

Universidad Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
Comparación en el rendimiento de la producción y análisis nutricional
de forraje verde hidropónico de maíz utilizando dos fuentes de agua

Estudiante

Anthony Paul Balladares Lazo

Juan José Carrera Atencio

Asesores

Patricio E. Paz, Ph.D.

Ángel Suazo, M.A.E.

Honduras, septiembre 2025

Autoridades

KEITH L. ANDREWS

Rector i.a.

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

CELIA O. TREJO RAMOS

Directora Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

JULIO NAVARRO

Secretario General

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento al personal de la Unidad de Acuicultura y al equipo del Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ); su apoyo técnico, la disposición para facilitar equipos e insumos, y su asesoría en los procesos analíticos fueron decisivos para obtener resultados confiables.

Contenido

Índice de Cuadros.....	7
Índice de Figuras	8
Índice de Anexos	9
Resumen	10
Abstract	11
Introducción	12
Materiales y Métodos	16
Ubicación de Investigación.....	16
Tratamientos	16
Agua de Recambio de Estanque de Reproducción.....	16
Solución Nutritiva.....	17
Sistema de Riego.....	17
Densidad	18
Desinfección y Preparación de Semillas.....	18
Siembra	19
Germinación.....	19
Manejo del Cultivo	19
Cosecha de Bandejas	20
VARIABLES DE EVALUACIÓN DIARIA	20
Temperatura Ambiental	20
Oxígeno Disuelto.....	21
Pruebas Químicas.....	21
VARIABLES DE CAMPO	22
Peso Húmedo (kg).....	22
Altura de la Planta (cm).....	22

Peso de Forraje.....	22
Peso de Raíz	22
Variables de Laboratorio	23
Proximal Químico Completo (Análisis Bromatológico)	23
Humedad.....	23
Cenizas	24
Proteína Cruda	25
Grasa Cruda.....	26
Fibra Cruda, Fibra Ácida Detergente y Fibra Neutra Detergente	27
Resultados y Discusión.....	29
Parámetros de Calidad del Agua.....	29
Temperatura.....	30
Variables de Campo Evaluadas para el Forraje Verde Hidropónico	31
Peso Húmedo	32
Peso de Forraje.....	33
Peso de Raíz	33
Altura de la Planta.....	34
Variables de Laboratorio	34
Humedad.....	35
Cenizas	36
Proteína.....	37
Grasa Cruda.....	37
Fibra Cruda.....	38
Fibra Ácida Detergente (FAD).....	39
Fibra Neutra Detergente (FND)	39
Extracto Libre de Nitrógeno	40

Conclusiones	41
Recomendaciones	42
Referencias	43
Anexos	45

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Frecuencia de riego para la producción de forraje verde hidropónico (FVH)	18
Cuadro 2 Resultados de pruebas API sobre la calidad del agua en la producción de forraje verde hidropónico	30
Cuadro 3 Variables de campo en la producción de forraje verde hidropónico con dos fuentes de agua	32
Cuadro 4 Resultados obtenidos en la evaluación bromatológica del forraje verde hidropónico de maíz	35

Índice de Figuras

Figura 1 Invernadero de la unidad de acuicultura “Daniel E. Meyer”	16
Figura 2 Diseño del sistema de riego para producción de forraje verde hidropónico	18
Figura 3 Cosecha de bandejas: T1. Riego con agua declorinada y solución nutritiva; T2. Riego con agua de recambio de un estanque de reproducción	20
Figura 4 Medición de la temperatura durante el procedimiento experimental	31

Índice de Anexos

Anexo A Lugar de germinación de las bandejas.....	45
Anexo B Estanque de Reproducción que se utilizó para el reservorio del agua de recambio (T2)	46
Anexo C Sistema de riego utilizado para la producción de FVH.....	47
Anexo D Termómetro ACURITE® utilizado para medir la temperatura ambiental dentro del invernadero	48
Anexo E Kit API utilizado para la toma de pH, amonio, nitritos y nitratos	49
Anexo F Balanza electrónica de torreta marca Truper utilizada para medir las variables de campo ...	50

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo comparar el rendimiento y la calidad nutricional del forraje verde hidropónico (FVH) de maíz (*Zea mays* L.) utilizando dos fuentes de agua: una solución nutritiva convencional (compuesta por MAP, KCl y nitrato de amonio) y agua de recambio proveniente de un estanque de tilapia roja (*Oreochromis* sp.). La investigación se desarrolló en la Universidad Zamorano, bajo condiciones controladas en un invernadero. Se empleó un diseño completamente al azar con dos tratamientos y diez repeticiones cada uno ($n = 20$). Se midieron variables productivas como peso húmedo, altura de planta, peso de forraje y peso de raíz, así como variables bromatológicas (humedad, proteína cruda, grasa cruda, fibra cruda, fibra detergente ácida y neutra). Los datos se analizaron mediante la prueba t de Student con un nivel de significancia de 5% utilizando el software JMP® Pro-18. No se observaron diferencias ($P > 0.05$) entre ambos tratamientos en las variables agronómicas y de calidad nutricional, lo que indica que el agua de recambio acuícola puede ser una alternativa sostenible y económicamente viable para la producción de FVH. Se destacan los beneficios del FVH como alta digestibilidad, bajo costo, palatabilidad, y adaptación a condiciones limitantes de suelo o agua. El análisis químico se realizó siguiendo métodos AOAC estandarizados, lo que respalda la rigurosidad técnica del estudio. Los hallazgos apoyan el uso de agua residual acuícola en la agricultura circular y sugieren su implementación práctica en contextos de escasez hídrica o intensificación sostenible.

Palabras claves: Agua de acuicultura, forraje verde hidropónico (FVH), proximal químico completo, sostenibilidad, solución nutritiva

Abstract

The objective of this study was to compare the yield and nutritional quality of hydroponic green forage (HGF) of maize (*Zea mays* L.) using two water sources: a conventional nutrient solution (composed of MAP, KCl, and ammonium nitrate) and recirculated water from a red tilapia (*Oreochromis* sp.) breeding pond. The research was conducted at Zamorano University, under controlled greenhouse conditions. A completely randomized design was used, with two treatments and ten replicates each (n = 20). Productive variables such as fresh weight, plant height, forage weight, and root weight were measured, along with bromatological parameters including moisture content, crude protein, crude fat, crude fiber, acid detergent fiber (ADF), and neutral detergent fiber (NDF). Data were analyzed using Student's t-test at a 5% significance level with the JMP® Pro-18 software. No differences ($P > 0.05$) were observed between treatments for agronomic and nutritional quality variables, indicating that aquaculture recirculated water can serve as a sustainable and economically viable alternative for HGF production. The benefits of HGF were highlighted, including high digestibility, low cost, palatability, and adaptability to limiting soil and water conditions. Chemical analyses were performed following standardized AOAC methods, ensuring the technical rigor of the study. These findings support the use of aquaculture wastewater within circular agriculture frameworks and suggest its practical implementation in scenarios of water scarcity or sustainable intensification.

Keywords: Aquaculture water, complete proximate analysis, hydroponic green forage (HGF), nutrient solution, sustainability.

Introducción

La agricultura siempre ha sido una actividad primordial para la subsistencia humana, por lo cual, a lo largo del tiempo, el hombre ha buscado maneras de aumentar la productividad de un cultivo, debido a esta necesidad siempre nos encontramos intentando mejorar las técnicas de producción de cultivos. Esto con el fin de garantizar la disponibilidad de alimentos en distintas épocas del año, sin importar las condiciones climáticas o geográficas.

Los primeros datos escritos sobre técnicas de cultivo sin suelo datan de los años 1600, cuando Jan Baptist van Helmont, científico de origen belga documentó como las plantas extraían nutrientes a partir del agua. Luego en el año 1699, John Woodward con la ayuda de diferentes sustratos, comprobó que el crecimiento de las plantas que estaba cultivando, se debía a las sustancias que contenía el agua presente en su experimento. Posteriormente los que comenzaron a perfeccionar estas soluciones nutritivas sin suelo, fueron Wilhelm Knop y Julius Von Sach por los años 1860 (Urrestarazu Gavilan, 2015).

Sin embargo, no fue hasta el año 1928 donde en la Universidad de Berkeley en California, el profesor William Frederick Gericke, propuso una producción vegetal sin el uso de suelo, que eventualmente se convirtió en una producción a gran escala, lo que dio origen a la hoy conocemos como hidroponía. Debido al avance de esta industria, se comenzaron a desarrollar nuevas técnicas más sofisticadas y eficientes (Urrestarazu Gavilan, 2015).

El forraje verde hidropónico (FVH) presenta una serie de ventajas significativas en comparación con los métodos tradicionales de cultivo de forraje. Este tipo de producción permite una programación de la cosecha que se ajusta a las necesidades específicas, lo que facilita la obtención de productos en el momento adecuado. Además, el FVH ofrece una alta digestibilidad, lo que lo hace ideal para la alimentación animal. Entre otras ventajas, se destaca su capacidad para ser producido en cualquier clima y época del año, especialmente cuando se utilizan invernaderos, lo que amplía las posibilidades de producción.

