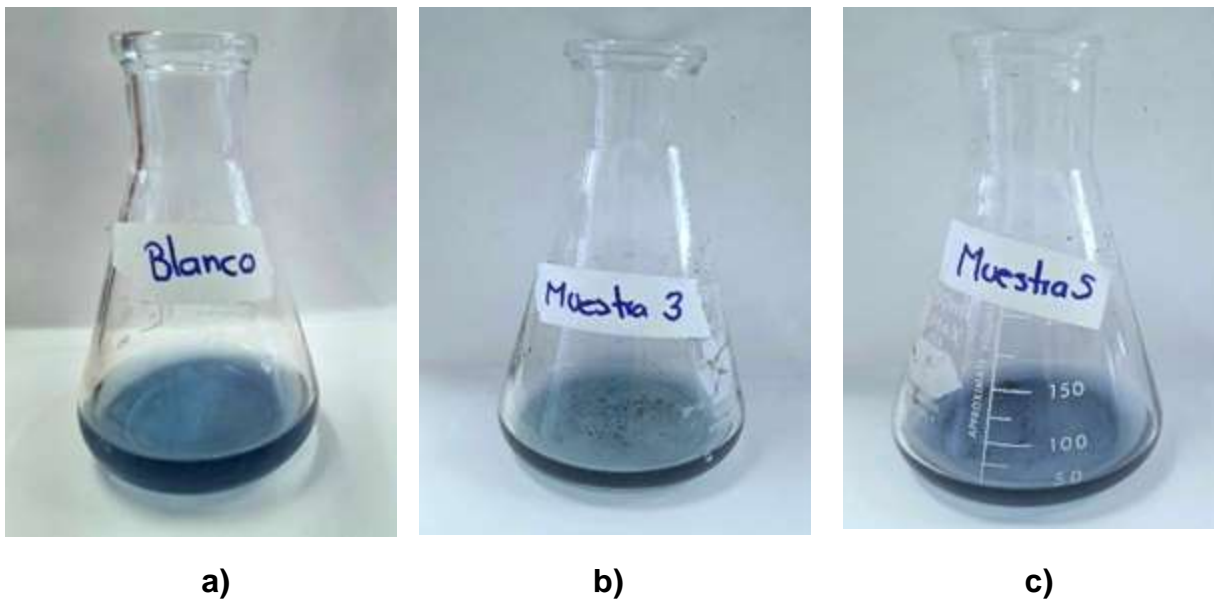
Fuente: Elaboración propia

### **Determinación de capacidad de intercambio catiónico**

Para la determinación de capacidad de intercambio catiónico se realizó siguiendo la metodología indicada en Soil Survey Laboratory Methods Manual (Burt, 2004).

Para este análisis, se utilizó el embudo con una muestra de suelo que se utilizó para la determinación de acidez extraíble y se hizo pasar agua desionizada por la muestra hasta el nivel del embudo y se dejó reposar durante un tiempo determinado hasta que toda el agua se filtró.

Posteriormente, se añadió a la muestra 20 mL de una solución de acetato de sodio 0.1 M dejándola reposar nuevamente hasta que el líquido se filtró por completo. Luego se retiró el embudo y se agregaron 5 mL de una solución buffer a la muestra, después se le agregó unas gotas de indicador negro de Eriocromo T. Finalmente se tituló con solución de EDTA hasta que vió de color rojo violeta a azul. Todos los datos obtenidos fueron registrados y utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



**Figura 39:** Determinación de capacidad de intercambio catiónico

- a) Resultado final del proceso de titulación utilizando un blanco de referencia
  - b) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo forestal
  - c) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo agrícola
- Fuente: Elaboración propia*

### **Determinación de nitrógeno total**

Para la determinación del nitrógeno total del suelo se realizó siguiendo el método AS-25 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Para realizar este análisis, se comenzó preparando un blanco como referencia. Se procedió a colocar 1g de suelo seco y previamente tamizado en un tubo de destilación micro Kjeldahl seco y limpio. Después se le agregó 1 d de mezcla de catalizadores y 5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado, se agitó un determinado tiempo hasta que se incorporaron los diferentes elementos. Los tubos fueron colocados y se pusieron a calentar en una unidad digestora por aproximadamente 2 horas. Completada esta etapa se le agregaron aproximadamente 10 mL de agua destilada para evitar una reacción violenta. Posteriormente se colocó el tubo en el destilador micro Kjeldahl y se le fueron añadiendo 15 mL de NaOH al 10 N, cuando se inició la destilación se utilizó un matraz Erlenmeyer que contenía 50 mL de H<sub>3</sub>BO<sub>4</sub> y 3 gotas de indicador Tashiro.

Finalmente se tituló con solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0.12 N, usando una bureta. Todos los datos obtenidos fueron registrados y utilizados para realizar los cálculos correspondientes.



**Figura 40:** Matracas con muestra de suelo, colocadas en la unidad digestora  
Fuente: Elaboración propia



**Figura 41:** Proceso de destilación  
Fuente: Elaboración propia



**a)**



**b)**

**Figura 42:** Determinación de nitrógeno total

- a) Resultado final del proceso de titulación utilizando un blanco de referencia
  - b) Resultado final obtenido tras la titulación de una muestra de suelo
- Fuente: Elaboración propia

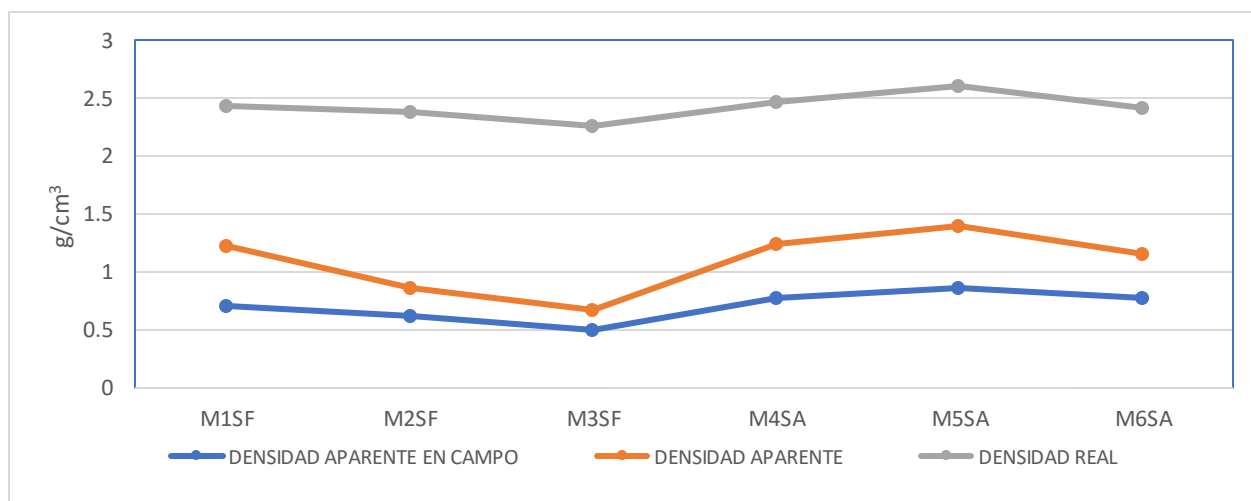
## CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis comparativo de las propiedades físicas y químicas de los suelos forestales y agrícolas.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten comparar las propiedades físicas y químicas de los suelos forestales y agrícolas bajo diferentes condiciones de manejo y uso. Estas comparaciones son clave para evaluar las hipótesis planteadas. A partir de las metodologías establecidas en la NOM-021-SEMARNAT-2000, y la metodología indicada en Soil Survey Laboratory Methods Manual, se analizaron parámetros relevantes como textura, densidad, pH y contenido de materia orgánica, carbonatos, bicarbonatos, calcio, magnesio entre otros. En esta sección se presentan y discuten los hallazgos obtenidos.

**Tabla 2.** Resultados obtenidos de la densidad aparente en campo, aparente y real.

| MUESTRAS DE SUELO | DENSIDAD APARENTE EN CAMPO g/cm <sup>3</sup> | DENSIDAD APARENTE g/cm <sup>3</sup> | DENSIDAD REAL g/cm <sup>3</sup> |
|-------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------|
| M <sub>1</sub> SF | 0.7034                                       | 1.23                                | 2.4386                          |
| M <sub>2</sub> SF | 0.6201                                       | 0.855                               | 2.3735                          |
| M <sub>3</sub> SF | 0.4916                                       | 0.665                               | 2.2577                          |
| M <sub>4</sub> SA | 0.7657                                       | 1.235                               | 2.4739                          |
| M <sub>5</sub> SA | 0.8587                                       | 1.4                                 | 2.5971                          |
| M <sub>6</sub> SA | 0.7722                                       | 1.155                               | 2.4089                          |



**Gráfico 1.** Comparación de los valores de la densidad aparente en campo, aparente y real entre los suelos forestales y suelos agrícolas.

Con base en los resultados obtenidos en la Tabla 2, se observa que los suelos forestales ( $M_1SF$ ,  $M_2SF$ ,  $M_3SF$ ) presentan una densidad aparente en campo significativamente más baja en comparación con los suelos agrícolas ( $M_4SA$ ,  $M_5SA$ ,  $M_6SA$ ). De manera similar, en cuanto a la densidad aparente, los suelos forestales tienden a registrar valores más bajos en comparación con los suelos agrícolas, con la excepción de la muestra  $M_1SF$ , que presenta un valor ligeramente más alto dentro de este grupo. Por otro lado, en los suelos agrícolas, predominan valores altos de densidad aparente, aunque la muestra  $M_6SA$  muestra un valor más bajo en comparación con las demás muestras agrícolas.

Esta diferencia se explica por el hecho de que los suelos agrícolas tienen menor materia orgánica que los que tienen vegetación natural, la materia orgánica propicia que la densidad aparente disminuya ya que ocupa mucho espacio (genera muchos poros) y pesa muy poco (Hillel, 1982). Por otra parte, las malas prácticas agrícolas incrementan considerablemente la densidad ya que van compactando el suelo (Jury and Horton, 2004).

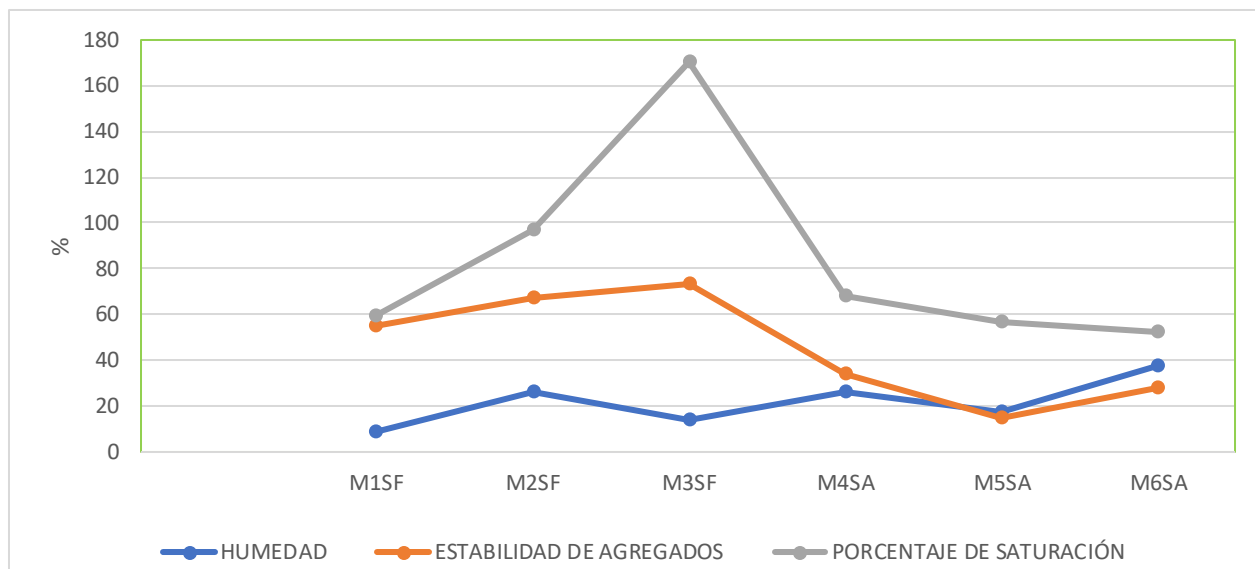
Asimismo los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las raíces, por el contrario, los valores altos de densidad aparente son propios de suelos compactos y poco porosos, con aireación deficiente e infiltración lenta del agua, lo cual puede provocar anegamiento, anoxia y que las raíces tengan dificultades para elongarse y penetrar hasta alcanzar el agua y los nutrientes necesarios. En estas condiciones, el desarrollo y crecimiento de las plantas es impedido o retardado consistentemente (Donoso, 1992).

