

Nota técnica

EFECTO DE LA NUTRICIÓN MINERAL SOBRE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO DE MAÍZ

Carolina Ramírez Víquez, Freddy Soto Bravo^{1/}**

Palabras clave: Hidroforraje; maíz; nutrición animal; valor nutritivo.

Keywords: Hydro-forage; maize; animal nutrition; nutritive value.

Recibido: 26/01/17

Aceptado: 02/06/17

RESUMEN

El forraje verde hidropónico (FVH) consiste en la producción especializada de biomasa vegetal a partir del crecimiento inicial de plántulas, la cual representa una alternativa en alimentación animal ante el sistema convencional basado en pastoreo. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la nutrición mineral aplicada mediante solución nutritiva, sobre la productividad y la composición de nutrientes minerales, de FVH de maíz. Se aplicaron 2 tratamientos de concentración de nutrientes: Nutrición alta (N_a) y Nutrición baja (N_b), y un tratamiento control con agua (T_c). El estudio se realizó en el 2015, en un invernadero ubicado en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), Alajuela, Costa Rica. La semilla se seleccionó y se preparó mediante desinfección, imbibición y aireación; seguidamente se pregerminó en cámara húmeda (3 días) en bandejas plásticas a una densidad de 3 kg.m^{-2} . Luego las bandejas se trasladaron a un invernadero de producción, donde permaneció durante 11 días hasta la cosecha. La aplicación de solución nutritiva no tuvo efecto significativo ($p > 0,05$) sobre la producción de peso fresco (PF) y de materia seca (MS), la eficiencia

ABSTRACT

Effect of mineral nutrition on green hydroponic maize forage production. Hydroponic green forage (FVH) consists of specialized production of vegetal biomass from initial seedling growth, which represents an alternative to conventional grazing systems for animal feeding. The objective of this study was to evaluate the effect of mineral nutrition applied by a nutrient solution on yield and mineral composition of maize FVH. Two nutrient concentration treatments were applied: High nutrition (N_a) and Low nutrition (N_b), and a control treatment with water (T_e). The study was conducted in 2015, in a greenhouse located in the Agricultural Experiment Station Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), Alajuela, Costa Rica. Seed was selected and prepared by disinfection, imbibition and aeration. It was then pre-germinated for 3 days in a wet chamber in plastic trays at a density of 3 kg.m^{-2} . Plastic trays were then moved to a production greenhouse in which they remained for 11 days until harvest. Application of nutrient solution had no significant effect ($p > 0.05$) on fresh weight (PF), dry matter (DM) production, conversion efficiency (EC)

¹ Autor para correspondencia. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

* Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Costa Rica.

de conversión (EC) y la composición mineral del FVH de maíz. Para todos los tratamientos (N_a , N_b y T_e), los valores promedios de producción de PF (15,28 kg.m⁻²), de EC (5,08 kg.kg⁻¹), de altura (27,7 cm) y la composición mineral del FVH de maíz, presentaron valores óptimos respecto a lo reportado por otros autores. Los resultados sugieren que bajo condiciones similares a este estudio, no es necesaria la utilización de soluciones nutritivas para la producción de FVH.

and mineral composition of maize FVH. For all treatments (N_a , N_b and T_e), mean values of PF (15.28 kg.m⁻²), EC (5.08 kg.kg⁻¹), height (27.7 cm) and mineral composition of maize FVH, presented optimum values compared to what is reported by other authors. The results suggest that under conditions similar to this study, the use of nutrient solutions for FVH production is not necessary.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica existen alrededor de 1 575 779 bovinos de doble propósito (38%) de carne (34,1%), leche (20,9%) y pie de cría (7,1%), de los cuales 70,2% pertenecen a pequeñas fincas (<30 ha) y el 84,9% a fincas de menos de 60 ha (CORFOGA 2012).

La producción bovina depende del sistema de pastoreo como principal recurso alimenticio (FCGG-MAG 2007). Sin embargo, los fenómenos climáticos actuales asociados al cambio climático, tales como las sequías e inundaciones ponen en riesgo la actividad ganadera extensiva, debido al agotamiento y pérdidas de pastizales que afectan sensiblemente la disponibilidad de forraje para los animales, que han causado alta mortalidad y pérdidas de peso o de producción.

La baja producción de forrajes durante la época seca, una defectuosa mineralización y problemas en la composición genética, ha incidido en la disminución de la producción y reproducción, entre los que se encuentra una baja tasa de natalidad (54%) y una edad al sacrificio de 3 años o más (FCGG-MAG 2007).

Los sistemas de producción animal sustentan sus prácticas alimenticias en el suministro de un porcentaje de forraje más un suplemento alimenticio (Vargas-Rodríguez 2008). Por tal razón, en Costa Rica, para producción de leche (bovina

la alimentación representa alrededor de 56% a 60% de los costos totales, que es el 82% costos de suplementos alimenticios (Tobía *et al.* 2004).

Actualmente, el cambio climático asociado a la potencial crisis del agua y al agotamiento de la frontera agrícola, representan una amenaza sobre la disponibilidad de forrajes para alimentación animal y plantean la necesidad de investigar otras opciones tecnológicas que aseguren la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos de origen animal.

La técnica de producción de forraje verde hidropónico (FVH) representa una alternativa a los métodos convencionales de producción de forraje, como un suplemento nutritivo en la dieta convencional. La producción de FVH es una tecnología de desarrollo de biomasa vegetal obtenida del crecimiento inicial de plántulas en los estados de germinación y crecimiento temprano a partir de semillas, para producir un forraje vivo de alta digestibilidad, calidad nutricional y apto para la alimentación de animales (FAO 2001).

