



Macropropagación sostenible de tapiz vegetal en pasto bermuda (Cynodon dactylon) con microaspersores en un sistema hidropónico y tecnología IoT
Sustainable macropropagation of Bermuda grass (Cynodon dactylon) turf using micro-sprinklers in a hydroponic system with IoT technology.

Macropropagação sustentável de erva-bermuda (Cynodon dactylon) com microaspersores em sistema hidropônico e tecnologia IoT

Aldo José Loqui Sánchez^I
aldo.loquis@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8953-5105>

Washington Guillermo Meza Cabrera^{II}
washington.mezac@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7252-305X>

Marcelo Erik Zambrano Alarcon^{III}
marcelo.zambranoa@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8833-7190>

Marisol Vera Oyague^{IV}
marisol.verao@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9382-7012>

Correspondencia: aldo.loquis@ug.edu.ec

Ciencias Agrícolas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 15 de febrero de 2025 * **Aceptado:** 22 de marzo de 2025 * **Publicado:** 11 abril de 2025

- I. Facultad de Ciencias Naturales; Universidad de Guayaquil
- II. Facultad de Ciencias Naturales; Universidad de Guayaquil
- III. Facultad de Ciencias Naturales; Universidad de Guayaquil
- IV. Facultad de Ciencias Naturales; Universidad de Guayaquil

Resumen

La presente investigación exploratoria y experimental busca la producción sostenible de tapiz vegetal del pasto bermuda (*Cynodon dactylon*) hidropónico con un sistema de IoT. Se midieron la altura de la planta, número de hojas y longitud de hoja, utilizando las soluciones nutritivas (SN): Extracto de algas (10 gramos), Alibiol (10 cm³) y Evergreen (10 cm³) en 2 litros de agua. El ETO fue de 4.06 mm/día, con una lámina de riego óptima de 2.43 mm/día con microaspersores de 31 litros/hora. El análisis de varianza multivariado (MANOVA) de Kruskal-Wallis evidenció diferencias significativas en Wilks, Pillai, Lawley-Hotelling y Roy ($p = 0,0001$) en INFOSTAT. Se obtuvieron promedios favorables en variables agronómicas clave de las 120 tablas: altura de planta (2.49 cm), número de hojas (2.91 por planta) y longitud de hoja (1.09 cm), respaldados por la prueba de Tukey ($p > 0.05$) respecto a la solución Evergreen. Mediante la utilización del sistema IoT se obtuvieron parámetros ambientales que promediaron 23,03°C de temperatura ambiente, 64,97% de humedad relativa, pH 6,47 y 21,34°C de temperatura de sonda.

Palabras claves: Césped, propagación, semilla, hidroponía, sostenibilidad.

Abstract

This exploratory and experimental research aims to achieve sustainable production of bermudagrass (*Cynodon dactylon*) turf using hydroponics with an IoT system. Plant height, number of leaves, and leaf length were measured using nutrient solutions (NS): seaweed extract (10 grams), Alibiol (10 cm³), and Evergreen (10 cm³) in 2 liters of water. The ETO was 4.06 mm/day, with an optimal irrigation depth of 2.43 mm/day using 31 liters/hour micro-sprinklers. Multivariate analysis of variance (MANOVA) using Kruskal-Wallis showed significant differences in Wilks, Pillai, Lawley-Hotelling, and Roy ($p = 0.0001$) in INFOSTAT. Favorable averages were obtained in key agronomic variables of the 120 tables: plant height (2.49 cm), number of leaves (2.91 per plant), and leaf length (1.09 cm), supported by Tukey's test ($p > 0.05$) regarding the Evergreen solution. Using the IoT system, environmental parameters were obtained with average values of 23.03°C ambient temperature, 64.97% relative humidity, pH 6.47, and 21.34°C probe temperature.

Keywords: Grass, propagation, seed, hydroponics, sustainability.

Resumo

Esta pesquisa exploratória e experimental busca a produção sustentável de capim-bermuda hidropônico (*Cynodon dactylon*) com um sistema IoT. A altura da planta, o número de folhas e o comprimento das folhas foram medidos usando as soluções nutritivas (NS): Extrato de algas marinhas (10 gramas), Alibiol (10 cm³) e Evergreen (10 cm³) em 2 litros de água. O ETO foi de 4,06 mm/dia, com uma profundidade ótima de irrigação de 2,43 mm/dia com microaspersores de 31 litros/hora. A análise de variância multivariada de Kruskal-Wallis (MANOVA) mostrou diferenças significativas em Wilks, Pillai, Lawley-Hotelling e Roy ($p = 0,0001$) no INFOSTAT. Foram obtidas médias favoráveis nas principais variáveis agrônomicas das 120 tabelas: altura da planta (2,49 cm), número de folhas (2,91 por planta) e comprimento da folha (1,09 cm), apoiadas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) em relação à solução Evergreen. Utilizando o sistema IoT, foram obtidos parâmetros ambientais com média de temperatura ambiente de 23,03°C, umidade relativa de 64,97%, pH de 6,47 e temperatura da sonda de 21,34°C.

Palavras-chave: Gramíneas, propagação, sementes, hidroponia, sustentabilidade.

Introducción

Las coberturas de césped son uno de los componentes principales de los espacios verdes en sus aspectos funcionales, estéticos o ambientales, destinados a ornamentación, deportes, recreación, fijación del suelo o algunos u otros usos múltiples (Carrieri et al., 2005).

Las gramíneas que conforman los céspedes tienen la capacidad de regenerarse continuamente, formando un tapiz vegetal resistente a la siega y al tránsito peatonal (Monje, 2006).

Los céspedes necesitan de unos cuidados y su instalación debe reunir una serie de características. Los céspedes destinados a espacios deportivos son los que más intensidad cultural van a tener, le siguen los destinados a uso ornamental y por último los que van a tener una utilidad funcional más o menos definida (Monje, 2006).

