

Efecto de la aplicación de soluciones nutritivas en la calidad bromatológica del forraje verde hidropónico de *Avena sativa* y *Hordeum vulgare*

Effect of applying nutritive solutions on bromatological quality of the hydroponic green forage of *Avena sativa* and *Hordeum vulgare*

José Manuel Salvador-Castillo¹ , Martín Alejandro Bolaños-González^{2†} ,
Ana Karen Cedillo-Aviles¹ , Yaneth Vázquez-Chena¹ ,
Sergio Antonio Varela-de Gante¹  y José Luis Meza-Discua² 

¹ Programa Mexicano del Carbono, A.C. Calle Chiconautla no. 8 Interior A, Colonia Lomas de Cristo, 56230 Texcoco, Estado de México, México.

² Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, 56230 Texcoco, Estado de México, México.

† Autor para correspondencia (martinb72@gmail.com)

RESUMEN

La calidad del forraje se determina mediante un análisis bromatológico, el cual mide variables como: peso seco (PS), proteína bruta (PB), fibra detergente ácido (FDA), fibra detergente neutro (FDN) y cenizas. La calidad es importante, ya que interviene en aspectos relacionados con la nutrición animal y su productividad; y en efectos ambientales como la generación de metano (CH₄). Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del agua potable y dos soluciones nutritivas, con diferente relación nitrato/amonio (NO₃⁻/NH₃⁺); en el peso fresco (PF) y la calidad bromatológica del forraje verde hidropónico (FVH) de avena (*Avena sativa*) y cebada (*Hordeum vulgare*), muestreado a los 5, 10, 15, 20, 25 y 30 días después de la siembra. Se midieron las variables PF, PS, PB, FDN, FDA y cenizas. Para el análisis estadístico se utilizó un modelo factorial 3×2 (tres soluciones nutritivas y dos especies de semilla) con medidas repetidas en el tiempo; y la comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). De acuerdo con el análisis de varianza ($P \leq 0.05$), se observó que: i) el tiempo tuvo un efecto significativo en todas las variables estudiadas; ii) las soluciones nutritivas solo afectaron a la PB, y iii) la especie utilizada tuvo efecto en la PB, FDN, FDA y cenizas. Acorde con la comparación de medias se observó que: i) existió un incremento en el valor de todas las variables conforme

avanzó el tiempo de muestreo; ii) el porcentaje de PB fue mayor con las soluciones nutritivas que con el agua potable, pero no se observó diferencia entre las soluciones; y iii) el FVH de avena tuvo mayores valores de PB, FDN, FDA y cenizas; por lo cual se concluyó que dicho FVH posee mejores características nutritivas para el ganado que el FVH de cebada.

Palabras clave: avena, análisis bromatológico, calidad del forraje, cebada.

SUMMARY

Forage quality is important since it intervenes in aspects related to animal nutrition and productivity and in environmental effects such as methane generation (CH₄). Forage quality is determined by a bromatological analysis, which measures variables such as: dry weight (DW), crude protein (CP), acid detergent fiber (ADF), neutral detergent fiber (NDF) and ash. Thus, the objective of this study is to evaluate the effects of drinking water and two nutritional solutions with different nitrate/ammonium (NO₃⁻/NH₃⁺) ratios on fresh weight (FW) and bromatological quality of hydroponic green forage (HGF). Oats (*Avena sativa*) and barley (*Hordeum vulgare*) were sampled at 5, 10, 15, 20, 25 and 30 days after planting. The variables FW, DW, CP, NDF, ADF, and ash were measured.

Cita recomendada:

Salvador-Castillo, J. M., Bolaños-González, M. A., Cedillo-Aviles, A. K., Vázquez-Chena, Y., 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*, 40, 1-16. e996. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.996>

Recibido: 5 julio de 2021. Aceptado: 17 de diciembre de 2021.

Artículo. Volumen 40, febrero de 2022.

For the statistical analysis, a 3×2 factorial model (three nutritive solutions and two seed species) was used with repeated measurements over time and Tukey's comparison of means ($P \leq 0.05$). According to the analysis of variance ($P \leq 0.05$) (i) time had significant effects on all the variables studied; (ii) nutrient solutions only affected CP; and (iii) the species used had an effect on CP, NDF, ADF and ash. Consistent with the comparison of means, (i) an increase in value of all variables was observed as sampling time progressed; (ii) CP percentage was higher with nutritive solutions than with drinking water, but no difference was observed between solutions; and (iii) hydroponically-grown (HGF) oats had higher CP, NDF, ADF and ash values. To conclude, HGF oats has better nutritional characteristics for livestock than HGF barley.

Index words: *oats, bromatological analysis, forage quality, barley.*

INTRODUCCIÓN

La ganadería ocupa cerca del 30% de la superficie terrestre (3900 millones de hectáreas) y debido al crecimiento de dicho sector, el requerimiento de tierra destinado a la producción de alimentos para el ganado se incrementa (Pérez-Espejo, 2008). De acuerdo con Foley *et al.* (2005), las tierras de cultivo y los pastizales ocupan alrededor del 40% de la superficie del planeta y su expansión ha causado la pérdida neta de ~7 a 11 millones de km² de bosques en los últimos 300 años. En ese contexto, cobra importancia la producción de forraje verde hidropónico (FVH), debido a que se utiliza menos espacio para su producción. El FVH es un tipo de forraje que se produce en invernadero, en un medio acuoso y sin necesidad de suelo (Birgi, Gargaglione y Utrilla, 2018). Esta técnica de producción de forrajes, según la FAO (2001), es complementaria a la producción tradicional, ya que permite incrementar la producción y mantener una oferta constante durante todo el año; similar a técnicas como el pastoreo tecnificado y la conservación de forrajes.

Según López-Aguilar, Murillo y Rodríguez (2009), el FVH de maíz puede tener los mismos rendimientos que las principales especies forrajeras, como la alfalfa, pero en una superficie 100 veces menor y usando hasta 50 veces menos agua. Asimismo, Naik, Swain y Singh (2015) señalan que es posible producir un kilogramo de FVH de maíz en siete días utilizando de 1.5 a 3.0 L

de agua, mientras que Al-Karaki (2011) obtuvo un kilogramo de FVH de cebada utilizando 1.26 L de agua. En ese sentido, según Al-Karaki y Al-Momani (2011), mediante la producción de FVH se puede obtener la misma cantidad de forraje que la producida de forma convencional, pero ahorrando 98% de agua, contribuyendo a disminuir de manera sustancial la huella hídrica (HH), lo que tiene importancia fundamental en el uso eficiente de los recursos hídricos y la disminución del impacto en el ambiente, ya que de acuerdo con Chapagain y Hoekstra (2004), la HH promedio cuantificada para producir 1000 kg de carne de bovino, cerdo, cabra, oveja y pollo es de 15 497; 4856; 4043; 6143 y 3918 m³, respectivamente.

Juárez-López *et al.* (2013), indican que en la producción de FVH se realizan riegos con agua potable hasta que los brotes alcanzan una altura de 3 a 4 cm; momento a partir del cual se deben aplicar riegos con una solución nutritiva para garantizar el óptimo crecimiento del forraje. Según Núñez-Torres y Guerrero-López (2021) el riego con solución de nutrientes permite incrementar la producción de biomasa, mejorar la calidad nutricional y optimizar el tiempo de corte. En ese sentido, Preciado *et al.* (2014) al evaluar dos soluciones nutritivas, una elaborada de forma inorgánica y otra de forma orgánica (lixiviado de vermicomposta), y agua potable como testigo; concluyeron que las soluciones nutritivas incrementaron el rendimiento ($\geq 19\%$), el uso eficiente del agua ($\geq 50\%$) y la calidad nutricional en el FVH de maíz. A su vez, Maldonado, Álvarez, Cristóbal y Ríos (2013); al evaluar soluciones con diferente relación nitrato/amonio, para descartar posibles efectos tóxicos por exceso de nitratos y usando agua potable como testigo en FVH de trigo, cosechado a los 15 días después de la siembra (DDS), encontraron que una relación nitrato/amonio de 7.0/1.4 fue óptima, ya que con está obtuvieron un porcentaje de proteína de 17.9 y una concentración de nitratos segura para la alimentación de los animales (3348 mg kg⁻¹).