La producción de FVH es una técnica que permite obtener de una manera rápida, de bajo costo y de forma sostenible, un forraje fresco, sano, limpio y de alto valor nutritivo, para alimentar a sus animales en cualquier época del año (FAO 2001). Es un forraje apto para la alimentación de cabras, terneros, vacas en ordeño, caballos, conejos, pollos, gallinas ponedoras y

patos, entre otros animales, sobre todo durante tiempos de escasez de forraje verde (Cuesta y Machado 2009).

El uso de FVH ha dado excelentes resultados tanto en animales monogástricos como poligástricos, debido al aporte de vitaminas, enzimas, coenzimas y aminoácidos libres (Rodríguez 2002). Además, presenta un alto valor nutritivo, alto valor proteico y una alta digestibilidad que permite una rápida circulación por el tracto digestivo de los animales por ser un forraje tierno y palatable (FAO 2001).

Mediante la técnica de FVH, la eficiencia en el uso del agua (EUA) se incrementa sustancialmente frente al sistema de producción convencional de forrajes a campo abierto. Según Lomelí (2000), se requiere de 2 a 3 litros de agua para producir 1 kilo de FVH con un 12% a 18% de MS, que se traduce en un consumo total de 15 a 20 litros de agua por kilogramo de MS en 14 días. En un estudio reciente, Ramírez (2016), obtuvo una eficiencia de uso de agua de $1,46 \text{ l.kg}^{-1}$ PF y $17,7 \text{ l.kg}^{-1}$ MS, lo cual representa un incremento sustancial frente al rango de 270 a 635 l.kg^{-1} MS, en pasturas convencionales a campo abierto (FAO 2001).

En Costa Rica, la aplicación de la técnica para producción de FVH es incipiente, debido a que existe poca evidencia científica sobre su factibilidad técnica, económica y metodológica para la producción en el trópico (Elizondo 2008). A nivel internacional, la información reportada presenta gran variabilidad en aspectos técnicos y metodológicos, tales como el clima, genotipos usados, densidades de siembra, días de cosecha y el manejo del riego y la nutrición.

Respecto a la nutrición mineral se reporta una alta variabilidad en las concentraciones de nutrientes minerales en las soluciones nutritivas utilizadas para la nutrición del FVH (Rivera *et al.* 2010, Salas *et al.* 2010 y 2012, FAO 2001, Maldonado *et al.* 2013, Candía 2014). Mientras que en algunos casos se aplica únicamente agua (Cuesta y Machado 2009, Al-Karaki y Al-Hashimi 2012) en otros se aplican excesos. Por ejemplo, en la producción de FVH de maíz los rangos de

nitrógeno oscilan desde 5 mg.l^{-1} (Rivera *et al.* 2010) hasta 238 mg.l^{-1} (Salas *et al.* 2010), mientras que en el caso del hierro las concentraciones varían desde $4,3 \text{ mg.l}^{-1}$ (Salas *et al.* 2012) hasta 800 mg.l^{-1} (Rivera *et al.* 2010).

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la nutrición mineral aplicada mediante solución nutritiva, sobre el crecimiento, la producción y la composición de nutrientes minerales, en FVH de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno (EEFBM), ubicada en el Distrito San José de Alajuela, Costa Rica ($10^{\circ}01'N$, $84^{\circ}16'W$), a 840 m de altitud y valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa, de 1940 mm, $22^{\circ}C$ y 78%, respectivamente.

Se utilizó un invernadero multitúnel, con dimensiones de 9,75 m de ancho y 50 m de largo, alturas de 6,0 m al centro del túnel y de 4 m al canalón. El invernadero fue construido en hierro galvanizado, con cubierta de polietileno transparente tricapa de $200 \mu\text{m}$ de espesor y malla anti-insectos (43x28) en las paredes frontales y laterales. El sistema de ventilación fue pasivo combinado con el funcionamiento automatizado de ventanas cenitales según la velocidad de viento monitoreada con anemómetro.

Durante el periodo del experimento se monitoreo la temperatura y la humedad relativa (Data logger HOBO U23 Pro v2) de forma continua cada 5 minutos se registraron los promedios horarios. Los promedios globales de temperatura ($^{\circ}C$) y humedad relativa (%), máxima, mínima y media, fueron $31,5^{\circ}C$; $19,7^{\circ}C$ y $23,9^{\circ}C$, y 97,4%; 59,8% y 86%, respectivamente.

Se utilizó semilla de maíz, a partir de su disponibilidad, volumen de producción y bajo costo en Costa Rica, respecto a otros materiales importados (Ramírez 2016). Se utilizó la variedad local "Diamantes 8843", de polinización libre, grano color blanco, con madurez tardía (120-135 días), rendimientos de 3 y 6 t.ha^{-1} de

grano, y un amplio rango de adaptación a condiciones agro-agroclimáticas (INTA-AECI 2005).

La investigación se llevó a cabo durante el invierno de 2015, en un ciclo de cultivo de 3 días para la etapa de imbibición-germinación, y de 11 días de crecimiento en invernadero hasta la cosecha, para un ciclo total de 14 días.

El experimento consistió en evaluar el efecto de la nutrición mineral aplicada mediante solución nutritiva, sobre la producción de peso fresco (PF) y de materia seca (MS), la eficiencia de conversión (EC) y la composición mineral

del FVH de maíz. Para ello, se aplicaron 2 tratamientos con diferente concentración de nutrientes minerales, Nutrición baja (N_b) y Nutrición alta (N_a), y un tratamiento testigo solo con agua (T_e) (Cuadro 1). Las concentraciones de nutrientes minerales en los tratamientos N_b y N_a , fueron definidas con base en los rangos de concentración reportados en la literatura (FAO 2001, Cuesta y Machado 2009, Al-Karaki y Al-Hashimi 2012, Rivera *et al.* 2010, Salas *et al.* 2010, Salas *et al.* 2012, Maldonado *et al.* 2013, Candía 2014) y se descartaron los valores extremos.