A su vez, el costo de producción es considerablemente menor en comparación con los cultivos tradicionales, y la producción puede llevarse a cabo en espacios reducidos, lo que hace de esta una opción viable incluso en áreas urbanas. También se reconoce por su alta palatabilidad, lo que mejora su aceptación por parte del ganado, y por la menor necesidad de mano de obra en su manejo. Además, la producción de FVH se caracteriza por bajos niveles de contaminantes y un alto contenido proteico, lo que lo convierte en una opción nutritiva y segura para la alimentación animal (Juárez López et al., 2013).

El proceso de producción de FVH se basa en una tecnología que permite la obtención de biomasa vegetal a partir de la germinación de semillas viables de diversos cereales o leguminosas, como maíz, sorgo, cebada, trigo o alfalfa, entre otros. Estas semillas se siembran sobre bandejas y el proceso de germinación tiene una duración de entre siete y 14 días. Durante este tiempo, las plantas captan la energía solar y absorben los minerales presentes en la solución nutritiva aplicada. Cabe destacar que, a diferencia de otros cultivos, en la producción de FVH no se utiliza sustrato alguno; solo se requiere semilla forrajera, bandejas, una solución nutritiva adecuada y agua para el proceso. Esta metodología ha sido objeto de investigaciones enfocadas en generar un alimento de alta calidad en un corto periodo de tiempo, con el objetivo de reducir el impacto ambiental asociado con otros métodos agrícolas (Chavarría Tórrez et al., 2018).

Sin embargo, la calidad del FVH puede verse influenciada por diversos factores. La calidad de la semilla utilizada es un aspecto clave, ya que debe cumplir con ciertos requisitos para asegurar un buen rendimiento. Es recomendable que la semilla no tenga más del 12% de humedad y que esté libre de impurezas, semillas rotas, hongos y contaminantes como insecticidas o fungicidas. Además, factores como el tiempo de remojo de las semillas, la temperatura y humedad, el suministro adecuado de nutrientes, la profundidad de siembra, la densidad de siembra y la presencia de hongos son variables que pueden afectar la calidad del forraje producido. Entre las semillas comúnmente utilizadas para la producción de FVH se encuentran el maíz, trigo, avena y cebada (Rodríguez, 2006).

El maíz (*Zea mays* L.) ha sido una de las plantas más utilizadas con fines forrajeros debido a su alto valor nutritivo y elevados rendimientos. Su capacidad para generar grandes volúmenes de FVH a partir de medios hidropónicos ha sido ampliamente reconocida. Esto ha permitido que, en diversas condiciones de producción, se logren resultados constantes y productivos, a la vez que se reducen los costos de producción en comparación con los métodos convencionales de cultivo a campo abierto. Según estudios realizados, la producción de FVH de maíz en sistemas hidropónicos puede reducir el costo de producción a la mitad en comparación con los forrajes cultivados tradicionalmente en campo (Zagal Tranquilino et al., 2016).

La variedad utilizada fue el maíz Tuxpeño, la misma destaca por su alta rusticidad, adaptación a diversas condiciones agroclimáticas y vigoroso crecimiento. Esta variedad se caracteriza por sus mazorcas grandes, cilíndricas, de grano dentado, predominando los colores blancos, pero puede presentar diversos colores. Tiene un alto número de hileras y granos por hilera, lo que la hace una de las razas más productivas de México; presenta muy buena calidad agronómica en planta y resistencia a enfermedades. Además, presenta un ciclo de desarrollo relativamente corto y un alto contenido de materia seca y proteína, lo que lo hace ideal para la producción de forraje de alta calidad en sistemas hidropónicos, contribuyendo a mejorar la eficiencia productiva y el valor nutricional del FVH (Conabio, 2020).

Los organismos que habitan en medios acuáticos liberan desechos orgánicos, siendo el amonio uno de los principales compuestos excretados. Mediante el proceso de nitrificación, diversos microorganismos convierten este amonio en nitratos, los cuales pueden ser utilizados por las plantas como nutrientes. Al absorber estos compuestos, las plantas cumplen una función de depuración biológica, ayudando a remover sustancias tóxicas del agua y promoviendo un entorno saludable para los peces (Ramirez et al., 2008).

La nitrificación es llevada a cabo por dos grupos principales de bacterias beneficiosas: *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. Las *Nitrosomonas* son responsables de transformar el amonio, proveniente de excreciones de los peces y restos de alimento, en nitritos. Luego, las *Nitrobacter*

convierten esos nitritos en nitratos. Este proceso permite que las plantas asimilen dichos nutrientes directamente del agua, al mismo tiempo que contribuyen a la purificación del medio acuático (Rosario Martínez, 2013).

Para determinar objetivamente la calidad nutricional del FVH, es necesario realizar análisis bromatológicos completos, que proporcionen información detallada sobre su composición química. Estos análisis incluyen la determinación del contenido de proteína, grasas, carbohidratos, minerales y humedad, aspectos fundamentales para evaluar el valor nutritivo del forraje. De manera complementaria, también se recomienda evaluar específicamente los niveles de fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA), ya que estos parámetros son esenciales para determinar la digestibilidad y la disponibilidad de nutrientes para los animales. La fibra detergente neutra proporciona información sobre la capacidad del animal para consumir voluntariamente el forraje, mientras que la fibra detergente ácida indica la porción menos digerible del alimento, directamente relacionada con su valor energético. Al realizar estos análisis detallados, es posible optimizar la producción del FVH, ajustando así la calidad del forraje producido a las necesidades nutricionales específicas del ganado, lo cual favorece la eficiencia productiva y el desempeño general en los sistemas pecuarios (Salvador Castillo et al., 2022).

El objetivo general de esta investigación fue comparar el rendimiento en la producción de forraje verde hidropónico (FVH) de maíz utilizando dos fuentes de agua distintas, con el fin de evaluar su eficiencia en términos de producción de biomasa, calidad nutricional y viabilidad técnica en sistemas hidropónicos. Esta comparación aportó datos relevantes que permitieron optimizar el uso de recursos hídricos en la producción de FVH, una alternativa sostenible y eficiente frente a los métodos convencionales de cultivo forrajero, especialmente en contextos donde la disponibilidad de agua o suelo es limitada.

Materiales y Métodos

Ubicación de Investigación

El experimento se realizó en el invernadero ubicado en la unidad de acuicultura “Daniel E. Meyer” de la Universidad Zamorano, ubicada en el valle del Yegüare, departamento de Francisco Morazán, a una elevación de 800 msnm y una temperatura anual de 24 a 29 °C. Se instalaron dos sistemas de producción independientes para forraje verde hidropónico bajo las mismas condiciones.

Figura 1

Invernadero de la unidad de acuicultura “Daniel E. Meyer”



Tratamientos

Se evaluó el rendimiento en 20 bandejas de aluminio con un tamaño de 19.5 cm × 25.5 cm (unidades experimentales) con FVH, las cuales fueron puestas en las mismas condiciones y con la misma densidad de siembra, con diferentes fuentes de riego. Las fuentes de riego consistieron en dos reservorios de 100 L cada uno. El control se aplicó en 10 unidades experimentales con el agua de recambio de un estanque de tilapia y 10 unidades experimentales en una solución nutritiva (MAP, KCL soluble y nitrato de amonio).

Agua de Recambio de Estanque de Reproducción

Se usó agua de recambio de un estanque de reproducción de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) con una densidad de 6 tilapias por m³. El agua de recambio de un estanque de tilapia contiene una

serie de componentes derivados de la actividad metabólica de los peces y la descomposición de materia orgánica.

Solución Nutritiva

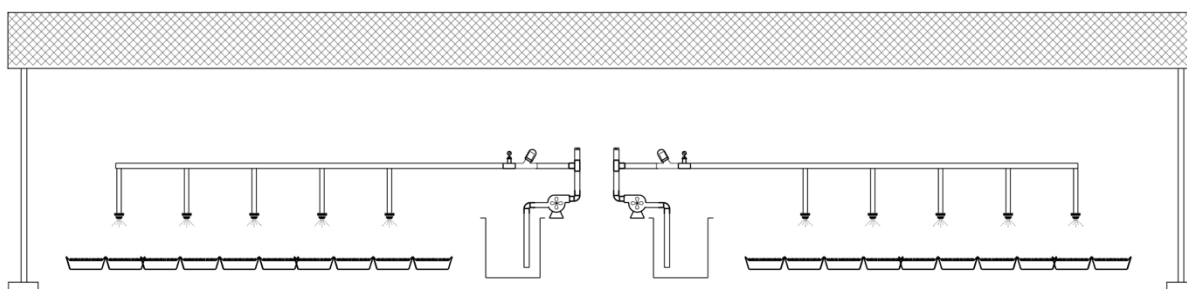
El uso de soluciones nutritivas en la producción de forraje verde hidropónico (FVH) es fundamental para garantizar un crecimiento óptimo de las plantas, ya que este sistema de cultivo prescinde del suelo y depende exclusivamente de los nutrientes disueltos en el agua. En el presente experimento se utilizó un reservorio de 100 litros, en el cual se preparó la solución nutritiva con tres componentes principales: nitrato de amonio (NH_4NO_3) en una cantidad total de 86 g, fosfato monoamónico (MAP) con 14 g, y cloruro de potasio (KCl) soluble con 12 g. Estos fertilizantes aportan los macronutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, necesarios para el adecuado desarrollo de las plántulas en condiciones hidropónicas.