En cuanto a la densidad real, los suelos forestales tienden a registrar valores más bajos en comparación con los suelos agrícolas, con la excepción de la muestra  $M_1SF$ , que presenta un valor un ligeramente alto dentro de este grupo. Por otro lado, en los suelos agrícolas, aunque predominan densidades reales altas, se identifica una excepción en la muestra  $M_6SA$ , que muestra un valor más bajo en comparación con las demás muestras agrícolas.

La densidad real, de las partículas densas del suelo, varía con la proporción de elementos constituyendo el suelo y en general está alrededor de 2,65 (FAO,2024). Por lo tanto, se puede afirmar que la baja densidad real de los suelos forestales se debe, en gran medida, a un alto contenido de materia orgánica y/o minerales de baja densidad, por lo tanto, son suelos ricos en materia orgánica, tendrán una mayor capacidad de retener agua y nutrientes, haciéndolos más fértiles. En contraste, la densidad real ligeramente más alta observada en los suelos agrícolas podría explicarse por su menor contenido de materia orgánica y la predominancia de minerales más densos, también suelen ser suelos más compactados.

**Tabla 3.** Resultados obtenidos de la humedad, estabilidad de agregados y porcentaje de saturación

| MUESTRAS DE SUELO | HUMEDAD % | ESTABILIDAD DE AGREGADOS % | PORCENTAJE DE SATURACIÓN % |
|-------------------|-----------|----------------------------|----------------------------|
| M <sub>1</sub> SF | 8.4788    | 54.8850                    | 59.09                      |
| M <sub>2</sub> SF | 25.9441   | 67.0542                    | 96.73                      |
| M <sub>3</sub> SF | 14.0712   | 72.9906                    | 169.86                     |
| M <sub>4</sub> SA | 26.2666   | 33.5629                    | 68.18                      |
| M <sub>5</sub> SA | 17.0893   | 14.8956                    | 56.34                      |
| M <sub>6</sub> SA | 37.6436   | 27.4977                    | 51.98                      |



**Gráfico 2.** Comparación de los valores de la humedad, estabilidad de agregados y porcentaje de saturación entre los suelos forestales y suelos agrícolas

A partir de los resultados obtenidos de la Tabla 3, se puede observar que la M<sub>1</sub>SF perteneciente a un suelo forestal presenta el % de humedad más bajo comparado con las muestras de los suelos agrícolas, esto está relacionado con el tipo de textura ya que esta muestra principalmente es de textura franco-arenosa, por lo tanto tiene buen drenaje y no retienen tanta agua, pero también influyó la temporada de muestreo ya que se realizó en una temporada seca, sin embargo la muestra M<sub>6</sub>SA perteneciente a un suelo agrícola, fue todo lo contrario tuvo un % de humedad más alto comparado con las muestras de los

suelos forestales, esto podría deberse al manejo agrícola, como el riego o una mayor compactación, que reduce la pérdida de agua.

Por otro lado, en los resultados obtenidos del % de estabilidad de agregados, se observa que los suelos forestales presentan una alta estabilidad de agregados destacando la M<sub>3</sub>SF, de lo contrario los suelos agrícolas tienen valores significativamente más bajos, principalmente la M<sub>5</sub>SA.

El uso agrícola impactó negativamente la estabilidad de los agregados del suelo, la remoción de la vegetación natural para cambiar el uso del suelo es una práctica que deteriora la estructura del suelo y afectan negativamente a la estabilidad de los agregados (Albaladejo et al., 1998; Reyes et al., 2002 y Sanano et al., 2005). Además, factores como la pérdida de materia orgánica, compactación del suelo, el impacto directo de gotas de lluvia en suelos descubiertos o con poca vegetación que los cubra, el uso excesivo de agroquímicos que afecta a los organismos beneficiosos, y la labranza intensiva contribuyen al debilitamiento de los agregados.

Por lo contrario, los suelos forestales mantienen una mayor estabilidad de agregados gracias a su cobertura vegetal ya que protege a los agregados de las gotas directas así el suelo. Esta estabilidad también está relacionada con una mejor porosidad, buen drenaje, disponibilidad de agua para las plantas, menor compactación, mayor cantidad de materia orgánica y mayor actividad biológica, que en conjunto favorecen al suelo más resiliente y estable.

Prosiguiendo con los resultados en cuanto al % de saturación, los suelos forestales fueron los que presentaron en general, valores más altos en comparación con los suelos agrícolas. Sin embargo, destaca la muestra M<sub>1</sub>SF cuyo valor fue un poco bajo dentro del grupo de suelos forestales. Por otro lado, en los suelos agrícolas, el porcentaje de saturación fue menor, a excepción muestra M<sub>4</sub>SA, que su valor fue un poco elevado

Es importante mencionar que la saturación se refiere al contenido de agua del suelo cuando prácticamente todos los espacios están llenos de agua. En los suelos bien drenados es un estado temporal ya que el exceso de agua drena de los poros grandes por influencia de la gravedad para ser reemplazada por aire (Shaxson y Barber, 2005). Es por eso que los suelos forestales en su mayoría tienen un porcentaje de saturación más elevado en comparación de los suelos agrícolas, por su alto contenido de materia orgánica y su mayor porosidad. El caso particular de la muestra M<sub>3</sub>SF, que presentó un porcentaje de saturación muy elevado (%169.86) se podría justificar por su alto contenido de materia orgánica, ya que algunos valores pueden ser hasta 150% para suelos muy arcillosos o con altos porcentajes de materia orgánica (Castellanos et al., 2000). Por lo contrario, los suelos agrícolas suelen tener valores más bajos de saturación debido a la disminución de la materia orgánica y a la compactación ocasionada por las prácticas agrícolas por ejemplo la labranza.

**Tabla 4.** Resultados obtenidos del color y COLE

| MUESTRAS DE SUELO      | COLOR                  |                            | COLE        |
|------------------------|------------------------|----------------------------|-------------|
|                        | SUELO SECO             | SUELO HÚMEDO               |             |
| <b>M<sub>1</sub>SF</b> | 10 Y/R 4/2             | 5 Y/R 3/1                  | 0.0402      |
|                        | Marrón grisáceo oscuro | Gris muy oscuro            |             |
| <b>M<sub>2</sub>SF</b> | 10 Y/R 3/2             | 5 Y/R 2.5/1                | 0.0574      |
|                        | Gris muy oscuro        | Negro                      |             |
| <b>M<sub>3</sub>SF</b> | 5 Y/R 3/1              | 5 Y/R 2.5/1                | 0.0172      |
|                        | Marrón muy oscuro      | Negro                      |             |
| <b>M<sub>4</sub>SA</b> | 10 Y/R 5/3             | 10 Y/R 2/2                 | 0.0232      |
|                        | Marrón                 | Marrón muy oscuro          |             |
| <b>M<sub>5</sub>SA</b> | 10 Y/R 6/3             | 10 Y/R 3/2                 | Sin grietas |
|                        | Marrón Palo            | Marrón grisáceo muy oscuro |             |
| <b>M<sub>6</sub>SA</b> | 10 Y/R 5/3             | 10 Y/R 2/1                 | 0.0517      |
|                        | Marrón                 | Negro                      |             |

Considerando los valores obtenidos de la Tabla 4, se observa que los suelos forestales tienden a presentar colores más oscuros en comparación de los suelos agrícolas, cuyos colores, por el contrario, fueron ligeramente más claros.

En el caso de los suelos forestales, los colores oscuros se justifican por la mayor cantidad de materia orgánica y generalmente suelen ser suelos más fértiles, también el color gris muy oscuro podría estar también muy relacionado con el material parental, por otro lado, los colores más claros observados en los suelos agrícolas podrían estar relacionados con una menor cantidad de materia orgánica. Así mismo, la compactación, que se empieza a evidenciar en estos suelos, puede influir en la reducción de la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, lo cual afecta su coloración.

**Tabla 5.** Grado de expansión-contracción según el coeficiente de extensibilidad lineal del suelo (COLE)

| Grado de expansión-contracción | COLE        |
|--------------------------------|-------------|
| BAJA                           | < 0,03      |
| MODERADA                       | 0,03 – 0,06 |
| ALTA                           | 0,06 – 0,09 |
| MUY ALTA                       | > 0,09      |

Adaptado de PENG *et al.*, (2007).

Continuando con los valores obtenidos en el coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), se puede observar que las muestras de suelo forestal (M<sub>1</sub>SF, M<sub>2</sub>SF) presentan un grado de expansión y contracción moderado, en comparación de los suelos agrícolas, a excepción de la muestra M<sub>3</sub>SF que presenta un valor un poco más bajo.

En cuanto a los suelos agrícolas (M<sub>4</sub>SA, M<sub>5</sub>SA) presentan un grado de expansión y contracción más bajo en comparación de las muestras de suelos forestales a excepción de la muestra M<sub>6</sub>SA que presenta el grado de expansión y contracción, moderado. Los datos obtenidos fueron interpretados de acuerdo con la Tabla 5.

Entonces se puede resumir que los suelos forestales suelen tener un mayor contenido de materia orgánica, lo que mejora la estabilidad de las arcillas y su capacidad de retención de agua y nutrientes. Sin embargo, no todos los suelos forestales tienen la misma cantidad de arcilla, como muestra el caso de M<sub>3</sub>SF.

De lo contrario, los suelos agrícolas suelen ser más perturbados debido a prácticas como el arado, la irrigación y la aplicación de fertilizantes, lo que puede afectar negativamente la estructura y el contenido de arcillas. También la falta de grietas o la inexistencia de estas podría deberse a un bajo contenido de materia orgánica e inicios de compactación, que no permite que el suelo se expanda adecuadamente. Sin embargo, la muestra M<sub>6</sub>SA sugiere que algunos suelos agrícolas todavía tienen características beneficiosas de retención de agua y nutrientes gracias a su contenido de arcilla.

**Tabla 6. Resultados obtenidos de la textura**

| TEXTURA           |         |        |           |                        |
|-------------------|---------|--------|-----------|------------------------|
| MUESTRAS DE SUELO | ARENA % | LIMO % | ARCILLA % | CLASE TEXTUAL          |
| M <sub>1</sub> SF | 65.2    | 18.56  | 16.24     | Franco-arenoso         |
| M <sub>2</sub> SF | 47.768  | 27.992 | 24.24     | Franco                 |
| M <sub>3</sub> SF | 56.5    | 19.21  | 24.29     | Franco-arcilla-arenoso |
| M <sub>4</sub> SA | 49.2    | 26.56  | 24.24     | Franco-arcilla-arenoso |
| M <sub>5</sub> SA | 68.568  | 15.192 | 16.24     | Franco-arenoso         |
| M <sub>6</sub> SA | 55.76   | 22.56  | 21.68     | Franco-arcilla-arenoso |

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 6, se puede observar que las muestras M<sub>1</sub>SF y M<sub>5</sub>SA presentaron la misma textura Franco-Arenoso. Sin embargo, aunque las texturas sean similares, el tipo de uso del suelo es un factor determinante. En el caso de los suelos protegidos por vegetación natural, como los suelos forestales, estos tienden a

ser más arenosos porque están menos erosionados que los agrícolas, la vegetación protege al suelo de la pérdida de partículas por lo que se podría decir que conservan la textura original del suelo. El dosel de la vegetación evita el impacto directo de las gotas de lluvias sobre el suelo limitando así el efecto erosivo, además los residuos orgánicos que están sobre la superficie de estos suelos evitan el escurrimiento y el arrastre de partículas, (Sanchez,2007) principalmente las de mayor tamaño como las arenas.

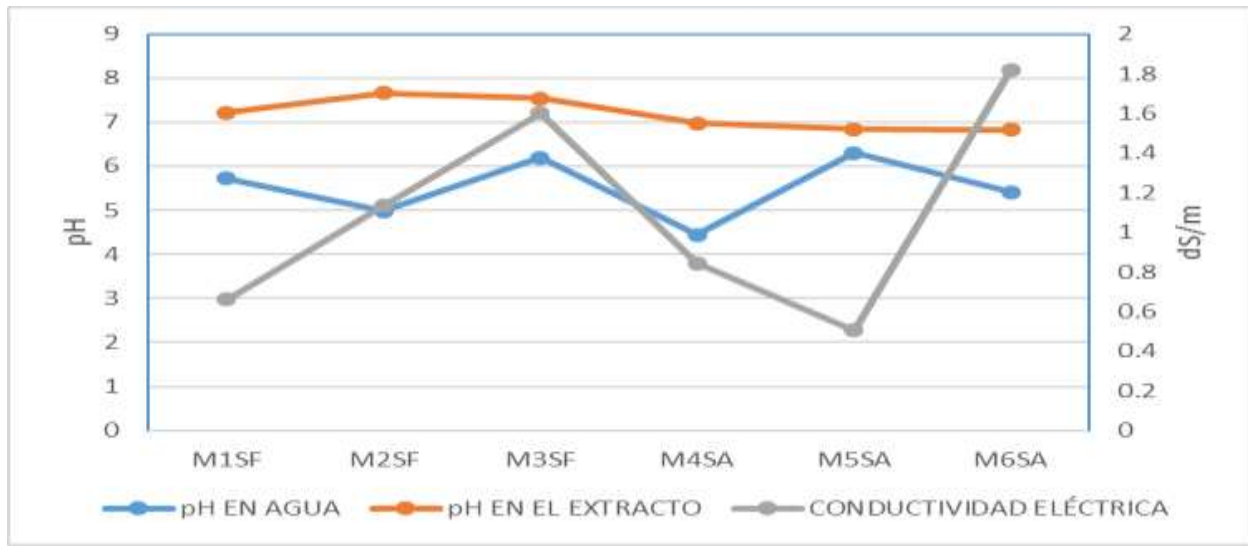
En contraste, los suelos agrícolas con la misma textura no presentan las mismas ventajas. A pesar de tener una textura Franco-Arenosa, presentan mala estructuración, buena aireación, muy alta permeabilidad y nula retención de agua (SEMARNAT,2010) y baja capacidad de retener nutrientes.