De acuerdo con Chavan, Kadam y Beuchat (1989) el mejor aporte de nutrientes del FVH se debe a la descomposición de compuestos complejos a formas más simples, la transformación de constituyentes esenciales y la descomposición de componentes nutricionales indeseables. El mayor aporte nutricional del FVH, ha permitido incrementos en la producción de alimentos de origen animal. Según Naik *et al.* (2015), al alimentar vacas lecheras con 5 a 10 kg de FVH de

maíz al día, se incrementa la digestibilidad de nutrientes proporcionados en la dieta, lo cual podría contribuir a un incremento de entre el 8 y el 13% en la producción de leche. En ese sentido, López-Aguilar *et al.* (2009) encontraron, al reemplazar la dieta de cabras con un 70 y 25% de FVH de maíz cosechado a los 14 DDS, ganancias de peso vivo de 135 y 144 g día⁻¹, respectivamente. Por su lado, García-Carrillo, Salas, Esparza, Preciado y Romero (2013) obtuvieron un incremento del 16% en la producción de leche de cabra al alimentarlas con una dieta de 30% de FVH de maíz, regado con agua potable y cosechado a los 14 DDS, y 70% de alfalfa henificada. Además, reportaron un incremento en el porcentaje de proteína de la leche, atribuido a la mayor cantidad de proteína en la dieta que incluía forraje verde hidropónico.

En contra parte, se ha encontrado que en periodos cortos de crecimiento la cantidad de materia seca del FVH disminuye con respecto al peso seco inicial de las semillas (Dung, Godwin y Nolan, 2010), situación que genera dudas con respecto a las ventajas de alimentar al ganado con FVH; por ejemplo, Fazaeli, Golmohammadi, Tabatabayee y Asghari (2012) señalan que la menor cantidad de materia seca (MS) en el FVH puede limitar la aceptación por el ganado, y que el costo de la producción se incrementa.

La ganadería contribuye con un 56% a las emisiones de CO₂ equivalente en el sector agropecuario; 40% por la fermentación entérica de rumiantes y 16% por el estiércol que queda en los pastizales (FAO, 2016) y, por otra parte, existe evidencia de impactos negativos, provocados por el cambio climático, en todo el proceso productivo de los alimentos de origen animal (Godde, Mason, Mayberry, Thornton y Herrero, 2021) que afectan la productividad, salud y biodiversidad de los animales, así como la calidad y cantidad del suministro de forrajes y la capacidad de carga de los pastizales (FAO, 2016). Debido a esto y a lo mencionado en párrafos anteriores, cobra especial importancia el estudio de las técnicas hidropónicas para la producción de forrajes, que hagan más eficiente el uso de los recursos en la producción de alimentos para el ganado. Así, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de dos soluciones nutritivas y de agua potable (testigo) en la ganancia de peso fresco (kg m⁻²) y la calidad bromatológica del FVH de avena (*Avena sativa*) y cebada (*Hordeum vulgare*), muestreado a los 5, 10, 15, 20, 25 y 30 días después de la siembra.

MATERIALES Y MÉTODOS

Periodo y Localización del Área de Estudio

La fase experimental se realizó del 10 de octubre al 10 de noviembre del año 2013 en un invernadero ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, municipio de Texcoco de Mora, Estado de México (19° 29' N, 98° 53' O, y 2240 m de altitud). Dicho invernadero tenía 25, 12 y 6 m de largo, ancho y alto, respectivamente. Fue construido con cubierta de polietileno blanco y malla anti-insectos en las caras laterales y en la apertura cenital, con un sistema de ventilación manual.

Especies Utilizadas

Para producir el forraje verde hidropónico (FVH) se utilizaron semillas de avena (*Avena sativa*) y cebada (*Hordeum vulgare*), ambas con cutícula. De cada especie se utilizaron 50 kg de semillas, las cuales fueron preseleccionadas, con la finalidad de eliminar piedras, paja o semillas quebradas. Posteriormente, se realizó una prueba de germinación con cuatro grupos de 100 semillas/especie. El promedio de germinación fue de 70 y 68% para avena y cebada, respectivamente.

Siembra

Al inicio del proceso se pesaron 900 g de semilla/especie y se colocaron en bolsas de tela, dentro de éstas se realizó la desinfección, el enjuague y el remojo. El proceso de desinfección consistió en colocar las bolsas en una tina de 200 L con una solución de hipoclorito de sodio (cloro) al 1% durante 2.5 min; enseguida se enjuagaron con agua potable durante 2 min para eliminar el exceso de cloro. A continuación, las bolsas se dejaron en remojo, con agua potable, durante dos lapsos de 12 h, separados por una hora para permitir la aireación de las semillas (Juárez-López *et al.*, 2013). Después del remojo se procedió a realizar la siembra, para ello, las semillas fueron colocadas sobre charolas de plástico con dimensiones de 0.56 m de largo, 0.38 m de ancho y 0.08 m de alto, las cuales no contenían ningún tipo de sustrato. Sobre cada charola se dejó una capa uniforme de semillas con un espesor aproximado de 1.5 cm, con lo que se obtuvo una densidad de siembra de 4.23 kg m⁻².

Periodo de Crecimiento del Forraje Verde Hidropónico (FVH)

Después de la siembra, las charolas con semillas de avena y de cebada se dejaron durante 5 días en un solo estante. Este fue construido con perfil tubular rectangular (PTR) y cubierto con polietileno blanco de 200 micras de espesor, con dimensiones de 1.3×0.6×2.3 m de largo, ancho y alto, respectivamente; con capacidad para almacenar 54 charolas. Durante ese periodo, el riego de las charolas/especies se realizó con agua potable. El sistema de riego funcionó con una bomba de 0.5 Hp y un timmer, con el cual se programaron riegos de un minuto a las 10:00, 11:00 y 12:00 a. m., y a las 14:00, 16:00, 17:00 y 18:00 p. m., mientras que a las 13:00 y 15:00 p. m. se aplicó un riego de 2 minutos.

A los 5 días después de la siembra (DDS) las charolas se trasladaron a tres anaqueles construidos con PTR de una pulgada de grosor, esto con el fin de realizar el primer muestreo e iniciar las aplicaciones de riego con las soluciones nutritivas. Los anaqueles tenían 6.00×1.20×2.20 m de largo, ancho y alto, respectivamente; además de cuatro entrepaños para colocar charolas a los 0.45, 0.90, 1.35 y 1.80 m de altura con respecto al nivel del suelo. Para eliminar el exceso de agua de las charolas se dejó una pendiente de 2.5 cm. La mitad de los estante se utilizó para colocar contenedores con semillas de avena y cebada en la parte restante. Por cada entrepaño del estante se colocaron tres charolas de avena y tres de cebada. De manera que, cada grupo de tres charolas conformaron la unidad experimental.

Para el riego, en los estantes de crecimiento, se instaló una línea de microaspersores con una

separación de 35 cm por entrepaño. El sistema funcionó de forma independiente para cada solución nutritiva (agua potable, solución “A” y solución “B”) mediante bombas de 1 Hp. En esta etapa se realizaron riegos de un minuto de duración, a las 9:00, 11:00 y 12:00 a. m., y 14:00 y 18:00 p. m.; mientras que a las 10:00 a. m. y 13:00, 15:00 y 17:00 p. m.; se realizaron riegos con una duración de 2 min. La aplicación de riegos se realizó en el mismo horario, para todos los tratamientos, desde los 6 hasta los 30 días después de la siembra.

Para determinar la duración de los riegos en el estante provisional y de crecimiento, se tomaron en cuenta las recomendaciones de Juárez-López *et al.* (2013). Cabe mencionar que a partir de los 25 DDS se observó la presencia de un hongo, el cual no fue identificado, para su control se aplicó el fungicida Swith 62.5 gwg, durante los días restantes del experimento.

Elaboración de las Soluciones Nutritivas

Las soluciones nutritivas A y B se prepararon en tinacos de 1 m³ de capacidad, tomando como base el análisis de agua del lugar, en el cual se encontraron los siguientes resultados: pH de 7.4, conductividad eléctrica de 0.054 mS cm⁻¹, bicarbonatos (HCO₃⁻) 0.52, cloro (Cl⁻) 0.05 y sodio (Na⁺) 0.20 meq L⁻¹. Las soluciones nutritivas se prepararon con base en la metodología de Steiner (1961), a un pH de 6.5, variando la relación nitrato/amonio (NO₃⁻/NH₄⁺) de 7.0/1.4 (Solución A) y 7.3/0.7 (Solución B), similar a las relaciones utilizadas por Maldonado *et al.* (2013) para producir FVH de trigo. La concentración de macronutrientes de las soluciones estudiadas se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Concentración de macronutrientes de las soluciones probadas.

Table 1. Macronutrient concentration of the tested solutions.