Cuadro 1. Concentración de nutrientes en los diferentes tratamientos utilizados.

Tratamiento	pH	Mayores (mg.l ⁻¹)					Menores (mg.l ⁻¹)						*CE (mS.cm ⁻¹)
		N	Ca	Mg	K	P	Fe	Zn	Cu	Mn	Na	S	
Testigo (T_e)	8,3	6,2	12,6	5,4	3,6	0,3	ND	ND	ND	ND	9,3	0,9	0,2
Nutrición baja (N_b)	6,7	94,6	94,2	22,3	145,6	18,4	0,3	0,1	0,1	ND	12,1	35	1,3
Nutrición alta (N_a)	6,6	227	202,7	49,5	341,4	46,1	1,2	0,5	0,5	0,7	16,3	78,8	2,5

*CE: conductividad eléctrica (mS.cm⁻¹)

Para la preparación de las soluciones nutritivas correspondientes a los tratamientos de baja y alta concentración de nutrientes, se utilizaron fertilizantes hidrosolubles como fosfato monopotásico, sulfato potásico, sulfato de magnesio, nitrato cálcico, nitrato potásico y pre-mezclas de micronutrientes. Posteriormente, las disoluciones se distribuyeron en 3 tanques de almacenamiento para los tratamientos N_a , N_b y T_e , respectivamente. Las soluciones nutritivas fueron aplicadas en cada evento de riego mediante sistema de riego por nebulización.

Como área experimental para la producción de FVH, se utilizó una estructura metálica 3 m de largo, 1,2 m de ancho y 2 m de altura, la cual fue dividida horizontalmente en 5 estantes separados cada 0,40 m, con un desnivel de 1% desde el centro de la estructura hacia el borde, en ambos lados.

Se utilizó un diseño unifactorial e irrestricto al azar, donde el nivel de nutrición y la especie vegetal, correspondieron a las variables independiente y dependiente, respectivamente. La estructura fue dividida verticalmente en 3 secciones, que fueron asignadas aleatoriamente a cada uno de los 3 tratamientos. Cada sección vertical estuvo compuesta por 5 estantes horizontales y en cada estante hubo 4 repeticiones distribuidas aleatoriamente. Una repetición correspondió a una bandeja plástica (0,55 m x 0,30 m = 0,165 m²) con FVH. Las muestras fueron tomadas del centro de cada bandeja, con el fin de descartar efectos de borde. Además, entre tratamientos o sectores, hubo una bandeja de FVH de división utilizada como borde.

Para la producción de FVH, se aplicó el procedimiento descrito por Vargas-Rodríguez (2008), que va desde la preparación de la semilla hasta la cosecha. El primer paso incluye la

selección, limpieza y pre-lavado de las semillas. Seguidamente se desinfectó por inmersión en una solución de 100 g.l⁻¹ de Hidróxido de Calcio (8 horas), se realizó un lavado de la cal y se sumergió en Busamart® (TCMTB: benzotiazol) a una dosis de 1 ml.l⁻¹ (5 minutos). A continuación, se realizó un lavado del TCMTB y las semillas se dejaron expuestas al aire del ambiente (1 hora).

Para pregerminar la semilla, se sometió a un proceso de imbibición, sumergiéndola en agua por un periodo de 10 horas. Consecutivamente, la semilla se colocó en bandejas plásticas, cubierta con papel húmedo, a una densidad de 3 kg.m⁻² según promedio reportado en la literatura (FAO 2001, Vargas 2008, Salas *et al.* 2010, Maldonado *et al.* 2013).

La germinación (3 días) se realizó en cámara oscura, a una humedad relativa superior a 85% y una temperatura de 23 a 25°C. Concluida la germinación, se inició la etapa de crecimiento (11 días). Para ello, se retiró el papel de protección de la semilla y se colocaron las bandejas en la estructura de producción de FVH ubicada dentro del invernadero.

La edad de cosecha a los 11 días fue definida al considerar como criterio, que la mayor

riqueza nutricional del FVH, en cuanto a proteína cruda y digestibilidad, se alcanza aproximadamente a los 10-11 días, mientras que inicia un descenso apreciable en el valor de algunos parámetros nutricionales (Salas *et al.* 2010, Herrera-Torres *et al.* 2010). Al respecto Salas *et al.* (2010), reportaron un descenso en el contenido de proteína cruda y la digestibilidad, debido al incremento del contenido de materia seca estructural conforme aumenta la edad del forraje.

El sistema de riego estuvo compuesto por i- tanques de almacenamiento, ii- bombas de impulsión, iii- tubería de conducción (PVC de 19 mm), iv- microaspersores autocompensados, v- reguladores de presión y vi- manómetros. Cada estante o nivel tenía 4 líneas de riego (PE de 16 mm), provistas de 2 aspersores cada una, para un total de 20 líneas y 40 aspersores en toda la estructura. La programación del riego se realizó por tiempos fijos, medidos con un programador (timer), con una duración de 15 segundos y una frecuencia cada 45 minutos, en un intervalo horario de 6 a.m. a 6 p.m. En el Cuadro 2 se presenta el balance de agua en el sistema de cultivo de FVH para cada tratamiento, durante 11 días del ciclo de cultivo.

Cuadro 2. Balance hídrico en los diferentes tratamientos utilizados en la producción de forraje verde hidropónico de maíz.

