



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

EFFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE *Dunaliella salina*
MEZCLADA CON FERTILIZANTES ORGÁNICOS EN
LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE UN SUELO
EROSIONADO HÍDRICAMENTE

TESIS

Que para obtener el título de Bióloga presenta:

Dana Noelia Alonso Flores

Director:

Dra. Nadia de la Portilla López

Codirector

Dr. Jorge Lugo de la Fuente



Toluca, Estado de México, septiembre 2024

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Resumen	1
2. Abstract.....	2
3. Introducción.....	3
4. Antecedentes.....	5
4.1 El Suelo.....	5
4.2 Propiedades físicas y químicas.....	5
4.2.1 Textura.....	6
4.2.2 Densidad Aparente (Da).....	8
4.2.3 Materia Orgánica (MO).....	9
4.2.4 Conductividad Eléctrica (CE)	10
4.2.5 Nitrógeno disponible en el suelo	11
4.3 Erosión.....	13
4.3.1 Erosión hídrica	13
4.3.2 Erosión hídrica en México	14
4.3.3 Erosión hídrica en el Estado de México	15
4.3.4 Efecto de la erosión en las propiedades fisicoquímicas del suelo.....	16
4.4 Fertilizantes.....	17
4.4.1 Fertilizantes Orgánicos.....	18
4.5 Bioestimulantes.....	21
4.5.1 Pasta de algas.....	22
5. Justificación	25
6 Hipótesis	25
7 Objetivo	26
8 Material y Métodos.....	27
8.1 Zona de muestreo	27

8.2 Toma de la muestra	28
8.3 Diseño experimental	29
8.4 Análisis fisicoquímico.....	29
8.5 Análisis estadísticos	30
9 Resultados.....	31
9.1 Caracterización fisicoquímica del suelo	31
9.2 Propiedades fisicoquímicas	32
9.2.1 Materia Orgánica	32
9.2.2 Conductividad Eléctrica	34
9.2.3 pH.....	36
9.2.4 Nitrógeno Inorgánico, amonio, nitratos y nitritos	38
10 Discusión	40
10.1 Perfil fisicoquímico.....	40
10.2 Materia Orgánica	40
10.3 Conductividad Eléctrica.....	42
10.4 pH.....	43
10.5 Nitrógeno inorgánico	44
11 Conclusiones.....	46
12 Recomendaciones	47
13 Referencias	48
14 Anexos.....	64

1. Resumen

La erosión es un fenómeno que afecta a México, principalmente en la región de Jiquipilco, Estado de México. Este fenómeno perjudica el ambiente del suelo, principalmente sus propiedades fisicoquímicas, dando como resultado una disminución en la fertilidad. El uso de fertilizantes orgánicos contribuye a proporcionar nutrientes para las plantas y mejorar la calidad del suelo. Este beneficio puede incrementarse mediante el uso de bioestimulantes a base de extractos de algas, ya que estos estimulan la actividad de los microorganismos del suelo, induciendo una mayor disponibilidad de nutrientes y mejorando su fertilidad. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la incorporación de *Dunaliella salina* mezclada con fertilizantes orgánicos en un suelo erosionado hídricamente a través de algunas propiedades fisicoquímicas, como una alternativa para mitigar los efectos causados por la erosión. Se tomaron muestras de suelo erosionado, y a las cuales se les adicionó lo equivalente a 35 t ha⁻¹ y 70 t ha⁻¹ de fertilizante equino y bovino mezclado con 0.2 % *D. salina*, obteniendo los siguientes tratamientos: C (control con 0 t ha⁻¹ de abono y 0.2% de pasta de algas), V70 (70 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2% de pasta de algas), V35 (35 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2% de pasta de algas), C70 (70 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2% de pasta de algas), C35 (35 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2% de pasta de algas). El experimento tuvo seis repeticiones por tratamiento y se empleó un diseño completamente al azar, esto se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero. Después de la aplicación de cada tratamiento, se tomaron muestras del suelo cada 15 días hasta alcanzar los 45 días. Los resultados muestran que la incorporación de los tratamientos influyó significativamente en las propiedades fisicoquímicas del suelo erosionado. El tratamiento C70 fue el de mayor porcentaje de materia orgánica, obteniendo valores de 3.98% y 4.11%, la conductividad eléctrica aumentó en el tratamiento C70. Respecto al pH este se mantuvo neutro en los tratamientos V70 y C70, mientras que el mayor contenido de N lo presentó el tratamiento V70. Los resultados sugieren que la aplicación de fertilizante orgánico con *D. salina* puede compensar los déficits de las propiedades fisicoquímicas provocados por la erosión hídrica, ayudando a mejorar la fertilidad del suelo.

2. Abstract

Erosion is a phenomenon that affects Mexico, mainly in the region of Jiquipilco, State of Mexico. This phenomenon damages the soil environment, mainly its physicochemical properties, resulting in a decrease in fertility. Using organic fertilizers helps provide nutrients to plants and improve soil quality. This benefit can be increased through the use of biostimulants based on algae extracts, since these stimulate the activity of soil microorganisms, inducing greater availability of nutrients and improving its fertility. The objective of this work was to evaluate the effect of incorporating *Dunaliella salina* mixed with organic fertilizers in a hydrically eroded soil through some physicochemical properties, as an alternative to mitigate the effects caused by erosion. Samples of eroded soil were taken, to which the equivalent of 35 t ha⁻¹ and 70 t ha⁻¹ of equine and bovine fertilizer mixed with 0.2% of *D. salina* were added, obtaining the following treatments: C (control with 0 t ha⁻¹ of fertilizer and 0.2% of algae paste), V70 (70 t ha⁻¹ of cow manure and 0.2% of algae paste), V35 (35 t ha⁻¹ of cow manure and 0.2% algae paste), C70 (70 t ha⁻¹ horse manure and 0.2% algae paste), C35 (35 t ha⁻¹ horse manure and 0.2% algae paste). The experiment had six repetitions per treatment and a completely randomized design was used, which was carried out under greenhouse conditions. After the application of each treatment, soil samples were taken every 15 days until reaching 45 days. The results show that the incorporation of the treatments significantly influenced the physicochemical properties of the eroded soil. The C70 treatment had the highest percentage of organic matter, obtaining values of 3.98% and 4.11%, the electrical conductivity increased in the C70 treatment. Regarding pH, it remained neutral in the V70 and C70 treatments, while the Treatment V70 presented the highest N content. The results suggest that the application of organic fertilizer with *D. salina* can compensate for the deficits in physicochemical properties caused by water erosion, contributing to improving soil fertility.

3. Introducción

En 2014, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) reportó que a nivel nacional 1,027,611.50 km² (52.86%) de la superficie jurisdiccional se encuentran afectados por la erosión hídrica; Por su parte Bolaños *et al.* (2016), reportaron una afectación del 66% de la superficie territorial de los cuales el 6% corresponde a erosión fuerte o extrema, el 24% a erosión moderada, el 36% a erosión leve, y el 34% a suelo estable. De manera particular reporta que el Estado de México presenta erosión extrema en las áreas conurbadas a la Ciudad de México (Naucalpan, Tlalnepantla, Cuautitlán, Ecatepec, Nezahualcóyotl y Chimalhuacán) y el corredor Toluca-Metepec-Lerma-San Mateo Atenco, el área de Santa María Zolotepec-Temoaya-Jiquipilco-San Lorenzo Malacota.

La erosión provoca la pérdida de materia orgánica del suelo debido al transporte de sedimentos por escorrentía (Arriaga y Lowery, 2003), originando un horizonte superficial A con aportes de material proveniente del horizonte B del pedón original. El material proveniente del horizonte B, en suelos maduros, es rico en arcillas estas tienen un cambio en la distribución del tamaño de las partículas afectó la relación agua-aire del suelo, alterando muchos de sus procesos sistémicos de igual forma existe un bajo contenido de materia orgánica y capacidad de almacenamiento de agua, características que son transferidas al horizonte superficial en respuesta al aumento del contenido de arcilla en las capas superficiales (Brunel y Seguel, 2011). Como consecuencia de la dispersión y movilización de partículas dentro del perfil, la densidad aparente y la reducción de la porosidad. Esto se refleja en la pérdida de la fertilidad del suelo y la disminución de la productividad en los procesos agrícolas como son los cultivos (Brunel y Seguel, 2011).

Un suelo erosionado presenta baja fertilidad y deja de ser considerado como un suelo agrícola; por lo que el uso de bioestimulantes al contener algunas sustancias que promueven el crecimiento de las plantas, resulta ser una alternativa para mitigar los efectos erosivos causados al suelo y mejorar el rendimiento de un cultivo gracias a sus enzimas provocan o activan en él reacciones de hidrólisis enzimáticas catalíticas reversibles; además de hidratan, reestructuran y promueven la diversidad y acción microbiana en el suelo (Barrios, 2007; Pérez-Madruga *et al.*, 2020, López-Padrón *et al.*, 2020).

Estudios han demostrado que se obtienen mejores resultados cuando se combina los extractos de algas con fertilizantes inorgánicos y orgánicos permitiendo alcanzar una productividad agrícola sostenible (Pérez-Madruga *et al.*, 2020). *Dunaliella* es uno de los géneros de microalgas más utilizados por su importancia comercial en la obtención de compuestos bioactivos estos organismos contienen entre 50 y 60% de proteína en células verdes en base al peso seco y alrededor de 30% para células rojas con un alto contenido de carotenoides (Olivarría *et al.*, 2010).

4. Antecedentes

4.1 El Suelo

El suelo es una entidad natural, esencial para la conservación de la vida sobre la Tierra, además de ser la principal base de la vegetación, la infraestructura y el hábitat de la biodiversidad ya que participa de manera primordial en el funcionamiento de todos los ecosistemas. Este recurso al igual que el agua, los bosques o los yacimientos minerales, es finito y forma parte del capital estratégico natural de cualquier país (SEMARNAT, 2018).

El proceso de formación del suelo inicia en la descomposición de la roca madre que se encuentra expuesta en la superficie de la corteza terrestre a partir del rompimiento físico y químico ocasionado por factores como las lluvias, el viento, la exposición al sol y la actividad biológica de las raíces de las plantas (SEMARNAT, 2008).

Es un recurso natural no renovable y su regeneración es muy lenta, siendo sometido constantemente a los procesos de destrucción y degradación. Es un elemento fundamental para la agricultura por proveer de agua y nutrientes a los cultivos; además, interviene en los ciclos del agua, carbono, nitrógeno, fósforo y otros elementos de interés (FAO, 2015).

El suelo tiene un impacto considerable en el medio ambiente en el que se ubica y repercute en las actividades socioeconómicas de los grupos humanos que habitan en el territorio, los cuales ejercen diversos grados de presión sobre este, provocando daños o su deterioro (Burbano-Orjuela, 2016).

4.2 Propiedades físicas y químicas

El suelo es un sistema complejo y dinámico que incluye tres fases: sólida, líquida y gaseosa. Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo interactúan para mantener un equilibrio adecuado para el crecimiento de las plantas y su entorno (Díaz y Medina, 2015).

Las propiedades físicas pueden observarse o medirse sin modificar químicamente la composición del suelo. Estas propiedades afectan el movimiento del aire, el calor, el agua, las raíces y los nutrientes en el suelo. Por ejemplo, la profundidad, la textura, la estructura, la densidad aparente, la densidad real, la porosidad, el color y la temperatura (Calderón-Medina *et al.*, 2018).

Las propiedades químicas del suelo pueden observarse o medirse a través de cambios químicos que ocurren en él. Estas propiedades describen el comportamiento de los elementos y sustancias que componen el suelo. Entre ellas se incluyen el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la conductividad eléctrica (CE), el contenido de materia orgánica (MO) y la presencia de elementos, tanto nutritivos como tóxicos (Díaz y Medina, 2015; Calderón-Medina *et al.*, 2018).

4.2.1 Textura

En el 2019 la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), define como textura a las partículas gruesas y finas que se difieren en tres clases conocidas como arcilla, limo y arena (**Tabla 1**); así mismo, indica que esta propiedad tiene que ver con la facilidad con que se puede manipular el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo.

Es una propiedad consustancial del suelo y cambia proporcionalmente al uso del terreno o con las prácticas de manejo. Cuando un suelo tiene una buena textura la proporción de los elementos que lo conforman le dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer la fijación y la nutrición del sistema radicular de las plantas (Rucks *et al.*, 2004), de igual es determinante en la relación entre el agua - solutos disueltos y su potencial para ser absorbidos por las plantas. Esta puede ser determinada cualitativamente en campo o cuantitativamente en el laboratorio (Lizcano *et al.*, 2017).

Los suelos arenosos son de un laborioso manejo, sus reservas de nutrientes son poco disponibles para las plantas. Sin embargo, los suelos limosos se caracterizan por poseer gránulos de un tamaño intermedio, son fértiles y fáciles de trabajar, tiene una facilidad de formar

terrones y estos se pueden deshacer cuando se encuentran secos. Por otro lado, los suelos constituidos por arcillas contienen partículas extremadamente finas, cuando se encuentran saturadas de agua forman barro. Estos suelos son pesados, contienen reservas de nutrientes abundantes ya que no se drenan ni se secan fácilmente, por lo tanto, son muy fértiles, sin embargo, son complejos de trabajar cuando se encuentran muy secos. La textura del suelo afecta la actividad microbiana, ya que incide directamente en el contenido de agua y la temperatura del suelo (Lizcano *et al.*, 2017).

El proceso utilizado para medir la composición granulométrica es el método granulométrico o mecánico. Estas técnicas de análisis están basadas en la velocidad de caída de las partículas del suelo a través del agua, que aumenta con el diámetro de estas, o bien en la relación de esta propiedad con la utilización de tamices para desagrupar las partículas gruesas. Para determinar la clase textural de un suelo, se utilizan diagramas triangulares, donde las líneas trazadas en el triángulo (paralelas a los lados) fijan los límites porcentuales de cada componente (arcilla, limo y arena) (**Figura 1**) (Rucks *et al.*, 2004).

Tabla 1. Clasificación de las partículas del suelo (Rucks *et al.*, 2004).

Fracción del Suelo	Sistema del Depto. de Agricultura de EE.UU.	Sistema Internacional
	Diámetros límites en mm.	Diámetros límites en mm.
Arena muy gruesa	2.00 - 1.00	
Arena gruesa	1.00 - 0.50	2.00 - 0.20
Arena Media	0.50 - 0.25	
Arena fina	0.25 - 0.10	0.20 - 0.002
Arena muy fina	0.10 - 0.05	
Limos	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002
Arcilla	Menos de 0.002	Menos de 0.002

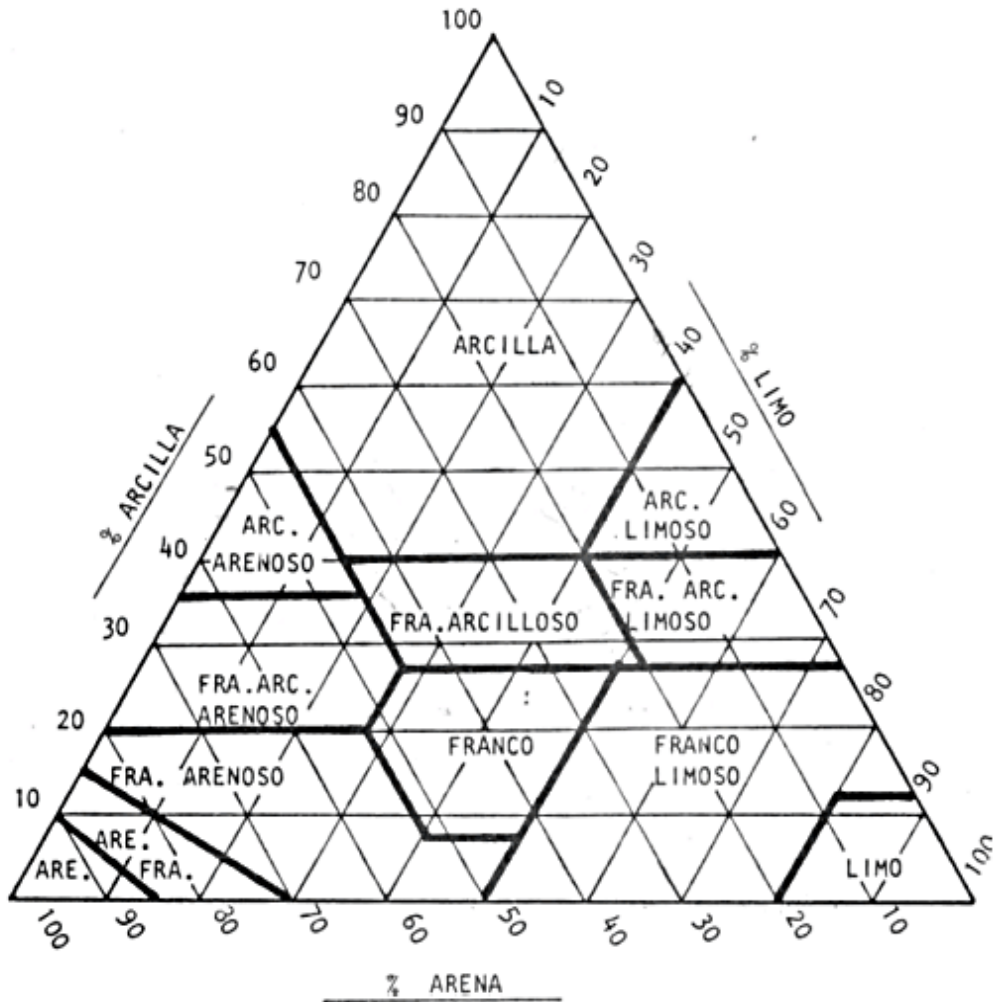


Figura 1. Triángulo textural de USDA (Fuente: Rucks *et al.*, 2004).

4.2.2 Densidad Aparente (Da)

Es la correlación que existe entre la masa y el volumen de un suelo. Este volumen considera todo el espacio poroso existente. Viene dada por la siguiente expresión:

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{(V_s + V_a + V_w)}$$

donde M_s es la masa de sólidos y V_t es el volumen total que viene dado por la sumatoria del volumen de sólido (V_s), el volumen de aire (V_a) y el volumen de agua (V_w) que contiene el suelo. Los diferentes factores como la textura, el contenido de materia orgánica o el tipo de

manejo del suelo determinan el valor de la densidad aparente (D_a) (Salamanca y Sadeghian, 2006; Ingaramo *et al.*, 2007).