Soluciones	Concentraciones						
	Ca ²⁺ Calcio	Mg ²⁺ Magnesio	K ⁺ Potasio	NH ₄ ⁺ Amonio	NO ₃ ⁻ Nitrato	H ₂ PO ₄ ⁻ Fosfato	SO ₄ ²⁻ Sulfato
	----- meq L ⁻¹ -----						
Agua potable	0.18	0.18	0.05	ND [†]	ND	ND	0.05
Solución “A”	4.89	2.63	4.2	1.4	7.0	1.0	5.85
Solución “B”	5.6	2.5	4.1	0.7	7.3	1.0	5.36

[†] Sin dato.

[‡] No data.

En la elaboración de las soluciones nutritivas se utilizaron las siguientes fuentes: multi NPK (13-2-44), fosfato monopotásico (KH_2PO_4), sulfato de potasio (K_2SO_4), nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), nitrato de amonio (NH_4NO_3) y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Además, se elaboró una solución madre de microelementos para complementar a las soluciones A y B. Para ello se usó sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), sulfato de manganeso ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sulfato de zinc ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y bórax. Esto con la finalidad de obtener 0.5, 0.2, 0.1, 0.2 y 0.01 mg L⁻¹ de hierro (Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), zinc (Zn^{2+}), boro (B) y cobre (Cu^{2+}), respectivamente (Maldonado *et al.*, 2013).

Tratamientos

Los tratamientos estudiados fueron: T1 (avena + agua potable), T2 (avena + solución "A"), T3 (avena + solución "B"), T4 (cebada + agua potable), T5 (cebada + solución "A") y T6 (cebada + solución "B") y cuatro repeticiones. A los diferentes niveles del estante se les consideró como una repetición del tratamiento. De forma adicional, para evitar el efecto de orilla, se colocaron dos charolas con semilla de trigo (*Triticum* spp.) en los extremos de cada nivel del anaquel.

Toma de Muestras del Forraje Verde Hidropónico (FVH)

Debido a que se contemplaron seis fechas de muestreo (5, 10, 15, 20, 25 y 30 DDS), de cada charola que conformó la unidad experimental se tomaron dos muestras, así que; se asignó la mitad de una charola para extraer una muestra. La toma de muestras se realizó de forma aleatoria en cada tratamiento. Para extraer la muestra se utilizó un cuadrado de madera de 100 cm² (10×10 cm), de acuerdo a la metodología de Almeida *et al.* (2021), y usando un cúter previamente desinfectado. En las diferentes fechas de muestreo se obtuvieron cuatro muestras/tratamiento, una por cada nivel del estante.

VARIABLES EVALUADAS

Las muestras se colocaron sobre una charola de aluminio, y se determinó el peso fresco (PF) usando

una balanza digital con resolución de 1 g. Luego, se colocaron en bolsas de papel perforadas para secarlas en una estufa de aire forzado a 70 °C durante 72 h. Una vez secas, se determinó el peso seco (PS) y se molieron en un molino tipo Wiley con criba de 1 mm. Después, se evaluaron las siguientes variables: proteína bruta (PB), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y cenizas. Los análisis de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Nutrición de Rumiantes del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo. Para determinar la FDN y FDA se utilizó el procedimiento descrito por Van Soest, Robertson y Lewis (1991). El porcentaje de PB se estimó con el método Kjeldahl y el de cenizas mediante la combustión en una mufla a 550 °C. Los métodos utilizados se siguieron de acuerdo con el manual elaborado por Sosa (1979).

Diseño Experimental y Análisis Estadístico

Los resultados se analizaron mediante un modelo factorial 3×2 con medidas repetidas en el tiempo (Bandera y Pérez, 2018), en donde los factores fueron tres soluciones nutritivas (agua potable, solución "A" y solución "B") y dos especies de semilla (avena y cebada). El modelo lineal mixto general utilizado se muestra a continuación en la Ecuación 1:

$$Y_{ijk} = m + S_i + E_j + T_k + R(S_i \times E_j) + SE_{ij} + ST_{jk} + ET_{jk} + SET_{ijk} + e_{ijkl} \quad (1)$$

donde: Y_{ijk} es la variable respuesta; m es la media general; S_i es el efecto de la i -ésima solución nutritiva en la variable respuesta; E_j es el efecto de la j -ésima especie en la variable respuesta; T_k es el efecto del k -ésimo tiempo en la variable respuesta; $R(S_i \times E_j)$ es el efecto de la repetición anidada en la interacción de la solución nutritiva y la especie; SE_{ij} es la interacción solución nutritiva×especie; ST_{jk} es la interacción solución nutritiva×tiempo; ET_{jk} es la interacción especie×tiempo; SET_{ijk} es la interacción de la solución nutritiva×la especie×el tiempo, y e_{ijkl} es el error aleatorio.

Los datos de las variables estudiadas se analizaron con el programa SAS (Statistical Analysis System versión 9.0.) (SAS, 2009). En el caso de los datos de las variables PB, FDN, FDA y cenizas se realizó la transformación con la función arcosen \sqrt{y} , ya que dicha información estaba expresada en porcentaje y,

por lo tanto, sigue una distribución binomial; es decir, su distribución se aparta de la normalidad cuando sus proporciones son grandes o pequeñas (Ramiro, Caballero y Herrera, 2017). Así, para cada variable respuesta se corrió un análisis de varianza con el modelo lineal mixto general. Además, se aplicó la prueba de Tukey para realizar la comparación de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo Lineal Mixto General

En el análisis de los factores estudiados (tiempo, especie y solución nutritiva), se observó que el tiempo presentó un efecto altamente significativo ($P < 0.001$) sobre todas las variables evaluadas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación de medias de las variables analizadas y efecto del tiempo, la especie, las soluciones nutritivas y sus interacciones sobre las variables evaluadas.

Table 2. Comparison of means of the analyzed variables and effect of time, species, nutrient solutions and their interactions on the evaluated variables.

Factores	Niveles de tratamiento	Variables					
		PF [†]	PS [#]	PB ^{**}	FDN ^{**}	FDA ^{§§}	Cenizas
		- - - - kg m ⁻² - - - -		- - - - - % - - - - -			
T [†]	Día 5	11.7 a	3.5 ac	9.4 a	32.8 a	14.3 a	9.4 a
T	Día 10	11.5 a	3.3 a	10.9 b	39.7 b	19.7 b	9.6 ac
T	Día 15	14.3 ab	3.4 ac	11.6 b	36.9 ab	28.1 c	10.7 ad
T	Día 20	16.8 bc	4.1 bd	12.9 c	40.0 b	27.2 c	12.2 bd
T	Día 25	18.2 cd	4.5 b	14.5 d	35.6 ab	27.7 c	10.3 ad
T	Día 30	20.4 d	3.9 cd	15.0 d	46.9 c	22.7 b	11.8 cd
E [‡]	Avena	16.2 a	3.8 a	13.7 a	41.8 a	27.4 a	11.7 a
E	Cebada	14.5 a	3.8 a	11.1 b	35.7 b	19.2 b	9.6 b
S [§]	Agua potable	14.7 a	4.1 a	11.5 a	39.4 a	24.4 a	9.9 a
S	A	16.0 a	3.7 a	13.1 b	37.4 a	23.1 a	11.2 a
S	B	15.7 a	3.7 a	12.6 b	39.4 a	22.5 a	10.9 a
Valor p ^{¶¶}							
T		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0003
E		0.0879	0.9670	<0.0001	0.0003	<0.0001	0.0010
S		0.7066	0.1960	0.0022	0.2319	0.3141	0.0788
T×E		0.7595	0.8592	0.4050	0.0529	0.5737	0.0028
T×S		0.5225	0.1847	0.0062	0.4720	0.7200	0.0378
E×S		0.9141	0.9307	0.8442	0.6343	0.4543	0.1243
T×E×S		0.7679	0.9920	0.5384	0.7897	0.7952	0.0006
Promedio		15.4	3.8	12.2	38.3	22.8	10.5
Coefficiente de variación		23.8	13.8	20.8	16.1	29.4	21.1

[†] Tiempo; [‡] Especie; [§] Solución nutritiva; [†] Peso fresco; [#] Peso seco; ^{**} Proteína bruta; ^{**} Fibra detergente neutro; ^{§§} Fibra detergente ácido; ^{¶¶} p = probabilidad. Valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.05$).

