

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA



Efecto de la Fertilización con Lixiviado de Lombriz en la Producción de Forraje Verde
Hidropónico de Maíz

Por:

JENNIFER ASTRID ALMANZA BALDERAS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Mayo 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

Efecto de la Fertilización con Lixiviado de Lombriz en la Producción de Forraje Verde Hidropónico de Maíz

Por:

JENNIFER ASTRID ALMANZA BALDERAS

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

Aprobada por el Comité Asesor:



DR. PERPETUO ALVAREZ VAZQUEZ
Asesor Principal



M.C. ARNOLDO OYERVIDES GARCIA
Coasesor



DR. JOSE JAVIER OCHOA ESPINOZA
Coasesor



M.C. PEDRO CARRILLO LOPEZ
Coordinador de la División de Ciencia Animal



Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Mayo 2026

DECLARATORIA DE NO PLAGIO

Saltillo, Coahuila, junio 2026.

DECLARO QUE:

El trabajo de investigación titulado:

Efecto de la Fertilización con Lixiviado de Lombriz en la Producción de Forraje Verde Hidropónico de Maíz

es una producción personal, donde no se ha copiado, replicado, utilizado ideas, citas integrales e ilustraciones diversas, obtenidas de cualquier tesis, obra intelectual, artículo, memoria, (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor.

En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que en caso de comprobarse plagio en el texto o que no se respetaron los derechos de autor; esto será objeto de sanciones del Comité Editorial y/o legales a las que haya lugar; quedando, por tanto, anulado el presente documento académico sin derecho a la aprobación del mismo, ni a un nuevo envío.

Jennifer Astrid Almanza Balderas

Nombre



Firma

RESUMEN

La producción de (FVH) se ha destacado como una opción innovadora en la producción de forraje, debido a su capacidad para generar biomasa vegetal de alto valor nutritivo en periodos cortos y en espacios reducidos. El objetivo del estudio fue evaluar el rendimiento de forraje verde hidropónico, la materia seca y los componentes morfológicos del maíz (*Zea mays* L.) en función de la aplicación de lixiviado de lombriz. Se utilizó la (VSBAN-543) y dosificaciones de 50 ml (T50) y 150 ml (T150) de lixiviado de lombriz por litro de agua, además de un testigo (riego con agua). Se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. El factor de bloqueo fue la cantidad e intensidad de la luz incidente sobre el invernadero entre la mañana y la tarde. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el paquete estadístico SAS, versión 9.0, mediante el procedimiento PROC GLM, y una comparación de medias con la prueba de Tukey al 5% para identificar diferencias significativas. No se observaron diferencias en las variables evaluadas de producción de materia seca, forraje verde, relación forraje producido por densidad de siembra y relación parte aérea con raíz ($p>0.05$), salvo en la comparación de los componentes morfológicos ($p>0.05$). La raíz fue la que mayor aporte hizo al rendimiento de materia seca total con 2.0 kg MS m², con un 67 % de representación, seguida por la semilla no germinada con 23 %, hoja 6 % y tallo con el 4 %. En conclusión, la fertilización con lixiviado de lombriz, a una dosis de 50 y 150 ml litro⁻¹, no afectó la producción de materia seca y (FVH) en maíz (VSBAN-543).

Palabras clave: *Zea mays* L., forraje verde hidropónico (FVH), fertilización orgánica, lixiviado de lombriz.

ABSTRAC

Hydroponic green fodder (HGF) production has emerged as an innovative forage production option due to its ability to generate high-nutritional-value plant biomass in short periods and in small spaces. This study aimed to evaluate the yield, dry matter content, and morphological components of hydroponic green fodder (*Zea mays* L.) in maize (*Zea mays* L.) as a function of vermicompost application. The white synthetic variety Antonio Narro 543 (VSBAN-543) was used, with dosages of 50 ml (T50) and 150 ml (T150) of vermicompost per liter of water, in addition to a control (water irrigation). A completely randomized block design with four replicates was used. The blocking factor was the amount and intensity of light incident on the greenhouse between morning and afternoon. An analysis of variance (ANOVA) was performed using the SAS statistical package, version 9.0, with the PROC GLM procedure, and a Tukey test at the 5% significance level was used to compare means and identify significant differences. No differences were observed in the evaluated variables of dry matter production, green forage, forage production per sowing density, and shoot-to-root ratio ($p>0.05$), except in the comparison of morphological components ($p>0.05$). The root contributed the most to total dry matter yield at 2.0 kg DM m², representing 67%, followed by ungerminated seed at 23%, leaf at 6%, and stem at 4%. In conclusion, fertilization with vermicompost at doses of 50 and 150 ml L⁻¹ did not affect the dry matter and hydroponic green fodder production of white synthetic maize variety Antonio Narro 543 (VSBAN-543).

Keywords: *Zea mays* L., hydroponic green fodder (HGF), organic fertilization, vermicompost.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por darme la vida, la salud y la sabiduría necesarias para enfrentar cada uno de los obstáculos durante mi formación profesional. En los momentos de dificultad y cansancio, su presencia me dio la fortaleza para continuar y no rendirme. Este logro es el resultado del esfuerzo, la perseverancia y, sobre todo, de la fe y confianza en que con la ayuda de Dios todo es posible. Gracias por guiarme y permitirme culminar esta importante etapa de mi vida profesional.

A mi mamá:

Juana María Almanza Balderas quien me dio el regalo más valioso: la vida. Aunque las circunstancias y las dificultades de salud que ha enfrentado no le permitieron acompañarme a lo largo de mi vida, siempre será una parte muy importante en mi vida y de mi historia. Este logro es una forma de honrar la vida que me dio y que como se lo dije, que soy su angelito que Dios le mando para que el día que mis abuelos ya no estén no este sola ya rindió frutos.

A mis padres (Abuelos): **Salomón Almanza y Eveleticia Balderas** por haber sido el pilar fundamental en mi vida por permitirme cumplir mis sueños y acompañarme siempre. Gracias por su amor, apoyó y por enseñarme con su ejemplo el valor, esfuerzo y perseverancia. Este logro también es de ustedes, porque sin su apoyo y confianza no lo habría sido posible lograrlo. Con todo mi amor les dedico este trabajo como muestra de lo agradecida que estoy con ustedes los amo.

A mi Familia

Mi madrina, mis primas Carmen y Abie, mis hermanos, Alejandro, Ángel y Emiliano y mi tía Mama. Por siempre creer en mí, por darme su apoyo, por darme porras de que, si podía lograrlo, por celebrar cada pequeño avance conmigo.

A mi mejor amigo **Iván coronado** con el que viví experiencias en lo largo de la carrera quien me hacía reír y enojar al mismo tiempo, por ser mi apoyo incondicional en toda la carrera el estar ahí conmigo en las buenas y en las malas por darme ánimos en que yo podía lograrlo. Gracias por ser mi pilar más grande en esta etapa y por nunca dejarme sola sabes que tienes un lugar muy especial en mi corazón.

A mis profesores y amigos que mi alma máter me dio, Ing. Ricardo Deyta. Ing. Pedro Carrillo por ser un apoyo fundamental durante mi carrera y quienes creyeron en mí, gracias. Mis amigos Edith, Dani, Víctor, Belén Alan, Óscar, Nano, Paola, Laura, Yenni, Laureano, Jiménez, Alma Clara, Marilyn, Mariano, Deiny, Francisco y José, gracias por brindarme su amistad.

A mi alma mater

Por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y por haber sido el espacio donde adquirí los conocimientos, valores que contribuyeron a mi desarrollo académico y profesional

Doctor **Perpetuo Álvarez Vázquez**, por depositar su confianza en mí y por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por compartir sus conocimientos y por su demasiada paciencia que me tuvo durante este proceso para lograr esta meta.

A mis asesores

MC. Arnoldo Oyervides García, Dr. José Javier Ochoa, MC. Alan E. Fuentes Huerta, gracias por su apoyo, orientación y paciencia durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos y consejos fueron parte fundamental para terminar con este trabajo. Gracias por compartir su experiencia y conocimientos durante mi trabajo de tesis y en la carrera.

DEDICATORIA

A mi abuelo

Alejandro Balderas que fue mi mayor ejemplo para amar el campo y los animales, gracias, por dejarme experimentar con tierra, como se trabajaba con en arado, por cada aventura vivida en mi niñez, este logro es también tuyo porque de uno u otra manera siempre me estuviste apoyándome y motivándome, gracias por creer en mí, te amo.

A mis ángeles

Padrino (Julián) que me acompaña siempre en el cielo, aunque ya no estas físicamente conmigo sigues presente en mi corazón en cada paso que doy, gracias por haber sido una persona tan importante en mi vida Muchas veces imaginé este momento y cuánto me habría gustado compartir contigo este logro, pero sé que desde el cielo te sientes orgulloso de mí. **Doña Hermelinda** por siempre tenerme presente en sus oraciones, por su cariño, apoyo y palabras de aliento. **Gracias** por siempre encomendarme a Dios por sesearme lo mejor de corazón hoy quiero agradecerle por acompañarme, de una u otra manera, en este camino tan importante.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| I. INTRODUCCIÓN | 10 |
| 2.1 OBJETIVOS..... | 11 |
| 2.1.1 Objetivo general..... | 11 |
| 2.1.2 Objetivos específicos | 11 |
| 1.2 HIPÓTESIS | 11 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA | 11 |
| 2.1 Antecedentes del forraje verde hidropónico (FVH) | 12 |
| 2.1.1 Importancia | 12 |
| 2.1.2 Ventajas de FVH..... | 14 |
| 2.1.3 Desventajas | 14 |
| 2.2 Lixiviado de lombriz como fertilizante..... | 15 |
| 2.3 Consideraciones del establecimiento del FVH..... | 16 |
| 2.3.1 Iluminación..... | 16 |
| 2.3.2 Temperatura | 17 |
| 2.3.3 Humedad | 17 |
| 2.3.4 Estructuras..... | 18 |
| 2.3.5 Invernaderos..... | 18 |
| 2.3.6 Bandejas para el cultivo | 19 |
| 2.4 Pasos para el establecimiento | 20 |
| 2.4.1 Selección de la semilla y desinfección..... | 20 |
| 2.4.2 Pre-germinación..... | 21 |
| 2.4.3 Siembra | 21 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.4 Riegos..... | 22 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 24 |
| 3.1 Ubicación | 24 |
| 3.2 Metodología | 25 |
| 3.3 Metodología de establecimiento del experimento | 27 |
| 3.4 Variables evaluadas..... | 29 |
| 3.4.1 Rendimiento de forraje verde y materia seca..... | 29 |
| 3.4.2 Componentes del rendimiento | 30 |
| 3.4.3 Relación:producción de forraje/densidad de siembra | 30 |
| 3.4.4 Relación parte aérea/raíz..... | 30 |
| 3.5 Análisis estadístico..... | 31 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 32 |
| 4.1. Rendimiento de forraje total..... | 32 |
| 4.2 Componentes del rendimiento y su aportación a la producción total | 36 |
| V. CONCLUSIÓN | 42 |
| VI. LITERATURA CITADA | 43 |
| VII. ANEXOS..... | 48 |

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1.** Diseño de tratamientos de acuerdo a la estructura utilizada de 2 niveles de PVC de 1 pulgada, donde se ubicaron las charolas de maíz con la aplicación de lixiviado de lombriz a diferentes dosis.26
- Cuadro 2.** Descripción de los elementos presentes en el lixiviado de lombriz utilizado como fertilizante en la producción de forraje verde hidropónico de maíz.26
- Cuadro 3.** Componentes del rendimiento de materia seca (kg MS m⁻²) y forraje verde (kg FV m⁻²) de maíz (*Zea mays* L.) de la variedad sintética blanca Antonio Narro 543 (VSBAN-5543), fertilizado con lixiviado de lombriz a dosis de 50 y 150 ml, y un testigo (riego con agua), en producción de FVH.39
- Cuadro 4.** Variables productivas y aportación de los componentes al rendimiento total de maíz (*Zea mays* L.) de la variedad sintética blanca Antonio Narro 543 (VSBAN-5543) fertilizado con lixiviado de lombriz a dosis de 50 y 150 ml, y un testigo (riego con agua).....48
- Cuadro 5.** Componentes del rendimiento de materia seca (kg MS m⁻²) y de forraje verde (kg FV m⁻²) de maíz (*Zea mays* L.) de la variedad sintética blanca Antonio Narro 543 (VSBAN-5543), fertilizado con lixiviado de lombriz a dosis de 50 y 150 ml, y un testigo (riego con agua), en producción de FVH.49