La hidroponía es un sistema de producción agrícola que cultiva plantas en soluciones nutritivas, en lugar de suelo. Esta técnica es especialmente adecuada para especies herbáceas y permite aprovechar espacios no convencionales, siempre y cuando se satisfagan las necesidades básicas de las plantas (Beltrano & Giménez, 2015)

Los sistemas hidropónicos en ambientes controlados ofrecen una alta reproducibilidad, convirtiéndose en herramientas indispensables para la investigación. Ante la creciente escasez de tierras cultivables, la hidroponía surge como una alternativa prometedora para garantizar la producción agrícola (Beltrano & Giménez, 2015).

Las prácticas agrícolas sostenibles reducen el impacto ambiental al optimizar el uso de los recursos naturales, proteger la biodiversidad y minimizar el empleo de sustancias nocivas. Asimismo, la evaluación de los riesgos climáticos y el fortalecimiento de la resiliencia son fundamentales para asegurar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (FAO, 2016).

Características botánicas y agronómicas del pasto bermuda

El *Cynodon dactylon*, según Laurencena et al (2009) siguiendo a McCarty & Miller (2002), es la gramínea de estación cálida predilecta en áreas deportivas por su notable resistencia a cortes frecuentes a baja altura, tráfico intenso y elevadas dosis de nitrógeno, aunque presenta limitaciones en su tolerancia a bajas temperaturas, sombra y un extenso período de latencia. De acuerdo con Oakley (1999), citando a diversos autores (Parodi, 1959; Burkart, 1969; Caro & Sánchez, 1969; Covas & Salvai, 1970), esta especie se caracteriza por poseer estolones, que son tallos horizontales superficiales con capacidad de arraigar en los nudos y generar nuevas plantas, mostrando abundante ramificación y nudos cercanos, pudiendo incluso desarrollar flores y crecer verticalmente; rizomas, que son tallos subterráneos gruesos y ramificados cubiertos de escamas, generalmente más robustos que los estolones y sin nudos evidentes, con variabilidad en su grosor entre poblaciones, y la posibilidad de coexistir con estolones en la misma planta; hojas dispuestas de forma alterna que pueden parecer opuestas por su agrupación, con vainas lisas (excepto en la base, que presenta una lengüeta con pelos) y láminas alargadas generalmente lisas, aunque algunas variedades pueden tener pelos, con bordes ligeramente ásperos y variaciones en ancho y vellosoidad útiles para distinguir poblaciones; una inflorescencia compuesta por espigas agrupadas en forma de dedos, de color verde a violeta, ubicadas en la punta de los tallos florales, donde cada espiguilla contiene una flor envuelta por dos glumas violetas y pequeñas brácteas, careciendo de arista y produciendo un fruto ovalado, aplanado y marrón oscuro brillante; finalmente, la profundidad radicular, factor crucial para la resistencia a la sequía y muy influenciada por las propiedades del suelo, puede alcanzar en condiciones normales entre 34.5 y 138 cm (Monje, 2006).

Taxonomía

La taxonomía del *Cynodon dactylon* de acuerdo con la USDA (2000):

Tabla 1. Taxonomía

Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta
Superdivisión	Spermatophyta
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelinidae
Orden	Cyperales
Familia	Poaceae / Gramineae
Sub-familia	Eragrostoideae
Género	Cynodon Rich
Especie	Cynodon dactylon (L.) Pers.
Nombre común	Césped Bermuda

Importancia de la producción de césped

Monje (2006) destaca la amplia gama de oportunidades que ofrece la industria del césped, involucrando desde quienes gestionan espacios verdes como campos deportivos, obras arquitectónicas y parques, hasta fabricantes de insumos, consultores, diseñadores y académicos.

Existen una gran cantidad de juegos y deportes que se practican sobre césped. Así tenemos que el fútbol, golf, rugby, hockey, polo, tenis, etc., son deportes que podemos ver o practicar, en mayor o menor grado, sobre céspedes, con más o menos calidad. Igualmente podemos ver otros deportes que llevan ligado el césped como base indirecta de su práctica, o entorno funcional de los mismos. Las carreras de caballos, los saltos ecuestres, los circuitos de competición de velocidad, etc (Monje, 2006).

Producción del tapiz vegetal

Portocarrero et al (2019) citando a Pessarakli (2008) explican que, para la producción de tepes, los estolones, rizomas o semillas deben ser sembrados en campo tres a cuatro meses antes de su comercialización. Las siembras se realizan todo el año y una vez que el campo de producción está totalmente cubierto se efectúa la extracción de tepes con una “cosechadora de césped”. Esta máquina corta bloques de 0,5 m de largo por 0,5 m de ancho y una profundidad promedio de 5 cm de suelo agrícola, lo que hacen un peso aproximado de 40 kg/m² de césped.

Requerimientos para implementar un tapiz vegetal

Monje (2006) dice que:

La elección de las especies de césped es fundamental para garantizar su longevidad y facilitar su mantenimiento. Las condiciones climáticas y las especies seleccionadas influyen directamente en las labores de cuidado anuales.

Antes de instalar césped, es fundamental preparar el terreno. Esto implica eliminar malas hierbas y piedras, y aflojar el suelo a una profundidad de al menos 20 centímetros. Si el suelo no es de buena calidad, es recomendable realizar un análisis para determinar qué nutrientes necesita y aplicar las correcciones necesarias.

Existen algunas normas sobre la selección de tierra para la implantación del césped en jardines. Se dice que la tierra debería cumplir con una textura franco-arenosa en un perfil inferior a 50 cm con un 50-80% de arena (con 25-40% de partículas con diámetro mayor de 0,25 mm), con menos del 30% de limo y 20% de arcilla. Con un pH entre 6 y 7,5 y un porcentaje en materia orgánica oxidable mayor al 3%, y un contenido en carbonatos totales inferior al 10%.