Sistema de Riego

El sistema de riego constó de cinco nebulizadores CoolNet™ Pro, cada uno equipado con cuatro boquillas dispuestas en forma de cruz, distribuidos con una separación de 50 cm entre ellos dentro de cada unidad de producción. Para evaluar la uniformidad del riego, se utilizó una probeta para medir el caudal individual de cada nebulizador, obteniéndose un valor de 450 mL por minuto. Este sistema fue alimentado por dos bombas marca Pearl de medio caballo de fuerza, capaces de proporcionar un caudal variable entre 5 y 35 L/min, conectadas a su vez a los dos reservorios con capacidad de 100 L cada uno.

Cuadro 1*Frecuencia de riego para la producción de forraje verde hidropónico (FVH)*

Días de Riego	Etapa	Tipo de riego	Intervalo de riego
0 a 3	Germinación	Agua de recambio del Experimental 14 y solución nutritiva (KCL soluble, MAP y nitrato de amonio).	Aplicar 6 riegos con un intervalo de 2 horas, empezando a las 6:00 a.m. y terminando a las 6:00 p.m.
3 a 13	Manejo del Cultivo	Agua de recambio del Experimental 14 y solución nutritiva (KCL soluble, MAP y nitrato de amonio).	Aplicar 6 riegos con un intervalo de 2 horas, empezando a las 6:00 a.m. y terminando a las 6:00 p.m.
14	Cosecha	No hay riego.	No hay intervalo de riego.

Figura 2*Diseño del sistema de riego para producción de forraje verde hidropónico***Densidad**

Se utilizó una densidad de siembra para el maíz Tuxpeño de 9.2 kg/m², conforme a la recomendación técnica de Ovando (2021). En cada bandeja se sembraron aproximadamente 1404 semillas, con un peso promedio de 0.45 kg por bandeja al momento de la siembra.

Desinfección y Preparación de Semillas

Se desinfectó el área de trabajo con alcohol al 95% y cloro al 0.5%, donde las semillas fueron seleccionadas, buscando las mejores características físicas, escogiendo aquellas sin residuos de agroquímicos y demás fuentes de contaminación (piedra, paja, otras semillas, etc.), después se hizo un prelavado con agua destilada y cloro al 0.5%, para que las semillas que floten fueran descartadas porque no son aptas para la producción. Después de este procedimiento pasaron por dos lavados de 15 minutos cada uno con cloro al 1%, para eliminar microorganismos o patógenos que pueden

contaminar al FVH. Transcurrido este tiempo, se hicieron tres enjuagues por cuatro minutos a las semillas con agua potable, para eliminar los residuos del proceso de desinfección.

Después del proceso de desinfección, se remojaron las semillas por 24 horas con agua potable, cambiando la misma dos veces; luego se procedió a secado las semillas por 24 horas (escurrirlas), volver a hacer el proceso de desinfección y secando por dos horas.

Siembra

Para la siembra del maíz Tuxpeño, se colocaron 0.45 kg de semillas por bandeja de 25.5 cm largo × 19.5 ancho cm × 1.5 cm alto, con una distribución homogénea, donde se cubrieron con una capa de papel toalla humedecida con agua de recambio de un estanque de reproducción y solución nutritiva. Las semillas fueron colocadas en un armario de la bodega de laboratorio de la Unidad de Acuicultura para permitir una germinación pareja; donde también se procedió a rotular por tratamiento y día de inicio de la siembra.

Germinación

En la germinación se observó las semillas por los siguientes tres días, con seis riegos con intervalos de una hora cada uno, empezando desde las 8:00 a.m. hasta las 10:00 a.m. y luego desde las 2:00 p.m. hasta las 4:00 p.m. El riego en la etapa de germinación se realizó por medio un aspersor manual, sin alterar el caudal (225 mL × bandeja), ya que cada boquilla tiene un gasto de 450 mL/minuto, donde cada tratamiento tiene cinco boquillas (Cuadro 1). Se utilizaron la solución nutritiva y el agua de recambio del estanque de tilapia para el proceso de germinación hasta observar la aparición de los primeros brotes de manera uniforme en el FVH. Una vez se alcanzó la germinación, se procedió a retirar las toallas que cubrían las bandejas, y así trasladarlas a un ambiente con luz solar.

Manejo del Cultivo

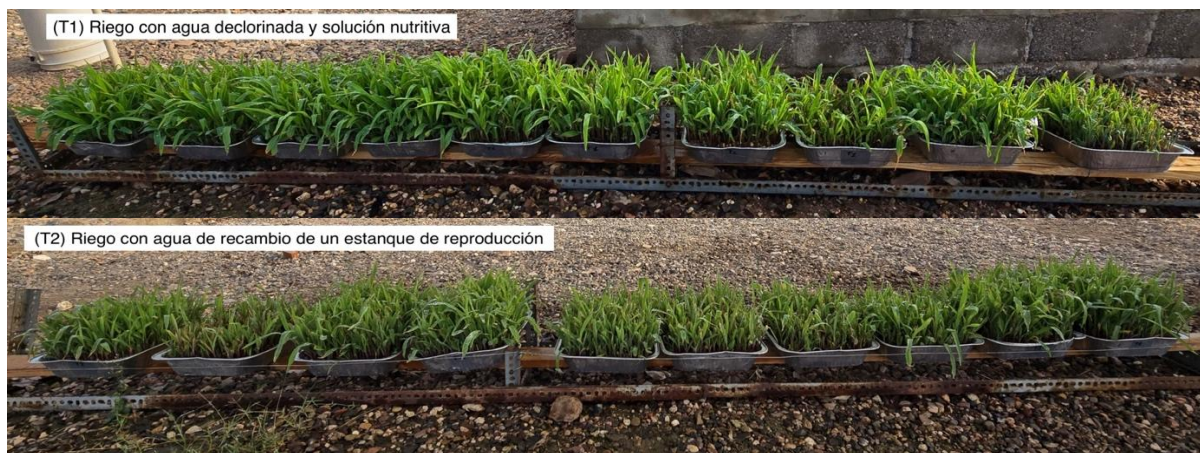
Posteriormente en el en el manejo del cultivo se procedió a agregar la solución nutritiva cada tres días en el balde con agua declorinada y se tomaran a diario los datos de temperatura y oxígeno disuelto en los baldes con agua de recambio de un estanque de reproducción y agua declorinada con solución nutritiva.

Cosecha de Bandejas

Después de 10 días se procedió a cosechar y medir las variables de campo, también se llevaron muestras del FVH de maíz al Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ) para realizar un análisis proximal químico completo, análisis de fibra neutra detergente y fibra acida detergente.

Figura 3

Cosecha de bandejas: T1. Riego con agua declorinada y solución nutritiva; T2. Riego con agua de recambio de un estanque de reproducción



VARIABLES DE EVALUACIÓN DIARIA

Temperatura Ambiental

Esta se midió mediante un termómetro marca ACURITE®. La temperatura juega un papel fundamental en el desarrollo de un forraje verde hidropónico de maíz, ya que afecta directamente la germinación, el crecimiento de las raíces y el proceso de fotosíntesis. Temperaturas elevadas pueden disminuir la eficacia en la absorción de nutrientes y aumentar la probabilidad de enfermedades, mientras que temperaturas bajas pueden ralentizar el crecimiento y generar estrés por frío. Es esencial mantener una temperatura óptima para asegurar un buen rendimiento y la calidad del forraje.

Oxígeno Disuelto

Se midió mediante un oxímetro YSI® Pro20, el cual proporciono el oxígeno disuelto del agua de recambio de un estanque de reproducción y del agua con la solución nutritiva, medido en mg/L. El oxígeno disuelto desempeña un papel fundamental en el desarrollo de un forraje verde hidropónico de maíz, ya que es esencial para la respiración de las raíces y la absorción eficiente de nutrientes. La insuficiencia de oxígeno disuelto puede limitar la capacidad de las raíces para realizar sus funciones vitales, lo que compromete el crecimiento vegetal. Esta deficiencia genera estrés en las plantas, ralentiza su desarrollo y afecta negativamente tanto la calidad como el rendimiento del forraje. Por lo tanto, mantener niveles adecuados de oxígeno disuelto es crucial para asegurar un crecimiento saludable y óptimo del forraje.

Pruebas Químicas

Se utilizo un kit API® Master Freshwater, el mismo se usa para la medición de amonio, pH, nitritos y nitratos. La concentración de amonio, pH, nitritos y nitratos en el agua es esencial para el cultivo de forraje verde hidropónico de maíz, ya que influye directamente en la nutrición y el crecimiento de las plantas. El amonio es una fuente inmediata de nitrógeno para las plantas, promoviendo un crecimiento rápido; sin embargo, niveles elevados pueden ser tóxicos y afectar negativamente el desarrollo vegetal. Por otro lado, los nitratos son menos tóxicos y pueden acumularse en las plantas, siendo una fuente de nitrógeno disponible para su asimilación. El pH del agua afecta la disponibilidad de estos nutrientes; un pH adecuado facilita la absorción eficiente de amonio y nitratos. Los nitritos, aunque menos comunes, pueden ser indicativos de procesos de nitrificación incompletos y, en concentraciones altas, pueden ser perjudiciales para las plantas. Mantener un equilibrio adecuado de estos nutrientes en la solución nutritiva es fundamental para asegurar un crecimiento saludable y un rendimiento óptimo del forraje verde hidropónico de maíz.