Por otro lado, la muestra M<sub>2</sub>SF con textura Franco, muestra una mejor distribución de las partículas, esta estructura equilibrada favorece la fertilidad aportada por los limos, adecuada retención de humedad aportada por las arcillas, esta condición puede contribuirse al aporte constante de materia orgánica, que mejora la estructura.

Finalmente, las muestras M<sub>3</sub>SF (suelo forestal), M<sub>4</sub>SA y M<sub>6</sub>SA (suelos agrícolas) presentaron una textura Franco-arcilloso-arenosa, lo que indica un equilibrio adecuado entre la capacidad de retención de agua, drenaje y aireación. Sin embargo, el uso del suelo influye en la distribución de sus componentes texturales. Los suelos agrícolas M<sub>4</sub>SA y M<sub>6</sub>SA, al estar expuestos a prácticas agrícolas y sin cobertura vegetal, son más susceptibles a la erosión y al escurrimiento, lo que genera una movilización de partículas provocando con esto mucha variación en la proporción de arenas, limos y arcillas (Sánchez, 2007).En contraste, el suelo forestal (M<sub>3</sub>SF), protegido por la vegetación, mantiene una distribución más estable de sus partículas, favoreciendo una estructura natural que mejora la infiltración y la retención de agua.

**Tabla 7.** Resultados obtenidos del pH en agua, pH en el extracto y conductividad eléctrica.

| MUESTRAS DE SUELO | pH EN AGUA | pH EN EL EXTRACTO | CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA |
|-------------------|------------|-------------------|-------------------------|
| M <sub>1</sub> SF | 4.724      | 7.22              | 0.66                    |
| M <sub>2</sub> SF | 4.988      | 7.655             | 1.135                   |
| M <sub>3</sub> SF | 6.19       | 7.535             | 1.6                     |
| M <sub>4</sub> SA | 4.448      | 6.98              | 0.845                   |
| M <sub>5</sub> SA | 6.306      | 6.845             | 0.505                   |
| M <sub>6</sub> SA | 5.417      | 6.82              | 1.815                   |



**Gráfico 3.** Comparación de los valores de pH en agua, pH en el extracto y conductividad eléctrica entre los suelos forestales y suelos agrícolas.

De acuerdo con los valores obtenidos de la Tabla 7, las muestras de suelo forestal (M<sub>1</sub>SF, M<sub>2</sub>SF, M<sub>3</sub>SF) presentaron un pH en agua fuertemente ácido, y moderadamente ácido en la muestra M<sub>3</sub>SF. En cuanto al pH en el extracto fue moderadamente alcalino, excepto M<sub>1</sub>SF, que fue neutro. Para las muestras agrícolas (M<sub>5</sub>SA, M<sub>6</sub>SA), el pH en agua fue moderadamente ácido y para la muestra M<sub>4</sub>SA fue fuertemente ácido, mientras que el pH en el extracto fue neutro. Esta clasificación fue de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000.

El pH es esencial en la química del suelo y factor primario de su fertilidad, la función del pH va más allá del simple suministro de nutrientes para la planta; otros procesos como las tasas de intemperismo y humificación, así como la actividad de poblaciones microbianas también pueden verse afectados (Yang y Zhang, 2015; Neina, 2019), con consecuentes afectaciones en la salud y crecimiento de especies arbóreas (Pregitzer *et al.*, 2016).

En los suelos forestales, los valores de pH obtenidos (4.724, 4.988 ,6.199) reflejan condiciones ácidas a ligeramente ácidas, lo cual es común en suelos forestales debido a factores naturales. Estudios indican que un pH entre 5.2 y 7.0 es óptimo para el desarrollo de especies forestales, ya que dentro de este rango los árboles no presentan síntomas de toxicidad por metales pesados y disponen de una reserva adecuada de macro y micronutrientes (Amacher *et al.*, 2007; Costello *et al.*, 2003). No obstante, niveles inferiores como los registrados pueden deber a la mineralización de la materia orgánica, la presencia de aluminio y a las acículas de los árboles del género *Pinus sp.*, las cuales son potencialmente acidificantes debido a la producción de ácidos orgánicos y H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

que influyen en la formación de complejos Al-humus (Martínez-Cruz et al., 2002). Aunque estas condiciones pueden limitar el fósforo y zinc, son características que muchas especies forestales han aprendido a tolerar (Samson, 2017).

En contraste, para suelos agrícolas el pH óptimo debe variar entre 6.5 y 7.0 para obtener los mejores rendimientos y la mayor productividad (Prasad and Power, 1997). El pH del suelo influye en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, es decir, este factor puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados (Benton, 2003). La acidificación en suelos agrícolas podría deberse a las malas prácticas agrícolas como uso excesivo de fertilizantes, riego excesivo, labranza constante o incluso características del material parental del suelo.

Finalmente, en el pH del extracto los valores fueron más altos en los suelos forestales (7.22, 7.655, 7.535) considerándose desde moderadamente alcalino a neutro y en los suelos agrícolas sus valores fueron neutros (6.98, 6.845, 6.83) esto podría deberse a que el pH del extracto, al haber una mayor cantidad de agua que permite liberar estas bases desde las partículas del suelo, el resultado es un pH más alto (menos ácido). Por eso el pH en el extracto suele ser mayor que el pH en agua, ya que se facilita la presencia de más bases que neutralizan la acidez.

Continuando con la determinación de la conductividad eléctrica, según la clasificación de la NOM-021-SEMARNAT, los suelos forestales estudiados (M<sub>2</sub>SF, M<sub>3</sub>SF) presentan una salinidad muy ligeramente salina, mientras que el M<sub>1</sub>SF muestra efectos despreciables de salinidad. Por otro lado, en los suelos agrícolas (M<sub>4</sub>SA, M<sub>5</sub>SA) también se observan efectos despreciables de salinidad, excepto en el M<sub>6</sub>SA, que presenta una salinidad muy ligeramente salina.

Es importante destacar que, aunque todos los suelos contienen sales esenciales para el crecimiento de las plantas, un exceso de estas puede inhibir su desarrollo. Este exceso puede ser de origen natural pero también puede ser resultado del uso y un mal manejo del suelo (USDA, 1999).

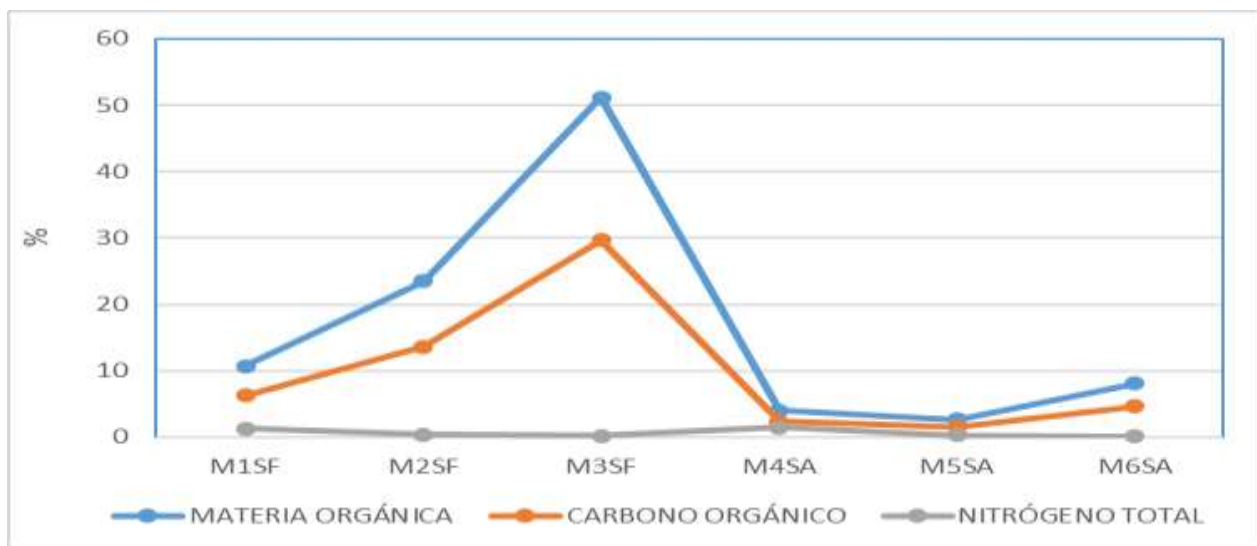
En los suelos forestales, la presencia moderada de sales puede atribuirse a factores naturales como el material de origen o los factores formadores del suelo (Cremonia y Enriquez, 2020) así como por la descomposición continua de la materia orgánica.

Por el contrario, en los suelos agrícolas, las malas prácticas de manejo pueden incrementar la salinidad. La aplicación inadecuada de fertilizantes, especialmente en exceso, acelera los procesos de nitrificación, incrementando la concentración de sales en el suelo (Cherlinka, 2023). Asimismo, el riego inadecuado contribuye al ascenso de capas freáticas salinas, especialmente cuando el agua de riego es rica en sales, incrementando así la salinidad del terreno (Courel, 2019).

Este análisis evidencia que los suelos forestales presentan una salinidad más controlada debido a sus procesos naturales y ausencia de intervención humana, mientras que los suelos agrícolas son más susceptibles a la salinización por prácticas inadecuadas.

**Tabla 8.** Resultados obtenidos la materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno total.

| MUESTRAS DE SUELO | MATERIA ORGÁNICA % | CARBONO ORGÁNICO % | NITRÓGENO TOTAL % |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| M <sub>1</sub> SF | 10.757             | 6.24               | 1.260             |
| M <sub>2</sub> SF | 23.532             | 13.65              | 0.420             |
| M <sub>3</sub> SF | 51.099             | 29.64              | 0.168             |
| M <sub>4</sub> SA | 4.034              | 2.34               | 1.429             |
| M <sub>5</sub> SA | 2.689              | 1.56               | 0.252             |
| M <sub>6</sub> SA | 8.068              | 4.68               | 0.084             |



**Gráfico 4.** Comparación de los valores de materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno total entre los suelos forestales y suelos agrícolas

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los suelos forestales (M<sub>1</sub>SF, M<sub>2</sub>SF, M<sub>3</sub>SF) presentaron valores muy altos de materia orgánica y carbono orgánico, mientras que los suelos agrícolas (M<sub>4</sub>SA, M<sub>5</sub>SA, M<sub>6</sub>SA) mostraron resultados más variables, desde valores medios hasta muy altos. A pesar de esta variabilidad, los suelos forestales presentaron valores significativamente superiores en ambas propiedades.

La materia orgánica es clave para mantener la productividad biológica, la calidad ambiental y la salud de las plantas (Mao et al., 2014). Junto con el carbono orgánico, constituye uno de los principales componentes del suelo y es una fuente energética fundamental para los microorganismos (Boul et al., 2011).

Aunque los valores de materia orgánica en los suelos agrícolas podrían estar dentro de rangos aceptables, comienzan a reflejar una disminución significativa. Esta reducción puede explicarse por la eliminación de la cobertura vegetal, que expone la superficie del suelo a los agentes erosivos y reduce el aporte de restos vegetales al suelo (Sanchez, 2007). Esta disminución afecta negativamente la fertilidad del suelo, la disminución de la capacidad de retención de humedad y la caída de la productividad del suelo. Estos efectos a menudo exigen un mayor uso de fertilizantes para mantener los rendimientos agrícolas (Harrington, 1996; Govaerts et al., 2006; Alonso y Aguirre, 2011). La pérdida de materia orgánica es uno de los principales problemas que enfrentan los agricultores al labrar la tierra (Crovetto, 1996).

En cuanto al porcentaje de carbono orgánico, los valores obtenidos en esta investigación se alinean con los de Pinos (2022), quien sugiere que los suelos agrícolas presentan una cantidad de carbono orgánico que no es óptima, reflejando la intervención humana en el suelo. Factores como el uso excesivo de fertilizantes, la compactación del suelo, el riego excesivo y la baja retención de humedad contribuyen a la reducción de este componente esencial (Pinos, 2022).