La determinación de la D_a refleja el comportamiento dinámico de la estructura y la porosidad del suelo, ya que varía debido a la actividad de agentes externos e internos, así como a la compactación y dispersión de las partículas. Esto es importante para conocer el estado físico en el que se encuentra el suelo (Castillo, 2005). Esta propiedad suele utilizarse para estimar compactación, porosidad total, micro y macro porosidad y humedad a saturación del suelo sobre las raíces (Ingaramo *et al.*, 2007; Díaz y Medina, 2015).

4.2.3 Materia Orgánica (MO)

Se considera a la materia orgánica del suelo (MOS) como un conjunto de compuestos heterogéneos formados por la acumulación de materiales de origen animal y vegetal parcial o completamente descompuestos en un constante estado de descomposición, de sustancias sintetizadas microbiológicamente y/o químicamente, del conjunto de microorganismos vivos y muertos y de animales pequeños que aún faltan descomponer (Sánchez *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2008).

La materia orgánica (MO) se puede apreciar en el suelo, de formas muy condensadas de composiciones próximas al carbono elemental, por ejemplo carbón vegetal, grafito, carbón de hulla, como humus y humatos que son los restos de plantas, animales y microorganismos, alterados y resistentes y residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos conocida como materia orgánica lábil (MOL), siendo todas ellas consideradas como un indicador de la calidad del suelo, ya que ejerce un efecto positivo en sus propiedades físicas (Eyherabide *et al.*, 2014).

El suelo obtiene mayormente restos orgánicos de diferentes orígenes, entre ellos, restos de las plantas superiores que llegan al suelo de dos formas: se depositan directamente en la masa del suelo, por ejemplo, las raíces al morir o bien en la superficie como son hojas, ramas, flores, frutos (Soto y Meléndez, 2003).

La descomposición de la MO ocurre de forma natural después de la caída de los materiales al suelo y muchas veces comienza con un proceso rápido de transformación por parte

de los macro y microorganismos, por medio de su ingestión, reciclan energía y nutrientes de las plantas utilizando los residuos orgánicos como fuente de energía. Este proceso de descomposición está acompañado de la liberación de CO₂ y de los nutrientes contenidos en los residuos orgánicos (Allaire *et al.*, 2012).

4.2.4 Conductividad Eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es una propiedad utilizada en la estimación de la salinidad, se basa en la velocidad con la que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución. La CE se expresa en dS/m (dS=deciSiemens), siendo equivalentes (1 mmhos/cm = 1 dS/m) (Aguirre, 2009; Lizcano *et al.*, 2017).

La conductividad eléctrica, se ve influenciada por la textura, porosidad, cantidad de agua presente, estructura, distribución de agregados, DA y la presencia de iones intercambiables en el suelo capaces de conducir la corriente eléctrica y que inciden en las características nutritivas del suelo. Estas propiedades están claramente asociadas con la salinidad del suelo y su estimación y predicción espacial son importantes para aplicaciones agrícolas o ambientales, la medición de la CE permite establecer la factibilidad, viabilidad y buen desarrollo de una planta en un suelo específico (Camacho-Tamayo, 2013; Espinosa, 2021)

4.1.1.5 pH

El pH se define como el recíproco del logaritmo decimal (base 10) de la actividad del ion Hidrógeno (α_{H^+}), en una solución (Covington *et al.*, 1985):

$$pH = -\log_{10} (\alpha_{H^+}) = \log_{10} \left(\frac{1}{\alpha_{H^+}} \right)$$

Lo anterior es una parte de la definición formal del pH, ya que la mayoría de los usuarios regulares el pH la definen como una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH nos señala la concentración de iones hidronio [H₃O⁺] presente en determinadas disoluciones (Vásquez y Rojas, 2016).

Es una de las propiedades fisicoquímicas más relevantes de los suelos, porque influye en la disponibilidad de nutrientes y su solubilidad para las plantas, afecta la actividad microbiana los cuales mineralizan la MO. También determina la concentración de iones tóxicos y diversas propiedades importantes que influyen en la fertilidad del suelo (Ramírez, 1997).

Este parámetro, no sólo indica si el suelo es ácido, neutro o alcalino; sino que, aporta información básica para conocer su potencial de uso agrícola, estimar la disponibilidad de nutrientes esenciales y la toxicidad de otros elementos (Azcarate *et al.*, 2017).

4.2.5 Nitrógeno disponible en el suelo

El nitrógeno (N) es uno de los indicadores importantes en el suelo que limita la productividad primaria terrestre. Los estudios han demostrado que los procesos cíclicos del N del suelo proporcionan más de la mitad del N para el crecimiento de los cultivos (Xu *et al.*, 2024).

Los organismos necesitan nitrógeno como una fuente esencial de nutrientes. En los ecosistemas terrestres, delimita la disponibilidad de las plantas, lo que resulta en una fuerte competencia entre microorganismos y plantas. Los microorganismos han desarrollado diferentes mecanismos para la captación y asimilación de formas minerales y orgánicas de N, lo que les permite utilizar una extensa gama de compuestos minerales y orgánicos (Geisseler *et al.*, 2010).

Las moléculas que contienen N cuantitativamente más importantes son las proteínas, la quitina y el peptidoglicano. Las proteínas por sí solas comprenden el 60% o más del N en células vegetales y microbianas (Geisseler *et al.*, 2010).

La transformación del nitrógeno es un proceso crítico estrechamente relacionado con la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos en suelos agrícolas. Implica pasos clave como la fijación de nitrógeno, la nitrificación y la desnitrificación, que regulan el contenido y la transformación de especies de nitrógeno inorgánico como NH_4^+ -N, NO_3^- -N y NO_2^- -N (Dong *et al.*, 2023).

Las formas minerales de N, como el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-), representan una menor proporción del N total en las células. La mayor parte del N ingresado al suelo se encuentra en forma de polímeros por lo cual las depolimerasas extracelulares constituyen el primer paso en la degradación de la mayor parte del N orgánico que ingresa al suelo (Geisseler *et al.*, 2010).

Los microorganismos del suelo desempeñan un papel vital en la transformación del nitrógeno al producir enzimas esenciales, incluidas la nitrato reductasa (NAR), la nitrito reductasa (NIR) y la hidroxilamina reductasa (HAR), que participan en el metabolismo del nitrógeno (**Figura 2**). La actividad de las enzimas del suelo sirve como un indicador crítico para evaluar los impactos de los contaminantes en la actividad microbiana y la salud del suelo (Dong *et al.*, 2023).

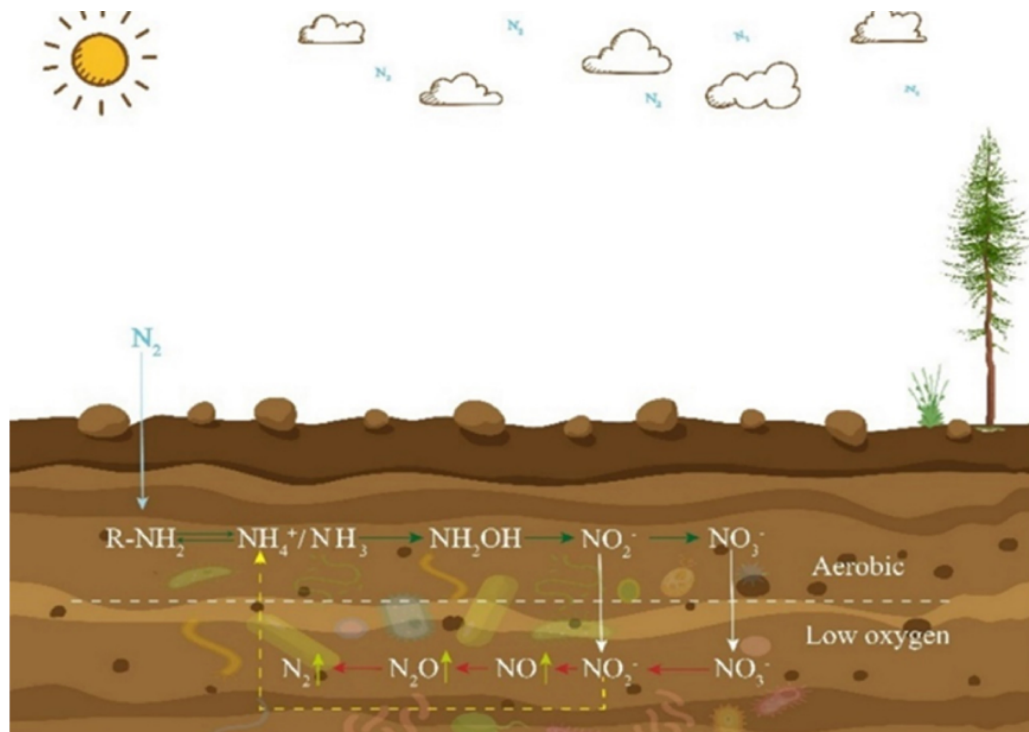


Figura 2. Esquema de los procesos de transformación microbiana en el ciclo del Nitrógeno en el suelo (Fuente: Wang *et al.*, 2024).

4.3 Erosión

La palabra erosión proviene del latín *erosio* que significa el desgaste que se produce en la superficie del suelo esta puede ser provocada por la acción de agentes externos, así como el viento y el agua, no obstante, son acelerados por la acción del hombre (INEGI, 2014). La causa más común de degradación del suelo en el mundo es la erosión, ya que al menos el 80% de la superficie terrestre sufre algún grado de afectación por este fenómeno (INEGI, 2014).

La erosión produce una disminución del espesor efectivo del perfil edáfico y por lo tanto su volumen esto es importante para la vegetación o el cultivo. La pérdida de material afecta principalmente a las capas superficiales del mismo, en las que se encuentra la mayor fertilidad, su pérdida supone una disminución significativa en los contenidos de MO y nutrientes. Los agentes erosivos tienen una acción que provoca un desgaste progresivo de la estructura física del medio lo que, a su vez, incrementa la vulnerabilidad de este a ser degradado comprometiendo las funciones de este. Por todo lo anterior, el medio edáfico manifiesta una disminución progresiva en su capacidad de retención de agua al igual que en nutrientes disponibles para las plantas, lo que perjudica drásticamente en la fertilidad de este (Alba *et al.*, 2011).

4.3.1 Erosión hídrica

Erosión hídrica es remoción del suelo por efecto del agua, sea por gotas de lluvia o por escurrimiento superficial en sus formas de torrente, lluvia, arroyadas, granizadas, crecida de ríos y el efecto del riego debido a que el agua es un agente erosivo muy enérgico esto ocurre porque al impacto de tales gotas en el suelo se rompe la estructura superficial de éste, y salpica el material sólido en todas direcciones (INEGI, 2014).

Los principales factores que controlan la erosión hídrica son las precipitaciones, la cubierta vegetal, la topografía y las propiedades del suelo. La interacción de estos factores determina el alcance y la tasa de pérdida del suelo. Cuanto más larga y pronunciada sea la pendiente, mayor será el impacto de la erosión. Además, cuanto mayor sea la capacidad de las

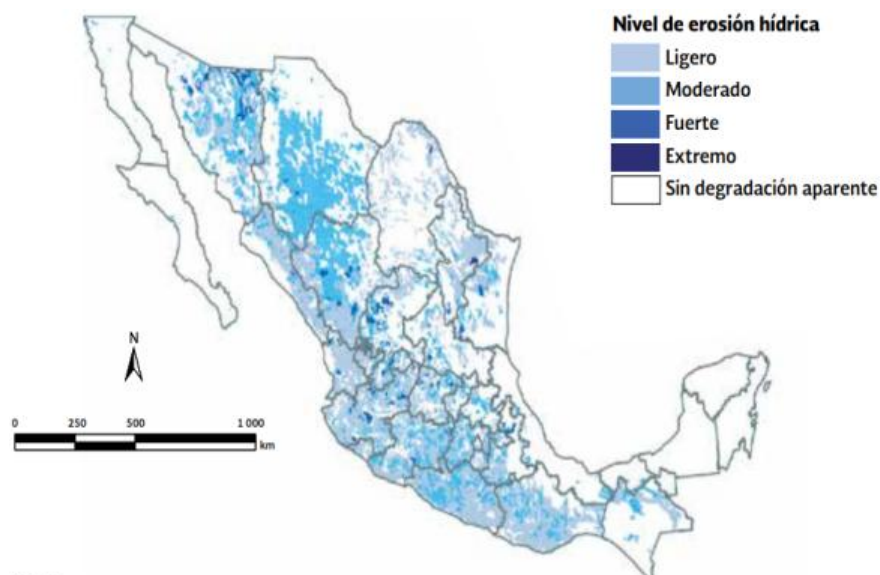
lluvias intensas para transportar la escorrentía, mayor será la tasa de pérdida de suelo y agua causada por la erosión (Camargo y López, 2017).

Hay tres tipos de erosión hídrica: deformación del suelo, efectos fuera del sitio y pérdida de la capa superficial del suelo. Esto último tiene graves efectos en la función del suelo: se eliminan nutrientes y materia orgánica, se reduce la profundidad de enraizamiento de las plantas, se reducen las tasas de infiltración y la retención de agua (SEMARNAT, 2012).

Los otros dos tipos de erosión hídrica están estrechamente relacionados entre sí. Los canales y barrancos se forman cuando el suelo es arrastrado por el agua sin la protección adecuada de la vegetación. Estas deformaciones del terreno provocan que grandes cantidades de agua de escorrentía y sedimentos sean arrastradas hacia cuerpos de agua como presas, ríos o lagunas, provocando que contaminen, sedimenten o incluso desborden e inunden las zonas aledañas. Esto se conoce como efecto externo de la erosión hídrica (SEMARNAT, 2012).

4.3.2 Erosión hídrica en México

Los principales tipos de degradación del suelo en México son: erosión hídrica (37%), erosión eólica (14.9%) y degradación química (17.8%) solo el 36% de la superficie se encuentra sin algún tipo de degradación. De la superficie nacional con erosión hídrica (22.73 millones de hectáreas), 56.4% se encuentra en el nivel ligero, 39.7% en el nivel moderado y 3.9% entre fuerte y extremo (Mapa 1) (SEMARNAT, 2012; Bolaños *et al.*, 2016).

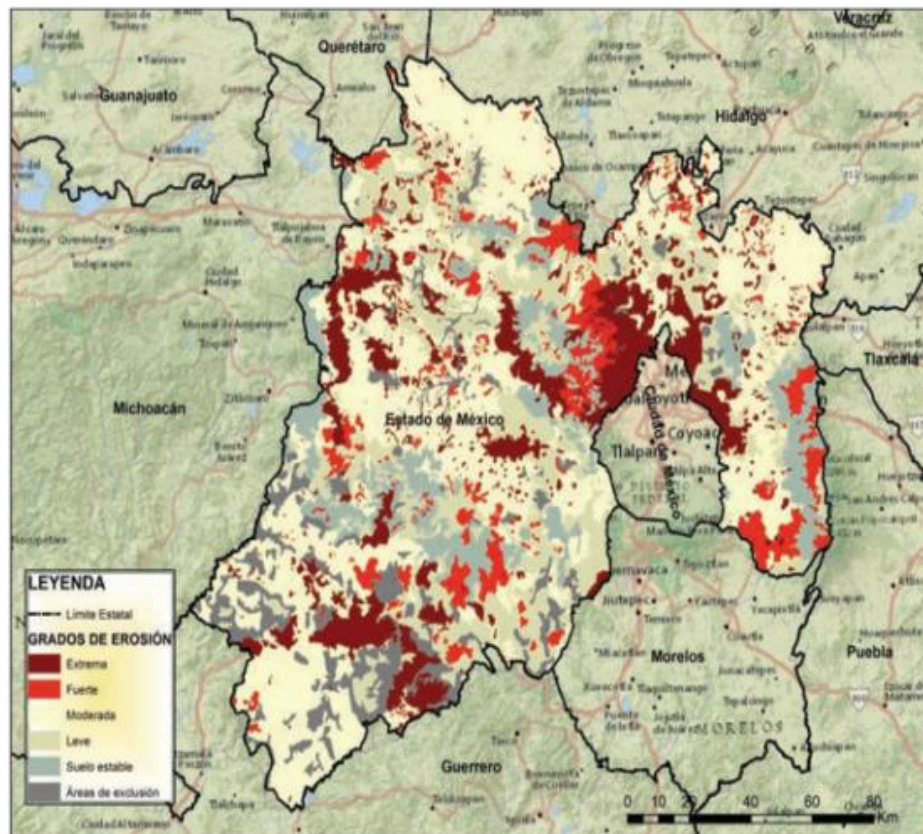


Mapa 1. Niveles de erosión hídrica de los suelos en México (SEMARNAT, 2002).

De acuerdo con SEMARNAT (2012), al menos el 42% de la superficie nacional está afectada por este fenómeno, donde 17 entidades federativas muestran un daño más del 50% de su territorio, entre ellas cabe destacar Guerrero (79.3%), Puebla (76.6%), Morelos (75.2%), Oaxaca (74.6%) y el Estado de México (73.7%).

4.3.3 Erosión hídrica en el Estado de México

La información más reciente para el territorio del Estado de México considera que 24.4 % presenta una afectación por erosión hídrica y al menos un 4.8 % por erosión eólica. Esta problemática se presenta, principalmente en los lomeríos y sierras los cuales se caracterizan por su topografía irregular, montañosa y accidentada (Mapa 2). Si tomamos en cuenta que el 76.1 % del territorio tiene este tipo de relieve y que 31 % de las zonas de cultivo de temporal se desarrolla en estos sitios, se puede decir que el problema es grave (SEMARNAT, 2008).



Mapa 2. Grado de erosión actual, Estado de México (Bolaños, 2016).

Bolaños *et al.* (2016), catalogaron como zonas de erosión extrema en el Estado de México las áreas conurbadas a la Ciudad de México, incluyendo Naucalpan, Tlalnepantla, Cuautitlán, Ecatepec, Nezahualcóyotl y Chimalhuacán. También se identificaron como áreas críticas el corredor Toluca-Metepec-Lerma-San Mateo Atenco, el área de Santa María Zolotepec-Temoaya-Jiquipilco-San Lorenzo Malacota (en la cara oeste de la Sierra de Las Cruces), la zona centro-occidente del estado, limitando con Michoacán desde El Oro de Hidalgo hasta Donato Guerra, y el sur del estado, abarcando Luvianos, Tejupilco y Sultepec.