Si el terreno tiene una pendiente adecuada o es muy permeable, puede que no sea necesario instalar un sistema de drenaje. Sin embargo, si el terreno es plano o poco permeable, es recomendable instalar tuberías de drenaje a unos 30-40 cm de profundidad y a una distancia de 3-5 cm entre sí, para evitar encharcamientos futuros.

La Hidroponía

La hidroponía es una tecnología para desarrollar plantas en solución nutritiva (SN) (agua y fertilizantes), con o sin el uso de un medio artificial (arena, grava, vermiculita, lana de roca, etc.) para proveer soporte mecánico a la planta (Lara, 1999).

De acuerdo con Lara (1999) citando a Jensen y Collins (1985) el sistema hidropónico líquido no tiene un medio de soporte; los sistemas en agregado tienen un medio sólido de soporte. Los sistemas hidropónicos han sido clasificados como abierto (una vez que la Solución Nutritiva es aplicada a las raíces de las plantas, ésta no es reusada), o cerrado (la SN excedente es recuperada, regenerada y reciclada).

El objetivo de la Agricultura de Ambiente Controlado (AAC) consiste en modificar el ambiente natural para obtener el óptimo desarrollo de la planta. La mayoría de los sistemas hidropónicos se encuentran en invernadero, con el fin de controlar la temperatura, reducir la pérdida de agua por evaporación, controlar las infestaciones de plagas y enfermedades y proteger a los cultivos de elementos del ambiente, como el viento y la lluvia. La hidroponía forma parte de la AAC, el aspecto más importante de la hidroponía es la SN, de ella depende la nutrición de las plantas y, por ende, la calidad y cantidad de la producción (Lara, 1999).

Los aspectos de la SN que en mayor medida influyen en la producción son:

(1) la relación mutua entre los cationes, (2) la relación mutua entre los aniones, (3) la concentración de los nutrimentos, debido a que éstos se encuentran en forma iónica, la concentración se expresa mediante la conductividad eléctrica (CE), (4) el pH, y (5) la temperatura (Lara, 1999).

Tipos de sistemas hidropónicos

La mayoría de las técnicas de producción en hidroponía son de sistema cerrado, la SN excedente se recupera y, luego de restablecer su composición química, es nuevamente utilizada. El uso más eficiente de la SN se presenta con el sistema cerrado. Las técnicas de producción en hidroponía se clasifican en función del medio de crecimiento en que se desarrolla el sistema radical de las plantas. Al conjuntar los criterios para clasificar a las técnicas hidropónicas propuestas por Steiner (1966), Jensen y Collins (1985) y Resh (1991), citados por Lara (1999) se pueden clasificar en: técnicas en medio líquido (no agregado), dentro de éstas se ubican a las técnicas en película

nutritiva (NFT), hidroponía en flotación y la aeroponía; en el grupo agregado se encuentran los cultivos en arena, grava (rocas porosas de origen volcánico como tezontle, perlita y zeolita), otros sustratos como la lana de roca, aserrín, turba y espumas sintéticas como el poliestireno.

Sistema NFT

Lara (1999) citando a Graves (1983), explica que la Nutrition Film Technique (NFT) consiste en mantener en circulación una fina capa de SN en las raíces de las plantas para proveer agua y nutrimentos, entre ellos el oxígeno. Las plantas crecen en canales formados por una película de polietileno, dentro de los cuales se depositan las raíces, se cubre de la luz y se hace fluir la SN. El plástico es completamente opaco en su interior, para evitar el desarrollo de algas, mientras que en su exterior es de color blanco para evitar el calentamiento de la SN y las raíces.

Sistema DWC

Flores-Aguilar et al (2021) citando a Yep y Zheng (2019) explican que la Deep Water Culture (DWC) también conocida como técnica de raíz flotante, mantiene a las plantas flotando en poliestireno con sus raíces sumergidas en solución nutritiva estacionaria. Esta técnica es la más sencilla y tiene el mayor rendimiento de biomasa vegetal. Además, tiene un impacto ambiental menor que otras técnicas hidropónicas. Una desventaja de la DWC es que se necesita añadir solución nutritiva constantemente para mantener los niveles de nutrientes óptimos. Esta adición requiere mediciones constantes de las variables del agua para evitar daño a las plantas por acumulación de nutrientes que no se absorbieron en el agua.

Otros sistemas

Las técnicas de producción en agregado son:

Cultivo en arena. Esta técnica es utilizada donde la arena es el material más fácilmente disponible como en los desiertos. Las partículas deben ser menores que 2 mm y mayores que 0.6 mm de diámetro. El principal sistema de riego que se asocia a esta técnica es el riego por goteo. Se deben aplicar de dos a cinco riegos por día, dependiendo de la especie cultivada, la etapa fenológica, la variedad y las condiciones del ambiente (temperatura y humedad relativa) (Lara, 1999).

Cultivo en grava. Lara (1999) citando a Resh (1991) detalla que su mayor uso es en los lugares donde abunda la roca volcánica. A esta técnica también se le conoce como subirrigación, debido

a la asociación de este tipo de riego con este sustrato. Las partículas de grava deben tener un diámetro entre 2 y 20 mm, más de la mitad del volumen debe tener partículas de aproximadamente 12 mm de diámetro. Las partículas deben tener consistencia para evitar su fractura, capacidad para retener humedad en su espacio libre, buen drenaje para facilitar la aireación de las raíces y no deben liberar sustancias que se solubilizan en el agua.

Cultivo en sustratos alternativos. Otros sustratos que han sido utilizados son: la turba, consiste en la descomposición parcial de plantas acuáticas, de pantanos o ciénagas. La composición química depende de la naturaleza de los materiales que le dan origen y la etapa de descomposición (Lara, 1999).