Variables de Campo

Peso Húmedo (kg)

Se midió el peso total de las plantas (tallo, hojas y raíz), inmediatamente después de la cosecha, sin que hayan sido sometidas a ningún proceso de secado. Este dato se tomó con una báscula electrónica de torreta el día de la cosecha, tanto para las plantas regadas con agua de recirculación de peces como con agua de clorinada.

Altura de la Planta (cm)

Se midió la altura de las plantas de maíz desde la base hasta la punta de las hojas más altas, esta medición se realizó con una regla o cinta métrica en cinco diferentes puntos predeterminados del FVH con un área aproximada por punto de 16 cm², utilizando una lámina de espuma flexible para cada una de las bandejas, esto con fin de obtener un promedio representativo.

Peso de Forraje

Con el objetivo de determinar la masa del forraje, se procedió a separar completamente la biomasa aérea del sistema radicular en cada unidad experimental, mediante un corte horizontal preciso utilizando un cuchillo de hoja recta. A continuación, se realizó el pesaje individual del material vegetal mediante una balanza electrónica de torreta marca Truper. Los datos obtenidos fueron registrados en unidades de kilogramos, asegurando la trazabilidad y exactitud de las mediciones, después de la cosecha. Este dato permitió comparar la cantidad total de forraje producido por cada tratamiento (agua de recambio de un estanque de reproducción vs. agua de clorinada con una solución nutritiva).

Peso de Raíz

Las raíces se pesaron con una báscula electrónica de torreta, donde el procedimiento experimental consistió en realizar un seccionamiento del colchón vegetal, mediante el cual se separó cuidadosamente el sistema radicular del resto de la biomasa aérea. Posteriormente, se efectuó el pesaje individual de las fracciones radicular y aérea con el fin de cuantificar con precisión la biomasa

correspondiente a cada componente. Esta metodología fue aplicada de manera sistemática en las 20 unidades experimentales (bandejas) utilizadas en el ensayo.

Variables de Laboratorio

Proximal Químico Completo (Análisis Bromatológico)

En este análisis, se evaluó los nutrientes esenciales del forraje verde hidropónico de maíz producido con dos fuentes de agua diferentes: recambio de un estaque de reproducción de peces y agua con solución nutritiva. Se realizó un análisis de laboratorio para determinar la concentración de los principales componentes nutricionales del forraje, tales como proteínas, fibra, minerales (como calcio, fósforo, y potasio), y carbohidratos.

Estos nutrientes son cruciales para determinar la calidad del forraje en términos de su valor alimenticio para el ganado. El estudio se llevará a cabo tomando muestras representativas del 30% de cada bandeja de forraje cosechado, las cuales serán sometidas a pruebas químicas estándar (como el método de secado en estufa para fibra y la determinación de nitrógeno total para proteínas). Las comparaciones entre las dos fuentes de agua permitirán identificar cualquier diferencia en la composición nutricional, lo que proporcionaron información clave sobre cuál de las fuentes produce un forraje de mayor calidad para la alimentación animal.

Humedad

La determinación de la humedad en el forraje verde hidropónico de maíz es fundamental, ya que un contenido elevado de agua puede acelerar procesos de deterioro microbiológico y reducir la estabilidad del material. Además, conocer el porcentaje de humedad permite realizar correcciones a base seca para estimar con mayor precisión el contenido de nutrientes. Para ello, se empleó el método AOAC 950.46B, que consistió en someter la muestra a una temperatura de 100–102 °C durante un período de 16–18 horas en un horno de convección. Una vez terminada la desecación, se pesó la muestra para calcular la pérdida de masa atribuible al agua. Este procedimiento se realizó por duplicado para mejorar la confiabilidad de los resultados.

Fórmulas 1 Y 2 de Cálculo de Humedad:

Peso de la muestra:

$$\text{Peso de la muestra} = W_2 - W_1 \quad [1]$$

Donde:

W_1 es el peso del crisol vacío (g).

W_2 es el peso del crisol con la muestra fresca (g).

Porcentaje de Humedad:

$$\% \text{Humedad} = \left(\frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \right) \times 100 \quad [2]$$

Donde:

W_3 es el peso del crisol con la muestra seca (g).

Este valor porcentual describe la cantidad de agua presente en el forraje, lo cual influye en su almacenamiento, estabilidad y costos de transporte.

Cenizas

La determinación de cenizas o “materia mineral” del forraje verde hidropónico de maíz corresponde a la cuantificación de los residuos inorgánicos que quedan tras la incineración de la materia orgánica a alta temperatura. El valor de cenizas indica la concentración de minerales y es útil para conocer si el forraje puede cubrir parte de los requerimientos minerales de los animales. Se basa en el método AOAC 923.03, donde la muestra (seca previamente) se llevó a una mufla a 550 °C hasta obtener cenizas de color gris claro.

Fórmula 3 de cálculo de Cenizas:

$$\% \text{Cenizas} = \left(\frac{W_4 - W_1}{W_2 - W_1} \right) \times 100 \quad [3]$$

Donde:

W_1 es el peso del crisol vacío (g).

W_2 es el peso del crisol con la muestra seca antes de incinerar (g).

W_4 es el peso del crisol con la ceniza (g).

Este análisis revela la proporción de minerales (como calcio, fósforo, magnesio, entre otros) y su contenido total en el FVH.

Proteína Cruda

El contenido de proteína cruda es un parámetro esencial para evaluar la calidad de un forraje, puesto que determina la disponibilidad de nitrógeno para la síntesis de proteínas que utilizan los animales en su metabolismo. El método utilizado es el Kjeldahl (AOAC 2001.11), que comprende tres etapas: digestión, destilación y titulación.

Etapas 1.

En la digestión con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y un catalizador ($K_2SO_4 + CuSO_4$), el nitrógeno orgánico de la muestra se transforma en sulfato de amonio.

Etapas 2.

Durante la destilación, se agrega hidróxido de sodio (NaOH) para liberar amoníaco (NH_3), el cual se recoge en un matraz que contiene ácido bórico (H_3BO_3).

Etapas 3.

Finalmente, el amoníaco capturado se valora con HCl 0.1 M, y con base en el volumen gastado, se determina el nitrógeno total y, por ende, la proteína cruda usando el factor de conversión apropiado (6.25 para la mayoría de los forrajes).

Fórmulas 4 y 5 de cálculo de Nitrógeno Kjeldahl y Proteína Cruda:

Porcentaje de Nitrógeno Kjeldahl:

$$\%N \left(\frac{(V_S - V_B) \times M \times 14.01}{W} \right) \times 10 \quad [4]$$

Donde:

V_S = volumen (mL) de HCl consumido por la muestra.

V_B = volumen (mL) de HCl consumido por el blanco.

M = molaridad del HCl.

14.01 = peso atómico del nitrógeno (g/mol).

W = peso de la muestra (g).

10 = factor de conversión de mg/g a porcentaje.

Porcentaje de Proteína Cruda:

$$\%Proteina\ Cruda = \%N \times F \quad [5]$$

Donde:

F = factor para convertir nitrógeno a proteína (generalmente 6.25 para vegetales/forrajes).

Esta prueba es de gran relevancia nutricional, ya que el resultado final (porcentaje de proteína cruda) orienta sobre la capacidad del forraje para satisfacer los requerimientos proteicos de los animales.

Grasa Cruda

El contenido de grasa cruda en el forraje verde hidropónico se determinó por medio de extracción con disolvente (generalmente hexano) usando un equipo Soxtec, conforme al método AOAC 2003.06. El valor de la grasa cruda incluye lípidos, ceras, pigmentos liposolubles y otras sustancias extractables, importantes para aportar energía a la dieta animal y para la absorción de vitaminas liposolubles.

Fórmula 6 de cálculo de Grasa Cruda:

$$Grasa\ Cruda\ (\%) = \left(\frac{F-T}{S} \right) \times 100 \quad [6]$$

Donde:

F = peso de la taza con extracto lipídico (g).

T = peso de la taza vacía (g).

S = peso de la muestra (g).

Tras la extracción, se evapora el disolvente y se seca la taza a 100 – 102 °C para eliminar completamente los restos de hexano; luego, se pesa para calcular la fracción lipídica retenida. Este análisis refleja la densidad energética del forraje.

Fibra Cruda, Fibra Ácida Detergente y Fibra Neutra Detergente

La determinación de los componentes fibrosos del forraje verde hidropónico (FVH) de maíz se realizó mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIRS), utilizando el equipo FOSS NIRSystems Model 5000. Este sistema permite la predicción rápida y no destructiva de fracciones como fibra cruda (FC), fibra ácida detergente (FAD) y fibra neutra detergente (FND), a partir de modelos de calibración desarrollados previamente a partir de métodos de referencia tradicionales.