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Localización del área de estudio. Invernadero del Departamento de Recursos Naturales Renovables. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.24
- Figura 2.** Distribución de la precipitación y de la temperatura promedio, mínima y máxima en los días registrados durante el periodo de estudio del 30 de abril al 20 de mayo de 2025 (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos - RUOA UNAM-UAAAN)..25
- Figura 3.** Variables productivas de Forraje Verde Hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) de la variedad sintética blanca Antonio Narro 543 (VSBAN-5543), fertilizado con lixiviado de lombriz a dosis de 50 y 150 ml y un testigo (riego con agua), en producción de FVH. Medias con las mismas letras en las columnas son estadísticamente iguales (Tukey; $p < 0.05$). R:PF/DS = Relación de Forraje Producido/Densidad de siembra, R:PA/R= Relación de Parte Área/Raíz.35
- Figura 4.** Componentes del rendimiento (%) de maíz (*Zea mays* L.) de la variedad sintética blanca Antonio Narro 543 (VSBAN-5543), fertilizado con lixiviado de lombriz a dosis de 50 y 150 ml y un testigo (riego con agua), en producción de FVH. Medias con las mismas letras en las columnas son estadísticamente iguales (Tukey; $p < 0.05$).37

I. INTRODUCCIÓN

La producción de forraje verde hidropónico (FVH) representa una alternativa innovadora y eficiente en la agricultura, con alto valor nutritivo, ciclos cortos y bajo condiciones de espacio limitado. Este sistema de cultivo sin suelo ha ganado relevancia a nivel global por sus ventajas, especialmente en zonas con limitaciones para la producción agrícola convencional. Carballido (2005), indica que el forraje hidropónico es un sistema de producción de biomasa vegetal de alta densidad y calidad nutricional producido muy rápidamente (de 9 a 20 días) captando energía del sol y asimilando los minerales contenidos en una solución nutritiva. Martínez, E. (2001), indica que el maíz es importante por el volumen de FVH que produce, aparte de su gran riqueza nutricional necesita de temperaturas óptimas que varían entre los 25 y 28°C donde los suelos son ácidos y la infraestructura es limitada. El lixiviado de humus de lombriz se propone como biofertilizante alternativo debido a su contenido de nutrientes solubles y de microorganismos, que pueden mejorar la absorción de nutrientes, el desarrollo radicular y la acumulación de biomasa, lo que reduce la necesidad de fertilización química sintética. Sin embargo, existe evidencia limitada, proveniente de ensayos experimentales, sobre el efecto de diferentes concentraciones de este bioinsumo en el rendimiento del FVH de maíz (Díaz-Gonzales 2025). El uso de abonos orgánicos como el lombricompost y lixiviados de lombricompost (lixiviado de lombriz) es considerado como una alternativa sustentable, de bajo costo y respetuosa con el medio ambiente para proporcionar nutrientes a los cultivos (Quaik *et al.* 2012; Alemán *et al.*, 2020). Gutiérrez y René (2024) evaluaron distintos niveles de lixiviado (20, 40 y 60% NO SON ml) y su interacción con las densidades de siembra. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en el rendimiento verde y seco, lo que indica que las concentraciones intermedias del 20 % y del 40 % presentaron mayores rendimientos productivos, lo que confirma la importancia de determinar dosis óptimas para maximizar la producción. Por lo anterior, se establecieron los siguientes objetivos.

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la fertilización con lixiviado de humus de lombriz sobre la producción de materia seca y de forraje verde, así como sobre los componentes (hoja, tallo raíz) del (FVH) de maíz, en condiciones semicontroladas de invernadero.

2.1.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de diferentes dosis de lixiviado de humus de lombriz sobre la producción de forraje verde hidropónico de maíz, mediante la cuantificación del rendimiento de forraje verde y de materia seca.
- Comparar el comportamiento productivo del FVH de maíz fertilizado con lixiviado de humus de lombriz con un tratamiento testigo sin aplicación de fertilizante orgánico.

1.2 HIPÓTESIS

Al menos una dosis de lixiviado de humus de lombriz influye significativamente en variables agronómicas del forraje verde hidropónico de maíz, como el rendimiento de materia seca, los componentes (raíz, hoja, tallo), la relación parte aérea/raíz y el forraje producido/densidad de siembra.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes del forraje verde hidropónico (FVH)

2.1.1 Importancia

El término hidropónico se deriva de dos palabras griegas: hydro, que significa agua, y ponos, que significa trabajo; su significado en conjunto es trabajo en el agua. Este concepto está asociado al desarrollo de sistemas agrícolas; en otras palabras, significa que la humedad ya no dependerá exclusivamente de la tierra sino de soluciones acuosas que permiten el crecimiento vegetal. De esta manera, la producción puede realizarse en distintos espacios y condiciones, lo que facilita la obtención de cosechas sin necesidad de utilizar la tierra como medio principal de cultivo (Almanza, 1984). En México, al igual que en otras regiones del mundo, el cambio climático está generando efectos negativos en el sector agropecuario, ya que reduce la producción y los niveles de rendimiento de los cultivos, tanto en cantidad como en calidad (Martínez 2006). Por ello surge la necesidad de desarrollar y adoptar nuevas alternativas tecnológicas que permitan contrarrestar los problemas que afectan al sistema agrícola y a la población en general. Por consiguiente, la producción de forraje verde hidropónico se presenta como una opción viable, ya que permite obtener alimento vegetal durante periodos de escasez de condiciones favorables para el crecimiento de pastizales. Asimismo, el FVH ofrece ventajas importantes, como la disponibilidad de forraje fresco, la alta palatabilidad y el elevado valor nutricional. El forraje verde hidropónico (FVH) constituye una tecnología a la producción de biomasa vegetal obtenida a partir de etapas iniciales de germinación y desarrollo temprano de plántulas provenientes de semillas que son viables. Este sistema genera un alimento vegetal fresco, caracterizado por su digestibilidad y su adecuado valor nutricional, lo que lo convierte en una buena alternativa eficiente para la alimentación animal. El FVH se basa en la germinación de semillas principalmente, de cereales y, en menor medida, de leguminosas. Seguida de su crecimiento bajo condiciones ambientales controladas como la luz, temperatura y humedad prescindiendo del uso del suelo. Entre las especies más empleadas se destacan avena, cebada, maíz, trigo y sorgo (Cortazzo

et al., 2002). La producción de forraje verde hidropónico (FVH) se basa en el proceso de germinación de semillas, principalmente de gramíneas y leguminosas, seguido del desarrollo de las plántulas en condiciones ambientales controladas, tal como luz, temperatura, y humedad, sin la utilización de suelo como medio de cultivo (FAO,2002). El maíz es una de las gramíneas más utilizadas en la producción de forraje verde hidropónico (FVH), especialmente en América Latina, donde constituye un cultivo tradicional para numerosos productores. Diversos estudios señalan que esta especie es ampliamente empleada en sistemas de FVH por sus características agronómicas y nutricionales. Sus granos poseen un alto contenido de carbohidratos solubles, lo que favorece un crecimiento rápido y vigoroso de las plántulas. Asimismo, el forraje obtenido presenta buena digestibilidad y palatabilidad, así como un adecuado aporte nutricional en términos de energía y proteína en la materia seca (Farghaly *et al.*, 2019).

Durante el proceso de germinación en condiciones hidropónicas, el maíz desarrolla plántulas con hojas anchas y un sistema radicular abundante. En términos productivos, se ha reportado que 1 kg de semilla de maíz puede generar entre 5 y 8 kg de forraje verde fresco en un periodo de 8 a 12 días. Aunque su eficiencia de conversión en relación con el peso de la semilla puede ser ligeramente inferior a la de especies como la cebada, sigue siendo una alternativa altamente productiva en los sistemas de FVH (Cisneros *et al.*, 2023). En términos de calidad nutricional, el forraje verde hidropónico de maíz suele presentar un menor contenido de proteína en comparación con el obtenido de cebada, debido a que el grano de maíz presenta inicialmente una mayor concentración de almidón y una menor proporción de proteína. No obstante, bajo condiciones adecuadas de manejo, este forraje puede alcanzar valores de proteína cruda entre 10 y 13 % en base seca dependiendo del manejo. Su principal contribución nutricional radica en el aporte energético, derivado de los azúcares producidos durante el proceso de hidrólisis de almidón en la germinación, lo que mejora su disponibilidad energética para la alimentación animal (Blanco *et al.*, 2019). Diversas investigaciones han comparado la producción de forraje verde hidropónico (FVH) de maíz con otras especies forrajeras.

Adekeye *et al.* (2020) reportaron que, bajo condiciones de cultivo similares, el maíz hidropónico presentó un mayor rendimiento y una mejor eficiencia en el uso del agua en comparación con el trigo producido bajo el mismo sistema. En dicho estudio, realizado en África, se observó que el maíz requirió aproximadamente 1.07 L de agua por kilogramo de forraje fresco a los 10 días de crecimiento, utilizando solución nutritiva, mientras que el trigo demandó un mayor volumen de agua para producir una biomasa comparable. Con base en estos resultados, los autores concluyeron que el maíz representa una alternativa eficiente para la producción de FVH, debido a su elevada productividad y a su eficiencia en el aprovechamiento del recurso hídrico cuando se cultiva bajo condiciones adecuadas de nutrición. De manera similar, Cisneros *et al.* (2023) señalan que el FVH de maíz presenta alta digestibilidad y buena aceptación por parte de los animales, lo que lo convierte en una de las especies más utilizadas y recomendadas en los sistemas de producción de forraje verde hidropónico.

2.1.2 Ventajas de FVH

De acuerdo con Vázquez (2014), citado por Álvaro (2018), la producción de forraje verde hidropónico presenta diversas ventajas frente a los sistemas tradicionales de producción de forraje en campo abierto. Estas ventajas se relacionan principalmente con la eficiencia en el uso de los recursos y con los beneficios productivos para los animales. En las que se pueden mencionar:

- Se requiere poca agua. En un sistema de producción de FVH, el agua utilizada se recircula y se realizan riegos de sólo 3 minutos diarios.
- Ahorro de agua. Las pérdidas de agua por evapotranspiración, escurrimiento superficial e infiltración son mínimas. Consumiendo entre 15 y 20 litros de agua por kilogramo de materia seca de FVH (Meza-Carranco, 2005).

2.1.3 Desventajas

En algunos casos, los proyectos de forraje verde hidropónico (FVH) se comercializan sin que los productores conozcan con precisión los requerimientos técnicos del sistema, tales como la selección de la especie forrajera y sus variedades, su comportamiento productivo, el manejo de plagas y enfermedades, así como las necesidades de nutrientes, agua y las condiciones adecuadas de luz, temperatura y humedad. Esta falta de información y capacitación previa ha provocado el fracaso de ciertos sistemas productivos, debido a un manejo inadecuado de la tecnología. Además, el FVH demanda un seguimiento constante y cuidados permanentes durante todo el proceso de producción, lo que implica un compromiso técnico y operativo por parte del productor para garantizar resultados satisfactorios (Ramírez, 2013).