Entre los materiales que se utilizan en las diferentes técnicas hidropónicas, aunque algunos tienen ventajas sobre otros, todos han sido importantes en la producción. La selección de la técnica y del sustrato depende, además de las propiedades físicas y químicas de los materiales, de la disponibilidad y del precio (Lara, 1999).

La solución nutritiva

Lara (1999) citando trabajos anteriores de Steiner (1968), Carpena et al. (1987) y Adams, (1994) explica que la solución nutritiva (SN) consiste en agua con oxígeno y los nutrientes esenciales en forma iónica. En hidroponía, las necesidades nutrimentales que tienen las plantas son satisfechas con los nutrientes que se suministran en la SN. La cantidad de nutrientes que requieren las plantas dependen de la especie, la variedad, la etapa fenológica y las condiciones ambientales.

Cada especie vegetal que se cultiva en hidroponía requiere de una SN con características específicas. Lara (1999), apoyándose en los trabajos previos de Graves, (1983) y Steiner (1984), afirma que las principales características que influyen en el desarrollo de los cultivos y sus productos de importancia económica son: la relación mutua entre los aniones, la relación mutua entre los cationes, la concentración de nutrientes (representada por la CE), el pH, la relación $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$ y la temperatura de la SN.

Importancia de los sistemas hidropónicos en la agricultura

La necesidad de incrementar la producción de alimentos de origen vegetal, la restricción de tierras aptas para la producción agrícola, la escasez de agua o la mala calidad de ésta para usarla en la

agricultura, fueron algunas de las causas que estimularon a diversos investigadores a buscar alternativas para el desarrollo de las plantas. (Lara, 1999)

Conceptos y aplicaciones del IOT

Delgado (2024) citando a Reyes Yanes et al. (2020) explica que el internet de las cosas (IoT) permite eliminar los problemas tradicionales de conectividad entre sistemas. Uno de sus principales objetivos es lograr que los equipos industriales sean capaces de comunicarse entre sí y proporcionar una base sobre la cual autónomamente pueda tomar decisiones, basado en la toma de datos, sin intervención humana. En general, se han identificado tres áreas de trabajo: Interfaces de monitoreo remoto, aplicaciones de control remoto y tecnologías inalámbricas.

En general se encuentran tres niveles diferentes de estrategia de control:

- La estrategia de control más elemental se fundamenta en un enfoque local con comunicación externa, donde se mantiene una automatización tradicional. Este sistema posee la capacidad de enviar notificaciones y alarmas, así como de actuar sobre equipos específicos, ejecutando acciones predefinidas en respuesta a los niveles medidos por los sensores de los parámetros o variables del cultivo.
- Dando un paso adicional, se busca recopilar y analizar información de manera inalámbrica a través de servidores conectados a la nube. Esta información se transmite a un servidor remoto, permitiendo a los usuarios analizarla y tomar decisiones en tiempo real, todo ello de forma remota a través de una conexión a internet. Esta estrategia agrega una capa de flexibilidad y accesibilidad a la gestión del sistema, permitiendo ajustes y toma de decisiones desde cualquier ubicación.
- Por último, las estrategias de control más avanzadas aspiran a lograr sistemas autónomos mediante el empleo de técnicas inteligentes que abarcan desde la regresión lineal hasta la utilización de predicciones basadas en redes neuronales. En este enfoque, se busca que el sistema sea capaz de tomar decisiones autónomas y ajustar su funcionamiento en función de patrones y tendencias identificadas en los datos recopilados.

IoT en la agricultura

Pérez et al (2019) citando trabajos anteriores de Berlanga y García-Peñalvo (2016) explican que el uso de IoT en la agricultura se describe como una tecnología destinada a organizar la gran variedad de sensores para formar redes, a través de los cuales se puede recolectar información de tierras aptas para la agricultura y análisis en tiempo real de los resultados transmitidos a los agricultores para que puedan tomar las decisiones más adecuadas.

A nivel tecnológico, la aplicación de IoT en agricultura encuentra un gran aliado por parte de la computación en la nube para el tratamiento de datos en los siguientes usos descritos en Kiran (2015) citado por Pérez et al (2019): uso eficiente de los insumos como fertilizantes y pesticidas, reducción de costos, control de ganado, agricultura de interiores, invernaderos y establos, piscicultura, monitoreo del almacenamiento en tanques de agua, tanques de combustible, silos, asignación de recursos a demanda sin límite, mantenimiento y actualizaciones realizadas en Back-end, fácil y rápido desarrollo incluyendo la colaboración con otros sistemas en la nube.

La sostenibilidad en la agricultura

Guzmán-Alboresa et al. (2024) citando a USDA (2018), Zhang et al. (2002) y Shahzad (2019) explican que, de acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, las prácticas agrícolas actuales pueden alimentar a aproximadamente 8 millones de personas, pero pueden ser no sostenibles sin intervención tecnológica. Por otro lado, las tierras agrícolas están perdiendo su fertilidad debido a los cambios sociales en los estilos de vida y las actividades humanas. Esto podría provocar hambrunas debido a la escasa producción agrícola. Además, la seguridad alimentaria y la agricultura enfrentan desafíos importantes, como el declive de la fertilidad de los suelos, baja producción de los cultivos, fluctuaciones de temperatura, patógenos vegetales y la disminución de la eficacia de los productos agroquímicos (debido principalmente al uso innecesario de fertilizantes y pesticidas, y a la disminución de la disponibilidad de agua de riego).

Estrategias Metodológicas / Materiales y Métodos

Características edafoclimáticas

En la Tabla 2 se detallan las condiciones edafoclimáticas predominantes en Guayaquil durante los meses de octubre a enero del año 2024-2025, proporcionando así un marco de referencia para interpretar los resultados obtenidos en la investigación.

Tabla 2. Parámetros climáticos.