Entradas (l.m ⁻²)	Parámetro	Testigo	Bajo	Alto
	Riego	11,7	12,1	8,9
Salidas (l.m ⁻²)	Pérdidas laterales	4,1	4,1	2,6
	Drenaje	3,3	4	0,6
	ET _c	3,6	3,1	5,1
	Total salidas	11	11,2	8,3
Balance (l.m ⁻²)		0,6	0,9	0,5

Al final de la etapa de crecimiento del FVH de maíz, se determinaron como variables de respuesta, la altura, el peso fresco (PF), la materia seca (MS), la eficiencia de conversión (EC) y la composición de nutrientes minerales (%) en el FVH. La altura de la planta (cm) se midió diariamente durante el ciclo de cultivo, desde la base de la plántula hasta el final de la hoja candela. El peso fresco (kg.m⁻²) se calculó a partir del peso

fresco de FVH obtenido por bandeja (0,55 m x 0,30 m = 0,165 m²).

La EC (kg.kg⁻¹), definida como la producción de PF por kg de semilla, se obtuvo como el cociente entre el peso fresco (kg.m⁻²) y el peso de semilla seca utilizada (kg.m⁻²). El contenido de materia seca (MS) se determinó en horno a 105°C hasta peso constante.

Para el análisis del contenido mineral del FVH, para cada tratamiento, se tomó una muestra compuesta a partir de submuestras de MS de las 4 repeticiones en cada uno de los 5 niveles, con el objetivo de obviar el efecto de la reducción de luz solar, según la posición descendente desde el nivel superior hasta el estante inferior. Además, Bertsh (2003), recomienda que las muestras de peso seco se pueden fundir en una sola, ya que el coeficiente de variación entre las repeticiones de concentraciones, experimentalmente ha dado valores menores a 15%, y que efectuar los análisis individuales para cada repetición y tejido encarece drásticamente los costos.

Los datos de las variables de respuesta fueron sometidos a la verificación de normalidad

y homocedasticidad, con el apoyo del programa informático Infostat (Di Rienzo *et al.* 2011). Al cumplirse dichos supuestos, los datos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANDEVA), y si este fue significativo, se procedió a una comparación múltiple de medias con LSD FISHER ($p < 0,05$).

RESULTADOS

Las variables de respuesta para determinar si la aplicación de nutrientes minerales mediante solución nutritiva afecta la productividad del FVH de maíz, se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Valores promedio de altura, peso fresco (PF), materia seca (MS) y eficiencia de conversión (EC) de forraje verde hidropónico de maíz.

Tratamiento	Variables				
	Altura (cm)	PF (kg.m ⁻²)	MS (%)	MS (kg.m ⁻²)	EC (kg.kg ⁻¹)
Testigo (T _e)	26,71 a	15,20	8,2	1,26	5,06
Nutrición baja (N _b)	26,05 ab	15,27	8,8	1,35	5,08
Nutrición alta (N _a)	30,21 b	15,37	9,0	1,36	5,11
Promedio	-	15,28	8,7	1,32	5,08
C.V.	7,60	12,15	5,77	12,20	12,13
Valor p	<0,0001	0,9585	0,1193	0,1068	0,9672

Medias con letra distinta presentan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Respecto a la altura del FVH, el tratamiento N_b no mostró diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) respecto a los tratamientos N_a y T_e, sin embargo, el tratamiento N_a fue estadísticamente superior ($p < 0,05$) al tratamiento T_e (Cuadro 3). La altura promedio de los tratamientos N_b-T_e fue de 26,38 cm, mientras que el promedio de los tratamiento N_b-N_a fue de 28,13 cm.

Por otra parte, no hubo efecto de los tratamientos de nutrición sobre la producción de PF, MS y la EC ($p > 0,05$), donde los valores

promedios de todos los tratamientos fueron 15,28 kg.m⁻² de PF, 8,7% de MS, 1,32 kg.m⁻² de MS y 5,08 kg.kg⁻¹ de EC (Cuadro 3).

La aplicación de nutrientes minerales mediante solución nutritiva no afectó la composición mineral ($p < 0,05$) del FVH, ya que fueron prácticamente similares en todos los tratamientos. No obstante, el tratamiento N_a fue ligeramente superior respecto a los tratamientos T_e y N_b (Cuadro 4). Las mayores diferencias de N_a respecto al promedio N_b-T_e, fueron 0,32% de N,

Cuadro 4. Contenido de macro y micronutrientes en forraje verde hidropónico de maíz.

Tratamiento	%						Mg.kg ⁻¹			
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Zn	Mn	B
Testigo (T _c)	3,26	0,53	0,29	0,22	0,92	0,22	70	50	143	<4
Solución Baja (N _b)	3,31	0,56	0,30	0,23	0,99	0,24	78	56	160	<4
Solución Alta (N _a)	3,60	0,65	0,53	0,28	1,66	0,32	97	60	158	15
Promedio	3,39	0,58	0,37	0,24	1,19	0,26	82	55	154	15

0,24% de Ca, 0,71% de K para los macronutrientes; y 23 mg.kg⁻¹ de Fe, 7 mg.kg⁻¹ de Zn y 3,5% de Mn en el caso de micronutrientes.

DISCUSIÓN

En la literatura reportada, existen diferencias en aspectos productivos y metodológicos de la técnica, tales como genotipos, densidades de

siembra, días de cosecha, condiciones climáticas y el manejo del riego y la nutrición. Esto tiene como consecuencia una alta variabilidad en los resultados reportados por diferentes autores. En el caso de la nutrición del FVH, las concentraciones de nutrientes minerales en solución utilizados para la fertilización varían ampliamente (Cuadro 5), con resultados muy variables y sin un panorama claro acerca de la justificación de fertilizar el cultivo de FVH.