Por otro lado, los suelos forestales (M<sub>1</sub>SF, M<sub>2</sub>SF, M<sub>3</sub>SF) presentaron niveles de materia orgánica más altos (10.75 %, 23.53 %, 51.09 %) que los suelos agrícolas, lo que refleja su menor intervención humana. Este mayor contenido de materia orgánica mejora la capacidad del suelo para resistir la degradación y el estrés, lo que aumenta su resiliencia. Además, la materia orgánica contribuye a la protección del suelo al fijar contaminantes (tanto orgánicos como minerales), disminuyendo su toxicidad (FAO, 2002). En suelos arenosos, la materia orgánica ayuda a retener agua, mientras que en suelos arcillosos mejora la porosidad, favoreciendo el drenaje (Hernández et al., 2014). Además, participa en la agregación y mejora de propiedades físicas como la densidad aparente, la porosidad, la capacidad de retención de humedad y la aireación, que favorecen el desarrollo radicular y la actividad biológica (Tejada et al., 2006; Aguilar-Benítez et al., 2012; Moreno et al., 2016). También mejora diversas propiedades químicas, tales como el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes esenciales (Thangaranjan et al., 2013).

Finalmente, la concentración de carbono en suelos forestales puede alcanzar hasta el 50% en suelos ricos en materia orgánica (Trettin & Jurgensen, 2003). Los valores obtenidos en esta investigación para suelos forestales (29.64%) y suelos agrícolas (máximo 4.68%) muestran una clara diferencia, evidenciando el impacto negativo de las actividades agrícolas sobre la calidad del suelo.

De acuerdo con la clasificación establecida por la NOM-021-SEMARNAT-2000, los valores del nitrógeno total obtenidos fueron los siguientes: en los suelos forestales (M<sub>1</sub>SF, M<sub>2</sub>SF, M<sub>3</sub>SF), los niveles variaron de ricos a extremadamente ricos, mientras que en los suelos agrícolas (M<sub>4</sub>SA, M<sub>5</sub>SA, M<sub>6</sub>SA) los valores oscilaron entre medianamente pobres y extremadamente ricos.

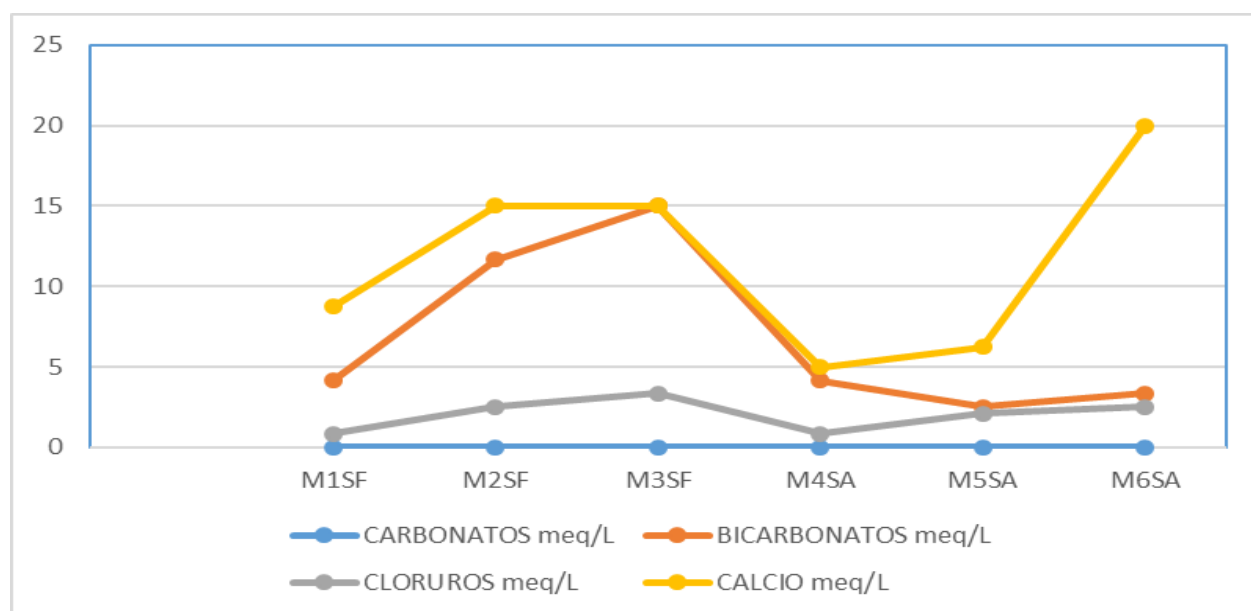
El elevado contenido de nitrógeno en los suelos forestales se atribuye principalmente a la alta concentración de materia orgánica aproximadamente el 95% del nitrógeno total del suelo proviene de la materia orgánica y su mineralización (Philippot y Germon, 2005). Suelos ricos en materia orgánica contienen naturalmente mayores cantidades de nitrógeno (Fassbender, 1993). Además, la cubierta vegetal tiene un papel clave en las concentraciones de nitrógeno, ya que fomenta la actividad microbiana. Ewing et al. (2007) afirman que una mayor cobertura vegetal favorece comunidades microbianas más activas, que reciclan nitrógeno de manera eficiente. Los microorganismos descomponen la materia orgánica, liberando nitrógeno disponible para las plantas y funcionando como reservorios de nutrientes, evitando su pérdida por lixiviación o volatilización.

En contraste, los suelos agrícolas presentaron valores de nitrógeno más variables. Los niveles elevados pueden estar relacionados con la aplicación de estiércol y fertilizantes nitrogenados, los cuales son ampliamente utilizados en la agricultura debido a la insuficiencia del nitrógeno disponible en el suelo para satisfacer las necesidades de los cultivos (Follett, 2001; Keeney y Hatfield, 2001). Sin embargo, los niveles bajos podrían deberse a la remoción de nitrógeno por las cosechas, la lixiviación o la pérdida de formas inorgánicas de nitrógeno hacia la atmósfera bajo ciertas condiciones (Galloway et al., 2004).

Aunque la fertilización nitrogenada ha mejorado los rendimientos agrícolas (Kopittke et al., 2019), se ha demostrado que dosis excesivas de nitrógeno disminuyen su eficiencia de aprovechamiento (Lu et al., 2019). Esto genera mayores pérdidas del nutriente, contaminación ambiental (He et al., 2022) y costos de producción más elevados (Cassim et al., 2022).

**Tabla 9.** Resultados obtenidos de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, calcio y magnesio.

| MUESTRAS DE SUELO | CARBONATOS meq/L | BICARBONATOS meq/L | CLORUROS meq/L | CALCIO meq/L | MAGNESIO meq/100 g |
|-------------------|------------------|--------------------|----------------|--------------|--------------------|
| M <sub>1</sub> SF | 0                | 4.166              | 0.833          | 8.75         | 0.57               |
| M <sub>2</sub> SF | 0                | 11.666             | 2.5            | 15           | 1.1625             |
| M <sub>3</sub> SF | 0                | 15                 | 3.333          | 15           | 0.55               |
| M <sub>4</sub> SA | 0                | 4.166              | 0.833          | 5            | 0.76125            |
| M <sub>5</sub> SA | 0                | 2.5                | 2.083          | 6.25         | 0.7175             |
| M <sub>6</sub> SA | 0                | 3.333              | 2.5            | 20           | 0.645              |



**Gráfico 5.** Comparación de los valores de carbonatos, bicarbonatos, cloruros y calcio entre los suelos forestales y suelos agrícolas

Continuando con los resultados obtenidos de la Tabla 9, los suelos forestales y suelos agrícolas mostraron valores de 0 en carbonatos. Esto podría justificarse por la naturaleza del suelo predominante en la región, ya que se trata de un Phaeozem, un tipo de suelo que, debido a su elevada humedad, impide que se acumulen los carbonatos y sales (Ibáñez, Manríquez, 2015).

La distribución y desplazamiento de los carbonatos podría estar también relacionado con las lluvias ya que se podría considerar las pérdidas de carbonatos por lixiviación. Por otro lado, Andrades et al (2015) explica que los carbonatos y el pH están altamente relacionados, si el suelo es ácido no existe presencia de carbonatos.

Sin embargo, los análisis muestran la presencia de bicarbonatos, con valores significativamente altos en los suelos forestales en comparación con los suelos agrícolas.

En los suelos forestales al tener una mayor cantidad de acumulación de materia orgánica se generan más bicarbonatos, es decir al descomponerse la materia orgánica por la acción de los microorganismos del suelo, se libera dióxido de carbono que se transforma fácilmente en bicarbonato (Castellanos, 2014). De manera opuesta, ocurre en los suelos agrícolas, ya que la labranza y la pérdida de materia orgánica disminuyen la producción de CO<sub>2</sub> en el suelo, afectando la formación de bicarbonatos y el uso de fertilizantes también son contribuyentes.

Con base en los valores propuestos por Castellanos (2004), las muestras de suelo forestal y agrícola se clasifican en categorías de concentración de cloruros que van de "muy bajo" a "moderadamente bajo". Estos niveles no representan un riesgo alarmante, dado que los cloruros son nutrientes esenciales para las plantas, aunque requeridos en pequeñas cantidades, ya que el cloruro desempeña funciones clave como el metabolismo vegetal: regulador estomático, osmótico, enzimático y del pH celular, productor de oxígeno en la fotosíntesis, estabilizador del potencial de membrana, participante en la turgencia celular, y en la resistencia o tolerancia a enfermedades (Xu et al., 2000; White y Broadley, 2001; Wenrong et al., 2010).

Desde una perspectiva agrícola, estos niveles de cloruros son beneficiosos, ya que una concentración adecuada favorece el desarrollo vegetal sin riesgo de toxicidad. Por el contrario, una concentración excesiva de cloruros puede inducir toxicidad, provocar la acumulación de sales, y reducir la disponibilidad de nutrientes, afectando el rendimiento agrícola (Fageria, 2001).

Las concentraciones de calcio en los suelos forestales y agrícolas de la región de estudio presentan variaciones significativas. Los suelos forestales (M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>) mostraron niveles altos de calcio, con concentraciones de 8.75, 15 y 15 meq/L respectivamente. En contraste, los suelos agrícolas (M<sub>4</sub>, M<sub>5</sub>, M<sub>6</sub>) presentaron niveles diversos: 5 y 6.25 meq/L, considerados bajos, y 20 meq/L, un nivel alto. Esta clasificación fue de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Según Barber (1995), el contenido de calcio depende del material parental, el grado de meteorización y la aplicación de enmiendas. Este nutriente puede ser lixiviado, adsorbido por el complejo coloidal del suelo o reprecipitarse como compuestos secundarios. En los suelos forestales, el calcio también se encuentra combinado con materia orgánica y ácidos húmicos, lo que contribuye a su estabilidad y disponibilidad (Navarro & Navarro, 2003).

El suelo predominante en la región es el Phaeozem, caracterizado por su alto contenido de iones de calcio que se unen a las partículas del suelo, formando una estructura bien agregada y altamente permeable (Ibáñez & Manríquez, 2015). Esta característica, junto con la ausencia de intervención humana, podría explicar las concentraciones consistentemente altas de calcio en los suelos forestales, permitiendo un equilibrio natural en la dinámica de nutrientes.

En los suelos agrícolas, la dinámica del calcio es más variable. Las muestras M<sub>4</sub>SA y M<sub>5</sub>SA, con niveles bajos de calcio, podrían ser el resultado de la lixiviación provocada por el riego constante y el consumo continuo de cultivos. Las deficiencias de calcio afectan negativamente el desarrollo vegetal, manifestándose en hojas pequeñas, deformes y cloróticas, raíces negras y podridas, así como un desarrollo deficiente de frutos (Cadenas, 2011).

Finalmente, la muestra M<sub>6</sub>SA, con una concentración alta de calcio (20 meq/L), podría atribuirse tanto a la aplicación de fertilizantes como a las características naturales del suelo, dado su origen y material parental.