PARÁMETRO	VALOR
Temperatura	27° C
Humedad Relativa	80%
Precipitación	1025 mm
Altura	15 msnm
Clima	Húmedo – seco

Materiales

En esta investigación de tipo experimental exploratorio, se utilizaron semillas de la variedad híbrida de *Cynodon dactylon*. Se empleó un diseño completamente al azar multivariado con una población de siete bandejas sembradas con una densidad de 150 gramos. Se aplicaron tres soluciones nutritivas diferentes a las semillas. Para el desarrollo del estudio en campo, se utilizaron materiales como malla de sarán, torres de metal, sensores de temperatura ambiental y de sonda, pH y caudal, microaspersores, manguera, bandejas plásticas y diversas herramientas de ferretería y medición. También se contó con materiales de oficina básicos y equipos como taladro, balanza eléctrica, cámara fotográfica, dispositivo móvil y computadora. Los insumos incluyeron extracto de algas, Alibiol, Evergreen y cal agrícola. La modalidad de investigación abarcó un estudio exploratorio, cuyo objetivo fue obtener una visión general y preliminar del fenómeno poco investigado para identificar variables principales y establecer bases para estudios futuros (Calderón, 2009). El diseño de la investigación consistió en un DCA multivariado (MANOVA) analizado con el programa no paramétrico Kruskal-Wallis, verificando los datos con Infostat y cuatro softwares estadísticos (Traza de Pillai, Lambda de Wilks, Traza de Hotelling y Raíz mayor de Roy), aplicando la prueba de Tukey al 5% para evaluar significancia.

Tratamientos estudiados

En la Tabla 3 se detallan los tratamientos en estudio:

Tabla 3. Nomenclatura y descripción de los tratamientos

TRATAMIENTO	CULTIVO	SOLUCIÓN NUTRITIVA
T1	<i>Cynodon dactylon</i>	Extracto de Algas
T2	<i>Cynodon dactylon</i>	Alibiol
T3	<i>Cynodon dactylon</i>	Evergreen
T4	<i>Cynodon dactylon</i> (testigo)	Agua

Número de repeticiones

Para los tratamientos se establecieron 7 repeticiones:

Tabla 4. Número de repeticiones

Fuentes de variación	Grados de libertad
Repetición	r-7
Tratamientos	t-4
Error experimental	(t - 4) (r - 7)
Total	28

Delineamiento experimental

El diseño experimental incluyó cuatro tratamientos, diferenciados por el tipo de solución nutritiva suministrada. En cada tratamiento, se sembraron 150 gramos de semillas de *Cynodon dactylon* en bandejas con sustrato inerte. Con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados, cada tratamiento se repitió siete veces. Para cada repetición, se seleccionaron aleatoriamente 15 plantas, sobre las cuales se registraron todas las variables de estudio.

Tabla 5. Delineamiento experimental

Diseño de investigación	DCA – MULTIVARIADO
Número de tratamientos	4
Número de repeticiones	7
Área total del proyecto	35 m ²
Ancho del experimento	5
Largo del experimento	7
Ancho de la bandeja plástica	32 cm
Largo de la bandeja plástica	44 cm
Profundidad de la bandeja plástica	2,5 cm
Ancho del estante	1,35 cm
Largo del estante	2,0 cm
Longitud del estante	6,7 cm

Manejo del experimento

Instalaciones y equipo para su desarrollo

En la Facultad de Ciencias Agrarias, se cuenta con un invernadero, infraestructura diseñada y adecuada para los cultivos hidropónicos, compuesta por sarán, este impide el acceso de animales que podrían perjudicar de alguna manera, de esta manera actúa como protección para los cultivos. La estructura utilizada tiene dimensiones de 96 cm de ancho y 145 cm de largo, son torres metálicas, en las cuales se colocaron bandejas plásticas, donde se colocaron las semillas de trigo, para posteriormente hacer el riego con micro aspersores. Utilizando el fertirriego, con capacidad de micro aspersores de 31 litros por hora, cada 2 horas en ciclos de 2 riegos de 1 minuto cada uno.

Fórmula de FAO - 56 ETO

Se calculó la evapotranspiración potencial (Eto) utilizando la siguiente fórmula (Allen et al., 2006).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + Y \frac{900}{T+273} u(e_s - e_a)}{\Delta + Y(1 + 0,34 u_2)}$$

Tabla 6. Cálculo de FAO - 56 ETO

DATOS		
Mes	11	
Día	11	
Día Juliano	315	
Latitud	-2,2°	[Grados]
Altitud	4m	[m]
Temperatura máxima	30°	° C
Temperatura mínima:	26°	° C
RH max	81	[%]
RH min	72	[%]
Velocidad del viento a 2 m	2,63	m/s
Número de horas de insolación fuerte del día	4,1	[horas]
Eto	4,06 mm/día	

Lámina de riego

Para determinar la lámina de riego, es necesario conocer la evaporación mensual o diaria y el coeficiente de cultivo. Estos dos valores se multiplican para obtener la lámina requerida correspondiente al período mensual o diario (Brambila, 2022).

Fórmula:

LR: Eto x Kc (césped)

LR: 4,06 mm/día x 0.60

LR: 2.43 mm/día

Aplicación de las soluciones nutritivas

Para la aplicación de la solución nutritiva se utilizó una bomba manual de 2 litros. Para el uso de cada solución se le colocó 2 litros de agua con sus respectivas dosis en la bomba manual.