2.2 Lixiviado de lombriz como fertilizante

El lixiviado de lombriz es un extracto líquido obtenido a partir de la fertilización aeróbica del compost en agua. Este producto es ampliamente utilizado en sistemas de fertiriego debido a su contenido de microorganismos benéficos, nutrientes solubles y diversos compuestos orgánicos que favorecen el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales (Salas Pérez, L. *et al.*, 2010). De manera similar, el té de humus o lixiviado es un extracto líquido obtenido a partir de una rica composta, proceso mediante el cual se liberan minerales, compuestos orgánicos y microorganismos benéficos presentes en la composta. Dicho extracto se considera un fertilizante orgánico que produce un líquido 100 % natural, ya que aporta nutrientes que favorecen el crecimiento y el desarrollo de las plantas (Capistrán *et al.*, 2004). Sin embargo, el humus de lombriz en estado sólido puede someterse a un proceso de extracción con agua para obtener soluciones acuosas que concentren los principales elementos solubles presentes en este material orgánico. Este procedimiento conocido comúnmente como humus líquido, puede aplicarse de forma foliar, donde cumple una función como bioestimulante al favorecer el crecimiento vegetal, además de aportar nutrientes disponibles que contribuyen al adecuado desarrollo del cultivo (Almaguer *et al.*, 2012). En cuanto su composición el té de humus

de lombriz se caracteriza por su contenido de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal. Dentro de sus propiedades químicas destacan aproximadamente 84 mg/l de nitrógeno total, Fosforo total 27 mg L⁻¹ y Potasio 700 mg L⁻¹, dentro de sus propiedades químicas (Guarachi, 2018).

De acuerdo con García (2021), para la elaboración del lixiviado de humus de lombriz se inicia con la desinfección del material orgánico, seguido su secado al sol durante un periodo de dos días. Posteriormente, el humus seco se somete a un proceso de tamizado para eliminar impurezas y se coloca en sacos. Luego, se coloca en un contenedor con agua utilizando una relación de 1:2 (1 kg de humus de lombriz por 2 litros de agua). Pasado el tiempo de tres días, se obtiene un extracto líquido soluble y consiste. Los estantes fueron contruidos con madera en las siguientes dimensiones 1.5 m de altura y 3 m de ancho, cada estante conto tres niveles, separados cado 0.3 m con una pendiente del 5% para drenar la solución excedente de las bandejas tuvieron las siguientes medidas: 0.45 m de ancho y 0.05 m de altura con un área de 0.20 m².

2.3 Consideraciones del establecimiento del FVH

2.3.1 Iluminación

Durante la etapa inicial del ciclo de producción de forraje verde hidropónico (FVH), es indispensable controlar la exposición a la luz durante la germinación de las semillas. En esta fase, las bandejas deben mantenerse en condiciones de baja luminosidad durante aproximadamente tres a cuatro días, garantizando simultáneamente un riego adecuado que favorezca la emergencia de los brotes y el desarrollo radicular. No obstante, las semillas requieren oscuridad para iniciar la germinación; una vez comenzado el crecimiento de las plántulas, es necesaria una iluminación moderada con intensidades entre 1000 y 5000 lux. Para lograr estas condiciones lumínicas pueden emplearse diferentes alternativas: el uso del plástico con una transmisión aproximada del

30% de luz, o bien, cuando se dispone de estructuras cubiertas con plástico verde clorofila o vidrio, la colocación de malla sombra sobre dichos materiales. La malla recomendada debe proporcionar entre el 50% y el 70% de sombra, lo que equivale a una reducción efectiva de la radiación incidente de aproximadamente del 25% al 35%. En sistemas de producción en ambientes cerrados, también puede utilizarse iluminación artificial, como lámparas fluorescentes, manteniendo un fotoperiodo de 12 a 15 horas diarias, evitando la incidencia directa de luz intensa sobre las bandejas (FAO, 2001).

2.3.2 Temperatura

La temperatura es un factor determinante en el desarrollo del forraje verde hidropónico. En términos generales, el rango adecuado para el crecimiento se sitúa entre 18 °C y 26 °C. No obstante, en el caso de las gramíneas, que son las más utilizadas por su alta producción de biomasa y su valor nutricional, se recomienda un intervalo óptimo ligeramente mayor, de 25 °C a 28 °C. Cuando la temperatura supera los 30 °C, pueden presentarse alteraciones en la actividad celular, lo que ocasiona una reducción de la capacidad de absorción de agua del sistema radicular. Asimismo, las temperaturas nocturnas elevadas resultan desfavorables para las gramíneas, ya que incrementan la tasa de respiración, lo que provoca un mayor consumo de reservas energéticas que, en condiciones adecuadas, deberían destinarse al proceso fotosintético durante el día (Hernández, 2024).

2.3.3 Humedad

La humedad relativa del ambiente es un factor determinante en la producción del forraje verde hidropónico (FVH), debido a su influencia directa en los procesos fisiológicos y sanitarios del cultivo. Se recomienda mantener los niveles de humedad entre 65 y 70%, ya que este rango favorece el crecimiento adecuado de las plántulas. Cuando la humedad supere el 90% y no se cuente con una ventilación eficiente, pueden surgir problemas fitosanitarios importantes, principalmente asociados al desarrollo de enfermedades

fúngicas de difícil control. Asimismo, la humedad ambiental adecuada contribuye al correcto funcionamiento de los estomas, estructuras responsables del intercambio gaseoso y de la absorción de dióxido de carbono (CO₂). Niveles insuficientes de humedad pueden limitar este proceso, reduciendo la asimilación de CO₂ y afectando negativamente el crecimiento y el desarrollo del cultivo (Jiménez, 2021).

2.3.4 Estructuras

Izquierdo (1998), citado por Condori (2015), incluye antiguas fábricas, criaderos de pollos y galpones vacíos. Estas ofrecen un mejor control ambiental y permiten una mayor producción con hasta siete niveles de bandejas. Por otro lado, existen estructuras modernas o de alta tecnología con sistemas cerrados y automatizados, conocidas como “fábricas de forraje” o “contenedores” climatizados. Estas pueden construirse en el lugar, prefabricarse o importarse como unidades completas de producción (FAO, 2001b). La producción de FVH se ubica sobre estructuras o repisas para aprovechar el espacio según las necesidades del productor. Una estructura de madera de sencilla construcción que permite la producción simultánea de forraje verde hidropónico. Además, su fabricación es de bajo costo y sencilla (Abarca *et al.*, 2020).

2.3.5 Invernaderos

Existen varios tipos de invernaderos para la producción de forraje verde hidropónico; uno de ellos es el invernadero de dos aguas, apropiado para la producción intensiva en espacios reducidos y a gran escala; es adecuado para cultivos de bajo crecimiento. Resultan ideales para el cultivo, ya que su estructura permite un uso óptimo del espacio disponible. Las dimensiones pueden variar entre 4 y 8 metros de ancho, hasta 20 metros de largo, con una altura de 3 metros (Vivas y Mejía, 2022). El mismo autor dice que existe otro invernadero de túnel; este se distingue por su estructura arqueada y por la ausencia de ventilación cenital. El cual cuenta con ventilas laterales de 2.8 metros, lo que restringe el uso a invernaderos de menor longitud, ya que estructuras más largas

podrían generar estrés en las plantas que están ubicadas lejos del perímetro. Este tipo de invernadero se emplea en cultivos que no requieren evacuaciones de grandes volúmenes de aire, lo que minimiza las pérdidas de calor. Estos se emplean en cultivos de porte bajo y mediano. Por último, el invernadero de media agua: este tipo de invernadero cuenta con una longitud de 8 metros y con un ancho de 3,20 metros, con una altura máxima de 3,20 m y mínima de 1,30 m. Esto, para garantizar una buena ventilación, cuenta con cuatro ventanas, de 0,70 por 0,50 metros cada una, distribuidas de la siguiente manera: dos en la parte superior lateral, dos en la parte inferior lateral y una más en la pared posterior. Además, dispone de una puerta metálica de 1,70 m de alto por 0,70 m de ancho. En la construcción de este invernadero se utilizan materiales de bajo costo, como adobes, piedras, barro y madera. (Vivas y Mejía, 2022).

2.3.6 Bandejas para el cultivo

Cantuca *et al.* (2024) indican que la bandeja es un elemento esencial en la producción de FVH, ya que proporciona el soporte adecuado para la germinación y el crecimiento inicial de semillas y cereales como cebada, avena, trigo y maíz. Estas bandejas se fabrican con distintos materiales cuyas características influyen en la durabilidad, el manejo sanitario y los costos del sistema productivo. Principales tipos de bandeja utilizados:

- ✓ Bandejas de polipropileno: son las más empleadas por su alta resistencia mecánica y su larga vida útil. Generalmente contienen aditivos estabilizadores frente a la radiación ultravioleta, lo que reduce el deterioro causado por la exposición prolongada a la luz solar.
- ✓ Bandeja de acero inoxidable: se recomienda para condiciones de elevada humedad, ya que presenta gran resistencia a la corrosión y reduce el riesgo de proliferación de patógenos; sin embargo, su costo es superior al de las bandejas de plástico.

- ✓ Bandejas de madera: aunque representan una opción más económica, no se aconseja su uso en ambientes muy húmedos, pues tienden a deteriorarse rápidamente y pueden favorecer el desarrollo de hongos.

2.4 Pasos para el establecimiento

2.4.1 Selección de la semilla y desinfección

En el primer paso de la producción de forraje verde hidropónico (FVH), se deben seleccionar adecuadamente las semillas. Los granos como el maíz, la cebada, el sorgo y la avena son los más empleados en la producción de forraje por su alto valor nutricional y su rápido crecimiento. Las semillas deben ser de buena calidad y estar libres de contaminantes o patologías para garantizar una producción óptima (FAO, 2024). Previo al proceso de germinación, las semillas deben someterse a un lavado y a una desinfección, lo cual es crucial para eliminar hongos y bacterias contaminantes. Para esto se usa el hipoclorito de sodio, con concentraciones de 0,5, 1 y 2 ml/L, concluyendo que el hipoclorito de sodio es efectivo para la desinfección de granos. El tiempo de inmersión debe de ser 15 minutos a próximamente esto para evitar dañar a las semillas (Mariño, 2022). De manera alternativa, Zúñiga y Beauregard (2020), recomiendan utilizar agua oxigenada con una dosis de 5 ml/L, ha demostrado ser una buena opción para desinfectar semillas, controlando eficazmente hongos y promoviendo la germinación, el crecimiento y la acumulación de biomasa. Una vez terminado el proceso de desinfección es indispensable enjuagar muy bien la semilla con agua limpia para así eliminar cualquier residuo de desinfectante. Asimismo, Hernández (2024a), sugiere desinfectar las semillas primero colocándolas en una bolsa de malla de nailon o malla sombra, permitiendo que el agua escurra correctamente al retirar las semillas. Las semillas deben permanecer en la solución únicamente por 15 min, ya que el tiempo mayor como dicen los demás autores, podría dañarlas.

2.4.2 Pre-germinación

La pregerminación

corresponde a la fase inicial en la que se estimula la actividad metabólica de las semillas, lo que permite superar su estado de latencia y dar inicio al proceso germinativo. En esta etapa, los factores determinantes son la temperatura, la disponibilidad de humedad y una adecuada oxigenación, ya que influyen directamente en la activación enzimática y en el desarrollo embrionario. Este procedimiento puede llevarse a cabo utilizando únicamente agua o mediante la aplicación de una solución compuesta por agua y cal, con el fin de favorecer condiciones sanitarias y de hidratación adecuadas (Hernández, 20024b). De acuerdo con García (2021), se deben colocar las semillas dentro de una bolsa de tela y sumergirlas completamente en agua limpia por un periodo de 24 horas para lograr una completa imbibición. Pasadas las 12 horas, se procede a sacarlas y orearlas durante una hora, y luego sumergirlas nuevamente durante 12 horas. Finalmente, realizarles el último oreado. Esto induce la rápida germinación de la semilla mediante el estímulo aplicado al embrión. Este crecimiento inicial vigoroso del FVH se debe a que se están utilizando semillas que ya han brotado y, por lo tanto, su etapa de crecimiento posterior estará más estimulada.