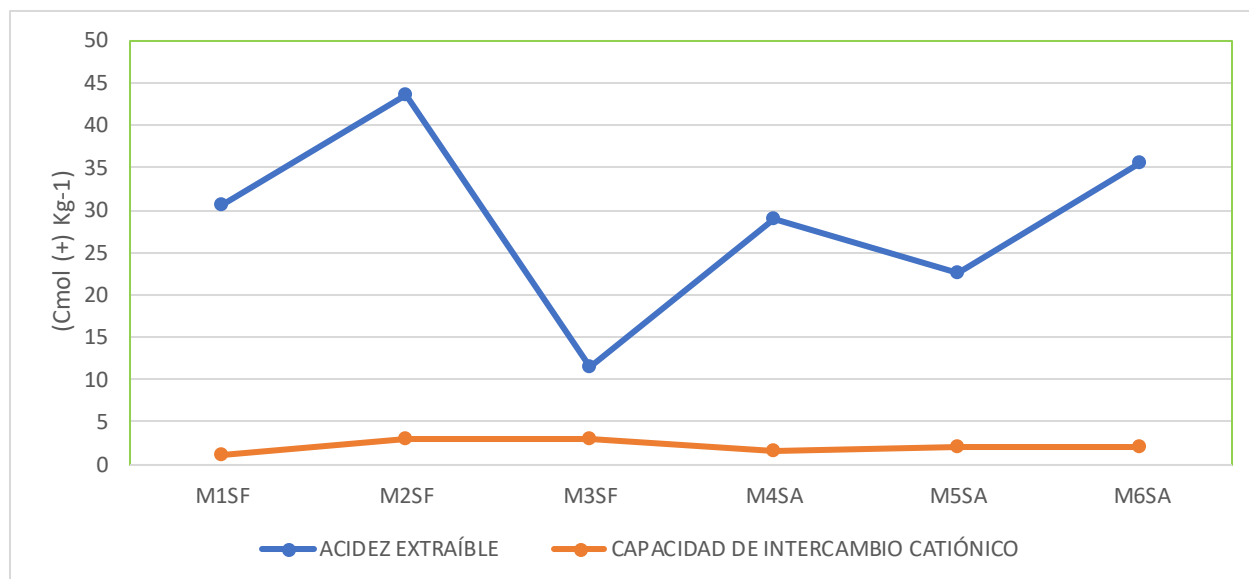
Los resultados obtenidos para las muestras de suelos forestales y agrícolas indicaron que las concentraciones de magnesio fueron clasificadas como “bajas” según los criterios establecidos por la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Las concentraciones de Mg en el complejo de cambio varían según el material parental, tipo de arcilla, la textura, presencia de otros cationes, la acidez, la lluvia, extracción por los cultivos y los aportes vía fertilización y enclavamiento. En este sentido, las deficiencias de Mg tienden a ocurrir cuando los suelos son ácidos, arenosos, altamente lavados y con baja Capacidad de Intercambio Catiónico–CIC; (Havlin et al., 1999). Las pérdidas de Mg en el suelo se pueden dar por la lixiviación, la absorción de los microorganismos, poca retención de cationes del suelo, y la precipitación por minerales secundarios y/o por una fertilización poco frecuente o ineficaz (Cakmak & M. Yazici, 2010).

El magnesio es el elemento menos abundante en el suelo que el calcio. Los principales síntomas asociados a la deficiencia de Mg en plantas son: retraso en el crecimiento y tallos delgados y largos. El Mg es móvil en la planta, se trasloca desde las hojas más viejas a las más jóvenes, por ello, las hojas jóvenes no se ven afectadas. Se desarrolla una clorosis (amarillamiento del tejido foliar) intervenal de color amarillo claro en la zona media de las hojas viejas que avanza hacia la punta y la base de las hojas. Bajo condiciones de deficiencia severa de Mg, la clorosis evolucionará a franjas color café (como óxido en las hojas viejas), posteriormente, tanto las puntas como los márgenes de las hojas se volverán café oscuro y se necrosarán causando la muerte prematura de las células del tejido foliar (Vistoso & Martínez ,2020).

**Tabla 10.** Resultados obtenidos de Acidez extraíble y capacidad de intercambio catiónico.

| MUESTRAS DE SUELO | ACIDEZ EXTRAÍBLE<br>(Cmol (+) Kg <sup>-1</sup> ) | CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICOC<br>(Cmol (+) Kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|--|---|
| M <sub>1</sub> SF | 30.5   | 1   |
| M <sub>2</sub> SF | 43.5   | 3   |
| M <sub>3</sub> SF | 11.5   | 3   |
| M <sub>4</sub> SA | 29   | 1.5   |
| M <sub>5</sub> SA | 22.5   | 2   |
| M <sub>6</sub> SA | 35.5   | 2   |



**Gráfico 6.** Comparación de los valores de acidez extraíble y capacidad de intercambio catiónico entre los suelos forestales y suelos agrícolas

Según Bertsch (2003a), valores superiores a 0.5 cmol (+)/L de acidez pueden resultar perjudiciales para el crecimiento de la mayoría de las plantas. En nuestras muestras de suelos forestales y agrícolas, los valores registrados superan este límite, lo cual podría deberse a diversos factores.

Las principales fuentes que contribuyen al desarrollo de la acidez en los suelos incluyen:

1. Materia orgánica (MO): Su descomposición libera ácidos orgánicos.

2. Minerales de aluminio-silicato y aluminio intercambiable ( $Al^{3+}$ ): Estos contribuyen a la acidificación del suelo.
3. Disminución de cationes básicos ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ): Ocurre por extracción en los cultivos y lixiviación.
4. Descomposición de residuos orgánicos: Libera compuestos ácidos
5. Aplicación de fertilizantes con fuentes amoniacales: Aumenta la acidez del suelo. (Espinosa, 1996).

Es importante destacar que, aunque la acidez en los suelos forestales suele ser un fenómeno natural, en los suelos agrícolas esta condición se intensifica debido a la intervención humana, como el manejo inadecuado de fertilizantes y la remoción continua de nutrientes básicos.

De acuerdo con los valores obtenidos, la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de los suelos forestales y agrícolas evaluados se clasifica como muy baja, según los criterios de la NOM-021-SEMARNAT-2000. Estos suelos presentan valores inferiores a  $5\text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ , lo que indica una baja capacidad para retener y suministrar nutrientes a las plantas.

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es un indicador clave de la fertilidad del suelo, ya que refleja su habilidad para retener cationes esenciales como  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$ . Factores como la textura del suelo, el tipo de arcilla y el contenido de materia orgánica influyen directamente en este parámetro (Blanco, 2003). En general, una CIC baja sugiere suelos pobres en materia orgánica o con una predominancia de texturas arenosas. Esto limita la retención de nutrientes, aumentando el riesgo de lixiviación y disminuyendo la fertilidad (FAO, 2015).

Los suelos forestales presentan valores ligeramente más altos ( $M_2SF$  y  $M_3SF$  con  $3\text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ) que los suelos agrícolas, lo que podría atribuirse a la presencia de materia orgánica en el horizonte superior debido a la acumulación de hojarasca y menor intervención humana. Sin embargo, estos valores siguen siendo bajos, posiblemente podría atribuirse a la baja actividad de arcillas

En cuanto a los suelos agrícolas, muestran valores consistentes pero igualmente bajos (entre  $1.5$  y  $2\text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ). La constante alteración de sus propiedades por la aplicación de fertilizantes químicos y enmiendas, junto con la absorción de cationes por las plantas y los procesos de lixiviación, reducen rápidamente la concentración de estos nutrientes en la solución del suelo, afectando el balance nutricional del sustrato edáfico (Blanco, 2003).

## CONCLUSIONES

El análisis comparativo de los suelos forestales y agrícolas en la localidad de Santa Catalina Tepanapa, Tochimilco, Puebla, evidenció diferencias significativas en sus propiedades físicas y químicas, lo que confirma que las prácticas agrícolas tienen un impacto considerable en la calidad del suelo. Los resultados obtenidos reflejan cómo el uso intensivo del suelo agrícola, a lo largo de aproximadamente 15 años, ha generado cambios que afectan tanto su estructura como su composición química, provocando signos de degradación y pérdida de fertilidad.

Las propiedades que mostraron las diferencias más notables entre los suelos forestales y agrícolas fueron la densidad aparente, densidad real, estabilidad de agregados, porcentaje de saturación, color, materia orgánica, carbono orgánico, bicarbonatos y calcio. Estos parámetros pueden considerarse como los más vulnerables al deterioro causado por las malas prácticas agrícolas, como la labranza intensiva, la aplicación de fertilizantes químicos y la falta de cobertura vegetal.

En cuanto a las propiedades físicas, los suelos forestales presentaron una menor densidad aparente y mayor estabilidad de agregados, lo que les confiere una mejor capacidad de retención de agua, mayor porosidad y resistencia a la erosión. Por el contrario, los suelos agrícolas mostraron signos de compactación superficial, que puede atribuirse a la manipulación constante del suelo, el arado de animales, la reducción de materia orgánica y la ausencia de cobertura protectora. Además, el color también reflejó diferencias claras: los suelos forestales presentaron tonalidades más oscuras debido a su mayor contenido de materia orgánica, mientras que los suelos agrícolas exhibieron colores más claros, indicando una pérdida significativa de materia orgánica y nutrientes esenciales.

En lo que respecta a las propiedades químicas, los suelos forestales presentaron mayores concentraciones de materia orgánica y carbono orgánico, lo que favorece su fertilidad y su capacidad de retener y liberar nutrientes de forma equilibrada. Por otro lado, los suelos agrícolas mostraron una disminución de estos elementos, lo que puede atribuirse a la extracción continua de nutrientes por los cultivos y a la pérdida de materia orgánica a causa de la labranza y la erosión. El pH también mostró diferencias significativas: mientras que los suelos forestales tuvieron una tendencia hacia la alcalinidad, los suelos agrícolas presentaron un pH más ácido, probablemente debido al uso prolongado de fertilizantes químicos y a la lixiviación de cationes básicos.

El contenido de bicarbonatos fue superior en los suelos forestales, lo que se relaciona con el proceso natural de descomposición de materia orgánica y la actividad microbiana, factores que favorecen la acumulación de estos compuestos. En cambio, los suelos agrícolas mostraron menores niveles de bicarbonatos, lo que indica que las prácticas de labranza y la pérdida de materia orgánica afectan negativamente la capacidad del suelo para mantener un equilibrio químico adecuado. De manera similar, el calcio presentó valores más altos en los suelos forestales, lo que sugiere un aporte constante de este mineral a partir del material parental y los procesos de meteorización. Por el contrario, los suelos agrícolas mostraron bajas concentraciones de calcio, lo que podría estar relacionado con la lixiviación provocada por el riego constante y el agotamiento del suelo debido al cultivo intensivo.

Estos hallazgos confirman la hipótesis alternativa de que las prácticas agrícolas alteran significativamente las propiedades físicas y químicas del suelo, disminuyendo su calidad en comparación con los suelos forestales, que permanecen en condiciones naturales. La evidencia obtenida muestra que, aunque los suelos agrícolas de la zona han sido utilizados durante aproximadamente 15 años, los signos de degradación ya comienzan a ser visibles, destacándose la pérdida de materia orgánica, la acidificación del pH y el inicio de procesos de compactación.

Dada la importancia del suelo como recurso fundamental para la producción de alimentos y el equilibrio ecológico, resulta indispensable promover la implementación de buenas prácticas agrícolas que minimicen su degradación. Entre las estrategias más efectivas se encuentran: la rotación de cultivos, el uso de abonos orgánicos, la reducción de la labranza intensiva y la incorporación de cobertura vegetal para proteger la estructura del suelo y conservar sus nutrientes. Además, es fundamental concientizar a la sociedad y a los agricultores sobre el funcionamiento del suelo y la necesidad de gestionarlo de manera sostenible para garantizar su productividad a largo plazo y preservar los servicios ecosistémicos esenciales.

En conclusión, este estudio destaca cómo las prácticas agrícolas inadecuadas impactan negativamente la calidad del suelo, provocando cambios físicos y químicos que aceleran su deterioro. La adopción de estrategias de manejo sostenible no solo permitirá recuperar la fertilidad del suelo, sino que también contribuirá a mitigar los efectos de la degradación y a asegurar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas para las futuras generaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar B., G., C. B. Peña V., J. R. García N., P. Ramírez V., S. G. Benedicto V., y J. D. Molina G. 2012. Rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en relación con la concentración de vermicompost y déficit de humedad en el sustrato. *Agrociencia* 46: 37-50.
2. Albaladejo, J; M. Martínez; A. Roldan. 1998. Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in semiarid environment. *Soil use and management* 14: 1-5.
3. Alonso Báez, M. y F. J. Aguirre M. 2011 Efecto de labranza de conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana* 29: 113-121.
4. Amacher, M. C., K. P. O'Neil, and C. H. Perry. 2007. Soil vital signs: A new soil quality index (SQI) for assessing forest soil health. Res. Pap. RMRS-RP-65WWW. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO, USA. doi: <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-65>.
5. Amudson, R., A. A. Berche, J.W. Hopmans, C. Olson, A. E. Sztein y D. L. Sparks. 2015. Soil and human security in the 21st century. *Science* 348 (6235): 1261071-1 - 1261071-6.
6. ANÓNIMO, 1988. Manual de fertilidad de suelos. Potash & Phosphate Institute. Georgia. USA, 85 p.
7. Arévalo, G., C. Gauggel. 2014. Manual de prácticas. Curso de manejo de suelos y nutrición vegetal. Zamorano, Honduras, 3ra edición. p 71
8. Arrieche I., Ruiz M., León M. 2013. Interferencia de cloruros en la determinación del carbono orgánico en suelos agrícolas *Multiciencias*, vol. 13, núm. 4, pp. 381-388 Universidad del Zulia Punto Fijo, Venezuela
9. Arshad, M.A., B. Lowery, and B. Grossman. 1996. Physical tests for monitoring soil quality. P. 123-142. In: J. W. Doran and A. J. Jones (eds.) *Methods for assessing soil quality*. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI.
10. Aznar-Sánchez, J. A., Piquer-Rodríguez, M., Velasco-Muñoz, J. F., & Manzano-Agugliaro, F. 2019. Worldwide research trends on sustainable land use in agriculture. *Land Use Policy*, 87, 104069. [10.1016/j.landusepol.2019.104069](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104069)
11. Barbaro, L. A., M. A., Karlanian, y D. A. Mata. 2019. Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los Sustratos para Plantas. INTA. Argentina. 11 p. Disponible en: <https://bit.ly/2J6sqrw>
12. Barber, S.A. 1995. Soil nutrient bioavailability; a mechanistic approach. John Wiley y Sons. New York. 414 p.
13. Barbier, E.B. 1997. The economic determinants of land degradation in developing countries. *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.*, pp. 891-899, [10.1098/rstb.1997.0068](https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0068)
14. Barioglio, C. F. 2013. Diccionario para las Ciencias Agropecuarias: Vol. Edición 2013 revisada. Editorial Brujas.