Cuadro 5. Concentración de nutrientes en diferentes soluciones utilizadas para fertilizar el forraje verde hidropónico.

Autor	Tipo	Material	Nutrientes (mg.l ⁻¹)						
			N	P	K	Ca	Mg	S	Fe
FAO 2001	Sol. Química	No indica	207	83	178	-	71	90	10
Cuesta y Machado 2009	Agua	Maíz	Agua, no especifican concentraciones						
Al-Karaki y Al-Hashimi (2012)	Agua	Sorgo Cebada, Trigo	Agua, no especifican concentraciones						
Rivera <i>et al.</i> 2010	Sol. Compuesta	Maíz	10	4	7	-	0,2	0,8	200
			5	15	5	300	400	1620	800
Salas <i>et al.</i> 2010	Sol. Química	Maíz	202	48	32	81	60	9,4	23
	Té Compost	Maíz	238	39	53	80	91	2,6	10,4
	Agua		nd	nd	14	47	8	13	nd
	Vermicompost		101	10	50,7	200	27		4,3
Salas <i>et al.</i> 2012	Té compost	Maíz	170	28	34	245	32		4,5
	Sol. Química		202	48	32	81	61		24
Maldonado <i>et al.</i> 2013	Sol. Química	Trigo	Agua y 5 modificaciones en la relación NO ₃ -/NH ₄ ⁺						
			204	87	395	-	-	-	-
Candía 2014	Sol. Guano de Cuy	Cebada	401	174	791	-	-	-	-

Por tanto, en este estudio se evaluó el efecto de la aplicación de soluciones nutritivas sobre la altura, el peso fresco (PF), la materia seca (MS) y la eficiencia de conversión (EC) (Cuadro 3) y sobre la composición mineral del FVH (Cuadro 4).

La altura representó un parámetro importante a considerar para el diseño de la infraestructura, ya que permitía determinar la separación entre niveles o estantes dentro del módulo de producción. Una mayor altura del tratamiento N_a respecto al tratamiento T_e ($p < 0,05$), probablemente se debe al efecto de una mayor concentración de N aplicado en N_a , lo cual favorece el crecimiento vegetativo mediante la elongación celular. Sin embargo, estas diferencias en altura no afectaron el rendimiento de PF, los contenidos de MS y la EC (Cuadro 3).

En este estudio, las diferencias en producción de PF y MS, en la EC y la composición mineral del FVH de maíz, respecto a lo reportado en la literatura, probablemente obedece a la variabilidad asociada a los genotipos utilizados, la densidad de siembra (kg.m^{-2}), los días de cosecha (Vargas 2008, Meza Carranco 2005), manejo del riego y la nutrición (Maldonado *et al.* 2013, Salas *et al.* 2010 y 2012 y Rivera *et al.* 2010) y a las condiciones de clima, entre otros.

La altura del FVH de maíz alcanzada a los 11 días de cosecha (26-30 cm), fueron similares a los valores reportados por Rivera *et al.* (2010) de 28,5 cm; mientras que FAO (2001), Rodríguez *et al.* (2012) y Vargas (2008), reportaron alturas inferiores (19,5 cm en promedio) a los 8 días (20 cm), 10 días (22 cm) y 12 días de cosecha, respectivamente.

En rendimiento, la nutrición mineral aplicada mediante soluciones nutritivas no tuvo efecto ($p > 0,05$) sobre el PF de FVH de maíz, lo cual coincidió con estudios similares realizados por Salas *et al.* (2010 y 2012). Salas *et al.* (2010) quienes reportaron rendimientos similares ($16,49 \text{ kg.m}^{-2}$) al cosechar a los 12 días de edad y utilizar concentraciones de nutrientes similares al tratamiento N_a . Por otra parte, los valores de PF obtenidos (Cuadro 3), fueron inferiores a los reportados por otros autores, lo cual probablemente está relacionado con el genotipo usado,

días de cosecha, fertilización y densidad de siembra. En estudios realizados por Muñoz *et al.* (2008), reportaron rendimientos $21,8 \text{ kg.m}^{-2}$ de PF para densidades de $6,3 \text{ kg.m}^{-2}$ de semilla.

Respecto a los contenidos (8,2% - 9%) y rendimientos de MS ($1,26$ a $1,36 \text{ kg.m}^{-2}$) en el FVH, no fueron afectados ($p > 0,05$) por los tratamientos de nutrición mineral. Lo anterior coincide con estudios similares realizados por Rivera *et al.* (2010), donde no obtuvieron diferencias en los valores de MS cuando aplicaron 2 diferentes soluciones nutritivas, aunque reportaron valores superiores de MS (17,2%). Por otra parte, Campêlo *et al.* (2007), obtuvieron 11,54% de MS en FVH de maíz, sin utilizar fertilización mineral; mientras que Vargas (2008) y Meza Carranco (2005) reportaron incrementos significativos de MS en FVH, conforme incrementa la edad de cosecha.

En el presente estudio, aún cuando los valores de MS fueron bajos (8,7%), se observó una alta DMS en el FVH de maíz (88,6% datos no reportados), al presentar contenidos superiores a los rangos reportados (64,3%-78,7%) por Gómez (2008) y López-Aguilar *et al.* (2009).

Respecto al rendimiento de MS se obtuvo un promedio de $1,32 \text{ kg.m}^{-2}$, un valor inferior a los reportados en literatura con rendimientos de $1,87$ - $2,3 \text{ kg.m}^{-2}$ de MS para FVH de maíz (Gómez 2008); $1,8 \text{ kg.m}^{-2}$ para maíz amarillo y $2,09 \text{ kg.m}^{-2}$ para maíz blanco (Muñoz *et al.* 2008). Los bajos valores de MS obtenidos y altos contenidos de agua en el FVH, implicarían un incremento en las cantidades necesarias de ingesta animal, para llenar los requerimientos de consumo de MS, lo cual supone una probable limitación desde el punto de vista práctico y económico.