Tabla 7. Soluciones nutritivas

	ALGAS	ALIBIOL	EVERGREEN
Composición	<p>Ácido algínico 18.0%</p> <p>Nitrógeno (N) 1.0%</p> <p>Potasio (K₂O) 20.0%</p> <p>Materia orgánica 45.0%</p>	<p>Sólidos % 5.6 Materia Orgánica % 60</p> <p>Fibra % 20</p> <p>Nitrógeno % 2.0</p> <p>Fósforo % 1.0</p> <p>Potasio % 2.0</p> <p>Calcio % 0.5</p> <p>Azufre % 0.4</p>	<p>Nitrógeno, fósforo y potasio.</p> <p>Micronutrientes, algas, vitaminas y ácidos húmicos.</p>
Dosis	10 gramos	10 cm ³	10 cm ³

Sustrato

En el experimento se usó sustrato inerte compuesto de: Arcilla y Arena. Con un peso 1500 gramos en cada bandeja.

Riego

Se utilizó un sistema con microaspersores, operando cada 2 horas durante un período de 2 riegos al día, con una duración de 1 minuto por riego.

Variables de medidas Temperatura

Los datos se recopilaron mediante un sistema de IoT siete veces al día, registrando la información del primer y último riego del cultivo.

Humedad relativa

Los datos fueron recogidos mediante un sistema de IoT en siete intervalos diarios, tomándose información durante el primer y el último riego del cultivo.

Ph

Se obtuvieron datos a través de un sistema de IoT siete veces al día, registrando información tanto al inicio como al final de cada riego del cultivo.

VARIABLES DE ESTUDIO

Variable independiente del estudio:

- Pasto Bermuda (*Cynodon dactylon*)

Variable dependiente del estudio:

VARIABLES AGRONÓMICAS

- Altura de planta (cm)
- Numero de hojas (#)
- Longitud de hoja (cm)

PARÁMETROS DE MEDIDAS

- Temperatura
- Humedad relativa
- Flujo
- Ph

VARIABLES ANALIZADAS

En la presente investigación se evaluaron las siguientes variables cada 7 días:

En esta investigación, se evaluará la altura de la planta de *Cynodon dactylon* como un indicador del éxito del sistema hidropónico y la calidad del tapiz vegetal, ya que un crecimiento vigoroso en altura sugiere un buen establecimiento radicular y absorción de nutrientes, permitiendo optimizar las condiciones de cultivo y establecer protocolos de producción eficientes. El número de hojas por planta se utilizará como variable de respuesta para cuantificar el crecimiento vegetativo y determinar si el sistema hidropónico con IoT favorece la producción de un mayor número de hojas, lo cual es un signo de vigor y potencial de desarrollo. Adicionalmente, se medirá la longitud de la lámina foliar de las hojas completamente expandidas para obtener información sobre la tasa de

crecimiento foliar y la respuesta de las plantas a los diferentes tratamientos, esperando una relación positiva entre la longitud de la hoja, el área foliar y la capacidad fotosintética.

Resultados y discusión

Soluciones nutritivas

En relación con el uso de soluciones nutritivas presentó mejores resultados el tratamiento 3, con solución nutritiva Evergreen la cual demostró ser el más eficiente, en las variables altura de planta y longitud de hoja con promedios de 2,49 cm y 1,09 cm. Mientras que para la variable número de hojas también se observaron valores favorables con un promedio de 2,91.

Análisis de la varianza multivariado

Tabla 8. Análisis de la varianza multivariado

Wilks	F.V.	Estadístico	F	GI (num)	GI (den)	P
	Fecha	0,01	11,22	87	255	<0,0001
	Tratamiento	0,04	62,57	9	207	<0,0001
Pillai	F.V.	Estadístico	F	GI (num)	GI (den)	P
	Fecha	1,29	2,28	87	261	<0,0001
	Tratamiento	1,63	34,71	9	261	<0,0001
Lawley Hotelling	F.V.	Estadístico	F	GI (num)	GI (den)	P
	Fecha	77,65	74,67	87	251	<0,0001
	Tratamiento	7,93	73,71	9	251	<0,0001
Roy	F.V.	Estadístico	F	GI (num)	GI (den)	P
	Fecha	77,24	231,73	29	87	<0,0001
	Tratamiento	5,13	148,75	3	87	<0,0001

Utilizando el software H Kruskal Wallis, se realizó un análisis de varianza multivariado para examinar medidas no paramétricas mediante los enfoques de Wilks, Pillai, Lawley-Hotelling y

Roy. Este análisis permitió distinguir las variables agronómicas en función de la aplicación de diversas soluciones nutritivas.

Variables agronómicas

Altura de planta

Los valores de R^2 y R^2 Ajustado (0,95 y 0,93) indican que el modelo estadístico utilizado explica muy bien la variabilidad observada en la altura de planta. En otras palabras, las categorías FECHA y TRATAMIENTO juntos explican casi el 99% de las diferencias en la altura de las plantas. El coeficiente de variación CV es de (5,87).

El modelo en su conjunto es altamente significativo ($p < 0.0001$), lo que confirma que al menos uno de los tratamientos influye significativamente en la altura de planta.

Tabla 9. Coeficiente de variación para la altura de planta

Variable	N	R 2	R2 Aj	CV
Altura de planta (cm)	120	0,95	0,93	5,87

Tabla 10. Análisis de varianza en altura (cm)

F.V	SC	gl	CM	F	p -valor
Modelo	29,34	32	0,92	51,78	<0,0001
Fecha	24,28	29	0,84	47,28	<0,0001
Tratamiento	5,07	3	1,69	95,36	<0,0001
Error	1,54	87	0,02		
Total	30,88	119			
CV %	5,87				

N.S. No Significativo.

Se observaron valores significativos en la variable altura de planta al utilizar las soluciones nutritivas: Extracto de Algas, Alibiol y Evergreen. El tratamiento con Extracto de Algas obtuvo

un promedio de 2,33, el tratamiento con Alibiol alcanzó un promedio de 2,31 y el tratamiento con Evergreen mostró un promedio de 2,49, mientras que el Testigo tuvo un promedio de 1,93. El análisis estadístico utilizando el programa INFOSTAT y aplicando la prueba de Tukey confirmó que el tratamiento con Evergreen resultó en el mayor promedio, con 2,49.