Actualmente, la demanda interna por alimentos y materias primas continúa aumentando, lo que aumenta la presión sobre los recursos naturales. Este es en el caso de los suelos fértiles, donde se presentan un alto grado de deterioro, así como vulnerabilidad a la sequía y a los procesos de desertificación. Algunos estudios reportan que el carácter internacional requiere aumentar anualmente 27 % de los costos de producción para mantener el mismo nivel productivo de las tierras de cultivo esto es debido a la erosión (SEMARNAT, 2008).

4.3.4 Efecto de la erosión en las propiedades fisicoquímicas del suelo

Cuando la lluvia choca en la superficie de un suelo que carece de cubierta vegetal produce un efecto de disgregación e inestabilidad de la estructura del suelo, liberando una serie de transformaciones en los procesos físicos de éste. Una de las propiedades más afectada por esta serie de perturbaciones dentro del perfil es la materia orgánica, esta es conocida como un factor esencial en complejas relaciones entre procesos químicos, físicos, y biológicos del suelo (Gollany *et al.*, 1992; Brunel y Seguel, 2011).

La pérdida de materia orgánica (MO) y el aumento del contenido de arcilla debido a la erosión impactan negativamente la estabilidad de la estructura del suelo. Esto disminuye la capacidad de retención de agua utilizable y la porosidad del suelo, resultando en un aumento de la densidad aparente. La erosión, principalmente a través del transporte de sedimentos por escorrentía, es la causa principal de la pérdida de MO. La remoción del suelo superficial reduce la capacidad de almacenamiento de agua, la diversidad de organismos y el contenido de carbono orgánico (Brunel y Seguel, 2011).

La erosión hídrica del suelo también implica la pérdida de carbono orgánico del suelo (COS), asociado a los sedimentos arrastrados que contienen la fracción lábil del COS, la cual es fácilmente mineralizable. Como resultado, la erosión del suelo es una fuente neta de CO₂ y otros gases, lo que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero. Esta pérdida se refleja en la disminución de la fertilidad del suelo y la reducción de la productividad en los procesos agrícolas (Aguirre-Salado *et al.*, 2023).

Las propiedades químicas del suelo, como el pH y la conductividad eléctrica (CE), son indicadores cruciales de las condiciones que afectan la relación suelo-planta, así como la calidad y cantidad de agua y nutrientes disponibles para las plantas y los microorganismos. Los valores de pH óptimos para el desarrollo de la mayoría de los cultivos están entre 6.0 y 7.5. El pH del suelo influye directamente en la actividad de los microorganismos beneficiosos y en la disponibilidad de nutrientes. En cuanto a la CE, los valores aceptables para el crecimiento de los cultivos se encuentran entre 0-0.8 dS/m (0-800 µS/cm). Sin embargo, estas características se vuelven muy inestables en suelos erosionados, afectando negativamente la productividad agrícola y la sostenibilidad del suelo (Romeo *et al.*, 2009).

4.4 Fertilizantes

Se define un fertilizante como un producto orgánico o inorgánico que aporta nutrientes a las plantas, promoviendo su crecimiento en el momento adecuado, ya sea como apoyo de nutrientes o debido a su escasez (Díaz y Guzmán, 2004). Los fertilizantes se aplican para corregir las deficiencias de nutrientes presentes en el suelo. Pueden estar compuestos por uno o varios elementos esenciales y tienen como objetivo devolver la fertilidad perdida al suelo, es decir, son responsables de la fertilidad adquirida del suelo. Sin embargo, los fertilizantes sólo influyen en los aspectos químicos del suelo y no en los físicos (Navarro y Navarro, 2023).

Los fertilizantes son considerados esenciales para el desarrollo vegetal; en general, contienen nutrientes principales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), nutrientes secundarios como azufre (S), sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg), y micronutrientes como boro (B), cobalto (Co), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn). Los nutrientes pueden encontrarse en forma de agentes quelantes, que son moléculas orgánicas,

o como nutrientes ligados a una o varias moléculas, conocidas como agentes complejantes (Navarro y Navarro, 2023).

4.4.1 Fertilizantes Orgánicos

Desde el punto de vista agrícola, la fertilidad del suelo decrece por la pérdida de materia orgánica debido a procesos de oxidación, la alta tasa de extracción de nutrientes por las plantas cultivadas y la lixiviación por altas precipitaciones. Estas condiciones ocasionan incrementos en la acidez del suelo y, en ocasiones, efectos tóxicos debido a la alteración o desequilibrio de los componentes químicos del suelo (González, 2007).

Los fertilizantes orgánicos son muy diversos, unos provienen de vegetales, otros de restos de animales, algunos más son de origen mineral natural. En los fertilizantes orgánicos, a diferencia de los inorgánicos o químicos, rara vez se puede cuantificar el porcentaje de mínimo de los nutrientes que contiene. Unos tienen un alto contenido de alguno de los nutrientes principales, pero son bajos en otros, y otros tienen una proporción muy baja de los tres. Los nutrientes de los fertilizantes orgánicos no se asimilan directa e inmediatamente como los inorgánicos, pues dependen de los organismos del suelo para la liberación paulatina de los nutrientes (González, 2007).

Los fertilizantes orgánicos influyen en las propiedades fisicoquímicas de los suelos ya que poseen diferentes beneficios como los altos contenidos de nitrógeno mineral, incrementan el contenido de MO, la capacidad de retención de humedad, la disponibilidad de K, Ca, Mg, mejoran la infiltración de agua, la estructura del suelo y la conductividad hidráulica además de disminuir la Da, la tasa de evaporación y mantener el pH del suelo, asimismo fomentan un mejor estado fitosanitario de las plantas (Ramos y Terry, 2014).

4.4.1.1 Estiércoles

Los estiércoles se producen a partir de los excrementos de animales de granja, principalmente bovinos, porcinos, equinos, caprinos, ovinos y aves. Estos residuos suelen incluir restos de materia vegetal utilizada como cama o alimento, como el rastrojo. La

aplicación de estiércol en tierras de cultivo tiene beneficios ecológicos significativos, ya que aporta nutrientes como nitrógeno y fósforo al suelo (Guzmán, 2018).

El nitrógeno en el estiércol está mayormente en forma de amoníaco, que es un nutriente esencial para las plantas. No obstante, el estiércol orgánico suele ser subestimado en comparación con los fertilizantes químicos. Gracias a sus propiedades orgánicas, el estiércol mejora la capacidad del suelo para retener agua, incrementa el intercambio catiónico y facilita la filtración de agua al subsuelo, además de disminuir la erosión. La fracción líquida del estiércol ayuda a reducir las pérdidas de nitrógeno, carbono y azufre en forma gaseosa en el suelo. Esto contribuye a reducir el uso de fertilizantes químicos y, por ende, disminuye el impacto ambiental (Pinos-Rodríguez, *et al.*, 2012).

4.3.1.1.1 Propiedades del estiércol bovino

El estiércol vacuno es el resultado del desecho de especies animales que incluyen ganado doméstico tal como las vacas, bueyes, búfalos, yaks y búfalos de agua. El estiércol de vaca es el residuo no digerido de materia vegetal que ha pasado por el intestino del animal este incluye 80 % agua, 5.6 % microorganismos y 14.4 % residuos no digeridos. El pH de este abono fluctúa entre 7.1 a 7.4. Es rico en celulosa no digerible, hemicelulosas, pentosanos, lignina, proteína cruda y también en 24 diferentes minerales, incluidos nitrógeno, fósforo, magnesio, calcio, potasio, hierro, azufre, cobalto, manganeso y cloro (Behera y Ray, 2021).

Durante siglos, el estiércol ha sido un fertilizante orgánico utilizado tradicionalmente en la agricultura de Asia y África. Sus beneficios para el suelo son amplios, abarcando desde mejorar la resistencia de las plantas contra plagas y enfermedades hasta estimular su crecimiento y facilitar la solubilización de fósforo y azufre. Además, actúa como un reservorio de diversos grupos de microorganismos que desempeñan roles fundamentales en los procesos biogeoquímicos del suelo. La aplicación de estiércol bovino como enmienda orgánica ha sido objeto de numerosos estudios, destacándose sus impactos positivos en las propiedades químicas del suelo. Entre estos efectos se observan aumentos significativos en el contenido de carbono orgánico, fósforo disponible y nitrógeno total, así como mejoras en el pH y una reducción en la saturación de aluminio. (Jiménez *et al.*, 2004; Behera y Ray, 2021).

4.3.1.1.2 Propiedades del estiércol equino

El estiércol de caballo es una combinación húmeda heterogénea de cama y heces. Los lechos pueden variar desde paja de trigo hasta virutas de madera, aserrín y más raramente, papel picado, cáñamo, turba y lino (Da Lio *et al.*, 2021).

Un caballo de un peso aproximado a 454 kg produce alrededor de 17 kg de heces y 9 litros de orina por día, esto da un total de 26 kg de desechos. Los caballos estabulados requieren hasta 9 kg de cama por día. En estas circunstancias, la combinación de cama y estiércol representa hasta 12 toneladas métricas (12,000 kg) de desechos húmedos por caballo al año, se puede estimar que la cantidad anual mundial de estiércol de caballo es de aproximadamente 500 a 800×10^6 toneladas por año (Wartell *et al.*, 2012; Da Lio *et al.*, 2021).

El estiércol es una mezcla altamente heterogénea debido al tipo de material de cama, el manejo del establo y la gestión del estiércol eliminado esto se refiere más a la duración y la disposición del almacenamiento ya que podrían alterar de manera significativa el contenido de materia seca y la degradación de los componentes orgánicos (Da Lio *et al.*, 2021).

La dispersión directa de este abono administra nutrientes, aumenta la materia orgánica, mejora la capacidad de retención de agua y la estructura del suelo (Da Lio *et al.*, 2021). El estiércol de caballo también contiene grandes cantidades de MO y nutrientes minerales menores como Ca, Mg, S, Zn, Cu, Mn y Fe los cuales se van liberando gradualmente, facilitando el aprovechamiento de las plantas (Huachi, 2008; Guzmán, 2021).

Otros aspecto positivo es que retiene 10 veces más nutrientes, mejora la capacidad de intercambio catiónico, y disponibilidad de nutrientes en el suelo; favorece la formación de complejos arcilla-humus, retiene macro y micronutrientes previniendo así su pérdida por lixiviación; proporciona energía a los microorganismos, aumentando así la actividad biológica del suelo y protege la superficie del suelo al aumentar la penetración del agua, reduciendo así el riesgo de erosión (Huachi, 2008; Da Lio *et al.*, 2021).

Dado los efectos positivos que tiene el estiércol en el suelo, es recomendada su adición especialmente en suelos con un porcentaje bajo de MO o degradados por el efecto de la erosión, ya que su aplicación puede mejorar la calidad de la producción de cultivos (Huachi, 2008).

4.5 Bioestimulantes

Actualmente la agricultura tiene como objetivo encontrar alternativas que aseguren el incremento del rendimiento de los cultivos y a su vez disminuyan o eliminen el uso de plaguicidas, fertilizantes y reguladores del crecimiento fabricados por las industrias químicas, ya que estos compuestos son un riesgo elevado de contaminación para el ambiente (Bell-Mesa *et al.*, 2017).

Un bioestimulante es una sustancia o conjunto de microorganismos que, al aplicarse en las plantas, mejoran la eficacia, absorción y asimilación de nutrientes. Además, estos productos ayudan a las plantas a tolerar el estrés biótico y abiótico, y mejoran diversas características agronómicas. A diferencia de los fertilizantes convencionales, los bioestimulantes no se limitan únicamente al aporte de nutrientes, sino que también proporcionan beneficios adicionales como el incremento del rendimiento de los cultivos y una mayor vitalidad desde la germinación hasta la fructificación de la planta. Estos bioproductos, están asociados a la nutrición, relaciones con el agua, estructura del suelo, pH, metales pesados. Un aspecto destacado de los bioestimulantes es su capacidad para acelerar el ciclo del cultivo, lo que permite reducir significativamente, entre un 30 % y un 50 %, la dosis recomendada de fertilizantes convencionales (Valverde-Lucio *et al.*, 2020).

Estas sustancias pueden ser compuestos individuales, así como la glicina betaína o tan bien grupos de compuestos naturales cuya única composición son componentes bioactivos que no están completamente caracterizados tal como los extractos de algas marinas (Du Jardín, 2015).

El uso de estos productos ejerce una función biorreguladora y bioestimuladora en el crecimiento de los cultivos forma parte de la base de la fertilidad del suelo. Estos productos presentan un triple aspecto: químico, físico y biológico. Cuando estas sustancias se aplican a

diferentes cultivos pueden aumentar los rendimientos de los cultivos, mejoran la resistencia al frío y la tolerancia a la salinidad del suelo (Cabrera-Medina *et al.*, 2011).

4.5.1 Pasta de algas

Las algas son organismos autótrofos de estructura simple, con escasa o nula diferenciación celular y tejidos complejos. Taxonómicamente se agrupan en tres grupos: Chlorophyta o clorofitas, Phaeophyta o feófitas y Rhodophyta o rodofitas, que por sus pigmentos corresponden a algas verdes, pardas y rojas respectivamente (Quitral *et al.*, 2012).

Según Du Jardín, (2015), la pasta de algas o extracto de algas se considera un bioestimulante que aporta materia orgánica. Este producto ha ganado popularidad en el ámbito comercial, incluyendo extractos de algas y compuestos purificados como polisacáridos de laminarina, carragenanos y alginato. Además de estos componentes, otros como micro y macronutrientes, así como citoquininas, auxinas, ácido abscísico, giberelinas y otros compuestos similares a hormonas como esteroides y poliaminas, presentes en los extractos de algas, también contribuyen al efecto promotor del crecimiento y rendimiento de los cultivos.

El uso de extractos de algas en la agricultura se basa en la acción sinérgica de todos sus componentes, lo que significa que los efectos beneficiosos no se deben a un único principio activo, sino a la interacción conjunta de todos ellos. Esto se puede lograr incluso con concentraciones muy bajas, como una proporción de 1:1000. Los efectos dependen de la forma en que sean administrados los extractos, pudiendo ser aplicados de una forma directa al suelo, o mediante aspersión foliar, por paletización a las semillas, tratamiento postcosecha o por la combinación de algunos de ellos, no obstante, la combinación del tratamiento directo del suelo y la aspersión foliar es el más utilizado (López-Padrón *et al.*, 2020).

Las enzimas de las algas o sus derivados provocan o activan en el suelo reacciones de hidrólisis enzimáticas catalíticas reversibles (López, 1999); también se han reportado que hidratan y reestructuran el suelo. A diferencia de los fertilizantes químicos, estas son ricas en macro y microelementos, las algas liberan más lentamente el nitrógeno. También, se han utilizado para la disminución de la cantidad de sodio intercambiable, lo que conduce a la restauración de los suelos sódicos (López-Padrón *et al.*, 2020).

4.5.1.1 *Dunaliella salina*

Esta alga pertenece al reino Plantae, Subreino Viridiplantae, Filo Chlorophyta, Subfilo Clorofitina, Clase Chlorophyceae, Orden Volvocales, Familia Dunaliellaceae por último presenta un género *Dunaliella*, fue descubierta por Teodoresco en 1905.

Dunaliella salina (**Figura 3**) es una célula que puede variar su forma de elipsoidal a cilíndrica dependiendo de las condiciones de cultivo. Esta especie está equipada con dos flagelos isomorfos de longitud similar al cuerpo celular. En la parte posterior de la célula, se encuentra un cloroplasto grande en forma de copa que alberga un pirenoide central de considerable tamaño. El núcleo se sitúa entre los lóbulos del cloroplasto, ocupando una posición central en la célula. *D. salina* tiene dimensiones que van desde los 10 hasta los 29 μm de longitud y de 8 a 21 μm de ancho, con una coloración que puede variar desde un tono amarillo-verdoso hasta un rojo intenso (Parra *et al.*, 1990).



Figura 3. *Dunaliella salina* (400x) (Fuente: Mendoza *et al.*, 2011)

Este género es ampliamente estudiado en términos de cultivo a gran escala, especialmente en acuicultura, donde destaca notablemente *Dunaliella salina*. Esta microalga tiene la capacidad única de prosperar en medios hipersalinos y exhibe una alta tolerancia a la osmolaridad. *D. salina* es reconocida por su contenido elevado de β -caroteno, un pigmento altamente valorado en la industria alimentaria por su contribución como provitamina A. Además, el β -caroteno tiene aplicaciones significativas en la industria farmacéutica (Mendoza *et al.*, 2011).

Hasta ahora, la investigación se ha centrado en la capacidad de *D. salina* para producir compuestos de interés industrial, como carotenoides, lípidos, glicerol, proteínas y compuestos farmacéuticos. El potencial de *D. salina* no se limita a la generación de bioproductos. También se ha aplicado para recuperar nutrientes, síntesis de biocombustibles y secuestrar dióxido de carbono (De Souza Celente *et al.*, 2024).

D. salina se puede desarrollar en diferentes hábitats marinos como son los lagos de salmuera, océanos, marismas e incluso lagunas saladas cerca del mar, preferentemente en cuerpos de agua que contienen una concentración de 2 M de cloruro de sodio y altos niveles de magnesio (Ben -Amotz, 2003; Guevara *et al.*, 2016). Esta microalga tiene capacidad de adaptarse a altas concentraciones de salinidad y tolerar altas intensidades luminosas al igual que temperaturas, así como deficiencias de fósforo y nitrógeno (López *et al.*, 2013; Guevara *et al.*, 2016).

Las características de *Dunaliella salina*, esta es una microalga que se puede desarrollar en condiciones extremas y deficientes como un suelo erosionado hídricamente y se ha cultivado principalmente para la obtención de β -caroteno y glicerol, entre otros metabolitos como lípidos, y carbohidratos (Mendoza *et al.*, 2011). El glicerol este polialcohol incrementa la capacidad de retención del suelo y ayuda a la absorción de nutrientes, aumentando así la MO del suelo (Betancourt-Aguilar *et al.*, 2016).

5. Justificación

El Estado de México enfrenta serios problemas de erosión hídrica, y el municipio de Jiquipilco, ubicado al norte del Valle de Toluca y al oriente del Valle de Ixtlahuaca, no es ajeno a esta problemática. Esta zona cuenta con condiciones climáticas ideales para el cultivo de hortalizas, tanto al aire libre como bajo invernadero. Sin embargo, debido a la topografía inclinada del terreno y las prácticas agrícolas utilizadas, la erosión hídrica tipo laminar es un desafío significativo.