Ante esta situación, una alternativa es utilizar el FVH como suplemento nutritivo en dietas convencionales basadas en el consumo de forrajes convencionales y heno. De esta forma, se aprovechan otras ventajas nutricionales del FVH tales como su excelente nivel de proteína (Salas *et al.* 2010), adecuado balance en la relación fibra soluble/fibra insoluble (Gómez 2008), alta digestibilidad de MS (Gómez 2008) y buen aporte de energía (López-Aguilar *et al.* 2009).

A pesar de presentar contenidos relativamente bajos de MS en el FVH, si se considera un sistema de producción continuo anual de 30 ciclos de 12 días, el rendimiento obtenido ($1,32 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) equivale a $400 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de MS. Esto representa un sustancial incremento (733%) respecto al promedio en pastos a campo abierto ($48 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) reportado por Villalobos (2006), Andrade (2006) y Salazar (2007).

Probablemente, en este estudio la calidad de la semilla fue un factor que afectó la producción de MS en el FVH de maíz. Es fundamental considerar la calidad física, fisiológica, genética y fitosanitaria de la semilla (FAO 2011), ya que representó una de las principales limitantes en la producción de FVH (Valdivia 1997), debido a la reducción del rendimiento, al incremento en los costos de producción y a los riesgos para la salud animal y humana, por la presencia de aflatoxinas (Figueroa 2006, Urrego y Díaz 2006). En este estudio, la calidad de la semilla de “Diamantes 8843” a pesar de ser una semilla certificada por la Oficina Nacional de Semillas, presentó múltiples problemas asociados con la calidad fitosanitaria.

La EC no fue afectada por los tratamientos de nutrición ($p > 0,05$), sin embargo, los rendimientos obtenidos son aceptables según los valores reportados por diferentes autores. La EC promedio de todos los tratamientos de ($5,1 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (Cuadro 3), fue similar al promedio de $5 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ reportado por Rodríguez *et al.* (2012) y Salas *et al.* (2012). Valdivia (1997), considera un buen rendimiento $5 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, aunque señala que lo óptimo sería una EC de 6 a $7 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Otros estudios reportaron valores de EC inferiores a los obtenidos en esta investigación, tales como $4 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ con maíz blanco a los 12 días y a una densidad de siembra de $3,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (Muñoz *et al.* 2008); y de $4,3 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en maíz (Vargas-Rodríguez 2008).

Estas diferencias podrían ser atribuibles a las variaciones en los días de cosecha, fertilización, genotipos y densidad de siembra.

En esta investigación, la aplicación de nutrientes minerales no afectó la composición mineral del FVH de maíz (Cuadro 4). Los estudios reportados sobre el efecto de la aplicación de la nutrición mineral en FVH, se enfocan en la evaluación de variables de producción y bromatológicas (Rivera *et al.* 2010, Salas *et al.* 2010 y 2012, Maldonado *et al.* 2013), y muy pocos estudios evalúan el efecto sobre la composición mineral del FVH.

En un estudio similar realizado por López-Aguilar *et al.* (2009), con FVH de maíz a una densidad de $2,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 14 días de cosecha y regado con agua, se observó que el contenido de nutrientes en los diferentes tratamientos fueron superiores en P, Ca, K, similares en Mg y Zn y ligeramente inferiores en Fe, aunque dicha investigación no reporta cuál es el aporte de nutrientes del agua de riego, lo cual dificulta las comparaciones. En otro estudio, Bedolla-Torres *et al.* (2015), al aplicar solución nutritiva de Hoagland, reportaron contenidos de potasio y calcio en FVH de maíz, inferiores a las obtenidas, pero no se especifica cuál es la concentración usada de cada nutriente.

Adicionalmente, en esta investigación se evaluó el potencial del FVH como fuente para suplir los requerimientos minerales en alimentación animal. Para ello se comparó la composición mineral del FVH obtenido, con las recomendaciones de nutrientes minerales en vacas lactantes y rumiantes (Cuadro 6) según NRC (1996 y 2001), con los contenidos de nutrientes minerales en forrajes convencionales a campo abierto según Villalobos (2006), Andrade (2006) y Salazar (2007) y con los rangos generales en pastos de Costa Rica según Cabalceta (1999) (Cuadro 7).

Cuadro 6. Recomendación de niveles de macro y micro nutrientes en vacas lactantes y rumiantes en desarrollo.

Autor	%					Mg.kg ⁻¹		
	P	Ca	Mg	K	Fe	Cu	Zn	Mn
Rumiantes ^b	0,18-0,43	0,18-0,60	0,13-0,15	0,60-0,80	40-50	5-20	30-50	-----
Vacas lactantes ^a	0,32-0,44	0,53-0,67	0,18-0,21	1,01-2	12,3-18	9-11	43-55	12-14

Fuente: ^aNRC (1996), ^bNRC (2001).

Cuadro 7. Contenidos de macro y micro nutrientes pasturas de campo abierto y en FVH de maíz.