Test: Tukey Alfa = 0,05 DMS = 0,09000 Error: 0,0177 gl: 87

Tabla 11. Prueba Tukey de la variable altura de planta

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Testigo	1,93	30	0,02	A
Alibiol	2,31	30	0,02	B
Algas	2,33	30	0,02	B
Evergreen	2,49	30	0,02	C

Medias con una letra común no son significativas diferentes ($p > 0,05$)

En un estudio realizado por Eslava et al. (2022) donde buscaron implementar un sistema hidropónico para la producción de FVH de arroz (*O. Sativa*), gramínea poco convencional para alimentación animal, evaluaron las variables altura total (cm), altura del tallo (cm), longitud de la hoja principal (cm), relación hoja/tallo y cantidad de hojas/plántula. La evaluación agronómica tuvo una duración de 38 días para la cosecha principal (CP) y 21 días para la soca (CS). Se observó un constante crecimiento de las plántulas hasta el día 26 postsiembra; luego, se halló que el crecimiento en altura fue mínimo. En mi investigación, logré un promedio de 2,49 cm de altura de planta a los 30 días, siendo el tratamiento 3 con la solución nutritiva Evergreen el que mostró mejores resultados.

Número de hojas

Para la variable Número de hojas los valores de R^2 y R^2 Ajustado fueron de 0.98 con un coeficiente de variación de 4.56%. El modelo en su conjunto arrojó valores significativos ($p < 0.0001$) en un total de 120 tablas, lo que confirma que al menos uno de los tratamientos influye significativamente en el número de hojas.

Tabla 12. Coeficiente de variación para el numero de hojas

Variable	N	R 2	R2 Aj	CV
n° Hojas	120	0,98	0,98	4,56

Tabla 13. Análisis de varianza en número de hojas

F.V	SC	gl	CM	F	p -valor
Modelo	81,23	32	2,54	161,78	<0,0001
Fecha	79,78	29	2,75	175,32	<0,0001
Tratamiento	1,45	3	0,48	30,81	<0,0001
Error	1,37	87	0,02		
Total	85,59	119			
CV %	4,56				

N.S. No Significativo.

Se observaron valores significativos en la variable número de hojas al utilizar las soluciones nutritivas: Extracto de Algas, Alibiol y Evergreen. El tratamiento con Extracto de Algas obtuvo un promedio de 2.72, el tratamiento con Alibiol alcanzó un promedio de 2.77 y el tratamiento con Evergreen mostró un promedio de 2.91, mientras que el Testigo tuvo un promedio de 2.60. El análisis estadístico utilizando el programa INFOSTAT y aplicando la prueba de Tukey confirmó que el tratamiento con Evergreen resultó en el mayor promedio, con 2.91.

Test: Tukey Alfa = 0,05 DMS = 0,08472 Error: 0,0157 gl: 87

Tabla 14. Prueba Tukey de la variable número de hojas

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Testigo	2,60	30	0,02	A
Algas	2,72	30	0,02	B
Alibiol	2,77	30	0,02	B
EVG	2,91	30	0,02	C

Medias con una letra común no son significativas diferentes ($p > 0,05$)

Hasta el día 28 de edad del FVH, las plántulas presentaron una a dos hojas; en los días siguientes algunas plántulas tenían hasta tres hojas. Referente a la CS, visualmente rebrotó aproximadamente el 15 % del área del tapete radicular, esto de manera dispersa por la bandeja (Eslava et al., 2022).

En mi investigación, logré un promedio de 2.91 respecto a la variable número de hojas a los 30 días, siendo el tratamiento 3 con la solución nutritiva Evergreen el que mostró mejores resultados.

Longitud de hoja

Para la variable Longitud de hoja los valores de R^2 y R^2 Ajustado fueron de 0.91 y 0.88 con un coeficiente de variación de 10.47%. El modelo en su conjunto es altamente significativo ($p < 0.0001$) en un total de 120 tablas, lo que confirma que al menos uno de los tratamientos influye significativamente en la variable longitud de hoja.

Tabla 15. Coeficiente de variación para la longitud de hoja

Variable	N	R 2	R2 Aj	CV
n° Hojas	120	0.91	0,88	10.47

Tabla 16. Análisis de varianza en longitud de hoja

F.V	SC	gl	CM	F	p -valor
Modelo	7,46	32	0,23	28,82	<0,0001
Fecha	4,71	29	0,16	20,08	<0,0001
Tratamiento	2,75	3	0,92	113,31	<0,0001
Error	0,70	87	0,01		
Total	8,16	119			
CV %	10,47				

N.S. No Significativo.

Se observaron valores significativos en la variable longitud de hoja al utilizar las soluciones nutritivas: Extracto de Algas, Alibioli y Evergreen. El tratamiento con Alibioli obtuvo un promedio de 0.73, el tratamiento con Extracto de Algas alcanzó un promedio de 0.91 y el tratamiento con Evergreen mostró un promedio de 1.09, mientras que el Testigo tuvo un promedio de 0.71. El

análisis estadístico utilizando el programa INFOSTAT y aplicando la prueba de Tukey confirmó que el tratamiento con Evergreen resultó en el mayor promedio con 1.09.

Test: Tukey Alfa = 0,05 DMS = 0,06083 Error: 0,0081 gl: 87

Tabla 17. Prueba Tukey de la variable longitud de hoja

Tratamiento	Medias	n	E.E.	
Testigo	0,71	30	0,02	A
Alibiol	0,73	30	0,02	A
Algas	0,91	30	0,02	B
EVG	1,09	30	0,02	C

Medias con una letra común no son significativas diferentes ($p > 0,05$)

En el rango de 18 a 22 días de edad del FVH, la longitud de la hoja se evidencia aproximadamente de 1,5 a 2,5 veces la altura del tallo de la plántula, posteriormente esta relación disminuye a casi 2,0 veces la altura del tallo, esto debido a que el tallo creció más respecto al periodo del día 18 a 22 de vida (Eslava et al., 2022).