Para la fibra cruda, el análisis mediante NIRS permitió identificar la fracción de polisacáridos estructurales parcialmente digeribles presentes en la muestra, principalmente celulosa, lignina y hemicelulosas asociadas. La estimación de este componente se obtuvo mediante la lectura espectral en el rango de 700 a 2500 nm, cuyos valores se interpretaron mediante el modelo de calibración basado en el método de Weende, validado internamente por el laboratorio. Los espectros generados se relacionan con las vibraciones de enlaces característicos en los grupos funcionales de estas moléculas estructurales, permitiendo al software especializado (WinISI) estimar el contenido de FC por medio de regresión multivariante.

En el caso de la fibra ácida detergente, el equipo NIRS identificó los patrones espectrales correspondientes a los enlaces presentes en la celulosa y lignina, componentes que definen la fracción FAD, cuya presencia es inversamente proporcional a la digestibilidad del forraje. La estimación se realizó mediante un modelo calibrado con base en el procedimiento de Van Soest, específicamente para muestras tratadas con detergente ácido. Este modelo permite predecir de forma precisa el porcentaje de FAD en muestras previamente secas y homogeneizadas, sin recurrir al uso de reactivos corrosivos ni procedimientos destructivos.

La fibra neutra detergente, por su parte, comprende la mayor parte de la pared celular vegetal, incluyendo celulosa, hemicelulosa y lignina. Su estimación mediante NIRS se basa en los espectros que representan las interacciones moleculares de estos compuestos, especialmente los puentes C-O y O-H asociados a la hemicelulosa. El equipo procesó las señales obtenidas según un modelo de calibración

respaldado por el método de Van Soest para FND, logrando obtener valores confiables y comparables con los métodos húmedos convencionales.

Todos los análisis se realizaron en duplicado por muestra, bajo condiciones controladas, con verificación de la línea base del espectrofotómetro y ajustes de calibración previos a cada jornada de lectura. Este enfoque permitió una caracterización eficiente y precisa de las fracciones fibrosas del FVH de maíz.

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Se utilizó un diseño completamente al azar, compuesto de dos tratamientos con 10 repeticiones cada uno para un total de 20 unidades experimentales. Para este estudio se empleó la prueba t de Student utilizando el programa JMP® Pro-18, con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$.

Resultados y Discusión

Parámetros de Calidad del Agua

Los resultados reflejan contrastes importantes en la calidad química del agua utilizada en ambos tratamientos (Cuadro 2). Según Guzman Diaz (2015) un pH óptimo debe estar entre 6 y 7.8. El pH neutro en ambos casos (7.6) indica condiciones estables y adecuadas para el crecimiento del FVH. Sin embargo, la ligera alcalinidad observada en T2 (7.85) podría influir en la disponibilidad de ciertos micronutrientes, aunque se mantiene dentro de los rangos permisibles para sistemas hidropónicos.

El aporte nutricional en T1-Solución nutritiva fue significativamente mayor, especialmente por la presencia de nitratos (80 mg/L), que representan la principal fuente de nitrógeno asimilable para el crecimiento vegetal. Este componente estuvo completamente ausente en el agua del estanque (T2), lo cual puede limitar el desarrollo estructural y el contenido proteico del FVH si no se suplementa externamente.

El oxígeno disuelto, T2-Agua de Estanque de Tilapia mostró un valor más elevado (8.5 mg/L), lo que sugiere una mayor aireación o menor carga orgánica en comparación con T1-Solución nutritiva. Este aspecto es beneficioso para la salud radicular, ya que una mayor disponibilidad de oxígeno en la solución favorece la respiración aeróbica y previene condiciones anaeróbicas que podrían afectar negativamente el sistema radicular.

Finalmente, la presencia de amonio en ambas fuentes, aunque en niveles bajos, indica una posible actividad biológica o descomposición de materia orgánica. Sin embargo, los valores registrados no representan un riesgo para el cultivo, aunque podrían influir en el equilibrio del nitrógeno si se acumulan con el tiempo.

Cuadro 2

Resultados de pruebas API sobre la calidad del agua en la producción de forraje verde hidropónico

Variable	T1 - Solución Nutritiva	T2 - Agua de Estanque de Tilapia
pH	7.6	7.6
pH alto rango	7.4	7.85
Nitratos (mg/L)	80	0
Nitritos (mg/L)	0	0
Amonio (mg/L)	0.5625	0.1875
Oxígeno Disuelto (mg/L)	6.53	8.5

En conclusión, el T1-Solución nutritiva ofreció una mayor disponibilidad de nutrientes, especialmente nitratos, lo cual favorece el crecimiento activo del FVH. Por su parte, el T2-Agua de Estanque de Tilapia, a pesar de su menor carga nutritiva, proporcionó un ambiente mejor oxigenado y más estable en cuanto a pH y presencia de compuestos nitrogenados potencialmente tóxicos. La elección de una u otra fuente dependerá del enfoque productivo: rendimiento nutricional frente a sostenibilidad del recurso hídrico.

Temperatura

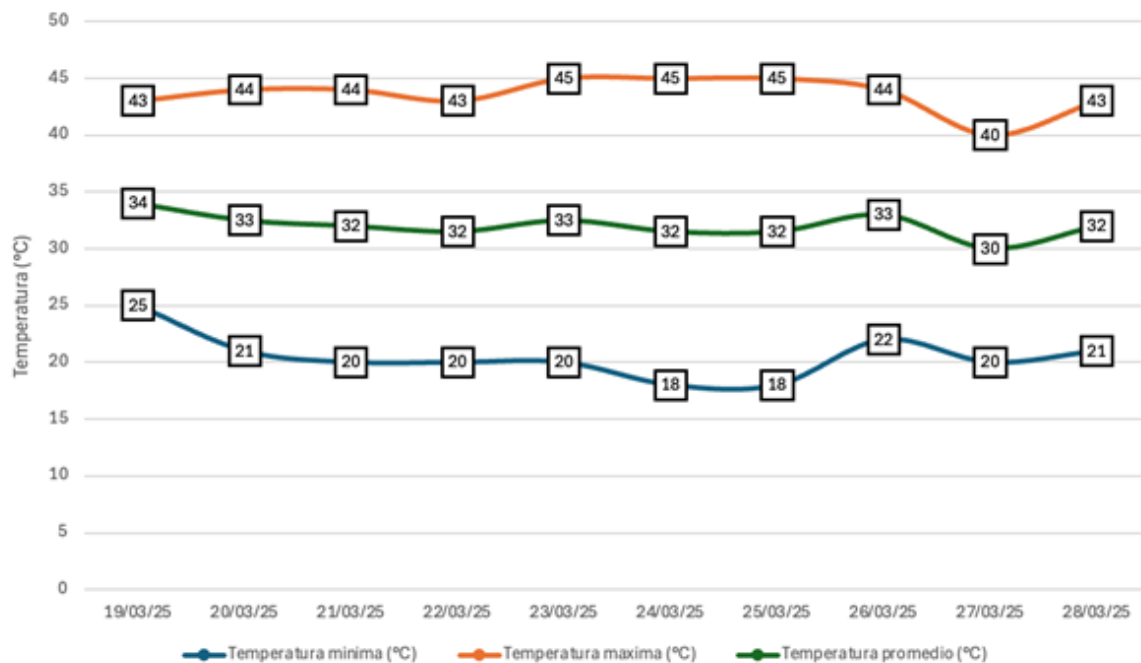
Durante el periodo del 19 al 28 de marzo de 2025, se observaron temperaturas máximas ambientales constantes entre 43 °C y 45 °C, excepto el 27 de marzo, cuando descendieron a 40 °C, lo que indica un ambiente cálido sostenido que pudo favorecer la tasa de transpiración y el desarrollo vegetativo (Figura 2). La temperatura promedio se mantuvo relativamente estable entre 30 °C y 34 °C, condiciones adecuadas para el crecimiento del FVH.

En contraste, según Zagal Tranquilino et al. (2016) la temperatura es una de las variables más importantes en la producción de FVH, por lo que se debe efectuar un adecuado control de la temperatura. La producción óptima del FVH de maíz se sitúa entre los 21 y 28 °C. Las temperaturas mínimas mostraron mayor variabilidad, con un descenso notable el 24 y 25 de marzo, alcanzando los 18 °C, lo que pudo generar cierto estrés térmico en etapas tempranas. Estos cambios, aunque breves, podrían haber influido en la absorción de nutrientes y el crecimiento radicular. En términos de dispersión, las temperaturas máximas presentaron menor variabilidad, como lo indica la poca

diferencia entre valores extremos, mientras que las mínimas reflejaron mayor amplitud térmica, lo cual podría tener implicaciones fisiológicas importantes para los cultivos bajo condiciones controladas.

Figura 4

Medición de la temperatura durante el procedimiento experimental



Variables de Campo Evaluadas para el Forraje Verde Hidropónico

En el presente estudio se evaluaron cuatro variables productivas clave del forraje verde hidropónico (FVH) de maíz: peso húmedo, peso de forraje, peso de raíz y altura de planta, con el objetivo de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en función de la fuente de agua utilizada en el sistema hidropónico (Cuadro 3). Se establecieron dos tratamientos: T1-Solución Nutritiva convencional compuesta por fosfato monoamónico (MAP), KCl soluble y nitrato de amonio, y T2-Agua de Estanque de Tilapia, correspondiente al uso de agua de recambio proveniente de estanque de reproducción de Tilapia, considerada como una alternativa sostenible en la gestión de recursos hídricos.