Autor	Pastura	%					mg.kg ⁻¹		
		P	Ca	Mg	K	Fe	Cu	Zn	Mn
Villalobos (2006)	Ryegrass	0,39	0,68	0,21	3,64	86,2	12,1	49,8	51,3
Andrade (2006)	Kikuyo	0,37	0,41	0,30	2,94	109	10,0	28,6	75,1
Salazar (2007)	Estrella	0,33	0,42	0,22	2,73	189,8	11,28	28,9	80,5
Cabalçeta (1999)	Pastos	0,31-0,60	0,43-0,80	0,20-0,40	0,8-2,0	50-100	10-20	40-100	40-100
López-Aguilar <i>et al.</i> (2009)	FVH	0,38	0,26	0,28	0,82	98	15	52	-----

En general, en todos los casos se demostró el potencial del FVH como fuente para suplir los requerimientos minerales en alimentación animal. Según los niveles críticos reportados por NRC (2001) para vacas lactantes (Cuadro 6), el contenido mineral del FVH de cada tratamiento, podría suplir todos los elementos minerales, a excepción del calcio en los tratamientos T_e y N_b (Cuadro 4). De igual forma, según NRC (1996), en todos los tratamientos el FVH presenta concentraciones óptimas de minerales, capaz de suplir los requerimientos para mantenimiento y desarrollo del rumiante.

Al comparar los valores de nutrientes minerales de pasturas de campo abierto (Cuadro 7) con los promedios obtenidos en FVH de los 3 tratamientos (Cuadro 4), se observó que estos fueron superiores para el P, Zn, Mn y Cu; similares para el Mg e inferiores para el Ca, K, Fe. Mientras que respecto a los rangos generales

de concentración mineral en pastos de Costa Rica reportados por Cabalçeta (1999) (Cuadro 7), todos los nutrientes se encontraron dentro del rango óptimo, con excepción del Mn que fue superior sin alcanzar niveles tóxicos y el Ca, que se encuentra ligeramente por debajo del valor crítico en los tratamientos N_b y T_e.

Por tanto, los resultados obtenidos sugieren que el FVH es una fuente óptima de macro y micro-nutrientes para alimentación animal, independientemente de la aplicación de solución nutritiva como fuente fertilizante durante el ciclo de cultivo.

CONCLUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos bajo las condiciones climáticas y de manejo del presente estudio, se concluye que no es necesaria

la utilización de soluciones nutritivas para la producción de Forraje Verde Hidropónico de maíz (cv. Diamante 8883) a los 11 días de cosecha. La aplicación de solución nutritiva no afectó la composición mineral, la altura y el rendimiento en términos de PF y EC, del FVH de maíz. Por tanto, no se encontraron diferencias atribuibles al uso de diferentes concentraciones de nutrientes minerales aplicadas mediante solución nutritiva como fuente fertilizante. Adicionalmente, los valores obtenidos en las variables de respuesta a los tratamientos, demostraron el potencial de utilización del FVH como fuente de alimentación en producción animal.

LITERATURA CITADA

- Al-Karaki, GN; Al-Hashimi, M. 2012. Green Fodder Production and Water Use Efficiency of Some Forage Crops under Hydroponic Conditions. ISRN Agronomy. 2012:1-5.
- Andrade, M. 2006. Evaluación de técnicas de manejo para mejorar la utilización del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) en la producción de ganado lechero en Costa Rica. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 140 p.
- Bedolla-Torres, MH; Palacios, EA; Palacios, OA; Choix, FJ; Valle, F de JA; López Aguilar, DR; Espinoza, VJL; de La Pena, R de L; Trujillo, AG; Avila, NY; Ortega, PR. 2015. La irrigación con levaduras incrementa el contenido nutricional del forraje verde hidropónico de maíz. Revista Argentina de Microbiología 47(3):236-244.
- Bertsch, F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 307 p.
- Cabalceta, G. 1999. Fertilización y nutrición de forrajes de altura. In XI Congreso Nacional Agronómico. III Congreso Nacional de Suelos. (80, 1999, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. 239-254 p.
- Campêlo, J; Gomes, A; Silva, J; Carvalho, G; Coutinho, M; Oliveira, J; López, J; Silva, V; Marchão, M. 2007. Forragem de milho hidropônico produzida com diferentes substratos. Rev. Bras. Zootec. 36(2):276-281.
- Candía, L. 2014. Evaluación de la Calidad Nutritiva de Forraje Verde de Cebada *Hordeum vulgare* hidropónico, fertilizado con soluciones de guano de Cuy (*Cavia porcellus*) a dos concentraciones. Salud Tecnol. Vet. 2:55-62.
- Cuesta, T; Machado, R. 2009. Producción y evaluación de la calidad nutricional del forraje verde hidropónico (FVH) a base de maíz (*Zea mays*) como alternativa para la alimentación de pollos de engorde en la Estación Ambiental Tutunendo, Chocó, Colombia. Biotecnia 6(2):127-134.
- CORFOGA (Corporación de Fomento Ganadero). 2013. Informe Encuesta Ganadera Nacional 2012 (en línea). Madrigal, PJ; Fallas, MA. San José, Costa Rica. Corporación Ganadera. 72 p. Informe. Consultado 9 nov. 2014. Disponible en <http://www.corfoga.org/estadisticas/poblacion-animal/>
- Elizondo, J. 2008. Forraje verde hidropónico. Una alternativa para la producción animal. Revista ECAG informa (32):36-39.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2001. Manual Técnico: Forraje Verde Hidropónico (en línea). Santiago, Chile. Oficina Regional de la FAO para América Latina y El Caribe. 55 p. Consultado 9 nov. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-ah472s.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2011. Manual técnico: Semillas en emergencias. In Estudio FAO Producción y Protección Vegetal 202. Roma, Italia. p. 1-83.
- FCGG-MAG (Federación de Cámaras de Ganaderos de Guanacaste - Ministerio de Agricultura y Ganadería. Región Chorotega, Costa Rica). 2007. Plan Estratégico para el desarrollo de la agrocadena de la ganadería bovina de carne en la Región Chorotega. San José, Costa Rica. 72 p.
- Figueroa, SE. 2006. Micotoxinas y micotoxicosis en el ganado bovino lechero. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas 5:89-94.
- Gómez, J. 2008. Evaluación de la producción y la composición nutricional de tres tipos diferentes de forraje hidropónico. Proyecto Lic. Tegucigalpa, Honduras. Zamorano. 16 p.
- Herrera-Torres, E; Cerrillo-Soto, MA; Juarez-Reyes, AS; Murillo-Ortiz, M; Rios-Rincon, FG; Reyes-Estrada, O; Bernal-Barragan, H. 2010. Effect of Harvest Time on the Protein and Energy Value of Wheat Hydroponic Green Fodder. Interciencia 35(4):284-289.
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; Gonzalez, L; Tablada M; Robledo, CW. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA (en línea, programa informático). Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba. Consultado 15 feb. 2016. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>
- INTA-AECI (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Costa Rica–Agencia Española de Cooperación Internacional). 2005. Proyecto de Granos Básicos: Variedad de Maíz Los Diamantes 8843. San José. Costa Rica. 6 p.