2.4.3 Siembra

La densidad de siembra es un factor clave en la producción de forraje verde hidropónico, ya que afecta directamente el crecimiento de las plantas, la competencia por recursos y el rendimiento del forraje. Una densidad óptima permite maximizar la producción y mejorar su calidad (Nina y Fernández, 2017). Para semillas de trigo, avena, cebada, centeno y críticale, se recomienda utilizar 300-350 gramos por bandeja de 35,5 cm x 45 cm, lo que equivale a distribuir un kilo de semillas en tres bandejas. En el caso de maíz, se debe incrementar a 500 y 600 gramos por bandeja, lo que implica utilizar dos bandejas por cada kilo de maíz. La siembra consiste en colocar semilla pregerminada en las bandejas de producción, considerando las densidades establecidas y distribuyéndola

de manera homogénea en una delgada capa. Posteriormente, se cubrió con poliamida negra para mantener condiciones de semioscuridad durante la fase inicial del desarrollo (Abarca et al., 2016). Por otra parte, Juárez-López *et al.* (2013) mencionan que la dosis óptima para la siembra de semillas por metro cuadrado oscila entre 1,0 y 2,2 kg dependiendo del tamaño de la bandeja que se utilice; no debe superar los 1,5 cm de altura de la bandeja. Otros recomiendan entre 2,2 kg y 3,4 kg de semilla por bandeja.

2.4.4 Riegos

El riego es un componente esencial en la producción de forraje verde hidropónico (FVH), ya que el agua participa directamente en los procesos fisiológicos responsables del crecimiento y desarrollo de las plántulas. Para lograr un rendimiento adecuado, es indispensable suministrar este recurso con calidad, volumen y frecuencia adecuados, asegurando así una correcta hidratación y la eficiente absorción de nutrientes en condiciones de cultivo sin suelo (Serna, 2017). Existen varios tipos de riego que se utilizan para forraje verde hidropónico y son los siguientes:

- **Riego por aspersión:** El riego por aspersión es una técnica que consiste en distribuir el agua sobre toda la superficie de las bandejas o charolas en forma de lluvia artificial. Este sistema utiliza una red de conducción que transporta el agua a la presión necesaria hasta los dispositivos emisores, conocidos como aspersores, que permiten su dispersión uniforme sobre el cultivo. La red de distribución está compuesta por tuberías cerradas que mantienen el flujo presurizado; sin embargo, una vez que el agua es expulsada por los aspersores, su trayectoria puede verse influida por factores ambientales como la temperatura, la ventilación o las corrientes de aire (Gómez *et al.*, 2010).

- Riego por goteo: El riego por goteo es un sistema que permite suministrar agua de manera controlada mediante una red de tuberías que la transporta hasta emisores denominados goteros. Estos dispositivos liberan pequeños volúmenes de agua de forma continua o intermitente, lo que favorece una aplicación eficiente y reduce las pérdidas por escurrimiento o evaporación. En este método, el agua circula a través de conductos cerrados que operan a presión, lo que asegura una distribución uniforme y un aprovechamiento hídrico adecuado en el cultivo (Demin, 2014).
- Riego por nebulización: El riego por nebulización es un sistema en el que los emisores liberan agua en forma de partículas muy finas, o neblina, sobre el cultivo. Además de aportar agua o solo soluciones nutritivas, este método contribuye a regular la temperatura del ambiente y a incrementar la humedad relativa, creando condiciones favorables para la germinación y el desarrollo inicial de las plantas. La uniformidad en la distribución y el reducido tamaño de las gotas evitan daños mecánicos en las plántulas y disminuyen el riesgo de compactación del sustrato. Esto resulta especialmente adecuado para la producción de forraje verde hidropónico, la germinación de semillas, la propagación por estacas o esquejes y el cultivo de hongos, ya que permite manejar caudales y diámetros de cobertura distintos, optimizando el uso del agua y de los fertilizantes en las diferentes etapas de crecimiento (Valencia, 2019). En cuanto al manejo del riego, se inicia con la aplicación de agua en los primeros 4 días del ciclo. A partir del quinto día, se incorpora el lixiviado de humus de lombriz como solución nutritiva. Dicho manejo se realiza generalmente en dos aplicaciones diarias: la primera a las 9:00 h y la segunda entre las 14:00 y las 15:00 h, ajustándose a las condiciones de temperatura del ambiente hidropónico (García, 2021).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación

El presente experimento se realizó del 30 de abril al 20 de mayo de 2025 en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, en el área experimental “El Bajío”. Las coordenadas del sitio son 25° 23’ de latitud norte y 101° 00’ de longitud oeste, a una altitud de 1,783 m. El clima se clasifica como templado semiseco, con una temperatura promedio de 18 °C, inviernos extremos y una precipitación media anual de 340 mm (RUOA UNAM, Observatorio Atmosférico Saltillo, UAAAN 2019).



Figura 1. Localización del área de estudio. Invernadero del Departamento de Recursos Naturales Renovables. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

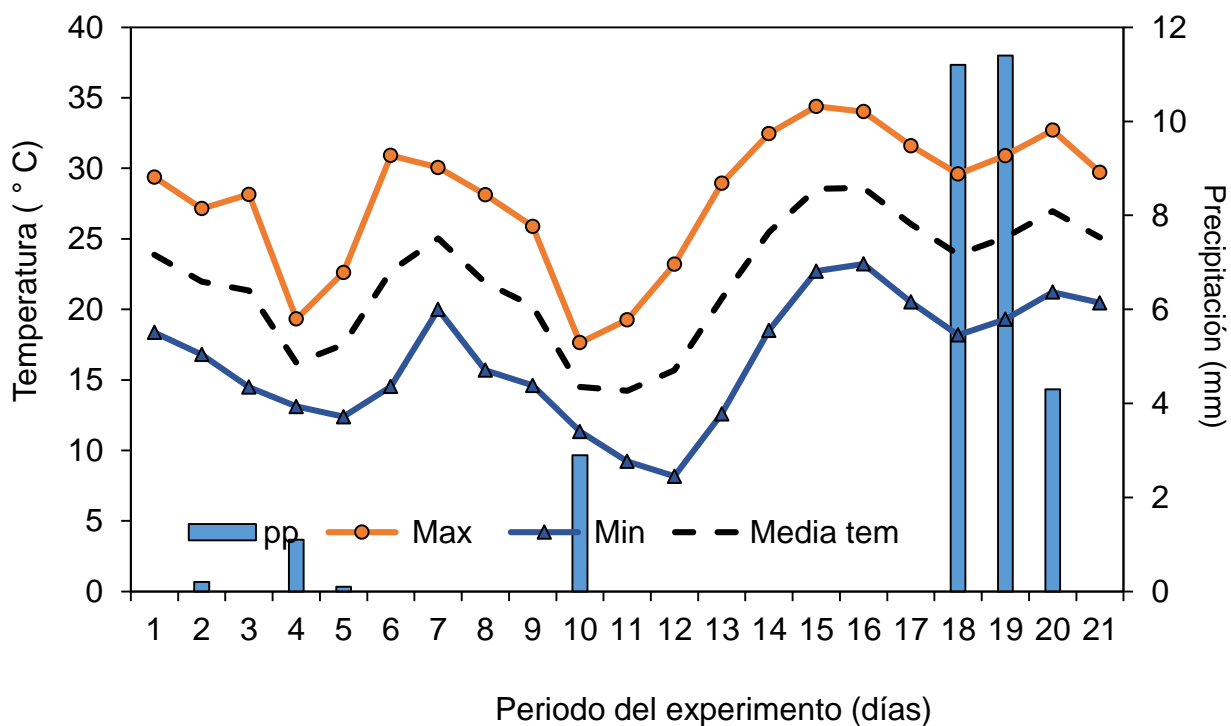


Figura 2. Distribución de la precipitación y de la temperatura promedio, mínima y máxima en los días registrados durante el periodo de estudio del 30 de abril al 20 de mayo de 2025 (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos - RUOA UNAM-UAAAN).

3.2 Metodología

Se utilizó la variedad de maíz Sintética Blanca Antonio Narro 543 (VSBAN-543), donada por el Instituto Mexicano del Maíz (IMM), departamento de Fitomejoramiento, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Para el estudio se utilizó un diseño experimental en bloques al azar, con cuatro repeticiones, con tres tratamientos (dos con una solución de lixiviado) más un control (riego solo con agua) (Cuadro 1). La composición química del lixiviado de lombriz se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Diseño de tratamientos de acuerdo a la estructura utilizada de 2 niveles de PVC de 1 pulgada, donde se ubicaron las charolas de maíz con la aplicación de lixiviado de lombriz a diferentes dosis.

| | | |
|----------------|----------------|---------------|
| T150 R1 | T0 R1 | T50 R3 |
| T150 R2 | T0 R2 | T50 R4 |
| T50 R1 | T150 R3 | T0 R3 |
| T50 R2 | T150 R4 | T0 R4 |

Tratamiento 0 (T0): Control (solo agua); Tratamiento 1 (T1): Solución con lixiviado al 50; Tratamiento 2 (T2): Solución con lixiviado al 150.

Cuadro 2. Descripción de los elementos presentes en el lixiviado de lombriz utilizado como fertilizante en la producción de forraje verde hidropónico de maíz.

| | | | | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| N (%) | P (mgL⁻¹) | K (mgL⁻¹) | Na (mgL⁻¹) | Ca (mgL⁻¹) | Mg (mgL⁻¹) |
| 0.37 | 1264.57 | 2615 | 1175 | 272.80 | 163.45 |
| Fe (mgL⁻¹) | Cu (mgL⁻¹) | Zn (mgL⁻¹) | Mn (mgL⁻¹) | B (mgL⁻¹) | |
| 3.87 | 2.07 | 4.26 | 12.70 | 27.92 | |

N= nitrógeno, P=fosforo, K= potasio, Na= sodio, Ca= calcio, Mg= magnesio
Fe= hierro, Cu= cobre, Zn= cinc, Mn= manganeso, B= boro.

3.3 Metodología de establecimiento del experimento

Limpieza y desinfección de las bandejas

Con el propósito de prevenir la aparición y la proliferación de patógenos, se desinfectaron las charolas utilizadas en el sistema. Estas fueron de un tamaño de 0.17 m² (32 x 53 cm). Para ello, se lavaron con agua y detergente doméstico para eliminar impurezas y restos de tratamientos anteriores. Después de haberlas lavados se desinfectaron para ello se colocaron en un contenedor de plástico donde se sumergieron 15 minutos en una solución de 1 ml de hipoclorito de sodio por un litro de agua, pasado ese tiempo se sacaron y se enjuagaron para después ponerlas en la base donde se iba a sembrar.

➤ Acomodo de bandejas en módulo de FVH

Dentro del invernadero se acondicionó un módulo de FVH, construido a base de tubo de PVC de ½ pulgada; posteriormente, las bandejas, previamente lavadas y desinfectadas, cada una de ellas identificada mediante una etiqueta para facilitar al momento de hacer los riegos con diferente solución.

➤ Selección de la semilla

De la semilla de maíz se procedió a retirar las impurezas, como basura, piedras y tierra, así como semillas que no cumplieran con las características deseables para su uso como semilla.

➤ Lavado y desinfección de semillas

Una vez realizada la selección, las semillas se colocaron en baldes para lavar con abundante agua, para retirar material flotante y otras impurezas. Se comenzó con la desinfección, en la que se dejaron durante 15 minutos en una solución de 2 ml de hipoclorito de sodio por cada litro de agua, con la finalidad de eliminar microorganismos

patógenos. Transcurrido este tiempo, las semillas se enjuagaron con agua limpia para retirar los residuos de hipoclorito de sodio y asegurar se adecuada limpieza.