La comunidad de Jiquipilco destina aproximadamente 15,570 hectáreas para la agricultura, pero este espacio se ve cada vez más reducido debido a los efectos de la erosión hídrica. Este fenómeno tiene un impacto considerable en las propiedades fisicoquímicas del suelo, las cuales son cruciales para mantener su fertilidad. Como alternativa para mitigar este problema, se propone el uso de mezclas de fertilizantes orgánicos y bioestimulantes basados en algas. Estos productos no solo proporcionan nutrientes esenciales, sino que también mejoran el rendimiento de los cultivos y contribuyen a la restauración del medio edáfico. Además, favorecen la dinámica suelo-planta y ofrecen otros beneficios significativos.

6 Hipótesis

Si el estiércol puede enriquecer el suelo con nutrientes esenciales para las plantas y mejorar la calidad del medio edáfico, y este efecto puede ser potenciado mediante el uso de bioestimulantes que estimulan la actividad de los microorganismos del suelo, aumentando la disponibilidad de nutrientes y mejorando la fertilidad del suelo, entonces los tratamientos que incluyan tanto abono orgánico como pasta de algas serán altamente efectivos para mejorar significativamente las propiedades fisicoquímicas de suelos afectados por la erosión hídrica

7 Objetivo

General

Evaluar el efecto de la incorporación de *Dunaliella salina* mezclada con abonos orgánicos en un suelo erosionado hídricamente a través de algunas propiedades fisicoquímicas, como una alternativa para mitigar los efectos ocasionados por dicha erosión.

Particulares

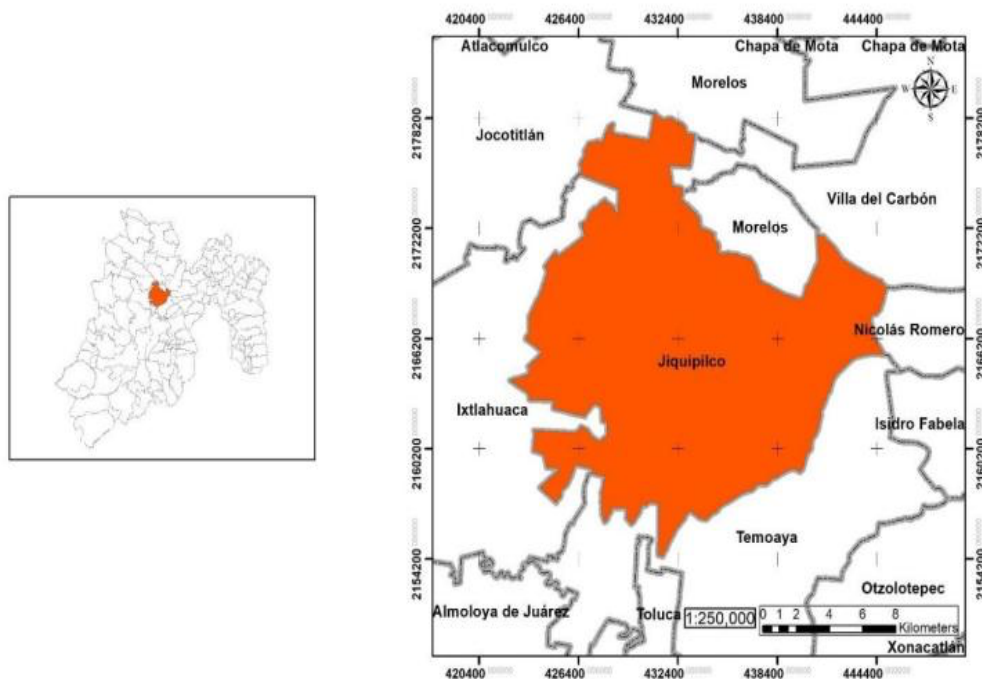
Conocer el efecto de la aplicación de *Dunaliella salina* mezclada con abono de vaca y caballo a los 15, 30 y 45 días después de su aplicación sobre pH, materia orgánica, conductividad eléctrica y mineralización de nitrógeno de un suelo erosionado hídricamente.

Analizar el impacto de la adición de *Dunaliella salina* mezclada con estiércol vacuno y equino, en una dosis baja (35 t ha^{-1}) y una dosis alta (70 t ha^{-1}), en las propiedades fisicoquímicas de un suelo erosionado hídricamente.

8 Material y Métodos

8.1 Zona de muestreo

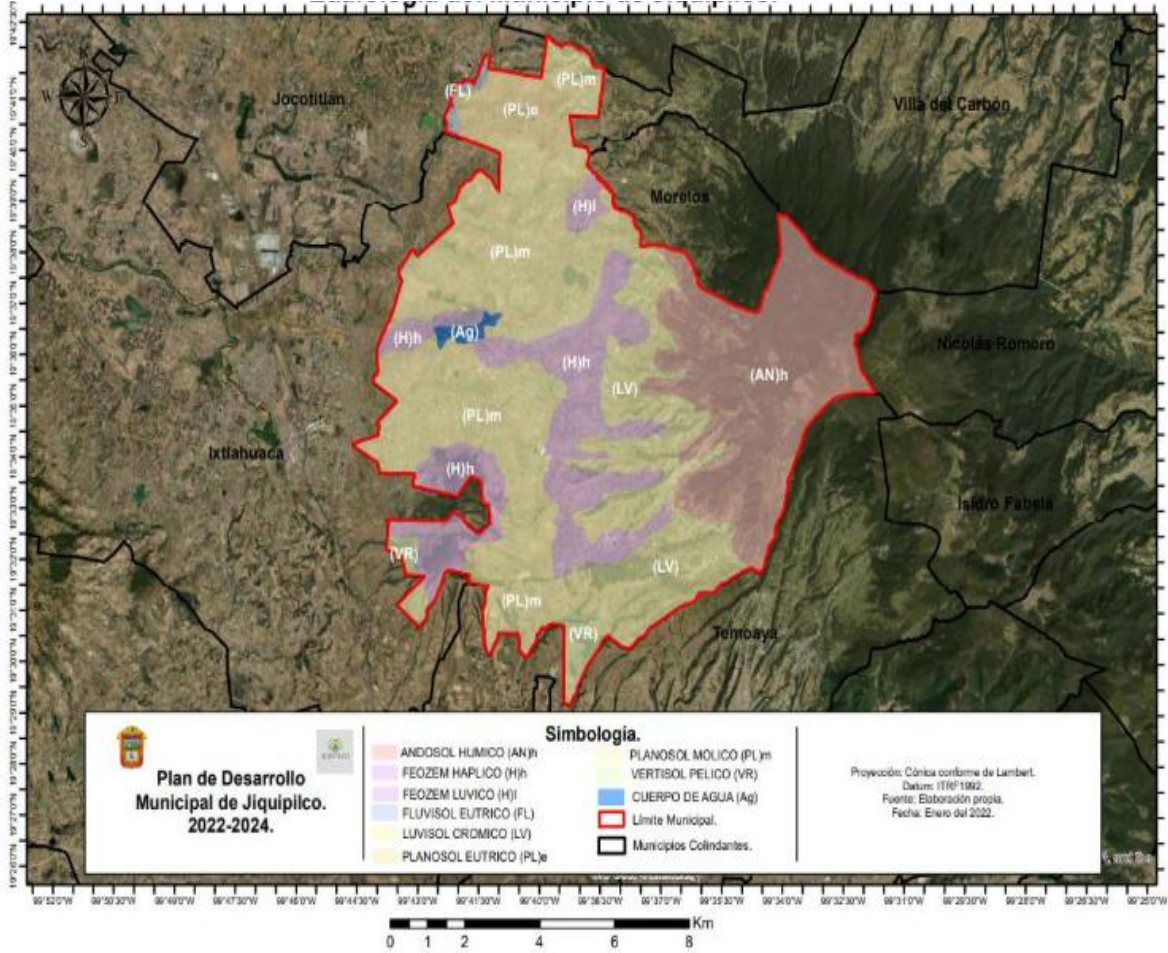
El municipio de Jiquipilco (Mapa 3) se localiza al norte del Valle de Toluca y al oriente del Valle de Ixtlahuaca, ocupando parte de la serranía del monte alto, sus coordenadas geográficas son 19°31'58" latitud norte; 99°41'15" de longitud oeste, a una altitud de 2723m, posee un clima templado subhúmedo con lluvias en verano C(w2) w, su temperatura máxima es de 18°C, se registra una precipitación pluvial de 875.5 milímetros, Jiquipilco presenta un grado intenso de erosión hídrica (Bolaños *et al.*, 2016; Gaceta de Gobierno Municipal, 2022).



Mapa 3. Municipio Jiquipilco, Estado de México (Elaboración propia con ayuda del programa ArcGIS 10.8).

El municipio de Jiquipilco se caracteriza por la diversidad de sus suelos, compuestos por ocho tipos principales según la clasificación de la FAO/UNESCO (**Mapa 4**). Estos tipos incluyen Planosol, Andosol, Luvisol, Feozem, Vertisol, Cambisol, Fluvisol y Litosol. Las zonas con alta aptitud forestal en el municipio abarcan 9,558.438 hectáreas, lo que representa el 34.47% de su superficie total. Entre estas áreas, los suelos Andosol son predominantes, cubriendo el 25% del territorio de Jiquipilco. Este tipo de suelo es especialmente vulnerable a

la erosión por acción mecánica del agua cuando está expuesto directamente en la superficie, por lo cual es crucial mantener su cobertura vegetal para preservar sus propiedades (Gaceta de Gobierno Municipal, 2022).



Mapa 4. Variedad de suelos presentes en el municipio de Jiquipilco (Fuente: Gaceta de Gobierno Municipal, 2022).

8.2 Toma de la muestra

Se llevó a cabo un muestreo preferencial utilizando una pala, donde se recolectaron los primeros 20 cm de la superficie erosionada. Las muestras de suelo obtenidas se colocaron en botes de plástico de con capacidad para 4 kg, cada uno conteniendo aproximadamente 3.6 kg de suelo erosionado. Cada muestra fue etiquetada y transportada cuidadosamente a un invernadero, asegurando que el suelo recolectado no fuera perturbado durante el proceso.

Se realizó una recolecta de 12 kg de abono de equino y bovino, se tomó en cuenta que estuviera fresco, y que no se encontrará expuesto a la intemperie. Para el secado del abono se

colocó en la sombra a temperatura ambiente, sobre una superficie de papel estraza durante tres semanas, una vez seco se procedió a moler y se tamizó por medio de un tamiz de 2mm.

8.3 Diseño experimental

Para la aplicación de la pasta de algas (bioestimulante), esta se preparó en una relación alga-agua 0.2:1 (2 gr/Lt) de acuerdo con Rojas, (2021) y López-Padrón *et al.* (2020) posteriormente se adicionaron 100 mL de solución a cada bote y se incorporó el estiércol bovino y equino en una dosis baja ($35,000 \text{ Kg ha}^{-1}$) y una dosis alta ($70,000 \text{ Kg ha}^{-1}$), y se tuvo un tratamiento control el cual consistió únicamente en la aplicación de pasta de algas (bioestimulante). La aplicación del abono se realizó en un solo tiempo (día 1), mientras que el bioestimulante (pasta de algas) se incorporó en tres tiempos (1, 15 y 30 días).

La distribución de los botes se realizó mediante un diseño completamente aleatorio. Los tratamientos aplicados fueron los siguientes: pasta de algas (C), vaca dosis alta + pasta de algas (V70), vaca dosis baja + pasta de algas (V35), caballo dosis alta + pasta de algas (C70), y caballo dosis baja + pasta de algas (C35), cada tratamiento contaba con seis repeticiones.

8.4 Análisis fisicoquímico

Para el análisis fisicoquímico, se realizó un muestreo de los primeros 15 cm de suelo de cada uno de los tratamientos a los 15, 30 y 45 días después de incorporación del abono, y antes de la siguiente aplicación del bioestimulante. Las muestras recolectadas se dejaron secar a temperatura ambiente y luego se colocaron en bolsas de plástico etiquetadas, las cuales fueron transportadas al Laboratorio de Edafología y Ambiente de la UAEMex para su posterior análisis.

Se determinó textura con el método de (AS-09), pH (método AS-02) en una relación suelo: agua 1:2, densidad aparente por el método de la probeta, materia orgánica (método AS-07) de Walkley y Black, conductividad eléctrica (método AS-18), determinación del Nitrógeno inorgánico (AS-08), la realización de estos análisis se llevó a cabo mediante la NOM-021-RECNAT 2000.

8.5 Análisis estadísticos

El análisis estadístico se realizó por medio de un ANOVA para un diseño en bloques completamente aleatorio, junto con la prueba de Tukey para determinar las diferencias significativas entre las propiedades fisicoquímicas medidas, ambos análisis se realizaron con un nivel de confianza del 95%, con ayuda del paquete estadístico Statgrapichs Centurion 5.0.

9 Resultados

9.1 Caracterización fisicoquímica del suelo

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos de los análisis fisicoquímicos del suelo antes de la adición del abono, el cual se caracterizó como un suelo arcillo-arenoso y de acuerdo con la NOM-021-RECNAT 2000 con un pH moderadamente ácido, muy bajo contenido en MO, baja concentración en sales y efectos despreciables de salinidad.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de suelo con erosión hídrica.

Parámetros	Suelo con erosión hídrica
Arena (%)	39.2
Limo (%)	20.4
Arcilla (%)	40.4
Clase de textura	Arcilla arenosa
Densidad aparente (g/ml)	1.3 ± 0.02
pH	6.19 ± 0.01
CE (μS/cm)	37.17 ± 0.06
M.O (%)	0.53 ± 0.01

Promedio ± desviación estándar, CE: Conductividad eléctrica; MO: Materia orgánica.

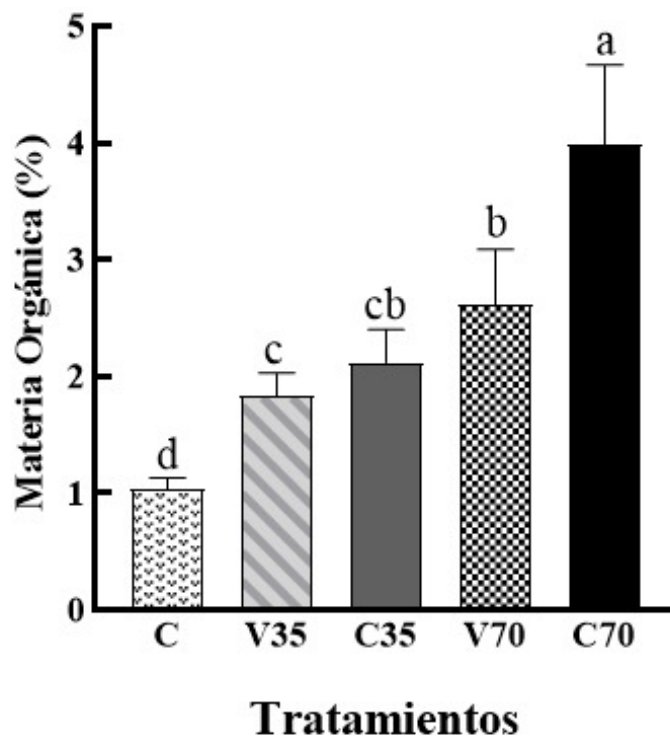
9.2 Propiedades fisicoquímicas

9.2.1 Materia Orgánica

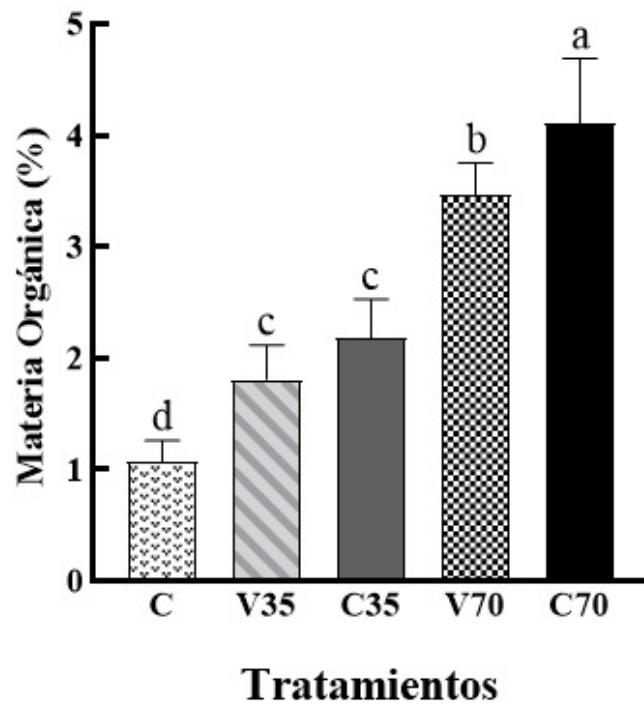
El contenido de materia orgánica (MO) aumentó respecto al control tras la incorporación de los diferentes tratamientos a los 15 y 30 días, mostrando incrementos estadísticamente significativos ($p < 0.05$). A los 15 días, el tratamiento C70 alcanzó un 3.98%, seguido por V70 con un 2.62%, clasificándose como porcentaje alto y medio respectivamente, según la NOM-021-RECNAT 2000.