[†] Time; [‡] Species; [§] Nutrient solution; [†] Fresh weight; [#] Dry weight; ^{**} Crude protein; ^{**} Neutral detergent fiber; ^{§§} Acid detergent fiber; ^{¶¶} p = probability. Values with different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

Al respecto, Almeida *et al.* (2021) reportaron que el tiempo afectó la ganancia de PS y los porcentajes de FDN y FDA, pero no el porcentaje de PB en el FVH de maíz; mientras que Salas-Pérez *et al.* (2010), también en maíz, observaron efecto del tiempo en las variables PF, PS, PB, FDA y FDN. Por otro lado, la especie presentó un efecto altamente significativo ($P < 0.001$) sobre los porcentajes de PB, FDN, FDA y cenizas, en ese sentido Salas-Pérez *et al.* (2010) encontraron diferencias entre el FVH de maíz híbrido con respecto al de maíz criollo en la PB y la FDA. Las soluciones nutritivas solo presentaron efecto altamente significativo ($P < 0.001$) sobre el porcentaje de PB; contrario a estos resultados, Salas-Pérez *et al.* (2010) reportaron efecto del tipo de fertilización en las variables PF, PS, PB, FDN y FDA. En cuanto a las dobles interacciones, la interacción tiempo \times especie presentó un efecto en las cenizas; y la interacción tiempo \times solución nutritiva presentó un efecto en la PB y cenizas ($P < 0.01$). Por último, la triple interacción mostró un efecto altamente significativo ($P < 0.001$) sobre las cenizas (Cuadro 2). Por su parte Salas-Pérez *et al.* (2010) encontraron efecto de la interacción genotipo \times tiempo de cosecha sobre el PS y la FDA; de la interacción genotipo \times tipo de fertilización sobre la PB y la FDN; y de la interacción tipo de fertilización \times tiempo de cosecha sobre la fibra detergente neutro.

Peso Fresco (PF) en el Forraje Verde Hidropónico (FVH) de Avena y de Cebada

En el Cuadro 2 se muestra la comparación de medias por el método de Tukey ($P < 0.05$). Al evaluar el tiempo, se observó que el PF se incrementó conforme aumentó el tiempo de muestreo (Figura 1), situación que concuerda con lo reportado en FVH de diferentes especies; Salas-Pérez *et al.* (2010) en maíz, Fazaeli *et al.* (2012) en cebada, Naik *et al.* (2016) en caupí (*Vigna unguiculata*) y Kantale *et al.* (2017) en trigo.

Con respecto a la especie, en el FVH de avena se obtuvieron en promedio 16.5 kg m^{-2} mientras que en cebada la media fue de 14.4 kg m^{-2} . Al respecto, Vargas-Rodríguez (2008), observó diferencias en la cantidad de PF del FVH de sorgo, maíz y arroz, sembrado a una densidad de 5.5 kg m^{-2} y cosechado a los 10 DDS, para los cuales obtuvo valores de 30.1 , 23.6 y 19.9 kg m^{-2} , respectivamente.

En lo que se refiere a las soluciones nutritivas, no se observó diferencia en la variable PF al utilizar soluciones nutritivas o agua potable. Por lo que, en este caso en particular, la mayor cantidad de nitrógeno aplicada con soluciones nutritivas no favoreció un incremento en la ganancia de PF, situación que resultó contrario a lo reportado por Maldonado *et al.* (2013) en trigo. Los resultados obtenidos concuerdan con

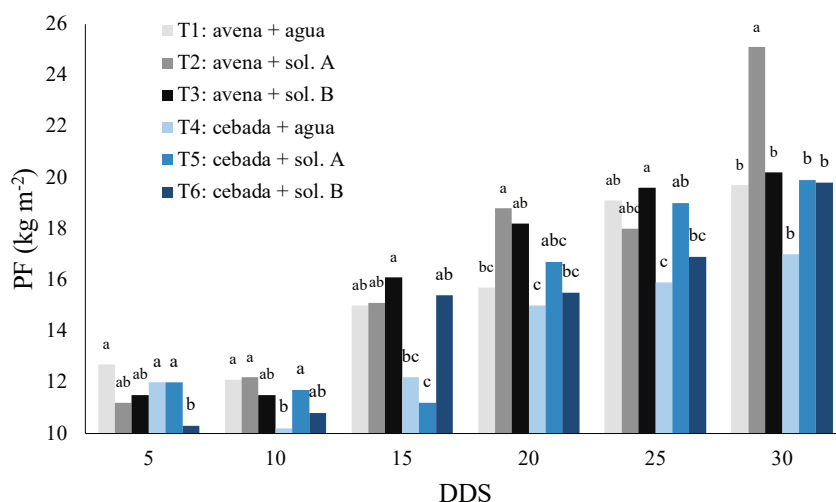


Figura 1. Comportamiento del peso fresco (PF) de los tratamientos en las diferentes fechas de muestreo. DDS = días después de la siembra. Letras diferentes en las barras de cada fecha de muestreo indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos.
Figure 1. Fresh weight (FW) treatment behavior at the different sampling dates. DDS = days after planting. Different letters in the bars of each sampling date indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments.

lo reportado por Ramírez- Viquez y Soto-Bravo (2017) y Soto-Bravo y Ramírez-Viquez (2018), en relación con las soluciones nutritivas y su nulo efecto en el incremento del PF en FVH de maíz cosechado a los 14 DDS. Según Fazaeli *et al.* (2012), la ganancia de PF del FVH se debe a la absorción de agua durante la germinación y el periodo de crecimiento. De esta manera, el incremento de PF que presenta el FVH se debe al agua aplicada y no al suministro de nutrientes por medio de las soluciones nutritivas. Por otra parte, Salas-Pérez *et al.* (2010) y Preciado *et al.* (2014) observaron valores mayores de PF en el FVH de maíz regado con una solución nutritiva convencional y una solución nutritiva a base de té de compost, que en el FVH producido con agua potable. En ese sentido, Al-Karaki (2011) obtuvo mayor PF en FVH de cebada cosechado a los 9 DDS, usando agua tratada, seguido de una combinación 1:1 de agua potable y agua tratada; y el menor PF lo obtuvo cuando utilizó solo agua potable.

Peso Seco (PS) en el Forraje Verde Hidropónico (FVH) de Avena y de Cebada

El valor de PS obtenido a los 5 DDS fue mayor respecto a los valores registrados en los muestreos

realizados a los 10 y a los 15 DDS, en los que se observó una disminución (Figura 2). Tal descenso también ha sido observado en el FVH de cebada (Akbağ, Türkmen, Baytekin y Yurtman, 2014), caupí (Naik *et al.*, 2016), y maíz (Zainab, Iram, Ahmad y Gul, 2019; Almeida *et al.*, 2021). Lo cual se explica por el corto periodo de crecimiento (Peer y Leeson, 1985; Chavan *et al.*, 1989; Dung *et al.*, 2010).

Al respecto, Dung *et al.* (2010) mencionan que, en FVH de cebada cosechado a los 7 DDS, se presentó una pérdida de PS del 21.9% con respecto al PS original de la semilla. Contrario a lo anterior, en este trabajo, a los 20 y 25 DDS se mostró un incremento en el PS (Figura 2). En ese sentido, Zainab *et al.* (2019) reportaron, en forraje de maíz comercial, un porcentaje de materia seca de 42% a los 60 DDS; mientras que Salas-Pérez *et al.* (2010) observaron en el FVH de maíz híbrido y criollo, sembrados a una densidad de 3.4 kg m⁻² y cosechados a los 12, 14 y 16 DDS, una mayor acumulación de materia seca conforme se incrementó el tiempo de cosecha. Por último, a los 30 DDS se presentó un descenso con respecto al PS obtenido el día 25 (Figura 2), atribuido al ataque de hongos observado después de los 25 DDS. Mientras Capper (1988), reporta que la contaminación por hongos, en las unidades de producción de FVH, es un

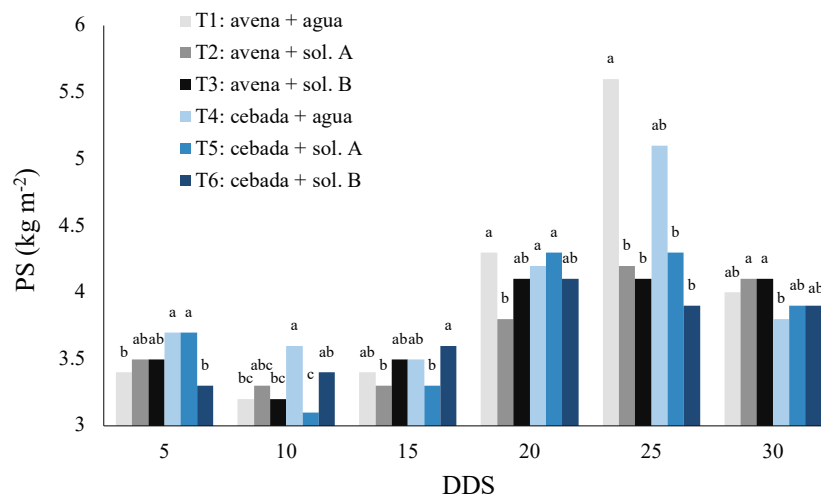


Figura 2. Comportamiento del peso seco (PS) de los tratamientos analizados en las diferentes fechas de muestreo. DDS = días después de la siembra. Letras diferentes en las barras de cada fecha de muestreo indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos.