➤ **Pregerminación de la semilla**

Una vez lavada y desinfectada la semilla, se procede a sumergirla en un recipiente con agua limpia. En este proceso, se llena el recipiente hasta la mitad de su capacidad. Se utilizaron un total de diez litros. Este procedimiento se dividió en dos fases, cada una con un tiempo de 12 horas y una hora entre cada fase para aireación de la semilla. Este proceso se realiza con el fin de lograr la inhibición de la semilla y provocar una pregerminación. Finalmente, la semilla fue colocada en las bandejas de plástico.

➤ **Siembra**

Una vez que el material biológico se desinfectó y se pre-germinó, se colocaron las semillas en las bandejas de plástico de 0,18 m² (33 cm x 55 cm), a una densidad de siembra de 927.5 g de semilla por bandeja.

➤ **Germinación – fase oscura**

Para lograr una adecuada germinación, las bandejas fueron cubiertas con bolsas de plástico negras, esto con la finalidad de dar obscuridad, se hace para estimular la germinación ya que las semillas necesitan un periodo de ausencia de luz para activar el embrión de una manera uniforme y conservar la humedad para completar su proceso de germinación. Al quinto día las bolsas de plástico se retiran para dar mayor ventilación y evitar proliferación de hongos, y permitiendo entrar la luz difusa para su desarrollo de las platas. En este proceso se regó con cal durante cinco días para ayudar a prevenir hongos.

➤ **Preparación del lixiviado de humus de lombriz**

Para la preparación de los tratamientos se emplearon dos toneles con capacidad de 200 L cada uno. En dichos recipientes se prepararon dos soluciones de lixiviado diluidas en

agua con diferentes concentraciones. La primera solución se preparó a una concentración de 50 ml de lixiviado por litro de agua, mientras que la segunda se preparó a una concentración de 150 ml de lixiviado por litro de agua. Posteriormente, las soluciones fueron mezcladas cuidadosamente con el fin de lograr una homogenización adecuada durante la aplicación durante el riego.

➤ **Riegos**

Durante la fase de oscuridad, en los primeros cinco días se realizaron riegos diarios. En la mañana y en la tarde se aplicó una solución con 50 g de cal por litro de agua, y el resto del día solamente agua. La aplicación del lixiviado de humus de lombriz se realizó cinco días después de la solución de cal, durante la fase de lumínica. Se establecieron tres tratamientos, aplicados manualmente con la ayuda de atomizadores de un litro, correspondientes a dos concentraciones de lixiviado y a un testigo. El primer tratamiento (T1) fue de 50 de lixiviado, mientras que el segundo tratamiento (T2) fue de 150 de lixiviado. El tratamiento testigo (T0) recibió únicamente agua, sin adición de lixiviado. Durante el periodo experimental se realizaron seis aplicaciones de agua, de acuerdo con las necesidades del cultivo.

3.4 Variables evaluadas

La cosecha se realizó 20 días después de la siembra y se evaluaron las siguientes variables productivas.

3.4.1 Rendimiento de forraje verde y materia seca

Para determinar el rendimiento del forraje verde hidropónico (kg FV m²), se pesó el total del forraje verde de cada repetición (charola) y para estimar el rendimiento de materia seca (kg MS m²) se colocó en bolsas de papel previamente etiquetadas y se llevaron a una estufa de secado de aire forzado, marca Felisa, modelo FE-243A, para secarlas a 55

°C durante 72 horas, hasta alcanzar un peso uniforme, y se registró el peso de materia seca.

3.4.2 Componentes del rendimiento

Para determinar la aportación de los componentes del rendimiento, la biomasa se separó en semilla no germinada, raíz, tallo y hoja, los cuales fueron separados de una muestra de un cuadrante de 0.22 m² (15 x 15 cm) por repetición (charola). Se colocó cada componente en bolsas de papel y se secaron en una estufa de secado de aire forzado, marca Felisa, modelo FE-243A, para su secado a una temperatura de 55 °C durante 72 horas, hasta alcanzar un peso uniforme. Se estimó su rendimiento de forraje verde (kg FV m²), materia seca (kg MS m²) por componente y su aportación en porcentaje al rendimiento total.

3.4.3 Relación: producción de forraje/densidad de siembra

La relación de materia seca producido versus la cantidad de semilla sembrada por repetición, se estimó dividiendo la cantidad de materia seca producido total entre la cantidad de semilla depositada en cada charola. El cálculo se realizó con la siguiente fórmula:

$$\mathbf{R: PF/DS}$$

R = Relación entre forraje producido y densidad de siembra.

PF = Producción de forraje por tratamiento (kg MS charola⁻¹).

DS = Densidad de siembra (g semilla charola⁻¹)

3.4.4 Relación parte aérea/raíz

La relación de la parte aérea respecto a la cantidad de raíz producida, se evaluó dividiendo el rendimiento de materia seca producido por los componentes aéreos (hoja y tallo) y lo correspondiente a lo que se produjo de materia seca en el componente radicular. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$R:PA/Raiz$$

R = Relación entre parte aérea y raíz.

PA = Producción de forraje total por tratamiento (kg MS charola⁻¹).

Raiz = Producción de forraje en raíz por tratamiento (g semilla charola⁻¹)

3.5 Análisis estadístico

Para comparar el efecto de los tratamientos (dosis de fertilización con lixiviado de lombriz) en producción de forraje verde hidropónico de maíz, se utilizó un diseño en bloques completamente al azar con tres repeticiones. Se aplicó un ANOVA con el procedimiento PROC GLM de SAS (Statistical Analysis System, versión 9.0 para Windows; SAS Institute, Cary, NC, USA). Cuando hubo efecto del tratamiento, se realizó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey, con un nivel de significancia del 5 %. Se utilizó el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Valor de la variable de estudio

μ = Media general de la población estudiada

α_i = Efecto del i-ésimo tratamiento

β_j = Efecto del j-ésima repetición

E_{ij} = Error estándar de la media

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Rendimiento de forraje total

En la Figura 3, se presentan las variables que describen el desarrollo productivo de Forraje Verde Hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) cosechado a los 20 después de su establecimiento. En el rendimiento de materia seca y de forraje verde hidropónico se obtuvieron promedios de 3.0 kg MS m⁻² y 6.8 kg FV m⁻² (p>0.05; Fig. 3a y 3b), sin diferencias significativas entre los tratamientos en las variables evaluadas (p>0.05), por lo que no se observó efecto de la fertilización con lixiviado de lombriz sobre el rendimiento de forraje del maíz en un sistema de producción de forraje verde hidropónico. Sin embargo, al aplicar 50 ml de lixiviado de lombriz (T₅₀), se obtuvo un incremento de 600 g MS m⁻² respecto al de menor producción (T₁₅₀) de 1700 g FVH m⁻², *versus* el tratamiento testigo (T₀). No obstante, para fines prácticos, un incremento de 1700 g m⁻² en la producción de FVH puede ser una cantidad adecuada para suplementar diferentes especies animales, dependiendo de sus requerimientos nutricionales y del nivel de producción. Por ejemplo, en aves domésticas, el FVH se utiliza principalmente como complemento del alimento balanceado, con consumos aproximados de 100 a 300 g animal⁻¹ día⁻¹. Bajo estas condiciones, 1700 g de FVH podrían suplementar entre 5 y 17 gallinas o pollos de engorde. Diversos autores señalan que la inclusión de FVH en las aves mejora la aceptabilidad del alimento y favorece el aporte de carotenoides, vitaminas y enzimas digestivas, aunque no sustituye por completo las fuentes energéticas concentradas (Elizondo-Salazar, 2005). En pequeños rumiantes, los consumos reportados fluctúan entre 1 y 3 kg FVH animal⁻¹ día⁻¹, según la edad, el peso vivo y la disponibilidad de otros forrajes. En este sentido, 1700 g FVH m⁻² adicionales obtenidos en el T₅₀, respecto al resto de los tratamientos, serían suficientes para suplementar a 1 cabra adulta en mantenimiento o a 2 cabritos jóvenes (Rodríguez et al., 2005). En bovinos, el requerimiento de FVH es considerablemente mayor debido a su mayor

tamaño corporal y a sus mayores necesidades energéticas. Una vaca adulta puede consumir entre 8 y 15 kg de FVH fresco al día cuando este se utiliza como parte importante de la ración. Por ello, el incremento (1700 g FVH m⁻²) únicamente representaría un suplemento parcial para bovinos adultos o podría destinarse al apoyo alimenticio de becerros en crecimiento (La Food and Agriculture Organization, 2001). En cerdos, los consumos varían entre 0,5 y 2,0 kg animal⁻¹ día⁻¹, según la etapa fisiológica, por lo que 1700 g FVH m⁻² podrían suplementar a un cerdo en crecimiento o a dos o tres lechones (Müller *et al.*, 2006).

En la relación de producción de forraje respecto a la de siembra (R:RF/DS), el promedio fue de 1.0 (Figura 3c), sin diferencias estadísticas entre los tratamientos ($p>0.05$). No obstante, al igual que el rendimiento de materia seca y de forraje verde, la aplicación de 50 ml de lixiviado por litro de agua al maíz en producción de FVH fue de 2 décimas respecto al tratamiento testigo (riego sin agua), con valores de 1.1 vs 0.9, respectivamente. Lo anterior significa que hay 1,1 kg de forraje verde hidropónico por cada kg de semilla sembrada; esto representa un valor bajo y no rentable, lo cual se debió a una mayor aportación de la raíz al rendimiento total (Figuras 4, 5 y 6), lo que también refleja una baja relación parte aérea:raíz (R:PA/Raiz) ($p>0.05$; Figura 3D), con un valor promedio de 0,2. Sin embargo, la tendencia de los valores fue diferente a la de los valores anteriores: testigo de riego con agua (T0) > fertilización con 50 ml de lixiviado por litro de agua (T50) > fertilización con 150 ml de lixiviado de lombriz por litro de agua (T150), lo que evidencia que la fertilización con lixiviado de lombriz en forraje verde hidropónico de maíz favorece más la parte radical que la aérea. La relación de conversión obtenida en el presente estudio es inferior a la reportada en otros trabajos de FVH de maíz y cebada, donde se han documentado relaciones de 4 a 8 kg de forraje fresco por kilogramo de semilla sembrada (Food and Agriculture Organization, 2001; Rivera *et al.*, 2010). Esta baja eficiencia productiva posiblemente estuvo asociada al elevado aporte de biomasa radical respecto a la parte aérea, situación que redujo el aprovechamiento comercial del forraje, ya que en sistemas de producción animal la fracción aérea constituye el

componente de mayor interés nutricional y económico. Al respecto, diversos autores señalan que condiciones de estrés nutricional, exceso de humedad o desbalances en la disponibilidad de nutrientes pueden inducir una mayor proliferación radical en detrimento del crecimiento foliar (Sánchez y Escalante, 2020). La ausencia de diferencias estadísticas en la relación parte aérea:raíz ($R:PA/Raíz$), con un promedio de 0.2, confirma que la mayor proporción de biomasa se concentró en el sistema radical. Además, la tendencia observada ($T0 > T50 > T150$) evidencia que el incremento en la dosis de lixiviado favoreció progresivamente el desarrollo de raíces sobre la biomasa aérea. Este comportamiento podría atribuirse al efecto bioestimulante de las sustancias húmicas presentes en el lixiviado de lombriz, las cuales promueven la elongación y ramificación radical debido a su acción similar a fitohormonas, particularmente auxinas (Canellas *et al.*, 2015). Aunque este efecto puede resultar benéfico en etapas iniciales del establecimiento vegetal, en producción de FVH puede generar una redistribución de fotoasimilados hacia la raíz, disminuyendo la acumulación de materia seca en hojas y tallos. En sistemas hidropónicos, el desarrollo excesivo de raíces puede representar una limitante para la productividad aérea cuando la disponibilidad de nutrientes supera los requerimientos fisiológicos iniciales de las plántulas. Según Morales *et al.* (2021), aplicaciones elevadas de biofertilizantes líquidos orgánicos pueden incrementar la actividad metabólica radical y el consumo respiratorio, reduciendo la eficiencia de conversión de reservas de la semilla en tejido fotosintético. Esto coincide con la tendencia observada en el tratamiento T150, donde la mayor dosis de lixiviado produjo los valores más bajos de relación parte aérea:raíz y menor eficiencia relativa de producción de forraje. Por otra parte, el comportamiento observado también puede estar relacionado con el corto periodo de crecimiento característico del FVH. Durante los primeros días de germinación, el maíz depende principalmente de las reservas del grano, por lo que la respuesta a fertilización externa suele ser limitada (Elizondo, 2005). En consecuencia, la aplicación de lixiviado de lombriz posiblemente no alcanzó a reflejar un efecto significativo sobre la acumulación de biomasa aérea, aunque sí estimuló procesos fisiológicos asociados al crecimiento radical.