Resultados similares se obtuvieron a los 30 días, con C70 y V70 presentando los valores más altos y estadísticamente significativos ($p < 0.05$) de MO en comparación con los demás tratamientos. A los 45 días, el tratamiento C70 mostró una disminución en su porcentaje de MO en un 3.24%, este porcentaje se clasificó como medio según la NOM-021-RECNAT 2000 (Figura 4).

a) 15 días



b) 30 días



c) 45 días

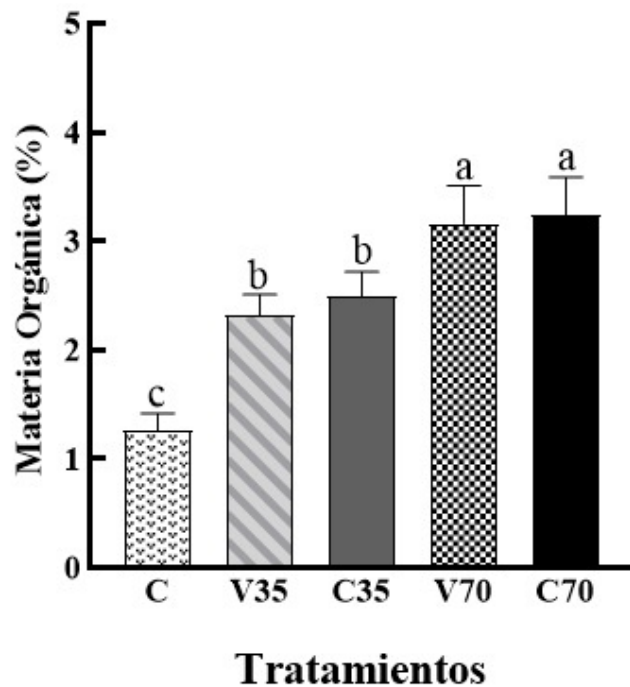


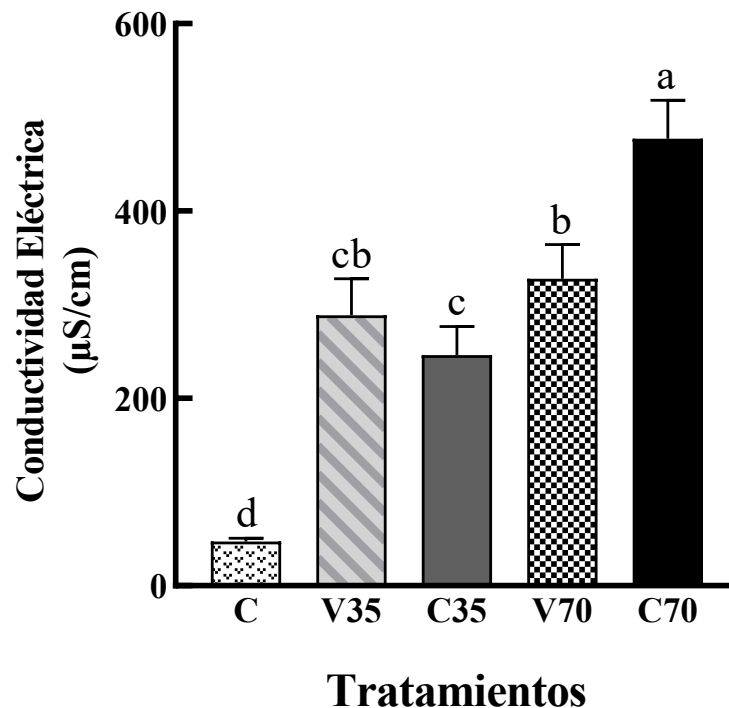
Figura 4. Materia orgánica (MO) de un suelo con erosión hídrica tratado con abono orgánico y bioestimulante, C (control con 0.2 % de pasta de alga), V70 (70 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2 % de pasta de alga), V35 (35 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2 % de pasta de alga), C70 (70 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2 % de pasta de algas), C35 (35 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2 % de pasta de alga) a los a) 15 días, b) 30 días y c) 45 días después de su aplicación. Promedio ± desviación estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas (p<0.05).

9.2.2 Conductividad Eléctrica

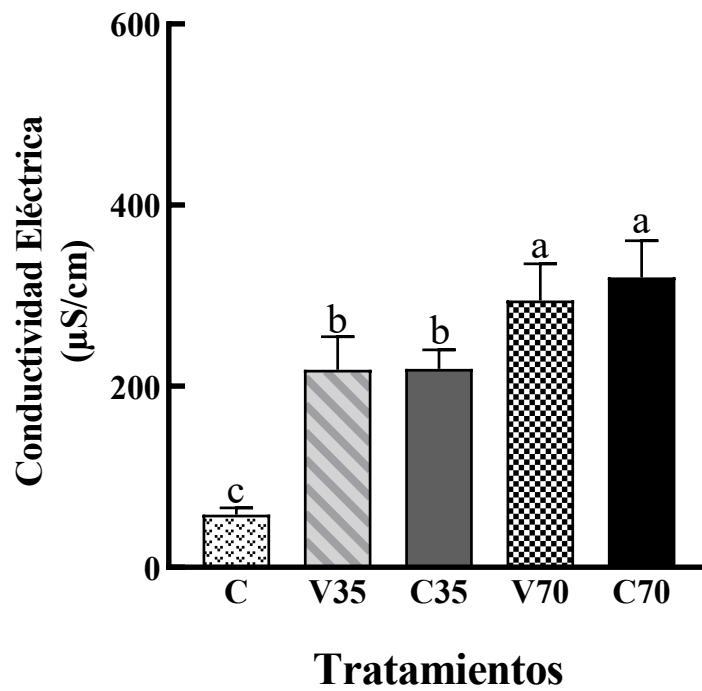
La aplicación de los diferentes tratamientos aumentó la conductividad eléctrica (CE), según se muestra en la **Figura 5**. Se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el control y los demás tratamientos 15 días después de su aplicación. Los tratamientos C70 y V70 mostraron los valores más altos de CE, con $477.49 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $327.89 \mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Según la NOM-021-RECNAT 2000, los tratamientos C70 y V70 se consideran despreciables en su contenido de sales ($< 10000 \mu\text{S}/\text{cm}$).

A los 30 y 45 días de la aplicación de los tratamientos, los valores de CE disminuyeron. El tratamiento C70 presentó valores que fluctuaron entre $320.46 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $324.56 \mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, mientras que los valores del tratamiento V70 oscilaron entre $294.94 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $267.28 \mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, ambos se clasificaron como despreciables en su contenido de sales según la NOM-021-RECNAT 2000.

a) 15 días



b) 30 días



c) 45 días

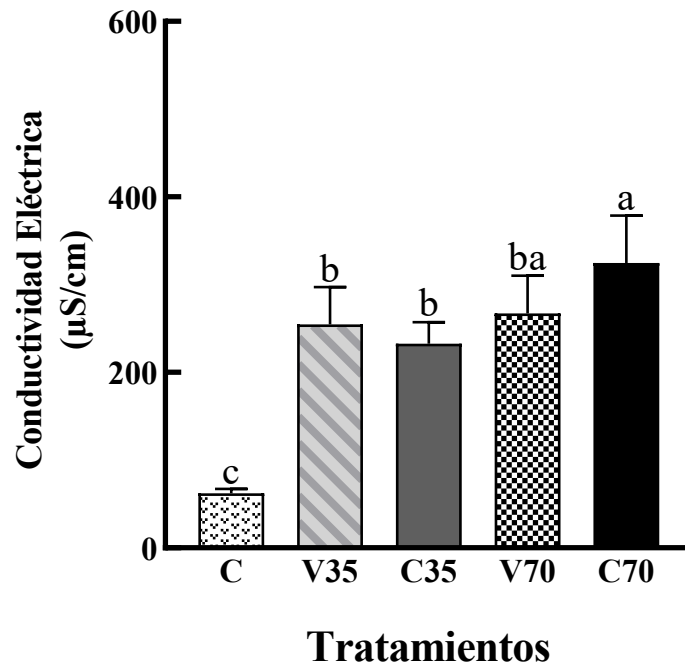


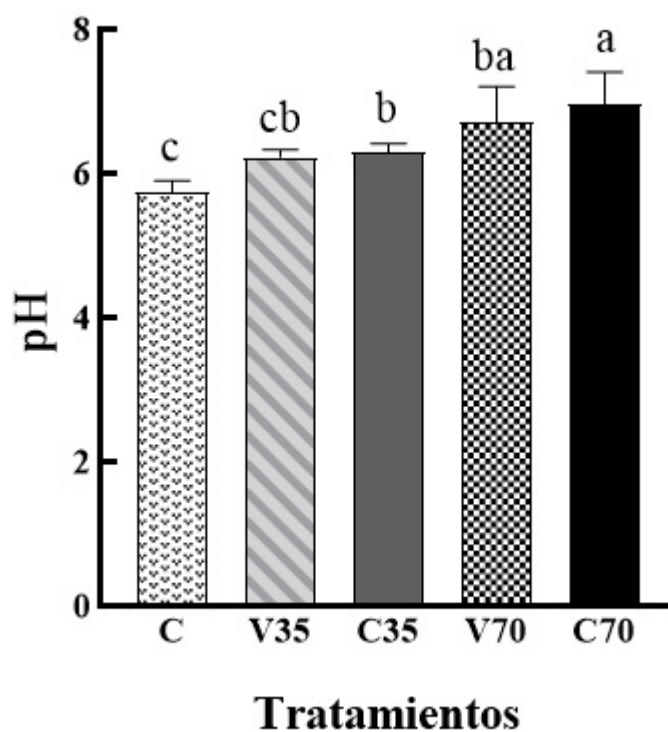
Figura 5. Conductividad eléctrica (CE) de un suelo con erosión hídrica tratado con abono orgánico y bioestimulante, C (control con 0.2 % de pasta de alga), V70 (70 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2 % de pasta de alga), V35 (35 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2 % de pasta de alga), C70 (70 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2 % de pasta de algas), C35 (35 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2 % de pasta de alga) a los a) 15 días, b) 30 días y c) 45 días después de su aplicación. Promedio ± desviación estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas (p<0.05).

9.2.3 pH

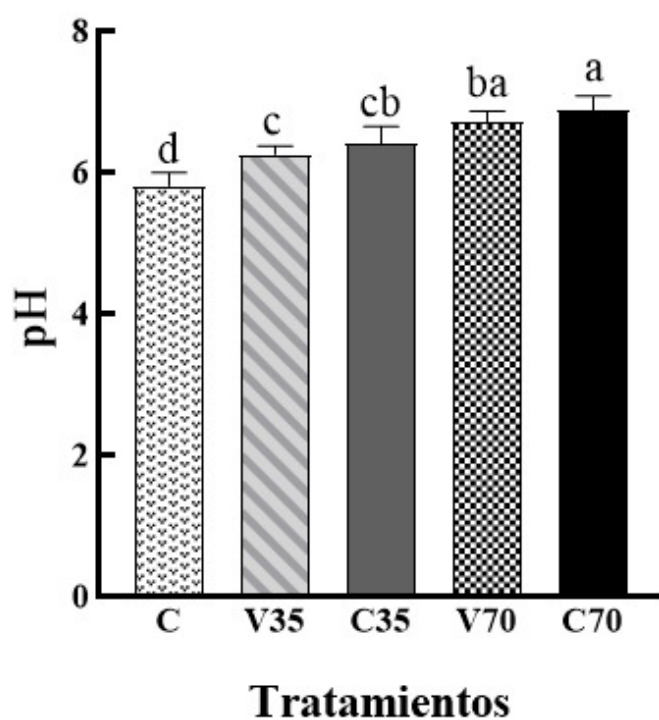
Como se puede apreciar en la **Figura 6**, el pH del suelo erosionado hídricamente mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) a los 15, 30 y 45 días tras la aplicación de los diferentes tratamientos. Los tratamientos con una dosis alta de abono (70 t ha^{-1}) presentaron los valores de pH más altos.

El tratamiento C70 obtuvo valores de 6.96, 6.87 y 6.76, mientras que el tratamiento V70 presentó valores de 6.71, 6.70 y 6.67 a los 15, 30 y 45 días respectivamente. Según la NOM-021-RECNAT 2000, estos tratamientos tienen una clasificación de pH neutro

a) 15 días



b) 30 días



c) 45 días

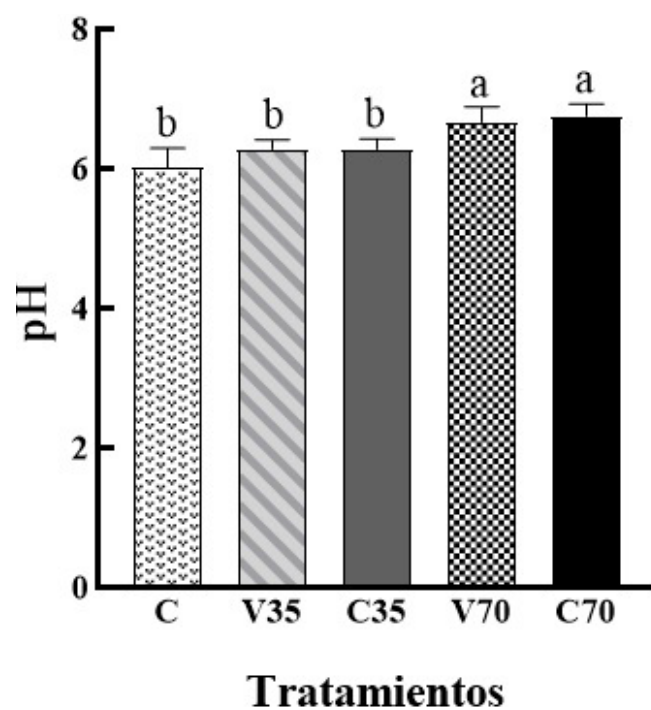


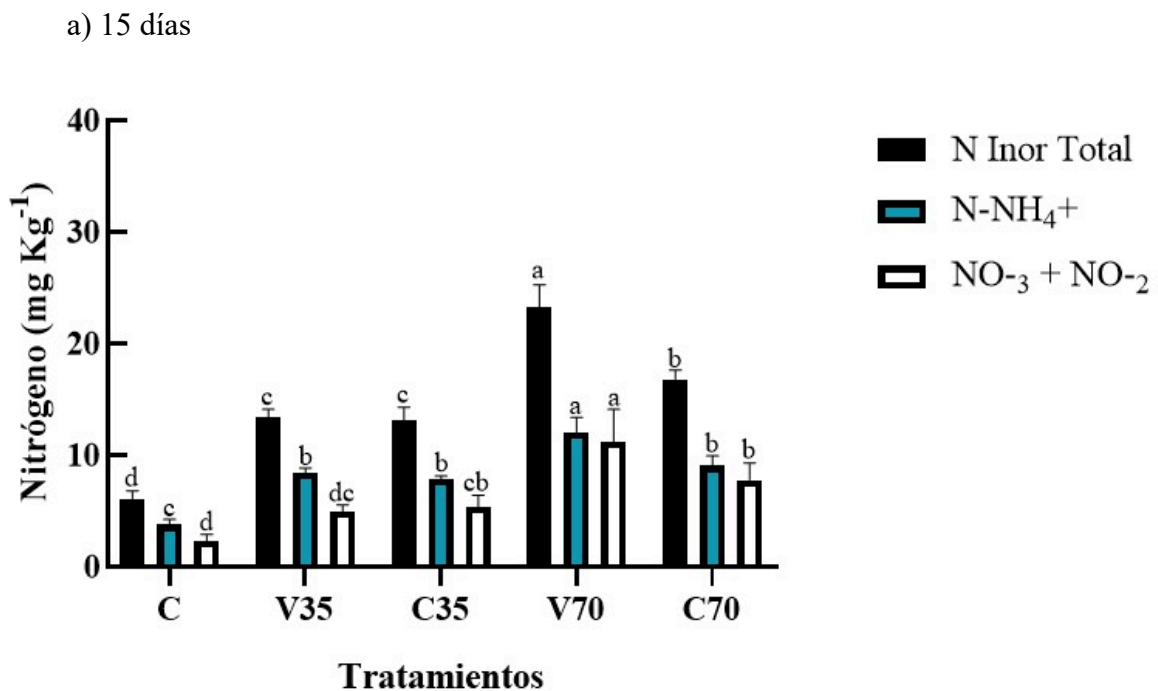
Figura 6. pH de un suelo con erosión hídrica tratado con abono orgánico y bioestimulante, C (control con 0.2 % de pasta de alga), V70 (70 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2 % de pasta de alga), V35 (35 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2 % de pasta de alga), C70 (70 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2 % de pasta de algas), C35 (35 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2 % de pasta de alga) a los a) 15 días, b) 30 días y c) 45 días después de su aplicación. Promedio \pm desviación estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0.05$).

9.2.4 Nitrógeno Inorgánico, amonio, nitratos y nitritos

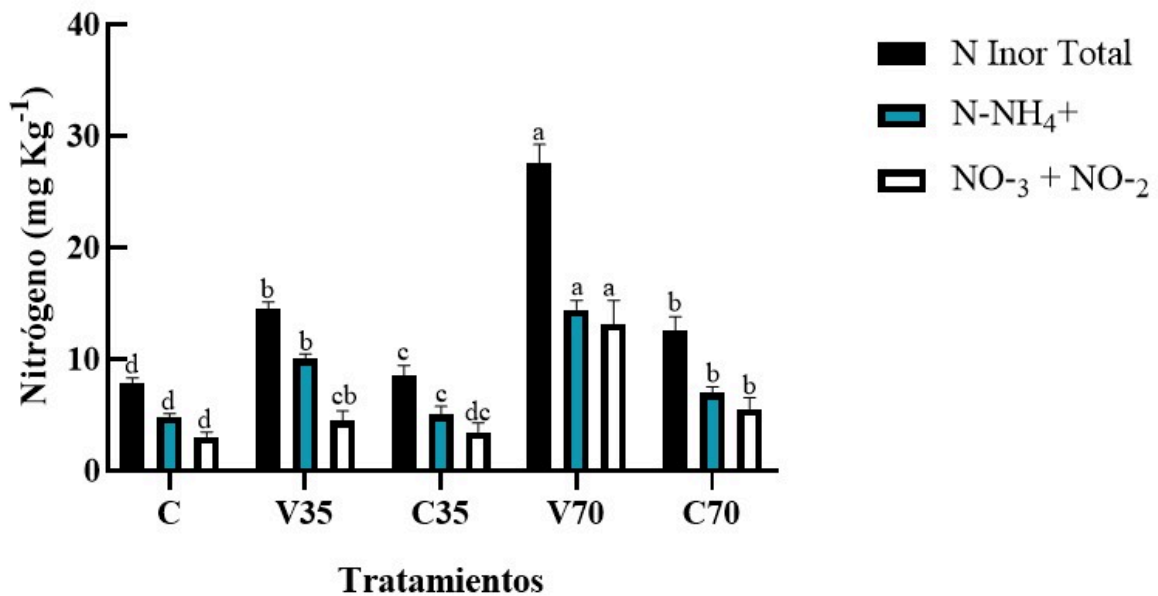
La incorporación de los diferentes tratamientos tuvo un impacto significativo en la concentración de N inorgánico ($p < 0.05$). A los 15 días después de la aplicación, los tratamientos con la dosis alta de abono (70 t ha^{-1}) mostraron la mayor concentración de N, NH_4^+ y $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$. Específicamente en N, el tratamiento V70 alcanzó 23.27 mg Kg^{-1} y el tratamiento C70 registró 16.82 mg Kg^{-1} . Según la NOM-021-RECNAT 2000, estos valores se clasificaron como contenido medio y bajo en N, respectivamente.