En términos generales, los valores promedio obtenidos en T1-Solución Nutritiva fueron: peso húmedo 1.5225 kg, peso de forraje 0.3095 kg, peso de raíz 1.2495 kg y altura de planta 28.78 cm. Por

su parte, los promedios registrados en T2-Agua de Estanque de Tilapia fueron de 1.4985 kg, 0.2705 kg, 1.1405 kg y 24.62 cm, respectivamente (Cuadro 3). No se observaron diferencias entre los tratamientos ($P > 0.05$).

Cuadro 3

Variables de campo en la producción de forraje verde hidropónico con dos fuentes de agua

Variable	T1- Solución Nutritiva	T2 - Agua de Estanque de Tilapia	EE \pm	Valor P
Peso húmedo (kg)	1.5225	1.4985	0.0940	0.8016
Peso forraje (kg)	0.3095	0.2705	0.0641	0.5549
Peso de raíz (kg)	1.2495	1.1405	0.0755	0.1664
Altura (cm)	28.78	24.64	2.628	0.1630

Peso Húmedo

El peso húmedo del FVH es un indicador importante que permite evaluar la productividad del sistema en términos de volumen de biomasa fresca generada, aspecto clave en sistemas de alimentación animal donde el forraje se suministra de manera directa. En este análisis, ambos tratamientos presentaron valores similares de producción en base húmeda, lo cual sugiere que las condiciones implementadas en cada uno permitieron un desarrollo vegetal comparable, al menos en términos de acumulación de masa total con contenido de agua.

A pesar de que el tratamiento T1–Solución Nutritiva registró una media ligeramente superior (1.5225 kg) frente a T2–Agua de Estanque de Tilapia (1.4985 kg), la diferencia no fue suficiente para establecer una ventaja estadística, lo que concuerda con Putzu Torres (2012) quien al comparar cuatro riegos hidropónicos (solución nutritiva, acuapónico, agua de tilapia, mixto y control) en FVH de maíz no encontró diferencias significativas entre sistemas para la mayoría de variables; como el peso húmedo, ello no se tradujo en diferencias de peso seco, porcentaje de materia seca, ni productividad.

Este patrón sugiere respuestas fisiológicas similares del cultivo bajo condiciones de manejo y ambiente comparables, con variabilidad intergrupar contenida, lo que puede deberse a una respuesta fisiológica similar del cultivo frente a factores como la solución nutritiva, la frecuencia de riego, la

densidad de siembra o las condiciones ambientales del entorno. Asimismo, la variabilidad dentro de cada grupo no fue excesiva, lo que refuerza la confiabilidad de los datos obtenidos.

Desde un enfoque práctico, la ausencia de diferencias en el peso húmedo permite una mayor flexibilidad al momento de seleccionar el tratamiento más adecuado, ya que ambos mostraron un rendimiento similar en cuanto a cantidad de forraje fresco disponible. Sin embargo, es importante considerar que el peso húmedo por sí solo no refleja completamente la calidad nutricional del forraje, por lo que debe ser interpretado en conjunto con otras variables bromatológicas como la humedad, la proteína, la fibra o los componentes energéticos.

Peso de Forraje

El peso de forraje representa la cantidad de biomasa aérea disponible, excluyendo el sistema radicular, y es uno de los indicadores más directos del rendimiento productivo del FVH en sistemas intensivos. Este parámetro tiene una gran relevancia práctica, ya que refleja la cantidad de materia verde utilizable por el ganado, y permite evaluar la eficiencia del sistema en términos de conversión de insumos en alimento aprovechable.

En este análisis, el tratamiento T2-Agua de Estanque de Tilapia, con un promedio de 0.2705 kg, mientras que T2 – Solución Nutritiva fue de 0.3095 presentó menor variabilidad, lo que podría asociarse a una mayor homogeneidad en el comportamiento del sistema de producción. Según información obtenida de Albert et al. (2016), en su estudio acerca del rol de los nitratos en los sistemas acuapónicos menciona que estos son una fuente crucial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Debido a que es un compuesto esencial para la producción de aminoácidos, proteínas y clorofila, todos estos necesarios para la fotosíntesis.

Peso de Raíz

El peso de la raíz en cultivos hidropónicos es un indicador importante del desarrollo del sistema radicular, según Oñate Zúñiga (2016), para la etapa inicial del maíz, este destina la mayor parte de su energía en las primeras semanas a la producción de raíces para luego poder generar sus primeras hojas, el cual influye directamente en la capacidad de absorción de nutrientes y agua, así como en la

estabilidad fisiológica de la planta . En este caso, el tratamiento T1-Solución Nutritiva obtuvo una media de 1.2495 kg mostró una mayor masa radicular promedio en comparación con T2-Agua de Estanque de Tilapia que obtuvo una media de 1.1405 kg, lo que podría reflejar una respuesta más activa o eficiente en la absorción de nutrientes.

Altura de la Planta

La altura de la planta es un indicador morfológico que refleja, en gran medida, el vigor vegetativo del cultivo y su respuesta al ambiente o al manejo aplicado. En el presente análisis, el tratamiento T1 - Solución Nutritiva obtuvo una media de 28.78 cm y el T2-Agua de Estanque de Tilapia que obtuvo una media de 24.62 cm. Resultados similares obtenidos por Ramírez Víquez y Soto Bravo (2017) en donde el tratamiento con mayor cantidad de nitrógeno en la fertilización del FVH obtuvo una mayor altura con un promedio de 26 a 30 cm, justificando que el mayor rendimiento de este parámetro es causado debido a que las concentraciones de nitrógeno presentes en el agua de riego promueven el crecimiento vegetativo y con ello la elongación de las células.

Variables de Laboratorio

Los resultados obtenidos en la evaluación bromatológica del forraje verde hidropónico de maíz indican que, de las ocho variables analizadas, solo el contenido de humedad mostró una diferencia entre tratamientos ($P = 0.0418$), siendo mayor en el grupo irrigado con solución nutritiva convencional (T1 - Solución Nutritiva). Este comportamiento podría explicarse por la mayor disponibilidad iónica y osmorregulación promovida por el balance electrolítico de la solución nutritiva, lo cual facilita la retención de agua en los tejidos del FVH (Rodríguez Verdesoto y Veloz Cando, 2022).

En contraste, variables como cenizas, proteína cruda, grasa cruda, fibra cruda y fibra ácido detergente no presentaron diferencias ($P > 0.05$), lo que sugiere que el uso de agua residual de acuicultura no compromete la calidad nutricional del forraje desde el punto de vista composicional, como también fue reportado por Loqui Sánchez et al. (2020) al evaluar híbridos de maíz bajo diferentes fuentes de nutrición hidropónica (Cuadro 4).

Cabe resaltar que tanto la fibra neutra y acida detergente (FND y FAD), como el extracto libre de nitrógeno (ELN) no presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos, lo que subraya la estabilidad de estos parámetros en la producción de forraje verde hidropónico. Este hallazgo es relevante, ya que la consistencia en la composición de estos componentes respalda la calidad nutricional del sistema, incluso cuando se emplean fuentes de riego alternativas. Estas tendencias podrían atribuirse a diferencias en la proporción de pared celular o en la asimilación de carbohidratos no estructurales bajo condiciones de riego con agua de acuicultura, las cuales tienden a contener residuos orgánicos, compuestos nitrogenados y micronutrientes derivados de la actividad piscícola (Díaz Palacios y Recinos Agustín, 2020).

En conjunto, estos hallazgos respaldan la viabilidad del uso de agua de recambio de acuicultura como insumo alternativo en sistemas hidropónicos de producción forrajera, manteniendo perfiles nutricionales comparables a los obtenidos con soluciones fertilizantes comerciales, lo cual representa una estrategia eficaz para integrar principios de sostenibilidad y economía circular en la agricultura intensiva.

Cuadro 4

Resultados obtenidos en la evaluación bromatológica del forraje verde hidropónico de maíz

Variable	T1 - Solución Nutritiva	T2 - Agua de Estanque de Tilapia	EE ±	Valor P
Humedad	91.02%	87.42%	0.008	0.0418
Cenizas	10.95%	12.48%	0.022	0.5542
Proteína Cruda	36.06%	25.69%	0.055	0.1527
Grasa Cruda	2.41%	2.48%	0.003	0.8592
Fibra Cruda	11.87%	10.76%	0.015	0.5130
Fibra Acida Detergente	25.82%	25.11%	0.021	0.7559
Fibra Neutra Detergente	52.82%	56.33%	0.016	0.0985
Extracto Libre de nitrógeno	38.71%	48.59%	0.032	0.0889

Humedad

La humedad del forraje es un factor clave en la calidad del FVH, ya que afecta directamente su valor nutricional, palatabilidad, digestibilidad y vida útil. Un mayor contenido de humedad, dentro de ciertos rangos, puede favorecer la aceptación por parte del ganado y facilitar su consumo, al tiempo

que reduce la necesidad de suplementación hídrica. Sin embargo, un exceso puede dificultar el manejo postcosecha y favorecer procesos de fermentación indeseada. Según información de Rodríguez Verdesoto y Veloz Cando (2022), quienes evaluaron el contenido nutricional del FVH de maíz producido con tres soluciones nutritivas para la alimentación del ganado bovino, donde los resultados mostraron que el contenido de materia seca (MS) osciló entre 8.8% y 13.4%, lo que corresponde a un contenido de humedad entre 86.6% y 91.2% en base húmeda. Estos valores indican una alta concentración de agua en el FVH de maíz, lo cual es característico de este tipo de forraje y relevante para su manejo y conservación.