15. Barton. A. M. 1994. Gradient analysis of relationships among fire. Environment and vegetation in a southwestern USA mountain range, *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 121:251-265
16. Bastida, F., Zsolnay, A., Hernandez, T., Garcia, C. 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*, 147 (3-4), pp. 159-171
17. Baumann, K., Schöning, I., Schrupf, M., Ellerbrock, R.H., Leinweber, P. 2016. Rapid assessment of soil organic matter: Soil color analysis and Fourier transform infrared spectroscopy. *Geoderma*, 278, pp. 49-57
18. Bembibre, C. 2011. Definición de Suelo Agrícola. <https://significado.com/suelo-agricola/>
19. Benton, J. J. Jr. 2003. *Agronomic handbook. Management of crops, soils, and their fertility*. CRC PRESS. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C. USA. 450 p.
20. Benton, J. J. Jr. 2003. *Agronomic handbook. Management of crops, soils, and their fertility*. CRC PRESS. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C. USA. 450 p.
21. Bertsch F. 2003a. Fortalezas y debilidades del análisis de suelos como herramienta de diagnóstico en la nutrición de los cultivos. ACCS, CIA, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 8 p
22. Blanco Sandoval, J.O. 2003. Manejo Integral de Suelos con Énfasis en el Cultivo del Arroz. <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/jspui/bitstream/11348/4185/1/Manejo%20de%20suelos%20para%20arroz.pdf>
23. Boardman, J. Poesen, J. Soil erosion in Europe. <https://doi.bibliotecabuap.elogim.com/10.1002/0470859202> (2006).
24. Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A. M., Gessesse, G. D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., Panagos, P. 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *The Science Of The Total Environment*, 780, 146494. [10.1016/j.scitotenv.2021.146494](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494)
25. Boul, S. W., R. J. Southars, R. C. Graham, and P. A. McDaniel. 2011. *Soil genesis and classification*. Wiley-Blackwell. Ames, IA, USA. Print ISBN: 9780813807690.
26. Boyle, J. R., & Powers, R. F. 2013. *Forest Soils. Reference Module In Earth Systems And Environmental Science*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124095489051691>
27. Buckman, H. O. y Brady N.C. 1977. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Ed.Montaner y Simon, S.A. Barcelona.

28. Bunemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z.G., Creamer, R.E., De Deyn, G., Brussaard, L. 2018. Soil quality - a critical review. *Soil Biol. Biochem.*, 120, pp. 105-125, [10.1016/j.soilbio.2018.01.030](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030)
29. Burt, R. 2004. Soil survey laboratory methods manual (Version 4.0). Soil Survey Investigations Report No. 42. USDA.
30. Cadenas, M. (2011). Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://www.lamolina.edu.pe/>
31. Cakmak, I., & M. Yazici, A. 2010. Magnesium: A forgotten element in crop production. *Better Crops*, 94(2), 23-25
32. Caravaca F., Lax A., Albaladejo J. 1999. Organic matter, nutrient contents and cation exchange capacity in fine fractions from semiarid calcareous soils. *Geoderma*, 93: 161–176.
33. Casanova, E. 2005. *Introducción a la ciencia del suelo* (2.<sup>a</sup> ed.). Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=k4FXuHW1ozQC&oi=fnd&pg=PA9&dq=carbonatos+en+el+suelo&ots=7ltkM5HSIr&sig=nBYFKMejPqBK8Km6cgar1j\\_ljlg8#v=onepage&q=carbonatos%20en%20el%20suelo&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=k4FXuHW1ozQC&oi=fnd&pg=PA9&dq=carbonatos+en+el+suelo&ots=7ltkM5HSIr&sig=nBYFKMejPqBK8Km6cgar1j_ljlg8#v=onepage&q=carbonatos%20en%20el%20suelo&f=false)
34. Cassim B. M. A. R., M. R. Besen, W. D. Kachinski, C. R. Macon, J. H. V. de Almeida Junior, R. Sakurada, and M. A. Batista (2022) Nitrogen fertilizers technologies for corn in two yield environments in South Brazil. *Plants* 11:1890, <https://doi.org/10.3390/plants11141890>
35. Castellanos, J. Z. 2014. Acidez del Suelo y su Corrección. Hojas Técnicas de Fertilab, México. 4 p.
36. Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle B. y A. Aguilar S. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2<sup>a</sup> edición. INTAGRI. México. 201 p.
37. Castellanos. 2004. ¿Por qué analizar la solución del suelo?. Intagri.
38. Castillo, C. 2012. Importancia de la Fertilidad Química del Suelo Agrícola. En: HANNA Instruments.
39. Cecillon, L., Barthès, B., Gomez, C., Ertlen, D., Génot, V., Hedde, M., Stevens, A., Brun, J. 2009. Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Eur. J. Soil Sci.*, 60 (5), pp. 770-784, [10.1111/j.1365-2389.2009.01178.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01178.x)
40. Centeno, F. (2022). Nitrogeno Disponible en el Suelo. <https://www.fertilab.com.mx/blog/207-nitrogeno-disponible-en-el-suelo/>
41. Chartres, C. 1987. Australian's land resources at risk. pp. 7-26. *In*: A. Chisholm, and R. Dumsday (ed.). Land degradation problems and policies. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
42. Chen, S. K., C. A. Edwards and S. Subler. 2001b. Effects of the fungicides Benomyl, Captan and Chorothalonil on soil microbial activity and nitrogen dynamics in laboratory incubations. *Soil Biol. Biochem.* 33: 1971-1980.

43. Cherlinka, V. 2023. Salinidad del suelo: causas, efectos y soluciones. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/salinidad-del-suelo/>
44. CIMMYT. 2016. Los suelos ácidos y medidas para corregirlos. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. <https://idp.cimmyt.org/los-suelos-acidos-y-medidas-para-corregirlos/>
45. Commegna, M. A.; Aguirre, M. E.; Santamaría, R. M. 2005. Recuperación natural de la estructura en argiudoles bajo siembra directa RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, vol. 34, núm. 1, abril, pp. 71 - 83 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Buenos Aires, Argentina
46. Conti, M.E. 1998. Principios de edafología con énfasis en suelos argentinos. Buenos Aires, Argentina, Distribución Orientación Gráfica Editora S.R.L.: 312-313.
47. Costello, L. R., E. J. Perry, N. F. Matheny, J. M. Henry, and P. M. Geisel. 2003. Abiotic disorders of landscape plants. A diagnostic guide. UC Agriculture and Natural Resources. Oakland, CA, USA. ISBN: 1879906589.
48. Courel, G. 2019. Suelos salinos y sódicos. Tucumán: Facultad de Agronomía y Zootecnia Universidad Nacional de Tucumán.
49. Cremonia, M. V., & Enriquez, A. S. 2020. Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. <https://core.ac.uk/download/pdf/335290789.pdf>
50. Crovetto, C. 1996. Stubble over the soil. The vital role of the plant residue in soil management to improve soil quality. Special Publication 19. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
51. Davis, A.G., Huggins, D.R., Reganold, J.P. Linking Soil Health and Ecological Resilience to Achieve Agricultural Sustainability. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 21 2023, pp. 131-139, 10.1002/fee.2594
52. Dike, S., & Apte, S. 2024. Impact of Microplastics on Strength Parameters of Clayey, Sandy, Silty soil: a Comparative assessment. *Science Of The Total Environment*, 946(174161). <https://sciencedirect.bibliotecabuap.elogim.com/science/article/pii/S0048969724043092>
53. Donoso Zegers, C. 1992. Ecología forestal. Editorial Universitaria, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile
54. Dörner, J., Schroeren, V., Dec, D. y Horn, R. 2009. Effect of Land Use on Physical Properties of a Volcanic Soil in South Chile. ISTRO 18th Triennial Conference proceeding, June 15-19. Izmir, Turkey
55. Dregne, H. E. 2002. Land degradation in the drylands. *Arid Land Res. Manage.* 16: 99-132.
56. Drobniak, T., Greiner, L., Keller, A., Gret-Regamey, A. 2018. Soil quality indicators - From soil functions to ecosystem services. *Ecol. Indic.*, 94, pp. 151-169

57. Duiker, S. W., F. E. Rhoton, J. Torrent, N. E. Smeck, and R. Lal. 2003. Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 606-611.
58. Escadafal, R. 1993. Remote sensing of soil color: principles and applications. *Remote Sens. Rev.*, 7 (3-4), pp. 261-279
59. Espinosa, J. Acidez y Encalado de los Suelos. Quito (Ecuador): Ed. INPOFOS, 1996.- pp. 1-21.
60. Ewing, S. A., Southard, R. J., Macalady, J. L., Hartshorn, A. S., & Johnson, M. J. 2007. Soil microbial fingerprints, carbon, and nitrogen in a Mojave Desert creosote-bush ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 71(2), 469-475. doi: 10.2136/sssaj2005.0283
61. Fageria, V. D. 2001. Nutrient interactions in crop plants. *J. Plant Nutr* 24: 1269-1290.
62. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2015. Levantamiento de suelos "Propiedades Químicas". Portal de Suelos FAO. <http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-desuelos/propiedades-del-suelo/propiedades-quimicas/es/>
63. FAO. 1996. ECOLOGÍA Y ENSEÑANZA RURAL. Nociones ambientales básicas para profesores rurales y extensionistas. <https://www.fao.org/4/w1309s/w1309s00.htm#TopOfPage>
64. FAO. 2002. Captura de Carbono en los Suelos para un Mejor Manejo de la Tierra. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/4/y2779s/y2779s00.htm#Contents>
65. FAO. 2015. Los bosques y suelos forestales contribuyen de manera esencial a la producción agrícola y a la seguridad alimentaria mundial. Año Internacional de los Suelos 2015. <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>
66. FAO. 2021. ¿Qué es el pH del suelo? Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e434293f-c9d1-4585-a799-b7c9107ea64e/content>
67. FAO. 2024. Definiciones | Portal de Suelos de la FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
68. FAO. 2024. Propiedades físicas del suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/#:~:text=La%20densidad%20real%2C%20de%20las,part%C3%ADcula s%20granulares%20como%20la%20arena.>
69. FAO. 2017. *Simposio Internacional sobre el Carbono Orgánico del Suelo Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura.*

<https://www.fao.org/about/meetings/soil-organic-carbon-symposium/key-messages/es/>

70. Fassbender, H. W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2da edición. Serie de materiales de enseñanza (no. 29). Turrialba, Costa Rica. 491 p.
71. Finch, H., G.P.F. 2014. Lane, soil and soil management in Lockhart & Wiseman's Crop Husbandry Including Grassland (Ninth Edition).
72. Fitz Patrick, E. A. 1996. *Introducción a la ciencia de los suelos*. México: Trillas.
73. Follett, R. 2001. Nitrogen transformation and transport processes. In: Follett, R.; Hatfield, J. eds. Nitrogen in the environment: Sources, problems and management. Elsevier Science, The Netherlands. p. 17-44.
74. Foth H.D. 1987. Fundamentos de la Ciencia del Suelo. Compañía editorial Continental, S.A. de C.V. 433p.
75. Galloway, JN; Dentener, F. J; Capone, DG; Boyer, EW; Howarth, RW y Seitzinger, S. Pág. 2004. Ciclos del nitrógeno: pasado, presente y futuro. Biogeoquímica. 70(2):153-226 (PDF) *Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales*. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/349964840\\_Urea\\_NBPT\\_an\\_alternative\\_in\\_the\\_nitrogen\\_fertilization\\_of\\_annual\\_crops](https://www.researchgate.net/publication/349964840_Urea_NBPT_an_alternative_in_the_nitrogen_fertilization_of_annual_crops)
76. Gleick, P. H., H. Cooley, and M. Morikawa. 2010. The world's water 2008-2009: The biennial report on freshwater resources. Island Press. Washington, DC, USA.
77. Gomez, C., Le Bissonnais, Y., Annabi, M., Bahri, H., Raclot, D. 2013. Laboratory Vis-NIR spectroscopy as an alternative method for estimating the soil aggregate stability indexes of Mediterranean soils. *Geoderma*, 209, pp. 86-97, [10.1016/j.geoderma.2013.06.002](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.002)
78. Govaerts, B., K. D. Sayre, and J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Tillage Res.* 87: 163-174
79. Graetz, H. A., 1997. *Suelos y Fertilización*. Traducido por: F. Luna Orozco. Trillas. México. 80 p.
80. Grossman, R.H., Brasher, B.R., Franzmeier, D.P., Walker, J.L. 1968. Linear extensibility as calculated from natural clod bulk density measurements. *Soil Sci. Soc. Am.* 32. pp 570-573.
81. Hanawalt, R. B. and R. H. Whittaker. 1977. Altitudinal patterns of Na.K.Ca. and Mg in soils and plants in the San Jacinto Mountains, California. *Soil Science*
82. Harrington, L. 1996. Diversity by design: Conserving biological diversity through more productive and sustainable agroecosystems. CIMMYT Natural Resource Group. Presented at Biodiversity and Sustainable Agriculture, a workshop arranged by the Swedish Scientific Council on Biological Diversity. Ekenas, Sweden.
83. Hartemink, A. E., & McBRATNEY, A. 2008. A soil science renaissance. *Geoderma*, 148(2), 123-129