A los 30 días de la aplicación de los tratamientos, se observó un aumento en los valores de N, el tratamiento V70 con 28.25 mg Kg^{-1} obtuvo el valor más alto, clasificado como contenido medio en N según la NOM-021-RECNAT 2000.

Después de 45 días, los tratamientos con abono vacuno presentaron los valores más altos. El tratamiento V70 continuó mostrando una mayor concentración de N, NH_4^+ y $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, con 27.57 mg Kg^{-1} , mientras que el tratamiento V35 registró 14.55 mg Kg^{-1} . El tratamiento V70 mantuvo un nivel medio de N, mientras que el tratamiento V35 conservó un contenido bajo de acuerdo con NOM-021-RECNAT 2000, (Figura 7).



b) 30 días



c) 45 días

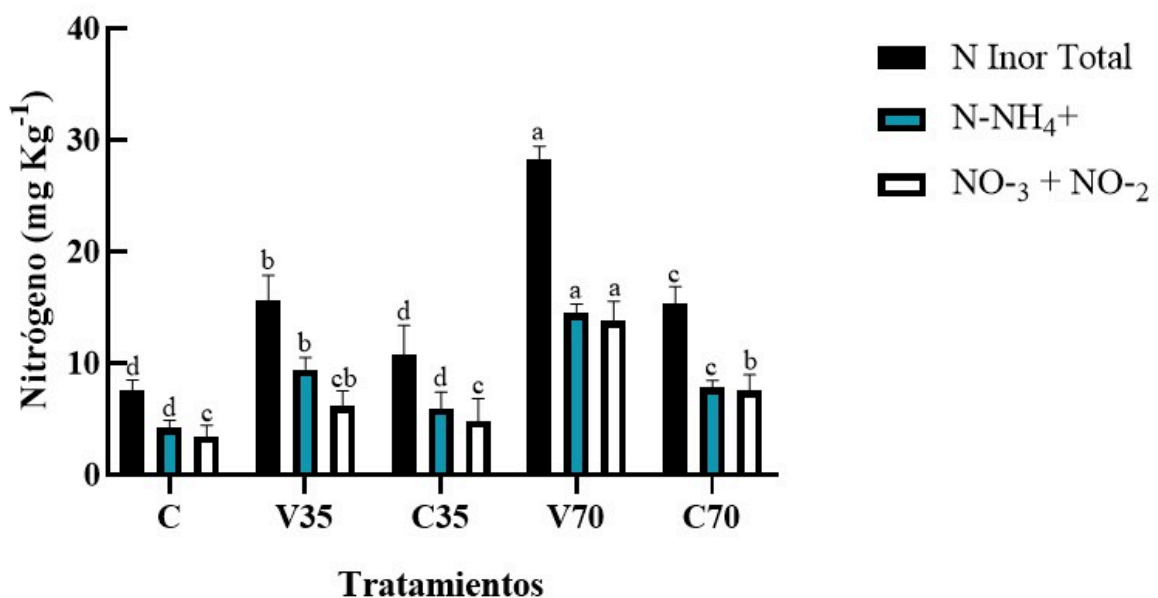


Figura 7. Concentración de N de un suelo con erosión hídrica tratado con abono orgánico y bioestimulante, C (control con 0.2 % de pasta de alga), V70 (70 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2 % de pasta de alga), V35 (35 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2 % de pasta de alga), C70 (70 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2 % de pasta de algas), C35 (35 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2 % de pasta de alga) a los a) 15 días, b) 30 días y c) 45 días después de su aplicación. Promedio ± desviación estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas (p<0.05).

10 Discusión

10.1 Perfil fisicoquímico

Bolaños *et al.* (2016) identifican a este suelo con un grado de erosión extrema. De acuerdo con los datos de la **tabla 2**, se observó un bajo contenido de materia orgánica (0.53%) por lo que se prevé una pérdida del primer horizonte del suelo, además, la pérdida de materia orgánica y el aumento en el contenido de arcilla son indicadores típicos de la erosión, los cuales contribuyen al incremento de la densidad aparente del suelo reportada en este estudio correspondiente a 1.3 g/ml y un porcentaje de arcilla considerablemente mayor al reportado por Hincapié y Salazar, (2011). Estos cambios estructurales que presentó el suelo (**Tabla 2**), generan alteraciones permanentes e irreversibles en su perfil, comprometiendo de manera significativa sus características originales y su capacidad para sostener la vida vegetal y los procesos ecológicos (Salamanca y Sadeghian, 2005; Brunel y Seguel, 2011; Huang *et al.*, 2013).

Dado que existió una disminución de la materia orgánica en este suelo, la actividad de los microorganismos decrece, ya que estos dependen de la mineralización de dicha materia para obtener energía. Por lo cual se prevé que en este suelo erosionado la reducción de microorganismos afecte tanto la estructura de los agregados como a los ciclos biogeoquímicos, dado que la materia orgánica es la principal fuente de nutrientes y energía para ellos (Maya, 2011; Huang *et al.*, 2013).

10.2 Materia Orgánica

El contenido de MO se vió influenciado a causa de la incorporación de los diferentes tratamientos desde el día 15, reportándose porcentajes más altos respecto al control. Estas diferencias fueron más notorias en los tratamientos V70 y C70 (**Figura 4**). Estos tratamientos corresponden a las dosis más altas de estiércol (70 t ha⁻¹). Los resultados son consistentes con lo reportado por Salazar-Sosa *et al.* (2010) quienes encontraron que la aplicación de estiércol al suelo en dosis de 40 a 160 t ha⁻¹ incrementa el contenido de la MO.

Sin embargo, los porcentajes obtenidos en este estudio no correspondieron con lo reportado por Salazar-Sosa *et al.* (2010) ya que en dosis de hasta 160 t ha⁻¹ de abono han incrementado el porcentaje de MO hasta un 5.24% aunque este incremento fue en un suelo agrícola con constante aplicación de estiércol, lo que difiere en este caso ya que aumentó hasta 3.24% para C70 y 3.16% para V70 en 45 días (**Figura 4**). Esto se podría explicar porque la mineralización de la MO ocurre a partir de la biomasa microbiana del medio edáfico al tener la MO una gran diversidad de componentes que la forman y no todos los compuestos orgánicos tienen la misma facilidad de ser degradados, a los 15 y 30 días la MO se encontró en porcentajes altos, estos compuestos corresponden a la MO descomponible o lábil que al ser más fácil de descomponerse va a conformar grandes porcentajes de MO, a los 45 días estos valores disminuyeron, esto podría explicarse por una posible predominancia de hongos provenientes de los diferentes tipos de estiércol responsables de la degradación de las sustancias húmicas compuestos más difíciles de sintetizar. La influencia de la erosión en los microorganismos del suelo provoca considerablemente que se vea afectada la dinámica de los depósitos de carbono del suelo debido a su ocurrencia simultánea con el efecto de selectividad la cual va a mineralizar el C de forma más lenta (Huang *et al.*, 2013; Barattini y Hepp, 2019).

El tratamiento V70, presentó un porcentaje medio de MO (**Figura 4**), de acuerdo con Salazar-Sosa *et al.* (2007) la adición al suelo de estiércol bovino incrementa la MO en 1% en dos años de aplicación esto se puede deber a que, a diferencia del estiércol bovino, el estiércol de caballo, aunque es menos rico en nitrógeno, es más rico en celulosa, lo que contribuye a un aumento más efectivo de la MO (Huachi, 2008). Esto se ve reflejado en el tratamiento C70 ya que obtuvo porcentajes de MO elevados a los 15 y 30 días (**Figura 4**). Esto se atribuye a que el estiércol de caballo posee grandes cantidades de carbono, materia orgánica y micronutrientes, los cuales se liberan lentamente, facilitando el aprovechamiento por parte de las plantas (Guzmán, 2021).

La MO encontrada en el perfil fisicoquímico y el tratamiento C (tratamiento conformado únicamente por pasta de algas), aumentó de 0.53 a 1.26 % a los 45 días de la aplicación de la pasta de algas. Esto se puede explicar debido a la influencia de la pasta de algas, que proporciona materia orgánica y fertilidad a los suelos, mejorando sus propiedades fisicoquímicas y aumentando la cantidad de microorganismos del suelo. Las algas como *D. salina* actúan sobre los suelos proporcionando una mayor productividad, mejorando el suministro de micro y macronutrientes ya que mantienen la liberación gradual de nutrientes,

previniendo su pérdida. Además, se ha demostrado que los metabolitos de las microalgas mejoran la fertilidad y la absorción de nutrientes del suelo, promoviendo su acción como bioestimulantes, *D.salina* produce glicerol y lípidos que constituyen una fuente adecuada de carbono para los microorganismos y pueden incrementar la actividad microbiana en el suelo (Du Jardín, 2015; López-Padrón *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2024).

El porcentaje alto de MO es también atribuido a que no se presentó un sistema de cultivo donde su presencia podría haber tenido un efecto en la mineralización de la MO y, por lo tanto, disminuir el porcentaje de esta. Es importante mencionar que las fluctuaciones registradas en el contenido de materia orgánica también son atribuidas al papel de otros factores edáficos como temperatura y humedad (Huachi, 2008; Nonato *et al.*, 2018) variables que no se midieron en este estudio y que son muy importantes.

10.3 Conductividad Eléctrica

La mezcla de abono y pasta de algas mostró valores significativos para la conductividad eléctrica (CE) en comparación con el control. Las mayores concentraciones de sales se encontraron en los tratamientos V70 y C70, lo cual se puede atribuir a la mineralización del estiércol, que libera altas cantidades de aniones y cationes, incrementando la salinidad del suelo. Se ha reportado que, por cada tonelada de estiércol aplicado al suelo, éste recibe de 15 a 50 kg de sales, dependiendo de la calidad del estiércol (Trejo-Escareño *et al.*, 2013).

Salazar-Sosa *et al.* (2010) y Cervantes-Vázquez *et al.* (2022) reportan que las concentraciones más altas de sales se encuentran en tratamientos con 80, 120 y 160 t ha⁻¹ de abono. Por esta razón, los tratamientos utilizados en este estudio fueron menores a 80 t ha⁻¹ para evitar el incremento de la cantidad de sales al mineralizarse la materia orgánica, ya que el aumento de Na⁺ en el suelo puede llevar a pérdidas estructurales o la inhibición del crecimiento vegetal, afectando el rendimiento agrícola.

En la **Figura 5**, se observan diferencias entre los tratamientos; Sin embargo, la NOM-021-RECNAT 2000 considera los valores obtenidos como despreciables en términos de salinidad. Esto se puede explicar por los hallazgos de Álvarez-Sánchez *et al.* (2006) y Köninger *et al.* (2021) quienes concluyeron que, en suelos con tratamientos de abonos orgánicos, la CE se incrementa entre 0.5 y 1.6 dS m⁻¹ por año. Este aumento depende de la dieta de los animales

(dietas ricas en nutrientes y minerales como maíz, sorgo, alfalfa, concentrados y aditivos) y de la cantidad de estiércol aplicada (González-Hernández y Peña 2002; Garay y Parra, 2012).

10.4 pH

Los valores de pH fueron influenciados por la interacción entre el abono en dosis altas y pasta de algas. En los tratamientos con dosis altas de abono (V70 y C70), los valores de pH se mantuvieron neutros (6.6 - 7.3) durante todo el periodo de tiempo, alcanzando 6.67 para V70 y 6.76 para C70 al final del experimento, según la NOM-021-RECNAT 2000. De acuerdo con Trejo-Escareño *et al.* (2013) en suelos tratados con abonos orgánicos, el pH aumentó debido al enriquecimiento de cationes y a la amonificación de la materia orgánica presente, ya que los abonos orgánicos favorecen la atracción de protones (Cervantes-Vázquez *et al.*, 2022).

Caiza *et al.* (2018) reportaron que los abonos orgánicos no sólo aumentan el pH, sino que también ayudan a combatir la acidez y salinidad provocadas por ciertos productos organoclorados y organofosforados. Esta capacidad se refleja en su habilidad para soportar cambios bruscos de pH cuando se añaden compuestos con diferente pH y en la reducción de la acidez producida por fertilizantes.

Sin embargo, las propiedades fisicoquímicas del estiércol afectan directamente las características físicas y químicas del suelo, pudiendo elevar su pH debido a la presencia de potasio, sodio, magnesio, calcio, carbonatos, bicarbonatos de calcio, compuestos orgánicos y aniones. Estos componentes aumentan la capacidad tampón y el intercambio catiónico del suelo. No obstante, los efectos del estiércol sobre el pH del suelo dependen de su valor inicial, la dieta de los animales, la cantidad de estiércol aplicada y su tratamiento previo a la aplicación (Köninger *et al.*, 2021).

10.5 Nitrógeno inorgánico

Los niveles de nitrógeno inorgánico mostraron diferencias significativas en comparación con el control. Los tratamientos con abono de vaca (V70 y V35) presentaron los valores más altos de nitrógeno a partir de los días 30 y 45, mientras que los tratamientos con abono equino (C70 y C35) mostraron una disminución en los mismos periodos (**Figura 7**). Aunque los valores de nitrógeno en el estudio fueron elevados, no se consideran altos (40-60 mg/kg) según la NOM-021-RECNAT 2000. Una posible explicación de los valores encontrados para los tratamientos es que el abono de vaca posee gran diversidad microbiana, que incluye bacterias, protozoos y levaduras (Behera y Ray, 2021), en contraste con el abono equino, que tiene una microbiota menos diversa (Pacheco-Torres *et al.*, 2021). Esta diversidad es clave, ya que la mineralización del nitrógeno en el suelo depende de los microorganismos y procesos fisicoquímicos (Tellez *et al.*, 2019).

Los valores de nitrógeno encontrados en este estudio fueron menores que los reportados por Trejo-Escareño *et al.* (2013) y Salazar-Sosa *et al.* (2010), debido a que probablemente el nitrógeno en el estiércol se encuentra mayormente en forma orgánica, y su mineralización depende de los microorganismos, siendo un suelo con erosión extrema se prevé que la actividad de los microorganismos esté disminuida, al igual que su diversidad por lo que no permite una correcta mineralización de N. Esto se puede explicar con la relación C/N ya que esta variable es importante para la mineralización de N (Qian y Schoenau, 2002). Uratani *et al.* (2004), mencionan que, en los primeros años de aplicación de estiércol, la mineralización es menos eficiente debido a la relación C/N del estiércol, que puede llegar a inmovilizar el nitrógeno, por lo tanto, al realizarse este estudio en 45 días se encontró que los niveles de nitrógeno inorgánico varían debido a cambios en la biomasa microbiana (Spedding *et al.*, 2004). A medida que los materiales pierden sus componentes más lábiles, es probable que los hongos, que tienen una relación C mayor que las bacterias (Monsalve *et al.*, 2017), dominen entre los microorganismos del suelo (Del Pino *et al.*, 2008) provocando que la mineralización del N sea aún más baja. Sin embargo, para conocer la relación C/N, se requiere de la medición de N total, variable que no se midió en este estudio y que se considera importante. Otra posible explicación se debe a que el nitrógeno inorgánico esta potencialmente disponible para las plantas y puede perderse del suelo por volatilización y desnitrificación si no es utilizado (Illarze *et al.*, 2018); En este caso, dado que no hubo plantas que aprovechan el nitrógeno, este pudo haberse perdido o sido aprovechado por parte de *D. salina*.

La mayor parte del nitrógeno mineral se encontró en forma de NH_4^+ , con los tratamientos V70 y V35 mostrando los niveles más altos de NH_4^+ a los 45 días (**Figura 7**). Esto se puede deber a la alta actividad de microorganismos amonificadores en el abono de vaca, que descomponen los compuestos nitrogenados en formas más simples que las plantas pueden absorber y utilizar. La actividad de los microorganismos amonificadores se ve influenciada por la temperatura: a temperaturas cálidas, las bacterias nitrificantes son más eficientes que las bacterias heterotróficas de amonio, mientras que en condiciones frías ocurre lo contrario (Behera y Ray, 2021; Zhang *et al.*, 2024). Este estudio tuvo lugar en los meses de noviembre y diciembre, en los cuales las condiciones climáticas pueden desarrollar las características antes mencionadas.

Además, *D. salina* influye en los valores de nitrógeno. Aunque las microalgas prefieren asimilar nitratos (NO_3^-), el NH_4^+ requiere menos energía, y las rutas metabólicas de *D. salina* le permiten utilizar ambas fuentes de nitrógeno. Se ha encontrado que el NH_4^+ aumenta el tamaño celular, la tasa de división y la concentración de clorofila en *D. salina* (Giordano, 2001; De Souza Celente *et al.*, 2024).

Los NO_3^- en cada tiempo fueron estadísticamente diferentes siendo más altos en los tratamientos de dosis alta los cuales corresponden a V70 y C70 (**Figura 7**). Resultados similares reportó Salazar-Sosa *et al.*, (2007) quienes encontraron que los NO_3^- y NO_2^- se incrementan en más de 60 t ha^{-1} de estiércol aplicado al suelo. Esto refleja que en un incremento de la dosis de aplicación de estiércol los beneficios de este se observan con una mayor mineralización, aumentando la cantidad de NO_3^- y NO_2^- en el suelo. También reportó un efecto significativo al aplicar estiércol en más de 40 t ha^{-1} , incrementándose todos los macronutrientes necesarios para el desarrollo y producción de la planta. No obstante, el contenido de NO_3^- en los diferentes sistemas de producción fue inestable y no se consideran altos, esto se puede deber a la frecuencia y dosis a la cual se incorpora la materia orgánica. Los NO_3^- y NO_2^- , están condicionados tanto a los residuos orgánicos, como a la calidad de la materia orgánica, es decir, si es muy lábil o resistente (Sabiené *et al.*, 2010; Conti *et al.*, 2015; Nonato *et al.*, 2018).

11 Conclusiones

El contenido de materia orgánica (MO) y el pH del suelo erosionado hídricamente aumentó significativamente con la aplicación de la mezcla de estiércol de caballo y vaca en dosis altas (70 t ha^{-1}) mezcladas con *Dunaliella salina*.