En el presente análisis, el tratamiento T1 - Solución Nutritiva evidenció un mayor contenido de humedad con un promedio de 91% en comparación con T2 - Agua de Estanque de Tilapia que obtuvo un promedio de 87.6%, diferencia que fue confirmada estadísticamente. Esta mayor retención de agua podría estar relacionada con aspectos como una mayor densidad foliar, una estructura celular más suculenta o una menor tasa de transpiración inducida por condiciones de cultivo más controladas. El bajo nivel de variabilidad en T1 - Solución Nutritiva, también sugiere que el tratamiento fue efectivo y consistente en mantener condiciones que favorecen la acumulación de agua en el tejido vegetal.

Por el contrario, el tratamiento T2-Agua de Estanque de Tilapia mostró no solo un menor contenido de humedad, sino también una mayor variabilidad entre repeticiones, lo cual puede indicar cierta inestabilidad en el sistema de cultivo o menor eficiencia en la retención hídrica. Esta diferencia puede tener implicaciones importantes en el manejo agronómico, ya que un forraje con menor humedad podría ser más susceptible a la deshidratación y al deterioro en condiciones ambientales adversas.

Cenizas

El contenido de cenizas en un forraje representa la fracción inorgánica, es decir, los minerales esenciales que quedan tras la combustión del material orgánico. Estos minerales cumplen funciones vitales en la fisiología animal, participando en la formación ósea, el equilibrio electrolítico y en

múltiples procesos metabólicos. Por ello, su presencia en el FVH es un indicador importante de su calidad nutricional.

En los resultados obtenidos, el T2-Agua de Estanque de Tilapia obtuvo un promedio de (12.48%), mientras que T1 - Solución Nutritiva fue de (10.95%). Este comportamiento sugiere que, bajo las condiciones evaluadas, ninguno de los tratamientos tiene una ventaja clara en la acumulación de minerales en el tejido vegetal. Esto podría deberse a una composición similar de la solución nutritiva utilizada, a la homogeneidad del sustrato o a factores ambientales constantes durante el ciclo de producción. De manera similar Narváez Herrera y Guerrero Guerrero (2022) reportaron contenidos de cenizas entre 10% y 15% en FVH de maíz evaluado como suplemento para ovinos, lo cual respalda la adecuación de estos valores dentro de un rango nutricional funcional para sistemas intensivos.

Proteína

La proteína cruda es uno de los parámetros nutricionales más importantes en la evaluación de forrajes, ya que tiene un impacto directo sobre el crecimiento, la producción de leche y el estado fisiológico general del ganado. En este análisis, el tratamiento T1 - Solución Nutritiva con un promedio de 36.06%, evidenció un mayor contenido de proteína a comparación de T2-Agua de Estanque de Tilapia que obtuvo un promedio de 25.69%. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Chavarría Tórrez et al. (2018), quienes señalan que el FVH de maíz presenta alto contenido proteico y que la proteína cruda depende de la fracción vegetal, alcanzando un 35 % en hojas, 27 % en tallos y 12 % en raíces; donde el promedio del tapete es del 16 %. Por tanto, una mayor proporción de tejido foliar o una mayor disponibilidad de nitrógeno explican el mayor el mayor porcentaje de proteína observado en T1 respecto a T2.

Grasa Cruda

La grasa cruda en el forraje representa una fuente energética concentrada, fundamental para cubrir las necesidades calóricas de los animales, además de participar en funciones biológicas esenciales como el transporte de vitaminas liposolubles. Su presencia en el FVH, aunque en cantidades

menores en comparación con otros nutrientes, resulta clave para mejorar el perfil energético del alimento ofrecido.

En este estudio, los tratamientos T1 - Solución Nutritiva (2.41%) y T2-Agua de Estanque de Tilapia (2.48%), generaron niveles de grasa cruda muy similares. Esta similitud indica que el tipo de tratamiento aplicado no fue determinante para modificar la acumulación de lípidos en el tejido vegetal. Resultados comparables fueron obtenidos por Valdez Sandoval et al. (2022) quienes reportaron un contenido promedio de grasa cruda de 2.1% en FVH de maíz, con variaciones entre 1.9% y 2.3% según la variedad utilizada, lo que refuerza la idea de que este parámetro tiende a mantenerse estable bajo diferentes condiciones de cultivo.

Fibra Cruda

La fibra cruda es un componente estructural fundamental en la dieta de los rumiantes, ya que contribuye al buen funcionamiento del rumen, estimula la motilidad gastrointestinal y modula la tasa de digestión. No obstante, un exceso de fibra poco digestible puede reducir la eficiencia alimenticia. En el presente análisis, ambos tratamientos mostraron niveles similares de fibra cruda, lo que sugiere que ninguno de los dos influyó significativamente en la concentración de este componente en el forraje.

El tratamiento T1 - Solución Nutritiva obtuvo un promedio de 11.87% mientras que el T2 - Agua de Estanque de Tilapia obtuvo un promedio de 10.76, lo cual podría estar relacionado con una mayor madurez fisiológica del forraje o con diferencias en la tasa de elongación de las células vegetales. Resultados consistentes se reportan en el estudio de Valdez Sandoval et al. (2022), donde se concluyó que el forraje verde hidropónico producido a partir de variedades mejoradas del ICTA mostró un buen perfil nutricional a los 18 días post siembra. En particular, la variedad HB18 destacó con el mayor valor de fibra cruda (11.7%), lo que la posiciona como una de las más prometedoras para la alimentación de rumiantes.

Fibra Acida Detergente (FAD)

La fibra ácida detergente representa una fracción de la fibra compuesta principalmente por celulosa y lignina, elementos poco digestibles que influyen directamente en la calidad nutricional del forraje. Un contenido elevado de FDA suele estar relacionado con una menor digestibilidad, por lo que su monitoreo es clave para balancear dietas en sistemas intensivos.

El tratamiento T1 - Solución Nutritiva, presentó un promedio de 25.82%, por otro lado, el tratamiento T2 - Agua de Estanque de Tilapia con un promedio de 25.11%. Resultados similares fueron reportados por Salas Pérez et al. (2012), quienes encontraron valores de FAD entre 17.34% y 19.05% en FVH de maíz cultivado bajo fertilización orgánica y química, sin diferencias relevantes entre tratamientos. Esta similitud sugiere una estabilidad del sistema de producción frente al tipo de fertilización aplicada.

Fibra Neutra Detergente (FND)

La fibra detergente neutra representa la fracción de la pared celular que incluye hemicelulosa, celulosa y lignina, y se asocia estrechamente con la digestibilidad y el consumo voluntario del forraje. Un mayor contenido de FND, aunque estructuralmente importante, puede reducir la ingesta de materia seca por parte del animal, ya que incrementa el volumen ruminal sin ofrecer una proporción equivalente de energía digestible.

En este análisis, el T2-Agua de Estanque de Tilapia obtuvo un promedio de 56.33% en comparación con T1 - Solución Nutritiva que obtuvo un promedio de 52.82%. Este hallazgo sugiere que T2-Agua de Estanque de Tilapia propició una mayor acumulación de componentes estructurales en la planta, lo que puede estar relacionado con factores como la composición de la solución nutritiva, la duración del ciclo de crecimiento o condiciones ambientales más favorables para la síntesis de pared celular. De forma similar, Salas Pérez et al. (2012) reportaron contenidos de FND de 46.23%, 44.53% y 45.15% en FVH de maíz fertilizado con té de vermicompost, té de compost y solución química respectivamente, sin diferencias sustanciales entre tratamientos. La diferencia significativa detectada

indica que esta respuesta no es producto del azar, sino que está asociada a las condiciones particulares del tratamiento aplicado.

Extracto Libre de Nitrógeno

El extracto libre de nitrógeno representa la fracción más fácilmente digerible del forraje, compuesta por azúcares, almidones y otros compuestos solubles no fibrosos. Su valor es fundamental en la formulación de dietas energéticas para rumiantes, especialmente en sistemas de producción intensivos.

En este contexto, el tratamiento T2-Agua de Estanque de Tilapia obtuvo un promedio de 48.59%, respecto al T1 - Solución Nutritiva que obtuvo un promedio de 38.70%, lo cual sugiere una mayor acumulación de compuestos energéticos disponibles para el animal. Esta diferencia es relevante desde el punto de vista nutricional, ya que puede traducirse en una mejora en la eficiencia alimenticia y, por ende, en el desempeño productivo del hato. Asimismo, el bajo nivel de variabilidad en T2-Agua de Estanque de Tilapia refuerza la consistencia del tratamiento y la estabilidad del sistema empleado. Resultados similares fueron reportados por Diaz Palacios y Recinos Agustín (2020), quien encontró contenidos de extracto libre de nitrógeno de 44.40% y 45.25% en FVH de maíz cultivado bajo dos tecnologías distintas, destacando su potencial como fuente energética en la alimentación animal.