84. Havlin, J. L.; Beaton, J.D.; Tisdale, S.L.; Nelson, W.L. 1999. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6. ed. Upper Saddle River (Estados Unidos), Prentice Hall. 499 p.
85. He S. G., R. Ma, N. N. Wang, S. Wang, T. X. Li and Z. C. Zheng 2022. Comparison of nitrogen losses by runoff from two different cultivating patterns in sloping farmland with yellow soil during maize growth in Southwest China. *Journal of Integrative Agriculture* 21:222-234, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63496-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63496-7)
86. Hernández, T., C. Chocano, J. Moreno, and C. García. 2014. Towards a more sustainable fertilization: Combined use of compost and inorganic fertilization for tomato cultivation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 196: 178-184.
87. Hillel, D. 1982. *Introduction to Soil Physics*. Academic Press. U.K. pp: 364
88. Honorato, R. (2000). *Manual de Edafología*. México: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A de C.V.
89. Ibáñez, J. J., & Manríquez Cosío, F. J. 2015. Curso básico: Tipos de suelos del mundo, geografía de suelos y megaedafología.
90. INEGI. 2009. Prontuario de Información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Tochimilco, Puebla. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>.
91. INEGI. 2019. Encuesta Nacional Agropecuaria 2019. México. 58. IPCC., 2019. Intergovernmental Panel on Climate Change Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
92. INEGI. Compendio de información geográfica municipal 2010. Tochimilco, Puebla. 2010
93. Jackson, M. L., 1964. Análisis químico de suelos (Traducido por J. Beltrán). Ediciones Omega, S. A. Barcelona, España. 662 p.
94. Jansen, B.; Nierop, K. G. J.; Verstraten, M. 2005. Mechanisms controlling the mobility of dissolved organic matter, aluminium and iron in podzol B horizons. *European Journal of Soil Science*. 56: 537-550.
95. Jarquín S. A., Salgado G. S., Palma L. D. J., Camacho C. W., Guerreto P. A. 2011. Analysis of total nitrogen in tropical soils with near-infrared spectroscopy (NIRS) and chemometrics. *Agrociencia* Vol. 15 No. 6.
96. Jenks, M. A. y Hasegawa, P. M. 2005. *Plant Abiotic Stress*. India. Blackwell Publishing Ltd, p. 270.
97. Johnson, C. E. 2002. Cation exchange properties of acid forest soils of the northeastern USA. *European Journal of Soil Science*. 53: 271-282.
98. Juhos, K., Czigány, S., Madarász, B., Ladányi M. 2019. Interpretation of soil quality indicators for land suitability assessment – A multivariate approach for Central European arable soils. *Ecol. Indic.*, 99, pp. 261-272, [10.1016/j.ecolind.2018.11.063](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.063)

99. Jury, W and Horton, R. 2004. Soil physics. 6<sup>th</sup> edition. Ed. John Wiley and Sons, Inc. USA. pp: 370.
100. Kass, D. 1979. *Fertilidad de suelos*. Editorial Universidad Estatal a Distancia.
101. Keeney, D.; Hatfield, J. 2001. The nitrogen cycle, historical perspective and current, and potential future concerns. In: Follett, R.; Hatfield, J. eds. Nitrogen in the environment: Sources, problems and management. Elsevier Science, The Netherlands. p. 3-6.
102. Khasi, Z., Askari, M. S., Amanifar, S., Moravej, K. 2024. Assessing soil structural quality as an indicator of productivity under semi-arid climate. *Soil Tillage Res.*, 236, Article 105945, [10.1016/j.still.2023.105945](https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105945)
103. Kopittke P. M., N. W. Menzies, P. Wang, B. A. McKenna and E. Lombi. 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International* 132:105078, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
104. Lal, R. 2006. Encyclopedia of soil science. CRC Press, 1923 pp.
105. Lal, R. 2005. Erosión del suelo y dinámica del carbono. *Soil Tillage Res.*, 81 (2), pp. 137-142, [10.1016/j.still.2004.09.002](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.002)
106. Lal, R. 1993. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil Tillage Res*, 27, pp. 1-8, [10.1016/0167-1987\(93\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90059-X)
107. Lefèvre, C., Rekik, F., Alcántara, V. y Wieses, L. 2017. Carbono Orgánico del suelo el potencial oculto. Roma, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
108. Loeppert, R.H. & Suarez, D.L. 1996. Carbonate and gypsum. Publications from USDA-ARS, UNL Faculty 504. Soil Survey Staff. 2014
109. López Báez, W., R. Reynoso-Santos, J. López-Martínez, B. Villar-Sánchez, R. Camas-Gómez y J. García-Santiago. 2019. Caracterización físico-química de suelos cultivados con maíz en Villaflores, Chiapas. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 10: 897-910. doi: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1764>.
110. López, M. y H. Estrada. 2015. Propiedades del suelo. *Bioagrociencias* 8(1):3-11
111. Lu C., J. Zhang, P. Cao and J. L. Hatfield 2019. Are we getting better in using nitrogen?: variations in nitrogen use efficiency of two cereal crops across the United States. *Earth's Future* 7:939-952, <https://doi.org/10.1029/2019EF001155>
112. Lu, H., Chen, X., Ma, K., Zhou, S., Yi, J., Qi, Y., Hao, J., Chen, F., Wen, X. 2024. Soil health assessment under different soil and irrigation types in the agro-pastoral ecotone of northern China. *Catena*, 235, Article 107655, [10.1016/j.catena.2023.107655](https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107655)
113. Malo D.D., Schumacher T.E., Doolittle J.J. 2005. Longterm cultivation impacts on selected soil properties in the northern Great Plains. *Soil and Tillage Research*, 81: 277–291.
114. Mamabolo, M., Gaigher, R., Pryke, J.S. 2024. Conventional agricultural management negatively affects soil fauna abundance, soil physicochemical

- quality and multifunctionality. *Pedobiologia*, 104, Article 150961, [10.1016/j.pedobi.2024.150961](https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150961)
115. Mao, X., Sun, J., Shaghaleh, H., Jiang, X., Yu, H., Zhai, S., y Hamoud, Y.A. 2023 Environmental assessment of soils and crops based on heavy metal risk analysis in Southeastern China. *Agronomy*, 13 (4), p. 1107
  116. Mao, Y., S. Sang, S. Liu, and J. Jia. 2014. Spatial distribution of pH and organic matter in urban soils and its implications on site-specific land uses in Xuzhou, China. *CR Biol.* 337: 332-337. <https://dx.doi.org/10.1016/j.crv.2014.02.008>.
  117. Marconi, J. 2012. El suelo: (ed.). Santa Fe, Argentina, El Cid Editor | apuntes. <https://elibro.bibliotecabuap.elogim.com/es/ereader/bibliotecasbuap/97983?page=8>.
  118. Martikainen, P. J. 1984. Nitrification in two coniferous forest soils alter different fertilization treatments. *Soil Biol. Biochem.* 16: 577-582.
  119. Martínez-Cruz, M. G. Carcaño-Montiel, L. López-Reyes. 2002. Actividad biológica en un transepto altitudinal de suelos de La Malinche, Tlaxcala. *Terra Latinoamericana*, 20: 141-146.
  120. Martorell, S. D. 2023. *Cuál es el nivel de humedad que puede soportar el suelo de un cultivo*. PRISMAB. <https://prismab.com/blog/cual-es-el-nivel-de-humedad-que-puede-soportar-el-suelo-de-un-cultivo/>
  121. Mason, B. 2020. *Bicarbonate: Is it a problem in your soil? — Soil Doctor*. Soil Doctor. <https://www.soildoctorconsulting.com/pro-tips/bicarbonate-soil>
  122. McLauchlan K. (2006): The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: A review. *Ecosystems*, 9: 1364–1382.
  123. Melillo, J. Forests and Climate Change. MIT Climate
  124. Mikha, M., Green, T., Untiedt, T., Hergret G. 2024. Land management affects soil structural stability: multi-index principal component analyses of treatment interactions. *Soil Tillage Res*, 235, Article 105890, 10.1016/j.still.2023.105890
  125. Mobilian, C., Craft, C. 2022. Wetland Soils: Physical and Chemical Properties and Biogeochemical Processes.
  126. Molina, E. 1998. Acidez de suelo y encalado. Centro de Investigaciones Agronómicas. (En línea). Universidad de Costa Rica– Costa Rica. [http://www.agrotriunfo.com/pdf/acidez\\_de\\_suelo\\_encalado.pdf](http://www.agrotriunfo.com/pdf/acidez_de_suelo_encalado.pdf).
  127. Moreno M. T., E. Carmona, A. Santiago, J. Ordovás, and A. Delgado. 2016. Olive Husk Compost Improves the Quality of Intensively Cultivated Agricultural Soils. *Land Degrad. Develop.* 27: 449-459.
  128. Moritsuka, N., Matsuoka, K., Katsura, K., Yanai, J. 2019. Farm-scale variations in soil color as influenced by organic matter and iron oxides in Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 65 (2), pp. 166-175
  129. Müller, K., Oliver, M.A., Siebe, C. 2023 Overview chapter on Soil Degradation. (2nd edition), *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Volume 3, Academic Press, pp. 165-171, 10.1016/B978-0-12-822974-3.00270-6

130. Murthy, K.R., Author, C. 2023. Soil quality assessment under different land use systems of Gandhi Krishi Vigyana Kendra, Bengaluru. ~ 1517 ~. *Pharma Innov. J.*, 12 (1), pp. 1517-1526. [www.thepharmajournal.com](http://www.thepharmajournal.com)
131. Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., Moradian, S. 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecol. Indic.*, 83, pp. 482-494, [10.1016/j.ecolind.2017.08.001](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.001)
132. Naorem, A., Jayaraman, S., Sinha, N.K., Mohanty, M., Chaudhary, R.S., Hati, K. M...Lal, R. 2023. Eight-year impacts of conservation agriculture on soil quality, carbon storage, and carbon emission footprint. *Soil Tillage Res.*, 23, Article 105748, [10.1016/j.still.2023.105748](https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105748)
133. Navarro, G. 2003. *Química Agrícola* (2.<sup>a</sup> ed.). Mundi-Prensa, Madrid. [https://www.google.com.mx/books/edition/Qu%C3%ADmica\\_agr%C3%ADcola\\_el\\_suelo\\_y\\_los\\_elementos/HuflWjgirtwC?hl=es-419&gbpv=1&dq=cloruros+suelo&pg=PA416&printsec=frontcover](https://www.google.com.mx/books/edition/Qu%C3%ADmica_agr%C3%ADcola_el_suelo_y_los_elementos/HuflWjgirtwC?hl=es-419&gbpv=1&dq=cloruros+suelo&pg=PA416&printsec=frontcover)
134. Navarro, G. Pérez-Lucas, G. y Navarro, S. 2022. Análisis de suelos y aguas: aplicación agrícola: (1 ed.). Madrid, Dextra Editorial. Recuperado de <https://elibro.bibliotecabuap.elogim.com/es/ereader/bibliotecasbuap/228505?page=42>.
135. Navarro, S. & Navarro, G. (2003). España: Mundi Prensa Libros.
136. Nearing, M. Soil erosion and conservation J. Wainwright, M. Mulligan (Eds.), *Environmental modelling: Finding simplicity in complexity*, John Wiley & Sons (2013), pp. 278-290
137. Neina, D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Appl. Environ. Soil Sci.* Article ID 5794869. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>.
138. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo, estudios, muestreo y análisis. Evaluación de la conformidad para muestreo de suelo.
139. Oldeman, L. R. 1988. Global assessment of soil degradation (GLASOD): guidelines for general assessment of true status human-induced soil degradation. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
140. Ortiz, C. A. (2019). *Edafología*. Trillas. México
141. Papini R., Valboa G., Favilli F., L'Abate G. 2011. Influence of land use on organic carbon pool and chemical properties of Vertic Cambisols in central and southern Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140: 68–79.
142. Paz-González A., Vieira S.R., Taboada Castro M.T. 2000-.The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *Geoderma*, 97: 273–292
143. Peng, X. Horn, R. And Smucker, A. 2007. Pore Shrinkage Dependency of Inorganic and Organic Soils on Wetting and Drying Cycles. *Soil Sci Soc Am J* 71, pp 1095-1104.