La conductividad eléctrica (CE) fue influenciada por la incorporación de los diferentes tratamientos donde los valores más altos se encontraron en las mezclas de abono de caballo y vaca en dosis altas (70 t ha^{-1}) mezcladas con *Dunaliella salina*.

La concentración de nitrógeno (N), amonio (NH_4^+) y nitratos + nitritos ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) aumentó por efecto de la incorporación de estiércol de vaca en dosis altas (70 t ha^{-1}) y bajas (35 t ha^{-1}), mezclado con *Dunaliella salina*.

12 Recomendaciones

A partir de las conclusiones anteriores se realizan las siguientes recomendaciones:

Determinar el Nitrógeno total y la biomasa microbiana del suelo para conocer el comportamiento de los microorganismos del medio edáfico, ante la mezcla del abono orgánico y pasta de algas.

El estudio tuvo lugar en los meses de noviembre y diciembre, por lo que se considera que la temperatura influyó en la actividad microbiana del suelo. Por lo tanto, se recomienda aplicar el abono orgánico en los meses de febrero y abril, cuando las condiciones climáticas podrían ser más favorables para la actividad microbiana.

De acuerdo con lo encontrado en este estudio se recomienda el uso de abono de vaca en dosis de 70 t ha^{-1} mezclado con *Dunaliella salina*, ya que según lo observado ayuda a mitigar los efectos ocasionados por la erosión hídrica, aumentando la materia orgánica, al igual que el Nitrógeno inorgánico, logrando obtener un pH neutro y una concentración despreciable de sales.

Con base a las características del tratamiento Va, se recomienda realizar experimentos futuros en suelos erosionado hídricamente cultivados con avena forrajera (*Avena sativa* L.) este es un cultivo que presenta la zona de Jiquipilco Estado de México, además de que esta gramínea se puede adaptar a condiciones de invernadero.

13 Referencias

Aguirre, H. A. (2009). *El manejo de la conductividad eléctrica en fertirriego*. [Tesis de magíster]. Centro de investigación en química aplicada. Centro de Investigación en Química Aplicada.

Aguirre-Salado, O. T., Pérez-Nieto, J., Aguirre-Salado, C. A., Monterroso-Rivas, A. I., & Gallardo-Lancho, J. F. (2023). Erosión hídrica, redistribución del carbono orgánico del suelo y conservación del suelo y agua: una revisión. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(3), 47-60.

Alba, S. D., Alcázar Torralba, M., Cermeño Martín, F., & Barbero Abolafio, F. (2011). Erosión y manejo del suelo. Importancia del laboreo ante los procesos erosivos naturales y antrópicos

Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., & Bernal, M. P. (2012). Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, ecosystems & environment*, 160, 15-22.

Allaire, S. E., Lange, S. F., Lafond, J. A., Pelletier, B., Cambouris, A. N., & Dutilleul, P. (2012). Multiscale spatial variability of CO₂ emissions and correlations with physico-chemical soil properties. *Geoderma*, 170, 251-260.

Álvarez-Sánchez, E., Vázquez-Alarcón, A., Castellanos, JZ, & Cueto-Wong, J. (2006). Efectividad biológica de abonos orgánicos en el crecimiento de trigo. *Terra Latinoamericana*, 24 (2), 261-268.

Alvear, M. Castillo, C. Henao, D. (2011). Evaluación del pH y concentración de nitrógeno en el cultivo de las microalgas *Dunaliella salina* y *Chlorella nativa* como fuente de aceite vegetal para la producción de biodiesel. [Tesis de licenciatura]. Universidad de Cartagena.

Arriaga, F. J., & Lowery, B. (2003). Soil physical properties and crop productivity of an eroded soil amended with cattle manure. *Soil science*, 168(12), 888-899.

Antúnez-Ocampo, O. M., Sandoval-Villa, M., Alcántar-González, G., & Solís-Martínez, M. (2014). Aplicación de amonio y nitrato en plantas de *Physalis peruviana* L. *Agrociencia*, 48(8), 805-817.

Azcarate, M. P., Baglioni, M., Brambilla, C., Brambilla, E., Fernandez, R., Kloster, N. S. & Savio, M. (2017). Métodos de análisis e implementación de Calidad en el Laboratorio de Suelos.

Barrios, E. (2007). Biota del suelo, servicios ecosistémicos y productividad de la tierra. *Economía ecológica*, 64 (2), 269-285.

Behera, S. S., & Ray, R. C. (2021). Bioprospecting of cowdung microflora for sustainable agricultural, biotechnological and environmental applications. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100018.

Ben-Amotz, A. (2003). industrial production of microalgal cell-mass and secondary products-major industrial species: *Dunaliella*. *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*, 273-280.

Bell-Mesa, T. D., Osoria-Galan, D., Montero-Limonta, G., & Molina-Lores, L. B. (2017). Efecto de hongos micorrícicos arbusculares sobre Pimiento (*Capsicum annuum* L.) en la producción de plántulas en campo antena, Santiago de Cuba. *Ciencia en su PC*, (4), 53-67.

Betancourt-Aguilar, C., Mello-Prado, R., Castellanos-González, L., & Silva-Campos, C. N. (2016). Características de la glicerina generada en la producción de biodiesel, aplicaciones generales y su uso en el suelo. *Cultivos tropicales*, 37(3), 7-14.

Barattini, P., & Hepp H. (2019). Mineralización de materia orgánica en suelos de la Patagonia. *INIA*. <https://biblioteca.inia.cl/handle/123456789/4989>

Bolaños González, M. A., Paz Pellat, F., Cruz Gaistardo, C. O., Argumedo Espinoza, J. A., Romero Benítez, V. M., & de la Cruz Cabrera, J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288.

Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124.

Brunel, N., & Seguel, O. (2011). Effects of soil erosion on soil properties. *Agro Sur*, 39(1).

Cabrera-Medina, M., Borrero-Reynaldo, Y., Rodríguez-Fajardo, A., Angarica-Baró, E. M., & Rojas-Martínez, O. (2011). Efecto de tres bioestimulantes en el cultivo de pimiento (*Capsicum annun*, L) variedad atlas en condiciones de cultivo protegido. *Ciencia en su PC*, (4), 32-42.

Caiza, D., Chimbo, A., Sarduy Pereira, L. B., Pisco, W., & Diéguez Santana, K. (2018). Propuesta de producción más limpia en el proceso de elaboración de abonos orgánicos con desechos del camal, realizado en el relleno sanitario del cantón Baños de Agua Santa, provincia de Tungurahua

Camargo, C., Pacheco, C., & López, R. C. (2017). Water erosion, fundamentals, evaluation and cartographic representation: a review with an emphasis on the use of remote sensing and Geographic Information Systems. *Gestión y Ambiente*, 20(2), 265-280.

Camacho-Tamayo, J. H. (2013). Spatial relation between electrical conductivity and some chemical soil properties. *UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 401-408.

Conti, M., González, M., Gómez, E., Ferrero, E., & Moreno, G. (2014). Soil organic carbon fractions as influenced by soybean cropping in the humid pampa of Argentina. *Terra Latinoamericana*, 32(3), 195-200.

Calderón-Medina, C. L., Bautista-Mantilla, G. P., & Rojas-González, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2), 141-157.

Calvo, P., Nelson, L. M., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant And Soil*, 383(1-2), 3-41.

Castelán-Vega, R., López-Teloxa, L. C., Tamariz-Flores, J. V., Linares-Fleites, G., & Cruz-Montalvo, A. (2017). Erosión y pérdida de nutrientes en diferentes sistemas agrícolas de una microcuenca en la zona periurbana de la ciudad de Puebla, México. *Terra Latinoamericana*, 35(3), 229-235.

Castillo, C. (2005). *Selección y Calibración de indicadores locales y técnicos para evaluar la degradación de los suelos laderas, en la microcuenca Cuzamá El Tuma - La Dalia Matagalpa*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Agraria.

Cervantes-Vázquez, T. J. Á., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Valenzuela-García, A. A., García-Hernández, J. L., & Cervantes-Vázquez, M. G. (2022). Effects of

applying bovine manure and vermicompost on soil in watermelon (*Citrullus lanatus*) cultivation. *Terra Latinoamericana*, 40.

Covington, A. K., Bates, R. G., & Durst, R. A. (1985). Definition of pH scales, standard reference values, measurement of pH and related terminology (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, 57(3), 531-542

Da Lio, L., Castello, P., Gianfelice, G., Cavalli, R., & Canu, P. (2021). Effective energy exploitation from horse manure combustion. *Waste Management*, 128, 243-250.

De Souza Celente, G., De Cassia De Souza Schneider, R., Rizzetti, T. M., Lobo, E. A., & Sui, Y. (2024). Using wastewater as a cultivation alternative for microalga *Dunaliella salina*: Potentials and challenges. *The Science of the Total Environment*, 911, 168812.

Del Pino, A., Repetto, C., Mori, C., & Perdomo, C. (2008). Patrones de Descomposición de Estiércoles en el Suelo. *Terra Latinoamericana*, 26(1), 43-52.

Díaz, E. R., & Guzmán, M. (2004). Características de los fertilizantes para su uso en la fertirrigación. *Medios, Agua y Fertilizantes*.

Díaz, M. L., & Medina, H. E. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Dong, J., Yang, B., Wang, H., Cao, X., He, F., & Wang, L. (2023). Reveal molecular mechanism on the effects of silver nanoparticles on nitrogen transformation and related functional microorganisms in an agricultural soil. *Science of The Total Environment*, 904, 166765.

Du Jardín, P. (2015). Bioestimulantes vegetales: Definición, concepto, principales categorías y regulación. *Scientia horticultrae*, 196, 3-14.

Espinosa, E. (2021). Identificación de las relaciones entre la conductividad eléctrica aparente y las propiedades físicas del suelo. [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia

Eyherabide, M., Saínz Rozas, H., Barbieri, P., & Echeverría, H. E. (2014). Comparación de métodos para determinar carbono orgánico en suelo. *Ciencia del suelo*, 32(1), 13-19.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura). (2019). Textura del suelo.

FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*). (2015). El suelo es un recurso no renovable y su conservación es esencial para la seguridad alimentaria y nuestro futuro sostenible. <https://www.fao.org/documents/card/en?details=0cd51fed-61de-4780-ba88-234645fac56b>

Gaceta de Gobierno Municipal. Jiquipilco, Estado de México. (30 de marzo del 2022). Plan De Desarrollo Municipal De Jiquipilco 2022-2024.

Garay, A. A. & Parra, A.E. (2009). *Caracterización química de microalgas Dunaliella salina y Dunaliella Tertiolecta*. [Tesis de licenciatura]. Facultad de Ciencias. Universidad de Tarapacá

Geisseler, D., Horwath, W. R., Joergensen, R. G., & Ludwig, B. (2010). Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms—a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(12), 2058-2067.

Giordano, M. (2001). Interactions between C and N metabolism in *Dunaliella salina* cells cultured at elevated CO₂ and high N concentrations. *Journal of Plant Physiology*, 158(5),

Gollany, H. T., Schumacher, T. E., Lindstrom, M. J., Evenson, P. D., & Lemme, G. D. (1992). Topsoil depth and desurfacing effects on properties and productivity of a Typic Argiustoll. *Soil Science Society of America Journal*, 56(1), 220-225.

González, A.C. (2008). *El uso de fertilizantes líquidos para el fertirriego*. [Tesis de magíster]. Centro de investigación en química aplicada.

González-Hernández, J. C., & Peña, A. (2002). Estrategias de adaptación de microorganismos halófilos y *Debaryomyces hansenii* (Levadura halófila). *Revista latinoamericana de microbiología*, 44(3-4), 137-156.

Guzmán F. J. (2018). Fertilizantes Químicos y Biofertilizantes En México. CEDRSSA.

Guzmán A.J.M. (2021). *Evaluación del compostaje de estiércol de caballo de un centro ecuestre en la región lima*. [Tesis de licenciatura]. Universidad nacional agraria La Molina

Guevara, M., Pinto, R., Villarroel, J., Hernández, E., Díaz, R., Gotera, B., & Cortez, R. (2016). Influence of salinity and irradiance on growth and biochemical composition of a new strain of *Dunaliella salina* from the Araya salt works, Venezuela. *Saber*, 28(3), 494-501.

Grzesik, M., Romanowska-Duda, Z. y Kalaji, HM (2017). Eficacia de las cianobacterias y las algas verdes para mejorar el rendimiento fotosintético y el crecimiento de plantas de sauce (*Salix viminalis* L.) bajo una aplicación limitada de fertilizantes sintéticos. *Fotosintética*, 55, 510-521.

Hernández-Tapia, N., Salinas-Ruiz, J., Saynes-Santillán, V., Ayala-Rodríguez, J. M., Hernández-Rosas, F., & Velasco-Velasco, J. (2019). Emisión de N₂O, CO₂ y NH₃ a partir de estiércol de bovinos con diferente porcentaje de proteína cruda en la dieta. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(3), 597-608.

Hincapié G., E.; Salazar G., L.F. (2011) Impacto de la erosión sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y la producción de café. *Revista Cenicafé* 62 (2): 79-89.

Huachi E., L. (2008). *Mejoramiento del suelo mediante la producción de un abono orgánico a partir de estiércol animal, en el parque Metropolitano de Quito*. [Tesis de Magíster]. Universidad Internacional SEK.

Huang, J., Li, Z., Zeng, G., Zhang, J., Li, J., Nie, X., Ma, W., & Zhang, X. (2013). Microbial responses to simulated water erosion in relation to organic carbon dynamics on a hilly cropland in subtropical China. *Ecological Engineering*, 60, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.040>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014). Guía para la interpretación de cartografía de erosión del suelo escala 1:250 000, serie I.

Ingaramo, O. E., Paz-González, A., Miras-Avalos, J. M., & Vázquez, E. V. (2007). General soil properties characterization in an experimental plot with different management systems. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*, 32, 127–137

Illarze, G., Del Pino, A., Riccetto, S., & Irisarri, P. (2018). Emisión de óxido nitroso, nitrificación, desnitrificación y mineralización de nitrógeno durante el cultivo del arroz en 2

suelos de Uruguay. *Revista Argentina De Microbiología*, 50(1), 97–104.
<https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.05.004>

Jiménez, L., Larreal, M., & Noguera, N. (2004). Efectos del estiércol bovino sobre algunas propiedades químicas de un Ultisol degradado en el área de la Machiques Colón, estado Zulia. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 21(4), 311-321.

Jorge Montalvo, P. A., Ortiz Dongo, L. F., Calle Maraví, J. L., Téllez Monzón, L. A., Césare Coral, M. F., & Visitación Figueroa, L. (2018). Transformación del nitrógeno durante el compostaje de bosta de caballo. *Producción Limpia*, 13(2), 77-88.

Katz, A., & Pick, U. (2001). Plasma membrane electron transport coupled to Na⁺ extrusion in the halotolerant alga *Dunaliella*. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1504(2-3), 423-431.

Köninger, J., Lugato, E., Panagos, P., Kochupillai, M., Orgiazzi, A., & Briones, M. J. (2021). Manure management and soil biodiversity: Towards more sustainable food systems in the EU. *Agricultural Systems*, 194, 103251.

Manna, L. L., Buduba, C., Alonso, V., Davel, M., Puentes, C., & Irisarri, J. (2007). Comparison of analytical methods for determining soil organic matter in Patagonian Andean Region: effects of vegetation and soil types.

Lizcano, R., Olivera, D., Saavedra, D., Machado, L., Rolando, E., Moreno, M. F., & Flórez, M. F. (2017). Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos. *Centro de Formación Agroindustrial La Angostura Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)*.

López, B. C. (1999). Enzimas-algas: posibilidades de su uso para estimular la producción agrícola y mejorar los suelos. *Terra latinoamericana*, 17(3), 271-276.

López–Elías, J. A., Fimbres-Olivarría, D., Medina-Juárez, L. Á., Miranda-Baeza, A., Martínez-Córdova, L. R., & Molina-Quijada, D. (2013). Production of biomass and carotenoids of *Dunaliella tertiolecta* in nitrogen-limited cultures. *Phyton*, 82, 23.

López-Padrón, I., Martínez-González, L., Pérez-Domínguez, G., Reyes-Guerrero, Y., Núñez-Vázquez, M., & Cabrera-Rodríguez, J. A. (2020). Las algas y sus usos en la agricultura. Una visión actualizada. *Cultivos Tropicales*, 41(2).

Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.

Maya, Y., (2011). Diagnóstico ambiental de suelos erosionados. Agroecosistemas tropicales y subtropicales, 13 (2), 169-179.

Mendoza, H., De La Jara, A., & Portillo, E. (2011). Planta piloto de cultivo de microalgas. Instituto tecnológico de Canarias, S.A.

Monsalve, O. I. M., Sebastián, J. S. G., & Cardona, W. A. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200-209.

Navarro, G., & Navarro, S. (2023). *Fertilizantes. Química y acción*. Mundi Prensa.

Nonato, A. G., Mejía-Carranza, J., & Ramírez-Gerardo, M. G. (2018). Mineralización de la materia orgánica en suelos con manejo diferencial en cultivo de rosa. *Acta Universitaria*, 28(2), 33-41. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1654>

Norma Oficial Mexicana 021-RECNAT-2001. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Olivarría, D. F., Castillo, L. R. M., López, Á. M., & Elías, J. A. L. (2010). Crecimiento y biomasa de *Dunaliella* sp. cultivada en medios limitantes en nitrógeno. *Biotechnia*, 12(3), 58-66.

Parra, O. A., Gonzalez, M., Dellarossa, V., Cifuentes, A. S., & Conejeros, M. (1990). Biological characterization of a chilean strain of *Dunaliella salina* of commercial potential. *Archivos de Biología y Medicina Experimentales (Chile)*, 23(2).

Pacheco-Torres, I., La Peña, C. G., Vaca-Paniagua, F., & Tarango-Arambula, L. A. (2021). Microbiota bacteriana fecal del caballo (*Equus caballus*) en libre pastoreo en la Reserva de la Biósfera Mapimí, México. *ResearchGate*. 1(1), 14–19.

Pérez-Batallón, P., Ouro, G., Merino, A., & Macías, F. (1998). Descomposición de materia orgánica, biomasa microbiana y emisión de CO₂ en un suelo forestal bajo diferentes manejos selvícolas. *Edafología*, 5, 83-93.