Figure 2. Dry weight (DW) behavior of the analyzed treatments at the different sampling dates. DDS = days after planting. Different letters in the bars of each sampling date indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments.

problema persistente debido a las condiciones de alta temperatura y humedad que imperan. Además, señala que la misma semilla puede ser la principal fuente de contaminación.

En lo referente a la especie utilizada, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el PS (Cuadro 2). En cambio, Vargas-Rodríguez (2008) encontró un porcentaje mayor de materia seca en FVH de arroz que en FVH de maíz y sorgo cosechado a los 10 días después de la siembra.

Al evaluar el efecto de las soluciones nutritivas, se observó que el uso de las mismas no presentó diferencias con respecto al agua potable en la acumulación de PS. Esto coincide con lo reportado por Maldonado *et al.* (2013) en FVH de trigo cosechado a los 15 DDS y por Ramírez-Viquez y Soto-Bravo (2017) en FVH de maíz cosechado a los 14 DDS. En ese sentido, Al-Karaki (2011) no encontró diferencias en el porcentaje de PS del FVH de cebada usando agua tratada, una combinación 1:1 de agua tratada y agua potable, y solo agua potable. En cambio, Salas-Pérez *et al.* (2010) y Preciado *et al.* (2014) encontraron mayores ganancias de PS utilizando soluciones nutritivas en el FVH de maíz.

Chavan *et al.* (1989) y Dung *et al.* (2010), señalan que la pérdida de PS de las semillas representa una pérdida de energía, que de otra manera estaría disponible

para la alimentación del ganado. Fazaeli *et al.* (2012), señalan que la baja cantidad de materia seca en el FVH de cebada, cosechado a los 6 DDS, puede incrementar los costos de la alimentación de terneros hasta en un 24%, en comparación con alimentarlos con granos de cebada. Estos autores resaltan las limitaciones en el uso de FVH para la alimentación de ganado. Sin embargo, en este trabajo se observó que después de los 20 DDS se presentan ganancias de PS en ambas especies (Figura 2), por lo cual se debe considerar el uso de FVH de mayor edad para suministrar como alimento para el ganado.

Proteína Bruta (PB) en el Forraje Verde Hidropónico (FVH) de Avena y de Cebada

La PB se incrementó conforme avanzó el tiempo de muestreo en ambas especies (Figura 3). Lo cual también fue observado por Naik, Dhuri, Swain y Singh (2012) en FVH de maíz muestreado desde el día 1 al día 7 DDS; y por Kantale *et al.* (2017) en FVH de trigo muestreado desde el primer día de siembra hasta el octavo día. Por su parte, Akbağ *et al.* (2014) al analizar los cambios en el porcentaje de PB del FVH de cebada cosechado a los 4, 7, 10 y 13 DDS, encontraron que éstos no fueron significativos y no estuvieron relacionados con la edad de cosecha.

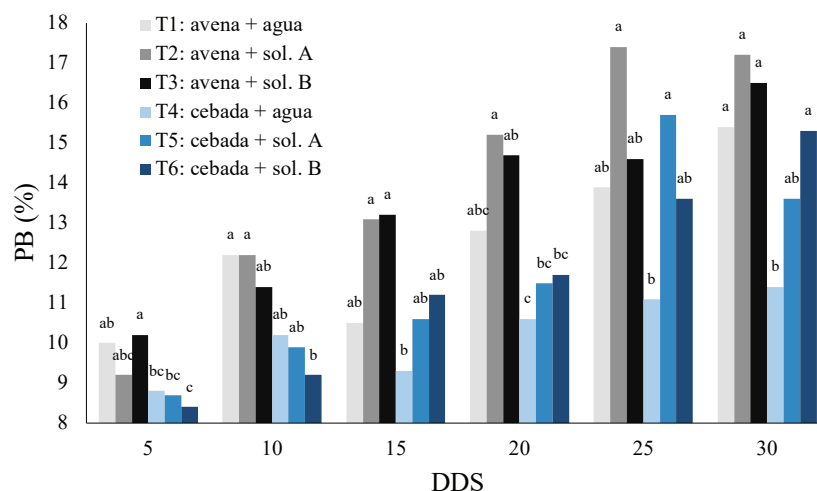


Figura 3. Comportamiento de la proteína bruta (PB) de los tratamientos analizados en las diferentes fechas de muestreo. DDS = días después de la siembra. Letras diferentes en las barras de cada fecha de muestreo indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos.

Figure 3. Crude protein (CP) treatment behavior at the different sampling dates. DDS = days after planting. Different letters in the bars of each sampling date indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments.

Asimismo, Almeida *et al.* (2021) tampoco observaron una tendencia clara en el comportamiento de la PB en FVH de maíz sembrado a densidades de 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 kg m⁻² y cosechado a los 10, 15, 20 y 25 DDS. Contrario a lo anterior, Salas-Pérez *et al.* (2010) encontraron disminuciones de PB en el FVH de maíz conforme avanzó el tiempo de cosecha, dichos autores reportan porcentajes de PB de 15.0, 12.8 y 10.6 a los 12, 14 y 16 DDS, respectivamente. Mientras que Herrera-Torres *et al.* (2010) describen un comportamiento parecido en el FVH de trigo, y reportan porcentajes de PB de 13.4 a los 8 DDS, de 21.5 a los 10 DDS y de 12.6 a los 12 días después de la siembra.

En la Figura 3 se observa que el porcentaje de PB del testigo (agua potable) posee un comportamiento similar al reportado por Herrera-Torres *et al.* (2010) y Salas-Pérez *et al.* (2010) hasta el día 15 DDS. De acuerdo con Chavan *et al.* (1989) y Naik *et al.* (2015), el aumento en el porcentaje de PB se atribuye a la pérdida de PS. Esta situación se presentó en el testigo, ya que a los 10 DDS se observó, en dicho tratamiento, el menor contenido de PS (Figura 2) y el mayor porcentaje de PB (Figura 3) en los primeros 15 DDS. El uso de las reservas contenidas en la semilla para el crecimiento de los brotes podría explicar el comportamiento del PS y la PB en los muestreos realizados a los 10 y 15 DDS (Chavan *et al.*, 1989; Dung *et al.*, 2010; Naik *et al.*, 2015); mientras que el incremento en la PB y el PS a los 20 y 25 DDS se puede atribuir a que el mayor tiempo de crecimiento favoreció la acumulación de reservas debido a la fotosíntesis.

En lo referente a la especie, se observó un porcentaje promedio mayor de PB en el FVH de avena (13.7%) respecto al FVH de cebada (11.1%) (Cuadro 2). En ese sentido, Vargas-Rodríguez (2008) obtuvo un porcentaje mayor de PB en FVH de sorgo (10.47%), un porcentaje medio en el FVH de maíz (9.6%) y el porcentaje más bajo en el FVH de arroz (7.9%) a los 20 DDS. Mientras que Salas-Pérez *et al.* (2010) observaron un porcentaje mayor de PB en el FVH obtenido con semilla de maíz híbrido (13.1%) que en FVH obtenido de semilla criolla (12.5%). Por lo cual, es posible que exista un comportamiento diferente en el porcentaje de PB tanto a nivel de especies, como de variedades.

Por otro lado, se observó un porcentaje mayor de PB en las soluciones nutritivas “A” y “B” (13.1% y 12.6%, respectivamente) respecto al agua potable (11.5%). Según Dung *et al.* (2010) y Al-Karaki (2011) esto se debe al mayor contenido de nutrientes aportado

por las soluciones nutritivas. Pero, entre las soluciones nutritivas “A” y “B” no se observó diferencia significativa (Cuadro 2), situación que se atribuye a que el contenido de nitrógeno era similar en ambas soluciones (Maldonado *et al.*, 2013). Al respecto, Salas-Pérez *et al.* (2010) obtuvieron un porcentaje menor de proteína cruda en el agua potable (12.2%) en comparación con una solución nutritiva convencional (13.2%) y con una solución nutritiva orgánica a base de té de compost (13.2%). Un comportamiento similar observaron Preciado *et al.* (2014), quienes encontraron un 16.0% de PB usando una solución nutritiva convencional, 15.5% usando una solución nutritiva orgánica, a base de lixiviado de vermicompost, y un 14.6% usando agua potable. Asimismo, Al-Karaki (2011) obtuvo, en FVH de cebada cosechado a los 9 DDS, un porcentaje mayor de PB usando agua tratada, en comparación con agua potable y con una combinación 1:1 de agua potable y agua tratada; donde el porcentaje de PB fue menor.