144. Philippot, L. y Germon, J. 2005. Contribution of Bacteria to Initial Input and Cycling of Nitrogen in Soils. [https://doi.org/10.1007/3-540-26609-7\\_8](https://doi.org/10.1007/3-540-26609-7_8) In: BUSCOT, François and VARMA, Ajit (Editors.) *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions*. Leipzig, New Delhi: Springer-Verlag. 159-172 p.
145. Phogat, V., Tomar, V., y Dahiya, R. 2015. Soil Physical Properties. En R. Rattan, J. Katyal, B. Dwivedi, A. Sarkar, T. Bhattacharyya, J. Tarafdar, y S. Kukal, *Soil Science: An Introduction* (pp. 135-171). New Delhi: ISSS.
146. Pinos Solano, D. S. 2022. Calidad del suelo a partir de indicadores físicos y químicos aplicado a tres usos de suelo para la generación de propuestas de gestión por impactos en el suelo por acciones antrópicas en el bosque y vegetación protectores de Sunsun – Yanasacha. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
147. Pinot, R, H. 2000. *Manual de Edafología*. Ed. Computec. Chile
148. Porta Casanellas Jaume y López-Acevedo Reguerin Marta. 2005. *Agenda de campo de suelos. Información de suelos para la agricultura y el medio ambiente*. Ed Mundi Prensa.
149. Postgate, J. 2000. *Microbes and man*. Cambridge University Press. UK.
150. Prasad, R. and Power, J. F. 1997. *Soil fertility management for sustainable agriculture*. Lewis Publishers. Boca Raton. New York. 356p
151. Prasuhn, V. On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. *Soil Tillage Res.*, 120 (2012), pp. 137-146, [10.1016/j.still.2012.01.002](https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.002)
152. Pregitzer, C. C., N. F. Sonti, and R. A. Hallett. 2016. Variability in urban soils influences the health and growth of native tree seedlings. *Ecol. Restor.* 34: 106-116. doi: <https://doi.org/10.3368/er.34.2.106>.
153. Pretorius, M., Van Huyssteen, C., Brown, L. Rapid assessment of soil organic matter: Soil color analysis and Fourier transform infrared spectroscopy. *Geoderma*, 278 (2016), pp. 49-57.
154. Pretty, J., Benton, T.G., Bharucha, Z.P. *et al.* Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nat Sustain* 1, 441–446 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0>
155. Priha, O. and A. Smolander. 1995. Nitrification, denitrification and microbial biomass N in soil from two N-fertilized and limed Norway spruce forest. *Soil Biol. Biochem.* 27: 305-310.
156. Reyes, J. I; Silva, P. y Acevedo, E. 2002. Efecto de cuatro temporadas de cero labranza y manejo de rastrojo en las condiciones físicas y químicas de un suelo aluvial de la zona central de Chile. *Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile*. pp: 165.
157. Rhoades, C., Lesch. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 108 (1999), pp. 197-216

158. Richards L.A. 1954. Diagnosis and improvements of saline and alkali soils. Agriculture Handbook No. 60. USDA, Washington.
159. Rinot, O., Levy, G.J., Steinberger, Y., Svoray, T., Eshel, G. Soil health assessment: a critical review of current methodologies and a proposed new approach. *Sci. Total Environ.*, 648 (2019), pp. 1484–1491, [10.1016/j.scitotenv.2018.08.259](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259)
160. Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Montevideo, Uruguay.
161. Sahwan, W., Lucke, B., Sprafke, T., Vanselow, K.A., Bäumler, R. Relationships between spectral features, iron oxides and colours of surface soils in northern Jordan. *Eur. J. Soil Sci.*, 72 (1) (2021), pp. 80-97
162. Salas, G. De las. (1987). *Suelos y ecosistemas forestales: Con énfasis en América tropical*. IICA No.80. Costa Rica. 450 p
163. Samson, R. 2017. Introduction: Urban trees as environmental engineers. pp. 3-5. *In: D., Pearlmutter, C. Calfapietra, R. Samson, L. O'Brien, S. Krajter, G. Sanesi, and R. Alonso del Amo (eds.). The urban forest. Cultivating green infrastructure for people and the environment*. Springer. Switzerland. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-50280-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50280-9_1).
164. Sánchez Cano, Roberto Carlos. (2007). "Análisis comparativo de la calidad de suelos agrícolas y suelos protegidos por vegetación natural en una zona semiárida". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/452852>
165. Santos, C., Loss, A., Piccolo, M., Girotto, E., Ludwig, M., Decarli, J., Torres, J., Brunetto, G. Aggregation index and carbon and nitrogen contents in aggregates of pasture soils under successive applications of pig slurry in southern Brazil *Agronomy*, 12 (2022), pp. 320-335, [10.3390/agronomy12020320](https://doi.org/10.3390/agronomy12020320)
166. Sanzano, G. A.; Corbella, R. D; García, J.R. y Fadda, G.S. 2005. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo dos sistemas de manejo de suelo *Ciencia del Suelo* 23: 93-100.
167. Saxton, K., Rawls, W., Romberger, J., Papendick R. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. <https://doi.bibliotecabuap.elogim.com/10.2136/sssaj1986.03615995005000040054x> (1986)
168. Schulp C.J.E., Veldkamp A. (2008): Long-term landscape – land use interactions as explaining factor for soil organic matter variability in Dutch agricultural landscapes. *Geoderma*, 146: 457–465.
169. SEMARNAT. (2010). Atlas de suelos de la República Mexicana. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de [https://gisviewer.semarnat.gob.mx/geointegrador/enlace/atlas2010/atlas\\_suelos.pdf](https://gisviewer.semarnat.gob.mx/geointegrador/enlace/atlas2010/atlas_suelos.pdf)

170. Shaxson, F., & Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo*. BOLETÍN DE SUELOS DE LA FAO 79. <https://www.fao.org/4/y4690s/y4690s00.htm#Contents>
171. Shi, P., Six, J., Sila, A., Vanlauwe, B., Van Oost, K. Towards spatially continuous mapping of soil organic carbon in croplands using multitemporal Sentinel-2 remote sensing. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens.*, 193 (2022), pp. 187-199, 10.1016/j.isprsjprs.2022.09.013
172. Silva, V., Mol, H. G., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils – A hidden reality unfolded. *The Science Of The Total Environment* 653, 1532-1545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441>
173. Six, J., E. T. Elliott, and K. Paustian. 2000. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1042-1049.
174. Soil Survey Staff (SSS). 1999. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2<sup>da</sup> edition. Agriculture Handbook Num. 436. USDA. Washington D. C. 869p.
175. Song, J., Zhang, H., Chang, F., Yu, R., Wang, J., Chen, A., Xu, Y., Liu, J., Zhou, Y. Li. Subsurface organic amendment of a saline soil increases ecosystem multifunctionality and sunflower yield. *Sci. Total Environ.*, 917 (2024), Article 170276,
176. Soriano, M., C. M. Asensio, H. Delgado y F. J. Lozano. 2000. Riesgo de degradación física en el término municipal de Pechina (Almería, España). *Serie Edafología* 7-3: 93-103.
177. Stavi, I., Lal, R. Achieving zero net land degradation: challenges and opportunities. *J. Arid Environ.*, 112 (2015), pp. 44-51
178. Tagar, A., Adamowski, J., Memon, M., Do, M., Mashori, A., Soomro, A., y Bhayo, W. Soil fragmentation and aggregate stability as affected by conventional tillage implements and relations with fractal dimensions. *Soil Tillage Res*, 197 (2020), Article 104494,
179. Tarr, AB; KJ Moore; CL Burras; DG Bullock& PM Dixon. 2005. Improving Map Accuracy of Soil Variables Using Soil Electrical Conductivity as a Covariate. *Precision Agriculture*, 6: 255-270.
180. Tavakkoli, E., F. Fatehi, S. Coventry, P. Rengasamy, and G. K. McDonald. 2011. Additive effects of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions on barley growth under salinity stress. *J. Exp. Bot.* 62: 2189-2203.
181. Teakle, N. L. and S. D. Tyerman. 2010. Mechanisms of Cl<sup>-</sup> transport contributing to salt tolerance. *Plant Cell Environ.* 33: 566-589.
182. Tejada, M., C García, J.L. González and M.T. Hernández. 2006. Organic amendment based on fresh and composted beet vinasse: influence on soil properties and wheat yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 900-908.

183. Thangarajan, R., N. S. Bolan, G. Tian, R. Naidu, and A. Kunhikrishnan. 2013. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. *Sci. Total Environ.* 465: 72-96.
184. Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (1982). *Los suelos y su fertilidad* (4.<sup>a</sup> ed.). Reverté.  
<https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=VpIUEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=tesis+sobre+suelos&ots=GDO1epRq60&sig=K9UfG1T95qttYTDV-B5pcdHsiQ0#v=onepage&q&f=false>
185. Tisdale, S. y Nelson, W. 1993. Soil fertility and fertilizers. MacMillan Publishing Company. New York
186. Trettin CC, Jurgensen MF. 2003. Carbon cycling in wetland forest soils. *In: Kimble J, Heath H, Birdsey R, Lal R, eds. The Potential of U.S. Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect.* USA: CRC Press LLC. pp. 1-21 ISBN: 1-56670-583-5.
187. Tumsavaş, Z., Tekin, Y., Ulusoy, Y., Mouazen, A. Prediction and mapping of soil clay and sand contents using visible and near-infrared spectroscopy. *Biosyst. Eng.*, 177 (2019), pp. 90-100, 10.1016/j.biosystemseng.2018.06.008
188. UNCC. Into the Woods. Retrieved December 18, 2023, from : <https://unfccc.int/news/into-the-woods> (2021)
189. United Nations Environment Programme (UNEP). (2006). Agriculture and ecosystems. UNEP.
190. USDA. (1999). Soil Quality Test Kit Guide.
191. USDA. "Departamento de Agricultura de los Estados Unidos".(1999). Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Obtenido de [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf)
192. Van Eijk, H. 2016. Técnicas de cultivo "La importancia de la humedad en el crecimiento de las plantas". *Anthura* 24(2): 11-14.
193. Van Oost, K., Govers, G. & Desmet, P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* **15**, 577–589 (2000). <https://doi.org/10.1023/A:1008198215674>
194. Vašák, F., Černý, J., Buráňová, S., Kulhánek, M., Balík, J. Soil pH changes in long-term field experiments with different fertilizing systems. *Soil Water Res.*, 10 (2015), pp. 19-23, 10.17221/7/2014-SWR
195. Vistoso Gacitúa, E., & Martínez-Lagos, J. 2020. Magnesio disponible y fertilización en suelos de la Región de Los Ríos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) Remehue. Informativo N° 261.
196. Warrick, A& DR Nielsen.1981. Spatial variability of soil physical properties in the field. *In:Hillel D. Practical Applications of Soil Physics:* pp. 319-344.
197. Wenrong, C., Z. L. He, X. E. Yang, S. Mishra, and P. J. Stof fella. 2010. Chlorine nutrition of higher plants: Progress and perspectives. *J. Plant Nutr* 33: 943-952.
198. Wenrong, C., Z. L. He, X. E. Yang, S. Mishra, and P. J. Stof fella. 2010. Chlorine nutrition of higher plants: Progress and perspectives. *J. Plant Nutr* 33: 943-952.

199. White, P. J. and M. R. Broadley. 2001. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: A review. *Ann. Bot.* 88: 967-988.
200. Whittaker, R. H.; S. W. Boul, W. A. Niering, and Y. H. Havens. 1968. Soil and vegetation patterns in the Santa Catalina Mountains, Arizona. *Soil Science.* 105:440-450.
201. Worthen, E. L. 1949. Suelos agrícolas: Su conservación y fertilización. U.T.E.H.A. México. 463 p
202. Xu, B.; Hou, Z.-Q.; Griffin, WL; Lu, Y.; Belousova, E.; Xu, J.-F.; O'Reilly, SY Los volátiles reciclados determinan la fertilidad de los depósitos de pórfido en entornos de colisión. *Am. Miner.* 2021, 106, 656–661.
203. Xu, G., H. Magen, J. Tarchitzky, and U. Kafkafi. 2000. Advances in chloride nutrition of plants. *Adv. Agron.* 68: 97-150.
204. Yang, J. L. and G. L. Zhang. 2015. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils - A review. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61: 30-46. doi: <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1035622>.
205. Yost, J., Hartemink, A. Soil organic carbon in sandy soils: a review. *Adv. Agron.*, 158 (2019), pp. 217-310
206. Zheng, X., Wei, L., Lv, W., Zhang, H., Zhang, Y., Zhu, Z., Ge, T., Zhang, W. Long-term bioorganic and organic fertilization improved soil quality and multifunctionality under continuous cropping in watermelon. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 359 (2024), Article 108721.
207. Zhu H., He X., Wang K., Su Y., Wu J. (2012): Interactions of vegetation succession, soil bio-chemical properties and microbial communities in a karst ecosystem. *European Journal of Soil Biology*, 51: 1–7.