Pérez-Madruga, Y., López-Padrón, I., & Reyes-Guerrero, Y. (2020). Las algas como alternativa natural para la producción de diferentes cultivos. *Cultivos Tropicales*, 41(2).

Pinos-Rodríguez, J. M., García-López, J. C., Peña-Avelino, L. Y., Rendón-Huerta, J. A., González-González, C., & Tristán-Patiño, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46(4), 359-370.

Quitral, V., Morales, C., Sepúlveda, M., & Schwartz, M. (2012). Propiedades nutritivas y saludables de algas marinas y su potencialidad como ingrediente funcional. *Revista chilena de nutrición*, 39(4), 196-202.

Qian, P. y J. Schoenau. (2002). Availability of nitrogen in solid manure amendments with different C:N ratios. *Can. J. Soil Sci.* 82, 219-225

Quiroga-Garza, H. M., Cueto-Wong, J. A., & Figueroa-Viramontes, U. (2011). Efecto del estiércol y fertilizante sobre la recuperación de ^{15}N y conductividad eléctrica. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 201-209.

Ramírez Carvajal, R. (1997). Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos.

|

Ramos Agüero, D., & Terry Alfonso, E. (2014). Generalidades de los abonos orgánicos: Importancia del Bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos tropicales*, 35(4), 52-59.

Rojas S.D.P. (2021). *Estudio de biofertilidad y proximal en cultivo de maíz (Zea Mays L.) En el ejido de San Marcos Yachihuacaltepec, Toluca, estado de México*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de México.

Romero, M. P., Santamaría, D. M., & Zafra, C. A. (2009). Bioingeniería y suelo: abundancia microbiológica, pH y conductividad eléctrica bajo tres estratos de erosión. *Umbral científico*, (15), 67-74.

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. *Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay*.

Sabiené, N., Kusliené, G., & Zaleckas, E. (2010). The influence of land use on soil organic carbon and nitrogen content and redox potential. *Zemdirbystė=Agriculture*, 97(3), 15-24.

Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana.

Sánchez, B., Ruiz, M., & Ríos, M. M. (2005). Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, estado Aragua. *Agronomía tropical*, 55(4), 507-534.

Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., Vázquez-Vázquez, C., & López-Martínez, J. D. (2007). Producción de maíz bajo riego por cintilla, con aplicación de estiércol bovino. *Phyton (Buenos Aires)*, 76, 169-185.

Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., López-Martínez, J. D., Vázquez-Vázquez, C., Serrato-Corona, J. S., Orona-Castillo, I., & Flores-Márquez, J. P. (2010). Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de maíz forrajero y propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana*, 28(4), 381-390.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Inventario Nacional de Suelos. México, D.F.

SEMARNAT (La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2008). *Bases de Diagnóstico: Identificación de Zonas Susceptibles a la Erosión en el Estado de México*. Gobierno del Estado de México.

SEMARNAT (La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2012). Informe del Medio Ambiente en México(suelos). Degradación de los suelos.

SEMARNAT (La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2018). *Informe del Medio Ambiente*. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap3.html>

Serpa-Ibáñez, R. F., & Calderón-Rodríguez, A. (2005). Efecto del estrés por salinidad en cuatro cepas de *Dunaliella salina* Teod. en el Perú. *Ecología aplicada*, 4(1-2), 128-133.

Soto, G., & Meléndez, G. (2003). Taller de abonos orgánicos: Memoria. *Taller de Abonos Orgánicos (13-14 Mar 2003: San José, Costa Rica)*.

Spedding, T. A., C. Hamel, G. R. Mehus, and C. A. Madramootoo. 2004. Soil microbial dynamics in maize growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biol. Biochem.* 36: 499-512.

Tellez Monzón, L. A., Ortiz Dongo, L. F., Calle Maraví, J. L., Jorge Montalvo, P. A., Cesare Coral, M. F., & Visitación Figueroa, L. (2019). Estabilización de la bosta de caballo mediante un proceso aeróbico similar al compostaje. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(1), 25-33.

Tian, W., Wang, L., Li, Y., Zhuang, K., Li, G., Zhang, J., ... & Xi, Y. (2015). Responses of microbial activity, abundance, and community in wheat soil after three years of heavy

fertilization with manure-based compost and inorganic nitrogen. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 213, 219-227.

Trejo-Escareño, H. I., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D., & Vázquez-Vázquez, C. (2013). Impact of cow manure in soil and corn forage production. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(5), 727-738.

Uratani, A. Daimon, H. Ohe, M. Harada, J. and Nakayama, Y. (2004). Ecophysiological traits of field-grown *Crotalaria incana* and *pallida* as green manure. *Plant Produc. Sci.* 7:449-455

Valverde-Lucio, Y., Moreno-Quinto, J., Quijije-Quiroz, K., Castro-Landín, A., Merchán-García, W., & Gabriel-Ortega, J. (2020). Los bioestimulantes. *Journal of the Selva Andina Research Society*, 11(1), 18–28.

Vásquez, E., & Rojas, T. (2016). *pH: Teoría y 232 problemas*. Universidad Autónoma Metropolitana

Wartell, B. A., Krumins, V., Alt, J., Kang, K., Schwab, B. J., & Fennell, D. E. (2012). Methane production from horse manure and stall waste with softwood bedding. *Bioresource Technology*, 112, 42-50.

Wang, S., Wang, W., Rong, S., Liu, G., Li, Y., Wang, X., & Liu, W. (2024). Key factors and mechanisms of microplastics' effects on soil nitrogen transformation: A review. *Soil & Environmental Health*, 2(4).

Xu, L., Chen, H., Zhou, Y., Zhang, J., Nadeem, M. Y., Miao, C., & Li, G. (2024). Long-term straw returning improved soil nitrogen sequestration by accelerating the accumulation of amino acid nitrogen. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 362, 108846.

Xu, Z., Li, R., Zhang, X., Liu, J., Xu, X., Wang, S., Lan, T., Zhang, K., Gao, F., He, Q., Pan, J., Quan, F., & Zhang, Z. (2023). Mechanisms and effects of novel ammonifying microorganisms on nitrogen ammonification in cow manure waste composting. *Waste Management*, 169, 167-178.

Zhang, Z., Xu, M., Fan, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2024). Using microalgae to reduce the use of conventional fertilizers in hydroponics and soil-based cultivation. *Science of The Total Environment*, 912, 169424.

14 Anexos

Tabla 3. Nitrógeno inorgánico de un suelo con erosión hídrica tratado con *Dunaliella salina* y abono orgánico

Tratamiento	Nitrógeno (N) mg Kg ⁻¹			Amonio (NH ₄ ⁺) mg Kg ⁻¹			Nitratos (NO ₃ ⁻) y Nitritos (NO ₂ ⁻) mg Kg ⁻¹		
	15 días	30 días	45 días	15 días	30 días	45 días	15 días	30 días	45 días
C	6.13 ± 0.69 d	7.58 ± 0.94 d	7.82 ± 0.48 d	3.78 ± 0.47 c	4.18 ± 0.71 d	4.78 ± 0.33 d	2.35 ± 0.58 d	3.41 ± 1.03 d	3.04 ± 0.44 c
V70	23.27 ± 2.01 a	28.25 ± 1.20 a	27.57 ± 1.69 a	12.07 ± 1.30 a	14.47 ± 0.85 a	14.44 ± 0.84 a	11.20 ± 2.91 a	13.78 ± 1.76 a	13.12 ± 2.16 a
V35	13.37 ± 0.75 c	15.61 ± 2.27 b	14.55 ± 0.56 b	8.42 ± 0.43 b	9.45 ± 1.05 b	10.06 ± 0.43 b	4.95 ± 0.61 dc	6.15 ± 1.37 cb	4.48 ± 0.89 cb
C70	16.82 ± 0.80 b	15.32 ± 1.58 b	12.54 ± 1.29 c	9.04 ± 0.91 b	7.80 ± 0.65 b	6.98 ± 0.53 c	7.77 ± 1.53 b	7.52 ± 1.46 b	5.56 ± 1.00 b
C35	13.18 ± 1.14 c	10.76 ± 2.61 c	8.55 ± 0.90 d	7.84 ± 0.32 b	5.93 ± 1.49 c	5.06 ± 0.72 d	5.34 ± 1.06 cb	4.83 ± 2.01 dc	3.49 ± 0.78 c

Promedio ± desviación estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0.05$). Mineralización de Nitrógeno de un suelo con erosión hídrica tratado con abono orgánico y pasta de alga, C (control con 0.2% de pasta de algas), V70 (70 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2% de pasta de algas), V35 (35 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2% de pasta de algas), C70 (70 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2% de pasta de algas), C35 (35 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2% de pasta de algas), después de 15, 30 y 45 días de su aplicación.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas de un suelo con erosión hídrica tratado con *Dunaliella salina* y abono orgánico.

Tratamiento	pH			Conductividad eléctrica (CE)			Materia orgánica (MO)		
	15 días	30 días	45 días	15 días	30 días	45 días	15 días	30 días	45 días
C	5.74 ± 0.16 c	5.81 ± 0.19 d	6.01 ± 0.29 b	47.04 ± 3.73 d	58.28 ± 7.33 c	62.25 ± 5.03 c	1.04 ± 0.09 d	1.07 ± 0.19 d	1.26 ± 0.16 c
V70	6.71 ± 0.50 ba	6.70 ± 0.17 ba	6.67 ± 0.22 a	327.89 ± 36.16 b	294.94 ± 40.52 a	267.28 ± 43.02 ba	2.62 ± 0.47 b	3.46 ± 0.29 b	3.16 ± 0.35 a
V35	6.23 ± 0.10 cb	6.26 ± 0.12 c	6.28 ± 0.14 b	288.55 ± 39.42 cb	218.37 ± 36.42 b	254.71 ± 42.60 b	1.83 ± 0.20 c	1.81 ± 0.31 c	2.32 ± 0.19 b
C70	6.96 ± 0.45 a	6.87 ± 0.21 a	6.76 ± 0.17 a	477.49 ± 40.79 a	320.46 ± 40.52 a	324.56 ± 54.33 a	3.98 ± 0.69 a	4.11 ± 0.58 a	3.24 ± 0.35 a
C35	6.29 ± 0.13 b	6.40 ± 0.25 cb	6.28 ± 0.15 b	246.07 ± 30.72 c	219.12 ± 21.16 b	232.73 ± 24.73 b	2.12 ± 0.28 cb	2.18 ± 0.35 c	2.49 ± 0.23 b

Promedio ± desviación estándar, barras con letras diferentes denotan diferencias significativas ($p < 0.05$). Propiedades fisicoquímicas de un suelo con erosión hídrica tratado con abono orgánico y bioestimulante, C (control con 0.2% de pasta de algas), V70 (70 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2% de pasta de algas), V35 (35 t ha⁻¹ de abono de vaca y 0.2% de pasta de algas), C70 (70 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2% de pasta de algas), C35 (35 t ha⁻¹ de abono de caballo y 0.2% de pasta de algas), después de 15, 30 y 45 días de su aplicación.

Zona de muestreo



Figura 8. Suelo erosionado hídricamente en San Miguel Yuxtepec, Municipio de Jiquipilco, Estado de México.



Figura 9. Zona de muestreo



Figura 10. Recolección de suelo

Proceso de secado de abono



Figura 11. Proceso de secado del abono de vaca.



Figura 12. Proceso de secado del abono de caballo.



Figura 13. Estiércol pesado, previamente molido.



Figura 14. (a) abono de caballo pesado para dosis alta y baja, (b) abono de vaca pesado para dosis alta y baja.

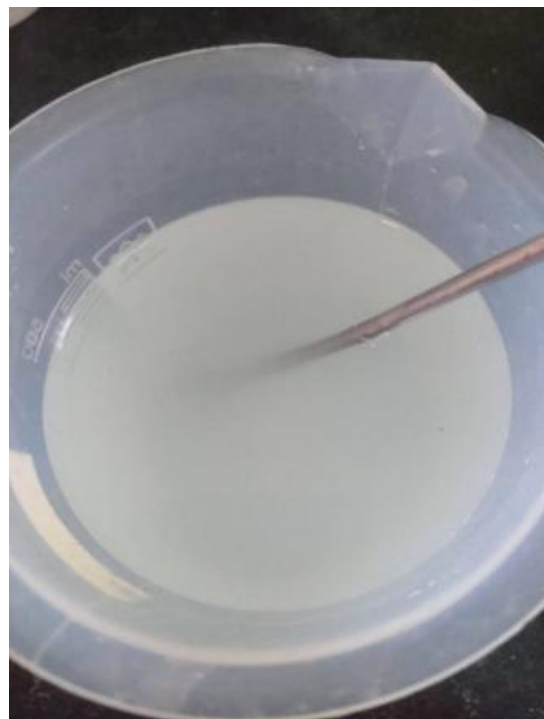


Figura 15. Extracto de algas.

Distribución de los tratamientos dentro del invernadero



Figura 16. Tratamientos a los 15 días después de la aplicación de los diferentes tratamientos.



Figura 17. Tratamientos a los 30 días después de la aplicación de los diferentes tratamientos.



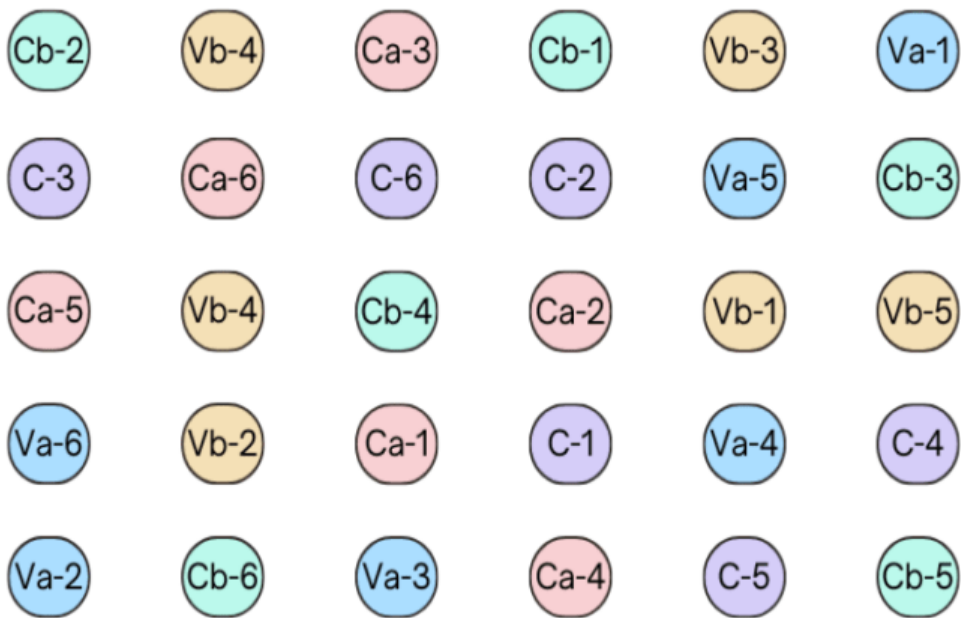
Figura 18. Tratamientos a los 45 días después de la aplicación de los diferentes tratamientos.



Figura 19. Secado de las muestras de suelo de los diferentes tratamientos para analizar en el laboratorio



Figura 20. Botes utilizados durante el experimento.



Control (C), Vaca dosis alta (Va), Vaca dosis baja (Vb), Caballo dosis alta (Ca), Caballo dosis baja (Cb).

Figura 21. Distribución de los botes dentro del invernadero.

Trabajo de laboratorio



Figura 22. Determinación de materia orgánica con el método de Walkley y Black.

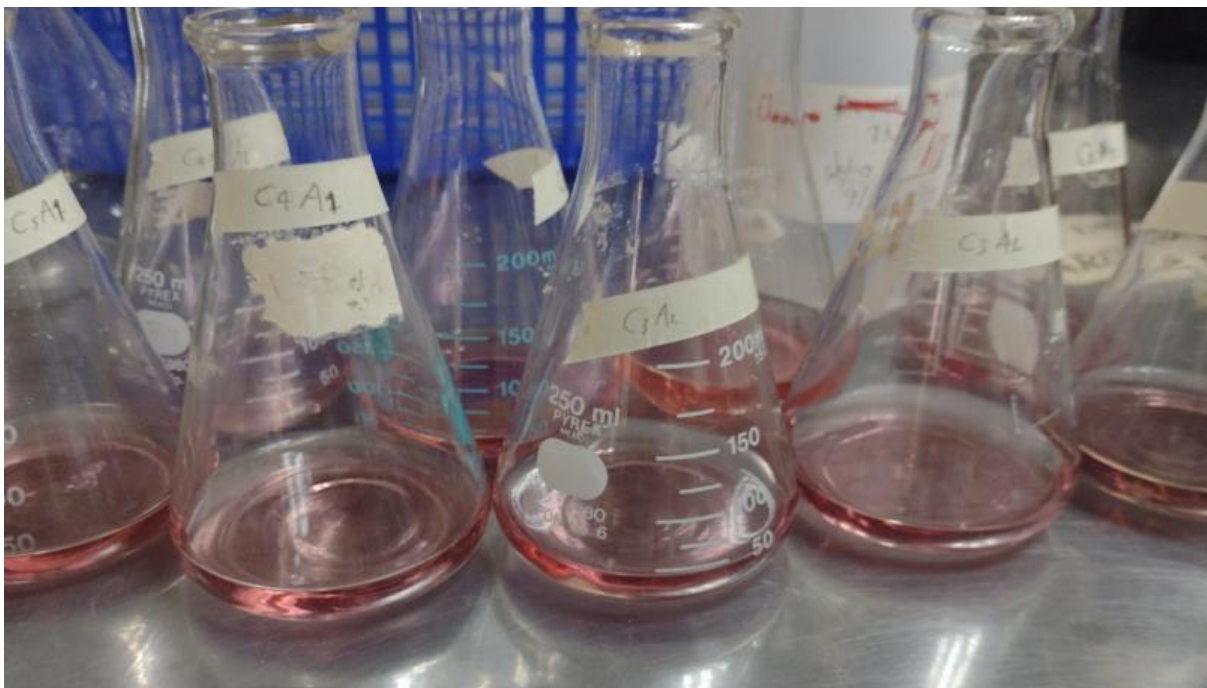


Figura 22. Determinación de Nitrógeno y Amonio con el método (AS-08).