El tratamiento T1 - Solución Nutritiva, aunque presentó valores aceptables, mostró una mayor variabilidad entre repeticiones, lo cual puede estar vinculado a factores como irregularidades en el suministro de nutrientes, diferencias en la intensidad luminosa o variaciones en el desarrollo fisiológico del forraje.

Conclusiones

En la humedad se evidencia que el forraje en la solución nutritiva posee una estructura foliar más densa y una mayor capacidad de retención de agua, sin alterar de manera relevante las fracciones bromatológicas en base seca. Esto sugiere que el tapete radicular y la estructura foliar desarrollaron una mayor capacidad de retención hídrica bajo este riego, lo que incrementa la succulencia y palatabilidad del forraje. Sin embargo, en base seca, las fracciones bromatológicas (proteína cruda, extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y FDA) no mostraron diferencias relevantes, lo que indica que ambos tratamientos son comparables en valor nutricional.

El uso de agua proveniente del estanque de tilapia se mostró técnicamente viable, aportando un perfil nutritivo complementario por la presencia de nitrógeno en formas reducidas (amonio), fósforo, potasio y microelementos disueltos. Además, representa una estrategia sostenible al reutilizar efluentes acuícolas, reduciendo costos y dependencia de insumos externos.

Ambos tratamientos de riego aseguraron un crecimiento homogéneo y un forraje de calidad bromatológica adecuada para la alimentación animal, con potencial de uso en dietas de bovinos, porcinos y aves. La elección del tratamiento depende de las condiciones económicas y operativas de cada productor.

Recomendaciones

Implementar un sistema de recirculación en el uso de agua de recambio de acuicultura, como fuente alternativa de riego en sistemas hidropónicos.

Incluir especies alternativas en el experimento de forraje verde hidropónico, integrando cereales como sorgo y trigo.

Integrar una evaluación económica y ambiental que incluya costos de insumos, energía y mano de obra, junto con indicadores de rendimiento y estabilidad nutritiva.

Referencias

- Albert, G., Alonso, N., Cabrera, A., Rojas, L. y Rosthoj, S. (2016). Evaluación productiva del forraje verde hidropónico de maíz, avena y trigo. *Compendio De Ciencias Veterinarias*, 6(1), 7–10. <https://doi.org/10.18004/compend.cienc.vet.2016.06.01.7-10>
- Chavarría Tórrez, Agustín. Sandra del Socorro Castillo-Castro y Editor Academico Prof. Dr. Noel Ernesto Blanco-Roa. (2018). El forraje verde hidropónico (FVH), de maíz como alternativa alimenticia y nutricional para todos los animales de la granja. *Tepic*, 6(1). <https://portal.amelica.org/ameli/journal/394/3941755005/3941755005.pdf>
- Conabio. (2020). *Tuxpeño | Biodiversidad Mexicana*. La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas/grupo-DentadosT/Tuxpeno>
- Díaz Palacios, C. y Recinos Agustín, S. I. (2020). *Producción de forraje verde hidropónico en condiciones agroclimáticas de la región occidental de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Informes%20Finales%20IICA-CRIA%202020/12%20VINOS/Validaci%C3%B3n%20Forraje%20VHidrop-CUNOROC-C%20D%C3%ADaz/Forraje%20Verde%20Hidroponico.pdf>
- Guzmán Díaz, G. (2015). Algunos aspectos en la Producción de maíz como forraje verde hidropónico. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1853.pdf>
- Juárez López, P., Morales Rodríguez, H., Sandoval Villa, M., Gómez Danés, A., Cruz Crespo, E., Juárez Rosete, C., Aguirre Ortega, J., Alejo Santiago, G. y Ortiz Catón, M. (2013). Producción de forraje verde hidropónico. *Revista Fuente Nueva Época*, 4(13), 16–26. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/bitstream/123456789/2126/1/Produccion%20de%20forraje%20verde%20hidroponico.pdf>
- Loqui Sánchez, A. J., Zambrano Alarcón, M. E., López Loqui, D. J. y Casignia Coox, D. A. (2020). *Forraje hidropónico de maíz: análisis bromatológico de cuatro híbridos de maíz para alimentación animal*. 4(2). [https://doi.org/10.26820/reciamuc/4.\(2\).abril.2020.76-80](https://doi.org/10.26820/reciamuc/4.(2).abril.2020.76-80)
- Narváez Herrera, J. P. y Guerrero Guerrero, E. M. (2022). Forraje verde hidropónico y organopónico de maíz como suplemento nutricional para ovinos. *RIAA (Revista De Investigación Agraria Y Ambiental)*, 13(1), 253–266. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8202373.pdf>
- Oñate Zúñiga, L. A. (2016). *Duración de las etapas fenológicas y profundidad radicular del cultivo de maíz (Zea mays) var. Blanco harinoso criollo, bajo las condiciones climáticas del cantón Cevallos [Tesis]*. Universidad Técnica de Ambato, Cevallos, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/f4398307-1cd7-432a-b2f1-d2afef12230f/content>
- Ovando, M. (2021). *Determinación de densidades y tipo de bandejas para la producción de forraje verde hidropónico de maíz - CPA-2021-T087.pdf* [Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. [bdigital.zamorano.edu. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/a96d7adc-7699-45e4-b99e-1294e344c952/content](https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/a96d7adc-7699-45e4-b99e-1294e344c952/content)

- Putzu Torres, A. P. (2012). *Comparación del rendimiento en la producción de forraje verde en diferentes sistemas de cultivo* [Tesis]. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/5627/1/RI002815.PDF>
- Ramírez, D., Sabogal, D., Jiménez, P. y Hurtado Giraldo, H. (2008). La acuaponía: una alternativa orientada al desarrollo sostenible. *Facultad De Ciencias Basicas*, 4, 32–51. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/2230/1937>
- Ramírez Víquez, C. y Soto Bravo, F. (2017). *Efecto de la nutrición mineral sobre la producción de forraje verde hidropónico de maíz*. Universidad de Costa Rica. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/31301/31011>
- Rodríguez. (2006). *Como producir forraje verde hidropónico*. (3ª ed.). Editorial Diana. <https://docplayer.es/82386832-Hydroponics-maize-green-forage-production-with-watering-every-24-hours.html>
- Rodríguez Verdesoto, J. P. y Veloz Cando, J. M. (2022). *Análisis bromatológico del forraje verde hidropónico producido con tres soluciones nutritivas para la alimentación del ganado bovino* [Tesis]. Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador. <https://repositoriobe.espe.edu.ec/server/api/core/bitstreams/0e76da81-3baa-4f4d-9dbb-09f5b709e327/content>
- Rosario Martínez. (2013). *Acuaponía: ¿Una posibilidad para tener en casa?* (Vol. 2). https://www.researchgate.net/publication/261098703_Acuaponia_Una_posibilidad_para_tener_en_casa
- Salas Pérez, Lilia, Esparza Rivera, Juan Ramón, Preciado Rangel, Pablo, Álvarez Reyna, Vicente de Paul, Meza Velázquez, Jorge Armando, Velázquez Martínez, José Rodolfo, Murillo Ortiz y Manuel (2012). Rendimiento, calidad nutricional, contenido fenólico y capacidad antioxidante de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays*) producido en invernadero bajo fertilización orgánica., 3, 215–220. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33922725009.pdf>
- Salvador Castillo, J. M., Bolaños Gonzáles, M. A., Cedillo Aviles, A. K., Chena, Y. V., Varela de Gante, S. A y & Meza Discua, J. L. (2022). Efecto de la aplicación de soluciones nutritivas en la calidad bromatológica del forraje verde hidropónico de Avena sativa y *Hordeum vulgare*. *Terra Latinoamericana*, 1–15. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20230079099>
- Urrestarazu Gavilan, M. (2015). *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*. Ediciones Mundi-Prensa. <https://books.google.co.ve/books?id=5NE9CwAAQBAJ>
- Valdez Sandoval, C., Guerra Centeno, D., Díaz Rodríguez, M., Noriega Morales, C. y Pérez Noriega, H. (2022). Producción de biomasa de forraje verde hidropónico de cinco variedades mejoradas de maíz producidas por el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas de Guatemala. *Revista Científica Del Sistema De Estudios De Postgrado*, 5(2), 21–34. <https://revistasep.usac.edu.gt/index.php/RevistaSEP/article/view/116/121>
- Zagal Tranquilino, M., Martínez González, S., Salgado Moreno, S., Escalera Valente, F., Peña Parra, B. y Carrillo Díaz, F. (2016). Producción de forraje verde hidropónico de maíz con riego de agua cada 24 horas. *Abanico Veterinario*, 6, 29–34. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-61322016000100029&script=sci_arttext

Anexos**Anexo A**

Lugar de germinación de las bandejas



Anexo B

Estanque de Reproducción que se utilizó para el reservorio del agua de recambio (T2)



Anexo C*Sistema de riego utilizado para la producción de FVH*

Anexo D

Termómetro ACURITE® utilizado para medir la temperatura ambiental dentro del invernadero



Anexo E

Kit API utilizado para la toma de pH, amonio, nitritos y nitratos



Anexo F

Balanza electrónica de torreta marca Truper utilizada para medir las variables de campo