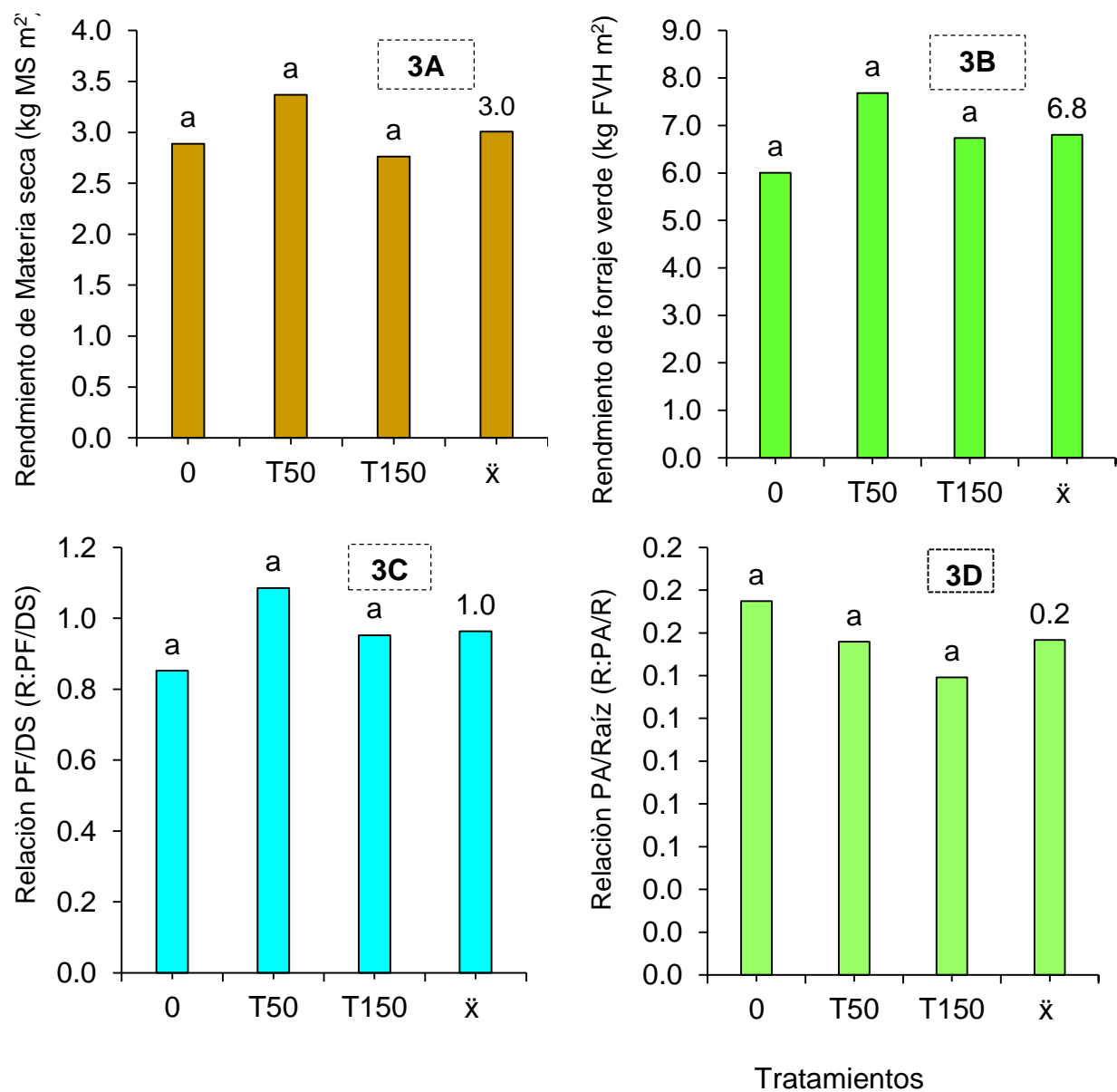


Figura 3. Variables productivas de (FVH) de maíz (*Zea mays* L.) de la variedad sintética blanca Antonio Narro 543 (VSBAN-543), fertilizado con lixiviado de lombriz a dosis de 50 y 150 ml y un testigo (riego con agua), en producción de FVH. Medias con las mismas letras en las columnas son estadísticamente iguales (Tukey; $p < 0.05$). R:PF/DS =

Relación de Forraje Producido/Densidad de siembra, $R:PA/R=$ Relación de Parte Área/Raíz.

A pesar de la ausencia de diferencias estadísticas, la ligera mejora observada en T50 respecto al testigo sugiere que dosis moderadas de lixiviado podrían contribuir positivamente al desarrollo del FVH de maíz bajo determinadas condiciones de manejo. Sin embargo, los resultados indican que dosis altas como 150 ml L^{-1} pueden alterar la distribución de biomasa y disminuir la proporción aprovechable de forraje. Por ello, es necesario continuar evaluando concentraciones menores, frecuencia de aplicación y composición química del lixiviado, con el fin de optimizar la producción de biomasa aérea y mejorar la rentabilidad del sistema hidropónico.

4.2 Componentes del rendimiento y su aportación a la producción total

En la Figura 4, se presentan los componentes del rendimiento y su aportación en porcentaje al rendimiento total de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.), fertilizado con diferentes dosis de lixiviado de lombriz y un testigo (riego con agua). Se presentaron diferencias significativas entre componentes en todos los tratamientos y promedio de los componentes ($p > 0.05$). La raíz fue la que mayor porcentaje de aporte presentó al rendimiento total con un 67 % promedio, seguida por la semilla no germinada con 23 %, la hoja 6 % y el tallo con 4 %, promedio general ($p < 0.05$; Fig. 4c). La significancia estadística y tendencia fue similar en todos los tratamientos: raíz > semilla no germinada > tallo > hoja. No obstante, el único componente que marco diferencia entre tratamientos fue el tallo, siendo mayor en el tratamiento T50, similar estadísticamente al testigo con 5 % de aportación y mayor al T150 con 3 % ($p < 0.05$; Cuadro 3 Anexos). Sin embargo, aunque no se presentaron diferencias estadísticas en el resto de los componentes (hoja, raíz y semilla no germinada) entre tratamientos (T0, T50 y T150) si se denota un mayor porcentaje de raíz en T150 y mayor porcentaje en la semilla no germinada en el Testigo (T0), lo que nos indica que una dosis mayor de fertilización con lixiviado de lombriz (T150), puede ayudar a desarrollar el componente raíz, y por otra

parte el no fertilizar con lixiviado, para el caso del testigo (T0) no favorece la germinación de la semilla.

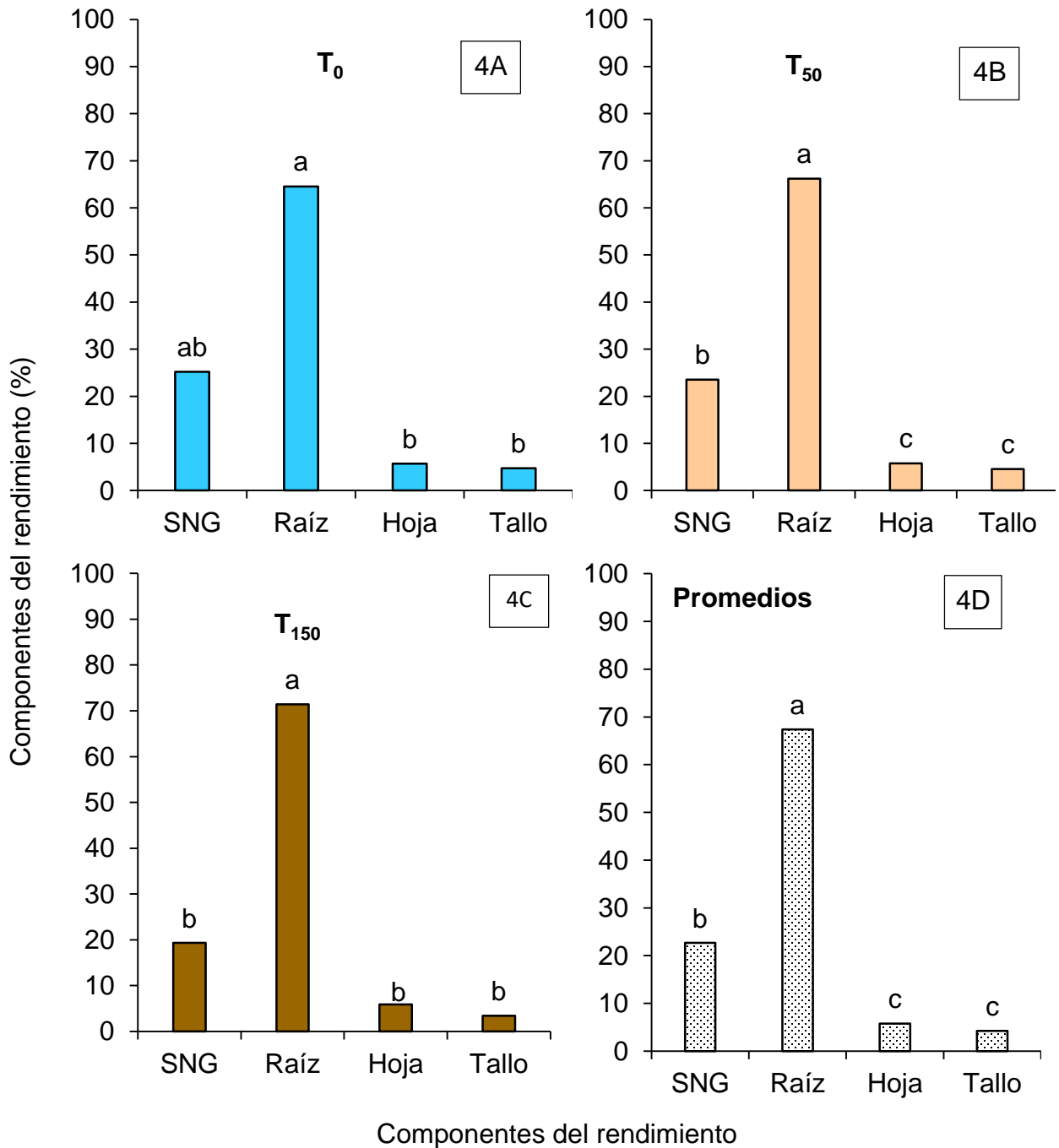


Figura 4. Componentes del rendimiento (%) de maíz (*Zea mays* L.) de la variedad sintética blanca Antonio Narro 543 (VSBAN-543), fertilizado con lixiviado de lombriz a

dosis de 50 y 150 ml y un testigo (riego con agua), en producción de FVH. Medias con las mismas letras en las columnas son estadísticamente iguales (Tukey; $p < 0.05$).