En el presente estudio, se obtuvieron resultados similares a los reportados por Salas-Pérez *et al.* (2010) y Preciado *et al.* (2014); donde no se mostró diferencia significativa en la PB encontrada con ambas soluciones nutritivas. De manera que, es recomendable utilizar la solución nutritiva más accesible en lo referente a precios, y que tenga el menor impacto ambiental (Salas-Pérez *et al.*, 2010; Preciado *et al.*, 2014). Por el contrario, Soto-Bravo y Ramírez-Viquez (2018), no observaron diferencias en el porcentaje de PB del FVH de maíz irrigado, con una solución nutritiva de baja concentración de nutrientes, y con una solución nutritiva con alta concentración de nutrientes.

Fibra Detergente Neutro (FDN) en el Forraje Verde Hidropónico (FVH) de Avena y de Cebada

La FDN mostró un comportamiento ambivalente conforme avanzó el tiempo de muestreo (Cuadro 2 y Figura 4). Tomando como referencia los valores de los días 5 al 10 y 20 al 30 DDS, el porcentaje de FDN mostró un incremento, mientras que a los 15 y 25 DDS se observaron decrementos. Dicho fenómeno es más marcado en el FVH de cebada (Figura 4); situación que se puede atribuir al ataque de hongos. Por su parte, Salas-Pérez *et al.* (2010) observaron un incremento en el porcentaje de FDN en el FVH de maíz cosechado a los 12, 14 y 16 DDS. Mientras, Fazaeli *et al.* (2012) observaron un incremento en el porcentaje de FDN

en el FVH de cebada cosechado a los 6, 7 y 8 DDS. Similar a lo reportado por Almeida *et al.* (2021), quienes observaron en FVH de maíz cosechado a los 10, 15, 20 y 25 DDS y regado con vinaza, una tendencia a incrementar el porcentaje de FDN cuando utilizaron densidades de siembra de 2.0 y 2.5 kg m⁻². Por el contrario, Akbağ *et al.* (2014) no encontraron una respuesta significativa del tiempo de cosecha en el porcentaje de FDN en el FVH de cebada cosechado a los 4, 7, 10 y 13 días después de la siembra.

Hoffman, Lundberg, Bauman y Shaver (2003) reportan que, durante el crecimiento de las plantas, la relación hoja-tallo va disminuyendo y que, debido a la mayor lignificación para la formación de tallos, el porcentaje de FDN se incrementa. En ese sentido, Naik *et al.* (2015) mencionan que el incremento de FDN se debe al aumento en el número y tamaño de las paredes celulares.

En lo referente a la especie, se observó un porcentaje promedio mayor de FDN en la avena (41.8%) respecto a la cebada (35.7%) (Cuadro 2). En estudios similares, Salas-Pérez *et al.* (2010) no observaron diferencias en la FDN y reportaron un porcentaje de 41.3 en maíz híbrido y 40.8 en maíz criollo. Por otra parte, Vargas-Rodríguez (2008) obtuvieron 43.1, 58.2 y 66.7% de FDN en FVH de maíz, arroz y sorgo, respectivamente;

cosechado a los 20 DDS. Contemplando la misma fecha de muestreo de estos autores, a los 20 DDS en este estudio se obtuvieron 43.7 y 35.8% de FDN en el FVH de avena y cebada, respectivamente; siendo menores a los resultados obtenidos en arroz y sorgo por Vargas-Rodríguez (2008), a pesar de que las semillas utilizadas tenían cutícula.

En este trabajo, el uso de soluciones nutritivas no presentó diferencias en los porcentajes de FDN con respecto a los obtenidos utilizando agua potable. Esto resultó similar a lo registrado por Soto-Bravo y Ramírez-Viquez (2018), quienes no encontraron diferencias al usar dos soluciones nutritivas y agua en el porcentaje de FDN de maíz cosechado a los 11 DDS; mientras que Salas-Pérez *et al.* (2010) encontraron un porcentaje mayor de FDN en FVH de maíz (cosechado a los 12, 14 y 16 DDS) regado con una solución nutritiva convencional y con otra solución nutritiva a base de té de compost, en comparación con el tratamiento de agua potable. Por su parte, Preciado *et al.* (2014) encontraron un porcentaje mayor de FDN en maíz, al utilizar soluciones nutritivas en comparación con utilizar agua potable. Asimismo, Al-Karaki (2011) encontró porcentajes de FDN mayores, al usar agua tratada, en comparación con el agua potable, atribuyendo esa diferencia al mayor contenido de nutrientes en el agua tratada.

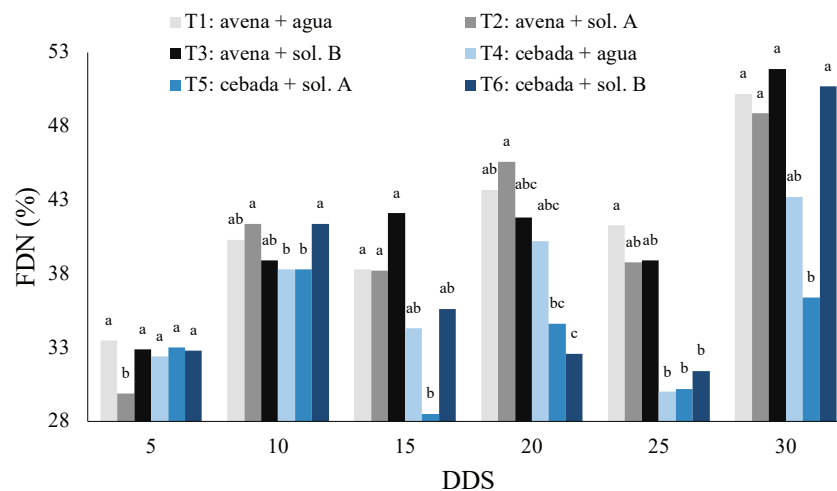


Figura 4. Comportamiento de la fibra detergente neutro (FND) de los tratamientos analizados en las diferentes fechas de muestreo. DDS = días después de la siembra. Letras diferentes en las barras de cada fecha de muestreo indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos.

Figure 4. Neutral detergent fiber (NDF) treatment behavior at the different sampling dates. DDS = days after planting. Different letters in the bars of each sampling date indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments.

Fibra Detergente Ácido (FDA) en el Forraje Verde Hidropónico (FVH) de Avena y de Cebada

La FDA mostró un incremento hasta el día 25, a partir del cual se registró un descenso (Cuadro 2, Figura 5). El incremento de FDA con el tiempo de cosecha se ha observado en maíz (Salas-Pérez *et al.* 2010; Almeida *et al.*, 2021) y cebada (Fazaeli *et al.*, 2012; Akbağ *et al.* 2014). Por su parte, Chavan *et al.* (1989) mencionan que el incremento en el contenido de fibra es solo aparente y atribuible a la desaparición del almidón. En cambio, Naik *et al.* (2015) mencionan que el incremento de FDA se debe al aumento en el número y tamaño de las paredes celulares. No obstante, es posible que este fenómeno solo se presente en etapas tempranas del crecimiento del FVH y se revierta cuando las plantas empiecen a acumular reservas; contemplando el incremento de PS que se presentó en el FVH de avena y cebada en este trabajo.

En lo referente a la especie, se observó un porcentaje promedio mayor de FDA en el FVH de avena (27.4%) respecto al FVH de cebada (19.2%) (Cuadro 2). Por su parte, Salas-Pérez *et al.* (2010) encontraron un porcentaje mayor de FDA en FVH de maíz utilizando semilla híbrida (12.9%) y un porcentaje menor usando semilla criolla (11.5%). En comparación con esos

autores, el mayor porcentaje de FDA se atribuye a que se realizaron muestreos cuando las plantas tenían mayor edad (Hoffman *et al.* 2003; Naik *et al.*, 2015) y a que las semillas de avena y cebada tenían cutícula. Por otro lado, Vargas-Rodríguez (2008) obtuvieron valores de FDA de 18.9, 38.5 y 45.2% en FVH de maíz, arroz y sorgo, respectivamente. En este estudio a los 20 DDS se obtuvieron 30.7% de FDA en avena y de 22.9% en cebada. Así, la FDA de avena y cebada, fue mayor que en el maíz, pero menor que en el arroz y el sorgo reportado por los autores antes mencionados.