El contenido de nitrógeno en los materiales hidropónicos es mayor a edades tempranas (10 días). Lo anterior se debe a que en las plantas jóvenes y el crecimiento está relacionado principalmente con un aumento en la superficie de las hojas que son órganos ricos y nitrógeno (Muller et al., 2005). En mi investigación, logré un promedio de 1.09 respecto a la variable longitud de hoja a los 30 días, siendo el tratamiento 3 con la solución nutritiva Evergreen el que mostró mejores resultados.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación demostraron la viabilidad de la macropropagación sostenible de pasto Bermuda bajo un sistema hidropónico con tecnología IoT. Al emplear microaspersores y la solución nutritiva Evergreen, se lograron promedios favorables en las variables agronómicas de estudio. Para evaluar diferencias significativas, se aplicó la prueba de Tukey ($p > 0,05$) donde la altura de planta alcanzó un promedio de 2.49 cm, el número de hojas

fue de 2.91 por planta y la longitud de hoja promedio fue de 1.09 cm. Estos resultados, respaldados por el análisis estadístico, evidencian el éxito del sistema hidropónico en promover el crecimiento vegetativo del pasto Bermuda, contribuyendo a una producción más eficiente y sostenible."

El estudio determinó una evapotranspiración (ET₀) de 4.06 mm/día para el cultivo, lo que permitió establecer una lámina de riego óptima de 2.43 mm/día utilizando microaspersores de 31 litros por hora. El análisis multivariado, mediante la prueba de Kruskal-Wallis y el análisis MANOVA, reveló diferencias significativas ($p < 0.0001$) en las variables evaluadas, demostrando la eficacia del sistema de riego en optimizar el suministro hídrico y nutricional del cultivo.

La integración de la tecnología IoT en el cultivo de césped Bermuda permitió avanzar hacia una agricultura de precisión. El sistema de monitoreo en tiempo real de variables como pH, temperatura y humedad facilitó la identificación temprana de posibles problemas y la implementación de medidas correctivas oportunas. Los resultados obtenidos demuestran el potencial de esta tecnología para mejorar la productividad y la calidad de los cultivos.

Bibliografía

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma.
- Beltrano, J., & Giménez, D. (2015). *Cultivo en hidroponía* (Primera ed.). Buenos Aires, Argentina.
- Brambila, Á. (2022). Obtenido de Agro Excelencia: <https://agroexcelencia.com/tips-para-el-calculo-de-lamina-de-riego-en-aguacate/>
- Calderón, C. (2009). Definición de los Tipos de estudio. En P. Salinas, & M. Cárdenas, *Métodos de investigación social* (Segunda ed., págs. 57-69). Quito: Ediciones Universidad Católica del Norte. Obtenido de <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/55363.pdf>
- Carrieri, S. A., Codina, R. A., & Llera, J. (2005). Determinación del coeficiente de nascencia en coberturas cespitosas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 1, 41-54.
- Delgado Martínez, R. (2024). Diseño de sistema de acuaponía automatizado para producción agrícola y piscícola a escala comercial. *Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de

<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/86030/1072657656.2024.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

- Eslava Pedraza, A., Carreño Correa, R., & Salazar Mercado, S. (2022). Implementación de un sistema hidropónico para la producción de *Oryza sativa* como forraje con potencial en alimentación animal. *TecnoLógicas*, 25(55). doi:<https://doi.org/10.22430/22565337.2415>
- FAO. (2016). *Agricultura sostenible: Una herramienta para fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe*. Obtenido de www.fao.org
- Flores-Aguilar, P., García-Trejo, J., & Martínez-Guido, S. (2021). Acuaponía: una alternativa versátil e integral en la producción de alimentos para el entorno mexicano. *Digital Ciencia@UAQRO*(1), 43 - 53. Obtenido de <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/101>
- Guzmán-Alboresa, J., Matuz-Cruz, M., Arana-Llanes, J., López-Carrasco, E., Gómez-Vázquez, V., & González-Cárdenas, N. (2024). Avances y perspectivas de la agricultura de precisión para la sostenibilidad agrícola. *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*, 12(24). doi:<https://doi.org/10.29057/xikua.v12i24.12790>
- Lara, A. (1999). Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra Latinoamericana*, 17(3), 221-229. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57317306.pdf>
- Laurencena, M. I., Carponi, M. S., Reinoso, P. D., Butus, M., Scorciapino, C., Galli, M., & Pérez, G. (2009). Comportamiento de céspedes de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. en Paraná, Entre Ríos, Argentina. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, XX(39), 129-141. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14512426007>
- Monje, R. (2006). *Manejo de céspedes con bajo consumo de agua*. Obtenido de <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/39543/MANEJO%20DE%20CESPEDES.pdf>
- Muller, L., Manfron, P., Santos, O., Medeiros, S., Haut, V., Dourado, D., . . . Bandeira, A. (2005).
- Oakley, L. (1999). Botánica y sistemática de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 19 (1), 3-10. Obtenido de <http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/facultadagronomia/1999oakleylj.pdf>

- Pérez, M., Mendoza, M., & Suarez, M. (2019). Paradigma IoT: desde su conceptualización hacia su aplicación en la agricultura. *Revista ESPACIOS*, 40(18), 6.
- Portocarrero, L., Palacios, J., & Jaulis, J. (2019). Producción de césped Bermuda (*Cynodon dactylon*) bajo sistema de tepes en sustratos provenientes del reciclaje de residuos urbanos e industriales. *Anales Científicos*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=25669>
- United States Department of Agriculture (USDA). (2000). *USDA Plants database*. Obtenido de <https://plants.usda.gov/home>