Asimismo, en el rendimiento de materia seca y de forraje verde no se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos en ninguno de los componentes morfológicos ($p > 0.05$). Entre los componentes morfológicos, la raíz destacó en ambos aspectos, con promedios de 2.0 kg MS m^{-2} y 4.7 kg FV m^{-2} (Cuadro 3). En contraparte, la hoja y el tallo fueron los de menor producción, tanto de materia seca como de forraje verde, con 0.15 kg MS m^{-2} y 0.35 kg FV m^{-2} en promedio, respectivamente. Esta tendencia fue similar para los tratamientos testigo (T0) y para la dosis de 50 ml de lixiviado de lombriz por lt de agua en el rendimiento de materia seca; sin embargo, para el T150, aunque la raíz con 2.0 kg MS m^{-2} fue mayor, la semilla no germinada con 0.5, la hoja y el tallo con 0.1 kg MS m^{-2} no difirieron estadísticamente ($p > 0.05$). Para el caso de la producción de forraje en verde, en los tres tratamientos la raíz fue mayor ($p < 0.05$) con 4.4, 5.1 y 4.8 kg FV m^{-2} para el T0, T50 y T150, respectivamente, pero para el T0 y T50, la semilla no germinada, la hoja y el tallo fueron menores a la raíz, pero similares estadísticamente entre ellos ($p > 0.05$), con un promedio de 0.56 y 0.83 kg FV m^{-2} , respectivamente. No obstante, en el T150, el tallo fue menor estadísticamente al resto de los componentes con 0.2 kg FV m^{-2} , seguido por la hoja con 0.4 kg FV m^{-2} , y la semilla no germinada con 1.3 kg FV m^{-2} .

Este comportamiento indica que gran parte de la biomasa producida durante el periodo de crecimiento se concentró en el sistema radical, lo cual coincide con lo reportado en diversos estudios de FVH de maíz, donde las primeras etapas fenológicas favorecen el desarrollo de raíces debido a la movilización de reservas de la semilla y a la rápida absorción de agua (Food and Agriculture Organization, 2001; Elizondo, 2005). También, la elevada proporción de biomasa radical observada en el presente estudio sugiere que el crecimiento del FVH estuvo orientado principalmente hacia estructuras de sostén y absorción, más que hacia tejido foliar fotosintéticamente activo. Este comportamiento puede considerarse una limitante desde el punto de vista productivo, debido a que en los sistemas pecuarios el mayor interés nutricional se concentra en la

fracción aérea, particularmente hojas y tallos tiernos. Rivera *et al.* (2010) señalan que una adecuada producción de FVH debe favorecer una mayor proporción de biomasa aérea, ya que ésta determina el valor nutritivo y el aprovechamiento animal del forraje. Asimismo, el presente comportamiento posiblemente estuvo relacionado con la duración del ciclo de producción, ya que durante las primeras etapas de germinación el maíz utiliza principalmente las reservas energéticas del grano para desarrollar raíces y estructuras embrionarias antes de incrementar significativamente la actividad fotosintética (Morales *et al.*, 2021).

Cuadro 3. Componentes del rendimiento de materia seca (kg MS m⁻²) y forraje verde (kg FV m⁻²) de maíz (*Zea mays* L.) de la variedad sintética blanca Antonio Narro 543 (VSBAN-5543), fertilizado con lixiviado de lombriz a dosis de 50 y 150 ml, y un testigo (riego con agua), en producción de FVH.

| TRAT | Componentes del rendimiento | | | | EEM |
|---|-----------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------|
| | Sng | Raíz | Hoja | Tallo | |
| Rendimiento de materia seca (kg MS m ⁻²) | | | | | |
| T | 0.7 ^{Aab} | 1.9 ^{Aa} | 0.2 ^{Ab} | 0.1 ^{Ab} | 0.522 |
| 50 | 0.8 ^{Ab} | 2.2 ^{Aa} | 0.2 ^{Ac} | 0.2 ^{Ac} | 0.110 |
| 150 | 0.5 ^{Ab} | 2.0 ^{Aa} | 0.1 ^{Ab} | 0.1 ^{Ab} | 0.406 |
| ̄ | 0.7 ^b | 2.0 ^a | 0.2 ^c | 0.1 ^c | 0.225 |
| EEM | 0.409 | 0.590 | 0.076 | 0.033 | |
| Rendimiento de forraje verde (kg FV m ⁻²) | | | | | |
| T | 1.0 ^{Ab} | 4.4 ^{Aa} | 0.4 ^{Ab} | 0.3 ^{Ab} | 1.443 |
| 50 | 1.8 ^{Ab} | 5.1 ^{Aa} | 0.4 ^{Ab} | 0.3 ^{Ab} | 0.683 |
| 150 | 1.3 ^{Ab} | 4.8 ^{Aa} | 0.4 ^{Abc} | 0.2 ^{Ac} | 0.445 |
| ̄ | 1.4 ^b | 4.7 ^a | 0.4 ^c | 0.3 ^c | 0.419 |
| EEM | 0.56 | 2.03 | 0.22 | 0.11 | |

Misma literal minúscula en la misma fila y misma literal mayúscula en la misma columna, no son diferentes estadísticamente (Tukey; p>0.05). EEM= Error Estándar de Media,

DMS= Diferencia Mínima Significativa. Sng= Semilla no germinada. T = Testigo, T50= con lixiviado de lombriz a dosis de 50, T150 = lixiviado de lombriz a dosis de 150 ml.

Autores comentan que el ambiente hidropónico puede estimular la elongación radical debido a la disponibilidad constante de humedad y nutrientes solubles. Por tanto, este resultado sugiere que dosis moderadas de lixiviado de lombriz pueden favorecer el desarrollo de estructuras aéreas, posiblemente debido al aporte equilibrado de nutrientes, microorganismos benéficos y sustancias húmicas presentes en el lixiviado. Canellas *et al.* (2015) indican que las sustancias húmicas actúan como bioestimulantes vegetales capaces de mejorar la actividad metabólica, la elongación celular y el crecimiento de tejidos jóvenes cuando son aplicadas en concentraciones adecuadas. Diversos autores mencionan que concentraciones altas de biofertilizantes líquidos pueden generar desbalances osmóticos o exceso de sales en la solución nutritiva, provocando una redistribución de fotoasimilados hacia el sistema radical en lugar del crecimiento aéreo (Sánchez y Escalante, 2020). Esto coincide con la tendencia observada en el presente estudio, donde T150 presentó el mayor porcentaje de raíz y menor proporción de tallo. El mayor porcentaje de raíz en T150 confirma que dosis elevadas de lixiviado favorecen el crecimiento radical, posiblemente debido a la acción hormonal de compuestos húmicos similares a auxinas que estimulan la formación y elongación de raíces secundarias (Canellas *et al.*, 2015).

Por otra parte, el mayor porcentaje de semilla no germinada en el tratamiento testigo (T0) indica que la ausencia de fertilización orgánica podría limitar parcialmente los procesos de germinación y establecimiento inicial de las plántulas. Al respecto, algunos estudios han demostrado que los lixiviados de lombriz contienen compuestos bioactivos, microorganismos promotores del crecimiento y nutrientes disponibles que favorecen la activación metabólica de la semilla y aceleran la germinación (Atiyeh *et al.*, 2002). En consecuencia, la menor proporción de semilla no germinada observada en los tratamientos fertilizados podría atribuirse al efecto estimulante del lixiviado sobre la viabilidad y vigor germinativo del maíz. En términos generales, los resultados sugieren

que el lixiviado de lombriz influye en la distribución de biomasa del FVH de maíz, favoreciendo principalmente el desarrollo radical cuando se utilizan dosis altas, mientras que dosis moderadas pueden contribuir al crecimiento del tallo y mejorar parcialmente la estructura aérea del forraje. Sin embargo, la alta proporción de raíz y semilla no germinada refleja que aún existen limitaciones en la eficiencia productiva del sistema, por lo que futuras investigaciones deberán enfocarse en optimizar dosis, frecuencia de aplicación y condiciones ambientales que permitan incrementar la proporción de biomasa aérea y mejorar la calidad comercial del FVH.

V. CONCLUSIÓN

La fertilización con lixiviado de humus de lombriz en la producción de forraje verde hidropónico (FVH) de maíz no produjo diferencias estadísticas significativas en el rendimiento de materia seca ni de forraje verde bajo condiciones semicontroladas de invernadero. Sin embargo, se observaron cambios en la distribución morfológica de la biomasa, destacando un mayor desarrollo del sistema radical respecto a la parte aérea. La raíz representó el principal componente del rendimiento total, mientras que hojas y tallos mostraron una baja contribución, lo que derivó en una reducida relación parte aérea:raíz y en una limitada eficiencia de conversión de semilla a forraje aprovechable.

Aunque las dosis evaluadas no mejoraron significativamente la productividad total del FVH, la aplicación moderada de lixiviado (50 ml L^{-1}) presentó una tendencia favorable en algunas variables productivas respecto al tratamiento testigo y a la dosis alta. En contraste, la dosis de 150 ml L^{-1} favoreció principalmente el crecimiento radical, reduciendo proporcionalmente el desarrollo de biomasa aérea. En términos generales, el lixiviado de humus de lombriz mostró un efecto bioestimulante sobre el desarrollo morfológico del cultivo, pero no sobre el rendimiento total, por lo que se requiere continuar evaluando estrategias de manejo y dosis más adecuadas que permitan optimizar la producción y calidad del FVH de maíz.

VI. LITERATURA CITADA

- Abarca, P.; Aguirre, C. y Silva, L. 2020a.** Capítulo 10. Producción de forraje verde hidropónico para la pequeña agricultura. O'Higgins-Chile, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 145-171 p. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/e98e53c6-92c2-4227-92f5-2f0eda4d17e7/content>
- Adekeye, A. B., Onifade, O. S., Amole, G. T., Aderinboye, R. Y., & Jolaoso, O. A. 2020.** Water use efficiency and fodder yield of maize (*Zea mays*) and wheat (*Triticum aestivum*) under hydroponic condition as affected by sources of water and days to harvest. African Journal of Agricultural Research, 16(6), 909–915. <https://doi.org/10.5897/ajar2019.14503>
- Almaguer I., Reyes J., Reyes V., Villa A, y Oniel P. 2012.** "Evaluación del efecto del humus líquido obtenido por tres métodos, en condiciones de maceta y de campo, utilizando maíz (*Zea mays* L.) y remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) respectivamente" revista científica DELOS. Desarrollo Local Sostenible Vol 5, Nº 15 Universidad de Sancti Spiritus. p. 35.
- Almanza, G.J, R.1984.** Producción intensiva de Forraje por medio de sistemas hidropónicos en cámara de crecimiento. Tesis Licenciatura. UAAAN. Buenavista, Saltillo Coahuila. México, pp.9
- Arano, C. 1998.** Forraje Verde Hidropónico y otras técnicas de cultivo sin tierra. Editorial América. Buenos Aires, Argentina
- Atiyeh, R. M., Edwards, C. A., Metzger, J. D. y Lee, S. 2002.** "The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth". Bioresource Technology, 84(1): 7–14.
- Blanco, C. L. E., Colque, P. H., & Rosales, M. M. B. 2019.** Producción de forraje verde hidropónico versus geopónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en ambientes

- controlados. *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 7(2), 109.
<https://doi.org/10.36610/j.jsab.2019.070200109>
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P. y Piccolo, A. 2015.** “Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture”. *Scientia Horticulturae*, 196: 15–27.
- Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P. y Piccolo, A. 2015.** “Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture”. *Scientia Horticulturae*, 196: 15–27.
- Cantuca, F.; Moncayo, J. y Cerón, S. 2024.** Sistema automatizado para una producción de forraje verde hidropónico en invernadero. Tesis Ingeniero Mecatrónico. San Juan de Pasto. Universidad Mariana. 88 p.
- Capistrán, F., Aranda, D. y Romero, J.C. 2004.** Manual de Reciclaje, Compostaje, y Lombricompostaje. Instituto de ecología, A.C. Xalapa., Ver. México. p.155.
- Cevallos, 2025.** Tesis de licenciatura. Universidad Técnica de Ambato. 57 p. Consultado 20 feb. 2025. Disponible en <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/9106f4a8-97be-491b-ad93-3ca76fdf2163/content>
- Cisneros, S. P., Cruz, B. P., & Hernández, H. M. 2023.** Forraje Verde Hidropónico como alternativa forrajera en la alimentación animal. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(3). <https://doi.org/10.56369/tsaes.4679>
- Cortazzo S. Aayo. 2002.** Manual Técnico Forraje Verde Hidropónico. Editado por la FAO, Santiago, Chile.
- Elizondo Salazar, J. A. 2005.** “Utilización de forraje verde hidropónico en la alimentación animal”. *Agronomía Mesoamericana*, 16(2): 271–280.
- Elizondo Salazar, J. A. 2005.** “Utilización de forraje verde hidropónico en la alimentación animal”. *Agronomía Mesoamericana*, 16(2): 271–280.
- FAO. 2001a.** Métodos y factores que influyen en la producción de forraje verde hidropónico. 24. Consultado 25 jun. 2025. Disponible en <https://www.fao.org/4/ah472s/ah472s01.pdf>