- Lomeli, ZHM. 2000. Forraje verde hidropónico. El forraje del futuro...Hoy. *Agrocultura* 63:15-18.
- López-Aguilar, R; Murillo-Amador, B; Rodríguez-Quezada, 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, R; Álvarez, M; Cristóbal, D; Ríos, E. 2013. Nutrición Mineral de Forraje Verde Hidropónico. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19(2):211-223.
- Meza Carranco, Z. 2005. Evaluación de variedades de maíz y densidad de siembra en la producción de forraje verde hidropónico. Tesis M.Sc. Nuevo León, Mexico. Universidad Autónoma de Nuevo León. 165 p.
- Muñoz, G; Camero, L; Ramírez, C. 2008. Evaluación Biológica y Económica del Uso de Forraje Verde Hidropónico (FVH) en la Producción de Leche. Informe Final. Proyecto de Investigación 5402-2151-7501. Cartago, Costa Rica. Vicerrectoría de Investigación y Extensión. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 66 p.
- NRC (National Research Council). 1996. Nutrient requirements of dairy cattle N° 5. 5 ed. Washington D.C., USA. National. Academy of Science -National Research Council. 370 p.
- NRC (National Research Council). 2001. Nutrient requirements of dairy cattle N° 7 ed. Washington D.C., USA. National. Academy of Science -National Research Council. 381 p.
- Ramírez, C. 2016. Efecto de la nutrición sobre la calidad del Forraje Verde Hidropónico en la Zona de Alajuela, Costa Rica. Tesis Lic. San José, Costa Rica. Universidad De Costa Rica. 81 p.
- Rivera, A; Moronta, M; Gonzáles-Estopiñam, M; Gonzáles, D; Perdomo, D; García, D; Hernández, G. 2010. Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de iluminación deficiente. *Zootecnia Tropical* 28(1):33-41.
- Rodríguez, H; Gómez, A; López, J; Loya, L; Ley De Coss, A. 2012. Forraje verde hidropónico de maíz amarillo (*Zea maíz* L.) con diferente concentración de solución nutritiva. *Abanico Veterinario* 2(3):20-28.
- Rodríguez, S. 2002. Hidroponía agricultura y bienestar. Universidad Autónoma de Chihuahua, México. 175 p.
- Salas, L; Esparza, J; Preciado, P; Álvarez, V; Meza, J; Velázquez, J; Murillo, M. 2012. Rendimiento, Calidad Nutricional, Contenido Fenólico y Capacidad Antioxidante de Forraje Verde Hidropónico de Maíz (*Zea mays*) Producido en Invernadero Bajo Fertilización Orgánica. *Interciencia* 37(3):215-220.
- Salas, L; Preciado, P; Esparza, J; Álvarez, V; Palomo, A; Rodríguez, N; Márquez, C. 2010. Rendimiento y calidad de forraje hidropónico producido bajo fertilización orgánica. *Terra Latinoamericana* 28(4):355-360.
- Salazar, S. 2007. Disponibilidad de biomasa y valor nutricional del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en el distrito de Quesada, Cantón de San Carlos. Tesis Lic. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 96 p.
- Tobía, C; Rojas, A; Villalobos, E; Soto, H; Uribe, L. 2004. Sustitución parcial del alimento balanceado por ensilaje de soya y su efecto en la producción y calidad de la leche de vaca, en el trópico húmedo de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28(2):27-35.
- Urrego, NJ; Días, GJ. 2006. Aflatoxinas: mecanismos de toxicidad en la etiología de cáncer hepático celular. *Revista de la Facultad de Medicina* 54(2):108-116.
- Valdivia, E. 1997. Producción de forraje verde hidropónico. Conferencia Internacional de Hidroponía Comercial. Centro de Investigación de Hidroponía y Nutrición Mineral. Lima, Perú. p. 91-99.
- Vargas-Rodríguez, C. 2008. Comparación productiva de forraje verde hidropónico de maíz, arroz y sorgo negro forrajero. *Agronomía Mesoamericana* 19(2):233-240.
- Vargas, M. 2008. Evaluación productivo-ambiental de dos genotipos de maíz (*Zea mays*: L.) en forraje verde hidropónico bajo invernadero. Tesis Lic. Durango, México. Instituto Politécnico Nacional. 76 p.
- Villalobos, L. 2006. Disponibilidad y valor nutricional del pasto Ryegrass Perenne Tetraploide (*Lolium perenne*) en las zonas altas de Costa Rica. Tesis Lic. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 140 p.