El uso de soluciones nutritivas no presentó diferencias en el porcentaje de FDA con respecto al obtenido utilizando agua potable; de la misma manera en que Soto-Bravo y Ramírez-Viquez (2018) no encontraron diferencias al usar dos soluciones nutritivas, una con alta y otra con baja concentración de nutrientes, y agua potable en el porcentaje de FDA de maíz cosechado a los 11 DDS. Por el contrario, Salas-Pérez *et al.* (2010) encontraron que los valores de FDA en el FVH fueron mayores aplicando una solución nutritiva a base de té de compost, respecto a la solución nutritiva convencional y el agua potable, entre los que no encontraron diferencias. Por su parte, Al-Karaki (2011) encontró, en FVH de cebada, valores de FDA mayores utilizando agua tratada en comparación

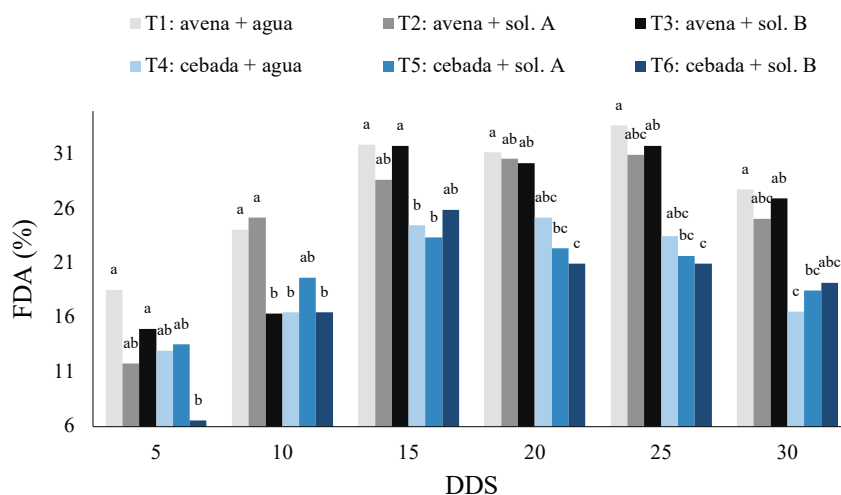


Figura 5. Comportamiento de la fibra detergente ácido (FDA) de los tratamientos analizados en las diferentes fechas de muestreo. DDS = días después de la siembra. Letras diferentes en las barras de cada fecha de muestreo indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos.

Figure 5. Acid detergent fiber (ADF) treatment behavior at the different sampling dates. DDS = days after planting. Different letters in the bars of each sampling date indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments.

con agua potable. Asimismo, Preciado *et al.* (2014) encontraron un porcentaje mayor de FDA en maíz, al utilizar soluciones nutritivas en comparación con utilizar agua potable.

Cenizas en el Forraje Verde Hidropónico (FVH) de Avena y de Cebada

Las cenizas mostraron un incremento hasta el día 15 DDS, después permanecieron estables hasta el día 25 DDS, periodo después del cual se registró un descenso (Cuadro 2, Figura 6). Este comportamiento también fue observado por Naik *et al.* (2012 y 2015), quienes registraron un incremento en el porcentaje de cenizas en el FVH muestreado desde el primer día hasta el séptimo DDS. Dichos autores reportan un incremento en el porcentaje de cenizas más rápido después del día cuatro, el cual coincidió con la extensión de la radícula, lo que permitió la toma de nutrientes. En ese sentido, Fazaeli *et al.* (2012) y Akbağ *et al.* (2014), reportaron un incremento en el porcentaje de cenizas en el FVH de cebada, y Naik *et al.* (2016) en el FVH de *Vigna unguiculata*. Por el contrario, Kantale *et al.* (2017) no observaron un incremento en el porcentaje de cenizas con el avance de la fecha de muestreo de FVH de trigo.

En lo referente a la especie, se observó un porcentaje promedio mayor de cenizas en el FVH de avena (11.7%), respecto al FVH de cebada (9.6%) (Cuadro 2). En ese caso, Vargas-Rodríguez (2008), obtuvieron 2.4, 9.2 y 6.5% de cenizas en FVH de maíz, arroz y sorgo, respectivamente. El porcentaje de cenizas obtenido en este trabajo fue mayor que el de todas las especies estudiadas por dichos autores, incluso en el arroz y sorgo que también poseían cutícula.

El uso de soluciones nutritivas no presentó diferencias con respecto al agua potable en el porcentaje de cenizas. Por el contrario, Soto-Bravo y Ramírez-Viquez (2018) reportaron un mayor porcentaje de cenizas al utilizar una solución nutritiva con alta concentración de nutrientes que al utilizar una con baja concentración de nutrientes y agua potable. En ese sentido, Salas-Pérez *et al.* (2010) encontraron un porcentaje mayor de cenizas, en FVH de maíz irrigado con una solución nutritiva convencional y otra solución nutritiva a base de té de compost, en comparación con el tratamiento en que utilizaron agua potable. De igual manera, Maldonado *et al.* (2013), encontraron un porcentaje mayor de cenizas, al utilizar soluciones nutritivas en comparación con utilizar agua potable.

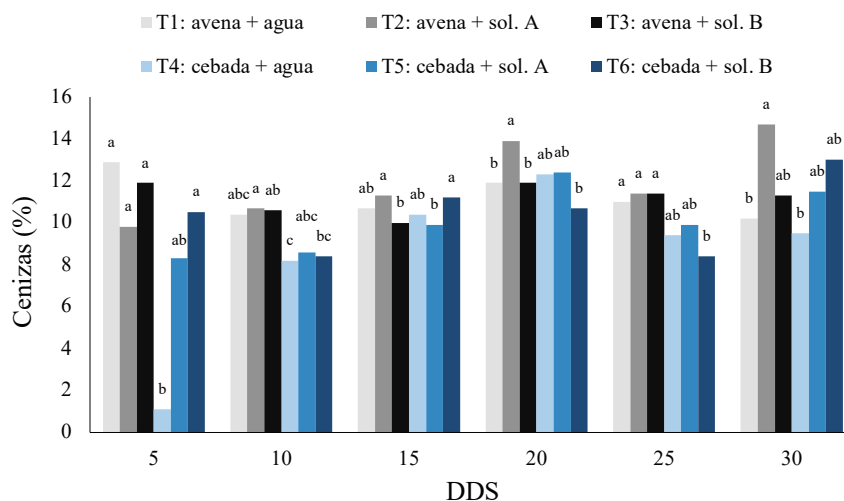


Figura 6. Comportamiento de las cenizas de los tratamientos analizados en las diferentes fechas de muestreo. DDS = días después de la siembra. Letras diferentes en las barras de cada fecha de muestreo indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre tratamientos.

Figure 6. Ashes treatment behavior at the different sampling dates. DDS = days after planting. Different letters in the bars of each sampling date indicate significant differences ($P < 0.05$) among treatments.

CONCLUSIONES

Los valores de las variables analizadas (peso fresco, peso seco, proteína bruta, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido y cenizas) se incrementaron conforme avanzó el tiempo de cosecha en el forraje verde hidropónico de avena y cebada, de forma especial a los 20 días posteriores a la siembra. Esto es de importancia para la ganancia de peso seco observada en el muestreo realizados a los 20 y 25 días después de la siembra, ya que se ha considerado que esta variable es una de las principales limitantes en el uso de forrajes hidropónicos para alimentar al ganado.

El uso de soluciones nutritivas favoreció un incremento en el porcentaje de proteína bruta con respecto al agua potable. Sin embargo, en las demás variables analizadas no se observaron diferencias entre las soluciones nutritivas y el agua potable.