- FAO. 2001b.** Forraje verde hidropónico. Manual técnico. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. 4. Consultado 10 abr. 2025. Disponible en http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/segalim/pdf/2.pdf
- FAO. 2024.** Forraje Verde Hidropónico, manual técnico. InfoAgronomo. 55. Consultado 20 feb. 2025. Disponible en <https://infoagronomo.net/forraje-verde-hidroponico-fvh/#2-1-selecci%C3%B3n-de-semillas->
- Food and Agriculture Organization. 2001.** Forraje Verde Hidropónico. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.
- Food and Agriculture Organization. 2001.** Forraje Verde Hidropónico. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile.
- Fox., R. 2000.** Fábrica de forraje. Boletín No. 8 Publicado vía Internet por Universidad La Molina, Lima, Perú. <http://mx.geocities.com/toro—salvajemx/f.v.h..html>
- Gericke, W. F. 1940.** The complete guide to soilless gardening. Prentice-Hall. <http://www.hidroponia.org.mx/esp/historia.htm>
- Guarachi, M.A. 2018.** Evaluación del efecto de biol y té de humus de lombriz como fertilizante en el desarrollo del cultivo de cilantro (*Coriandrum sativum* L.), bajo ambiente atemperado en el Centro Experimental Cota Cota. Tesis de grado UMSA. La Paz – Bolivia.
- Gutiérrez y Rene 2024.** <https://cibumscientia.umsa.bo/index.php/1/article/view/58/61>
- Hernández, R. 2024.** Guía: Condiciones ambientales para la producción de FVH. Consultado 25 feb. 2024. Disponible en https://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?id=128&main_page=page
- Hernández, R. 2024a.** Guía: ¿Qué es el Forraje Verde Hidropónico? Hydro Environment-Inovación Agrícola. Consultado 25 feb. 2025. Disponible en <https://hydroenv.com.mx/id125/>
- Hernández, R. 2024b.** Manual de Forraje Verde Hidropónico con Trigo: Todo en 8 Pasos. Consultado 10 jun. 2025. Disponible en <https://hydroenv.com.mx/id126/>
- Jiménez, J. 2021.** Condiciones Ambientales Óptimas para Producción de Forraje Verde Hidropónico como Alternativa de Solución para las Épocas de Heladas. Tesis de

licenciatura, Universidad César Vallejo. Lima, Perú. 54 p.
https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/79387/Jimenez_BJ_E-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mariño, C. 2022. Evaluación de dos productos desinfectantes para la producción de forraje verde hidropónico de avena (*Avena sativa* L.) en el sector san pedro del cantón Cevallos. Tesis de Licenciatura. Universidad Técnica de Ambato. 57 p.
<https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/9106f4a8-97be-491b-ad93-3ca76fdf2163/content>

Morales, A., Pérez, L. y Hernández, J. 2021. “Efecto de biofertilizantes líquidos sobre el crecimiento radical y producción de biomasa en sistemas hidropónicos”. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(2): 245–256.

Morales, A., Pérez, L. y Hernández, J. 2021. “Efecto de biofertilizantes líquidos sobre el crecimiento radical y producción de biomasa en sistemas hidropónicos”. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(2): 245–256.

Müller, L., Santos, O. y Manfron, P. 2006. Producción y utilización de forraje verde hidropónico para alimentación animal. *Revista Brasileira de Agrociência*, 12(4): 391–397

Organización De Las Naciones Unidas Para La Alimentación y la Agricultura. FAO. 2002. Manual Técnico: Forraje Verde Hidropónico. Oficina Regional de la FAO para América Latina y El Caribe. Santiago de Chile, Chile.

Ramírez, S. A. M. 2013. Producción de forraje verde hidropónico como alternativa de suplemento para ganado caprino durante la época seca en la Región Lagunera. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
<http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/7000>

Rivera, A., Moronta, M., González-Station, L. y González, D. 2010. Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.). *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 27(4): 557–577.

- Rodríguez, M., Mendoza, G., Cobos, M., et al. 2005.** “Uso de forraje verde hidropónico en la alimentación de ovinos y caprinos”. *Técnica Pecuaria en México*, 43(1): 39–48.
- Salas Pérez, L. et al. 2010.** Rendimiento y calidad de forraje hidropónico producido bajo fertilización orgánica. Chapingo, México; Terra Latinoamericana. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
- Sánchez, E. y Escalante, J. 2020.** Distribución de biomasa aérea y radical en cultivos hidropónicos bajo diferentes niveles de nutrición. *Acta Agronómica*, 69(3): 210–218.
- Sánchez, E. y Escalante, J. 2020.** Distribución de biomasa aérea y radical en cultivos hidropónicos bajo diferentes niveles de nutrición. *Acta Agronómica*, 69(3): 210–218.
- Vivas, J. y Mejía, W. 2022.** Manual práctico para la elaboración de Forraje Verde Hidropónico en invernadero no convencional. Universidad Nacional Agraria. 34 p.
<https://repositorio.una.edu.ni/4576/1/NL02V856.pdf>
- Zúñiga, A. y Beauregard, I. 2020.** Evaluación de tres productos desinfectantes sobre semillas de maíz y cebada para la producción en la tecnología de Forraje Verde Hidropónico. *Repertorio Científico*. 23(2): 75. Consultado 20 feb. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.22458/rc.v23i2.3180>
- Zúñiga, A. y Beauregard, I. 2020.** Evaluación de tres productos desinfectantes sobre semillas de maíz y cebada para la producción en la tecnología de Forraje Verde Hidropónico. *Repertorio Científico*. 23(2): 75. Consultado 20 feb. 2025. Disponible en <https://doi.org/10.22458/rc.v23i2.3180>

VII. ANEXOS

Cuadro 4. Variables productivas y aportación de los componentes al rendimiento total de maíz (*Zea mays* L.) de la (VSBAN-543) fertilizado con lixiviado de lombriz a dosis de 50 y 150 ml, y un testigo (riego con agua).

| Variables | Tratamientos | | | \bar{x} | Pr > F | EEM | DMS |
|---------------------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------|--------|-------|-------|
| | T | 50 | 150 | | | | |
| RMS | 2.9 ^a | 3.4 ^a | 2.8 ^a | 3.0 | 0.216 | 0.422 | 0.916 |
| FVH | 6.0 ^a | 7.7 ^a | 6.7 ^a | 6.8 | 0.658 | 2.237 | 4.853 |
| R:PF/DS | 0.9 ^a | 1.1 ^a | 1.0 ^a | 1.0 | 0.671 | 0.323 | 0.702 |
| R:PA/Raíz | 0.2 ^a | 0.2 ^a | 0.1 ^a | 0.2 | 0.408 | 0.076 | 0.165 |
| Componentes del rendimiento (%) | | | | | | | |
| Sng | 25 ^{ABa} | 24 ^{Ba} | 19 ^{Ba} | 23 ^B | 0.835 | 15.39 | 33.38 |
| Raíz | 65 ^{Aa} | 66 ^{Aa} | 71 ^{Aa} | 67 ^A | 0.805 | 15.22 | 33.03 |
| Hoja | 6 ^{Ba} | 6 ^{Ca} | 6 ^{Ba} | 6 ^C | 0.514 | 2.397 | 5.202 |
| Tallo | 5 ^{Bab} | 5 ^{Ca} | 3 ^{Bb} | 4 ^C | 0.030 | 0.552 | 1.199 |
| Pr > F | 0.0221 | <.0001 | <.0001 | <.0001 | | | |
| EEM | 18.72 | 2.286 | 7.427 | 5.676 | | | |
| DMS | 41.34 | 5.047 | 16.39 | 12.53 | | | |

Misma literal minúscula en la misma fila y misma literal mayúscula en la misma columna, no son diferentes estadísticamente (Tukey; $p > 0.05$). EEM = Error Estándar de Media, DMS = Diferencia Mínima Significativa. Sng= Semilla no germinada. Rendimiento de materia seca RMS (kg MS m⁻²), rendimiento de forraje verde hidropónico (kg FVH m⁻²), relación forraje producido/densidad de siembra (R:PF/DS), relación Parte Área/Raíz (R:PA/R).

Cuadro 5. Componentes del rendimiento de materia seca (kg MS m⁻²) y de forraje verde (kg FV m⁻²) de maíz (*Zea mays* L.) de la (VSBAN-5543), fertilizado con lixiviado de lombriz a dosis de 50 y 150 ml, y un testigo (riego con agua), en producción de FVH.

| TRAT | Componentes del rendimiento | | | | Pr > F | EEM | DMS |
|---|-----------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------|-------|-------|
| | Sng | Raíz | Hoja | Tallo | | | |
| Rendimiento de materia seca (kg MS m ⁻²) | | | | | | | |
| T | 0.7 ^{Aab} | 1.9 ^{Aa} | 0.2 ^{Ab} | 0.1 ^{Ab} | 0.016 | 0.522 | 1.154 |
| 50 | 0.8 ^{Ab} | 2.2 ^{Aa} | 0.2 ^{Ac} | 0.2 ^{Ac} | <.0001 | 0.110 | 0.244 |
| 150 | 0.5 ^{Ab} | 2.0 ^{Aa} | 0.1 ^{Ab} | 0.1 ^{Ab} | 0.001 | 0.406 | 0.896 |
| ̄ | 0.7 ^b | 2.0 ^a | 0.2 ^c | 0.1 ^c | <.0001 | 0.225 | 0.496 |
| Pr > F | 0.66 | 0.62 | 0.61 | 0.24 | | | |
| EEM | 0.40 | 0.59 | 0.07 | 0.03 | | | |
| DMS | 0.88 | 1.28 | 0.16 | 0.07 | | | |
| Rendimiento de forraje verde (kg FV m ⁻²) | | | | | | | |
| T | 1.0 ^{Ab} | 4.4 ^{Aa} | 0.4 ^{Ab} | 0.3 ^{Ab} | 0.030 | 1.443 | 3.186 |
| 50 | 1.8 ^{Ab} | 5.1 ^{Aa} | 0.4 ^{Ab} | 0.3 ^{Ab} | <.0001 | 0.683 | 1.508 |
| 150 | 1.3 ^{Ab} | 4.8 ^{Aa} | 0.4 ^{Abc} | 0.2 ^{Ac} | <.0001 | 0.445 | 0.983 |
| ̄ | 1.4 ^b | 4.7 ^a | 0.4 ^c | 0.3 ^c | <.0001 | 0.419 | 0.926 |
| Pr > F | 0.42 | 0.84 | 0.50 | 0.46 | | | |
| EEM | 0.56 | 2.03 | 0.22 | 0.11 | | | |
| DMS | 1.23 | 4.41 | 0.47 | 0.24 | | | |

Misma literal minúscula en la misma fila y misma literal mayúscula en la misma columna, no son diferentes estadísticamente (Tukey; p>0.05). EEM= Error Estándar de Media, DMS= Diferencia Mínima Significativa. Sng= Semilla no germinada. T = Testigo, T50= con lixiviado de lombriz a dosis de 50, T150 = lixiviado de lombriz a dosis de 150 ml.