En el forraje verde hidropónico (FVH) de avena se obtuvieron los mayores valores de proteína bruta, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido y cenizas, en comparación con el FVH de cebada. Por lo cual, en este trabajo se observó que el FVH de avena posee una mejor calidad nutricional que el FVH de cebada.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados y analizados durante el estudio actual están en disponibilidad del autor a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

Este estudio se realizó con apoyo de material, instalaciones y equipo pertenecientes a la Universidad Autónoma Chapingo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Preparación del borrador original, diseño, instalación y manejo del experimento, y análisis de laboratorio: J.M.S.C. Revisión del borrador original y análisis estadístico: M.A.B.G. Preparación del borrador original y análisis de los datos obtenidos: A.K.C.A. Manejo e instalación del experimento y análisis de laboratorio: Y.V.C. Preparación del borrador original: S.A.V. de G. Revisión del borrador original: J.L.M.D.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, en especial a los departamentos de Suelos, Zootecnia y Preparatoria Agrícola por todas las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Akbağ, H. I., Türkmen, O. S., Baytekin, H., & Yurtman, I. Y. (2014). Effects of harvesting time on nutritional value of hydroponic barley production. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 2, 1761-1765.
- Al-Karaki, G. N. (2011). Utilization of treated sewage wastewater for green forage production in a hydroponic system. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 23(1), 80-94. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v23i1.5315>
- Al-Karaki, G. N., & Al-Momani, N. (2011). Evaluation of some barley cultivars for green fodder production and water use efficiency under hydroponic conditions. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 7(3), 448-457.
- Almeida, J. C. S., Valentim, J. K., Faria, D. J. G., Noronha, C. M. S., Velarde, J. M. D. S., Mendes, J. P., ... Ziemniczak, H. M. (2021). Bromatological composition and dry matter production of corn hydroponic fodder. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 43, e48800. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v43i1.48800>
- Bandera F., E., & Pérez P., L. (2018). Los modelos lineales generalizados mixtos. Su aplicación en el mejoramiento de plantas. *Cultivos Tropicales*, 39(1), 127-133.
- Birgi, J. A., Gargaglione, V., & Utrilla, V. (2018). El forraje verde hidropónico como una alternativa productiva en Patagonia Sur: Productividad y calidad nutricional de dos variedades de cebada (*Hordeum vulgare*). *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 44(3), 316-323.
- Capper, A. L. (1988). Fungal contamination of hydroponic forage. *Animal Feed Science and Technology*, 20(2), 163-169. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(88\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0377-8401(88)90040-5)
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). *Water footprints of nations*. (Value of water research report series; no. 16). Delf, The Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education.

- Chavan, J. K., Kadam, S. S., & Beuchat, L. R. (1989). Nutritional improvement of cereals by sprouting. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 28(5), 401-437. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398909527508>
- Dung, D. D., Godwin, I. R., & Nolan, J. V. (2010). Nutrient content and *in sacco* digestibility of barley grain and sprouted barley. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 9(19), 2485-2492. <https://doi.org/10.3923/javaa.2010.2485.2492>
- Fazaeli, H., Golmohammadi, H. A., Tabatabayee, S. N., & Asghari-Tabrizi, M. (2012). Productivity and nutritive value of barley green fodder yield in hydroponic system. *World Applied Sciences Journal*, 16(4), 531-539.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309(5734), 570-574. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1111772>
- García-Carrillo, M., Salas-Pérez, L., Esparza-Rivera, J. R., Preciado-Rangel, P., & Romero-Paredes, J. (2013). Producción y calidad fisicoquímica de leche de cabras suplementadas con forraje verde hidropónico de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 169-176.
- Godde, C. M., Mason-D'Croz, D., Mayberry, D. E., Thornton, P. K., & Herrero, M. (2021). Impacts of climate change on the livestock food supply chain; a review of the evidence. *Global Food Security*, 28, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100488>
- Herrera-Torres, E., Cerrillo-Soto, M. A., Juárez-Reyes, A. S., Murillo-Ortiz, M., Ríos-Rincón, F. G., Reyes-Estrada, O., & Bernal-Barragán, H. (2010). Efecto del tiempo de cosecha sobre el valor proteico y energético del forraje verde hidropónico de trigo. *Interciencia*, 35(4), 284-289.
- Hoffman, P. C., Lundberg, K. M., Bauman, L. M., & Shaver, R. D. (2003). The effect of maturity on NDF digestibility. *Focus on Forage*, 5(15), 1-3.
- Juárez-López, P., Morales-Rodríguez, H. J., Sandoval-Villa, M., Gómez D., A. A., Cruz-Crespo, E., Juárez-Rosete, ... Ortiz-Catón, M. (2013). Producción de forraje verde hidropónico. *Revista Fuente Nueva Época*, 4(13), 16-26.
- Kantale, R. A., Halburge, M. A., Deshmukh, A. D., Dhok, A. P., Raghuvanshi, D. S., & Lende, S. R. (2017). Nutrient changes with the growth of hydroponics wheat fodder. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 6(3), 1800-1803.
- López-Aguilar, R., Murillo-Amador, B., & Rodríguez-Quesada, G. (2009). El forraje verde hidropónico (FVH): una alternativa de producción de alimento para el ganado en zonas áridas. *Interciencia*, 34(2), 121-126.
- Maldonado T., R., Álvarez S., M. E., Cristóbal A., D., & Ríos S., E. (2013). Nutrición mineral de forraje verde hidropónico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 19(2), 211-223. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2011.10.053>
- Naik, P. K., Dhuri, R. B., Swain, B. K., & Singh, N. P. (2012). Nutrient changes with the growth of hydroponics fodder maize. *Indian Journal of Animal Nutrition*, 29(2), 161-163.
- Naik, P. K., Swain, B. K., & Singh, N. P. (2015). Production and utilization of hydroponics fodder. *Indian Journal of Animal Nutrition*, 32(1), 1-9.
- Naik, P. K., Dhawaskar, B. D., Fataerpekar, D. D., Swain, B. K., Chakurkar, E. B., & Singh, N. P. (2016). Yield and nutrient content of hydroponics cowpea sprouts at various stages of growth. *Indian Journal of Animal Sciences*, 86(12), 1469-1471.
- Núñez-Torres, O. P., & Guerrero-López, J. R. (2021). Forrajes hidropónicos: una alternativa para la alimentación de animales domésticos. *Journal of the Selva Andina Animal Science*, 8(1), 44-52. <https://doi.org/10.36610/J.JSAAS.2021.080100044>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2001). *Manual técnico. Forraje verde hidropónico*. Santiago de Chile: FAO para América Latina y El Caribe.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2016). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2016: Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria*. Roma, Italia: FAO.
- Peer, D. J., & Leeson, S. (1985). Nutrient content of hydroponically sprouted barley. *Animal Feed Science and Technology*, 13(3-5), 191-202.
- Pérez-Espejo, R. (2008). El lado oscuro de la ganadería. *Problemas del desarrollo*, 39(154), 217-227.
- Preciado-Rangel, P., García H., J. L., Segura C., M. A., Salas P., L., Ayala G., A. V., Esparza R., J.-R., & Troyo D., E. (2014). Efecto del lixiviado de vermicomposta en la producción hidropónica de maíz forrajero. *Terra Latinoamericana*, 32(4), 333-338.
- Ramírez-Viquez, C., & Soto-Bravo, F. (2017). Efecto de la nutrición mineral sobre la producción de forraje verde hidropónico de maíz. *Agronomía Costarricense*, 41(2), 79-91. <https://doi.org/10.15517/rac.v41i2.31301>
- Ramiro V., E., Caballero, N., A., & Herrera V., M. (2017). Transformación de variables binomiales para su análisis según un diseño de bloques al azar. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 108-114.
- Salas-Pérez, L., Preciado-Rangel, P., Esparza-Rivera, J. R., Álvarez-Reyna, V. de P., Palomo-Gil, A., Rodríguez-Dimas, N., & Márquez-Hernández, C. (2010). Rendimiento y calidad de forraje hidropónico producido bajo fertilización orgánica. *Terra Latinoamericana*, 28(4), 355-360.
- SAS Institute. (2009). *SAS/STAT User's Guide*, Versión 9.0. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Sosa de Pro, E. (1979). *Manual de procedimientos analíticos para alimentos de consumo animal*. Departamento de Zootecnia, Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Soto-Bravo, F., & Ramírez-Viquez, C. (2018). Efecto de la nutrición mineral en el rendimiento y las características bromatológicas del forraje verde hidropónico de maíz. *Pastos y Forrajes*, 41(2), 106-113.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

Vargas-Rodríguez, C. F. (2008). Comparación productiva de forraje verde hidropónico de maíz, arroz y sorgo negro forrajero. *Agronomía Mesoamericana*, 19(2), 233-240.

Zainab, S. M., Iram, S., Ahmad, K. S., & Gul, M. M. (2019). Nutritional composition and yield comparison between hydroponically grown and commercially available *Zea mays* L. fodder for a sustainable livestock production. *Maydica*, 64(3), 1-9.