

**Universidad Zamorano**  
**Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria**  
**Ingeniería Agronómica**



**Universidad  
Zamorano®**

Proyecto Especial de Graduación  
**Análisis Comparativo de Tasas de Fertilización en el Cultivo de Maíz**  
**(*Zea mays* L.) para Forraje**

Estudiantes

Aron Matsumoto Nishizawa

Felipe Maximiliano Vera Arias

Asesores

Ricardo Alexander Peña Venegas Ph.D.

Ángel Augusto Suazo Ramirez MAE

Honduras, septiembre 2025

**Autoridades**

**KEITH L. ANDREWS**

Rector a.i.

**ANA M. MAIER ACOSTA**

Vicepresidenta y Decana Académica

**CELIA O. TREJO RAMOS**

Directora Departamento Ciencia y Producción Agropecuaria

**JULIO NAVARRO**

Secretario General

## Contenido

Índice de Cuadros .....	5
Índice de Figuras .....	6
Índice de Anexos .....	8
Resumen .....	11
Abstract .....	12
Introducción .....	13
Materiales y Métodos .....	15
Sitio de Estudio .....	15
Diseño y Establecimiento del Experimento .....	15
Variables Medidas.....	18
Altura de Planta .....	18
Diámetro de Tallo .....	18
Número de Hojas .....	18
Tasa de Crecimiento.....	18
Variables de Rendimiento.....	18
Variables Bromatológicas .....	19
Variables Económicas .....	21
Análisis Estadístico .....	21
Resultados y Discusión.....	22
Crecimiento del Cultivo.....	22
Rendimiento del Cultivo .....	24
Análisis Bromatológico.....	26
Análisis Económico.....	30
Conclusiones .....	32

Recomendaciones.....33

Referencias.....34

Anexos.....37

### Índice de Cuadros

Cuadro 1 Nutrientes utilizados para las diferentes tasas de fertilización (50%, 100%, 150% y Convencional) aplicadas en el experimento de análisis comparativo de tasas de fertilización en el cultivo de maíz para forraje, en el lote 7 de San Nicolás, entre los meses de mayo a agosto del 2024.

..... 15

## Índice de Figuras

Figura 1 Mapa del diseño de bloques completos al azar (BCA) en el experimento de análisis comparativo de tasas de fertilización en el cultivo de maíz para forraje, en el lote 7 de San Nicolás, entre los meses de mayo a agosto del 2024.....	16
Figura 2 Croquis de las unidades experimentales en el experimento de análisis comparativo de tasas de fertilización en el cultivo de maíz para forraje, en el lote 7 de San Nicolás, entre los meses de mayo a agosto del 2024.....	17
Figura 3 Efecto de cuatro tasas de fertilización en el crecimiento del cultivo de maíz, variedad DK-7088, al final del ciclo de cultivo. (a) Altura de planta (cm); (b) Diámetro del tallo (cm); (c) Altura de mazorca y (d) Tasa de crecimiento (cm día <sup>-1</sup> ). Las barras de error representan ± error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un $p < 0.05$ de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey. ....	22
Figura 4 Efecto de cuatro tasas de fertilización en el rendimiento del cultivo de maíz, variedad DK-7088, al final del ciclo de cultivo. (a) Peso de mazorca (g); (b) Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> ); (c) Biomasa del tallo + hoja seca (g) y (d) biomasa aérea seca (g planta <sup>-1</sup> ). Las barras de error representan ± error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un $p < 0.05$ de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey. ....	25
Figura 5 Efecto de cuatro tasas de fertilización en las variables bromatológicas del cultivo de maíz, variedad DK-7088, al final del ciclo de cultivo. (a) Proteína cruda (%); (b) Extracto etéreo (%); (c) Cenizas (%); (d) Fibra detergente acida; (e) Fibra detergente neutra; (f) Energía neta de lactancia; (g) Almidón; (h) Carbohidratos totales. Las barras de error representan ± error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un $p < 0.05$ de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey.....	27
Figura 6 Análisis de utilidad y relación costo beneficio incremental de las cuatro tasas de fertilización en del cultivo de maíz, variedad DK-7088. (a) Utilidad incremental (Lempiras); (b) Relación beneficio-	

costo incremental (RBCI). Las barras de error representan  $\pm$  error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un  $p < 0.05$  de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey. .... 30

## Índice de Anexos

Anexo A Resultados del análisis de químico de suelos elaborado por el Laboratorio de Suelos de Zamorano.....	37
Anexo B Datos del análisis de suelo y recomendaciones de fertilización brindado por el Laboratorio de Suelos de Zamorano.....	38
Anexo C Resultado del análisis de varianza de Welch de Altura de planta. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . ....	39
Anexo D Resultado del análisis de varianza del diámetro del tallo. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . ....	40
Anexo E Resultado del análisis de varianza de altura de la mazorca. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . ....	41
Anexo F Resultado del análisis de varianza de Welch de tasa de crecimiento. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se ha usado el valor $p \leq 0.05$ . ....	42
Anexo G Resultado del análisis de varianza de peso de mazorca. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se ha usado el valor $p \leq 0.05$ . ....	43
Anexo H Resultado del análisis de varianza de Welch del rendimiento. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . ....	44

Anexo I Resultado del análisis de varianza de la biomasa de tallo + hoja seca. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . .....	45
Anexo J Resultado del análisis de varianza de la biomasa aérea seca. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . .....	46
Anexo K .....	47
Anexo L Resultado del análisis de varianza de Welch del porcentaje del extracto etéreo. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . .....	48
Anexo M Resultado del análisis de varianza del porcentaje de cenizas. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . .....	49
Anexo N Resultado del análisis de varianza del porcentaje de fibra detergente acida. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . .....	50
Anexo O Resultado del análisis de varianza del porcentaje de fibra detergente neutra. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . .....	51
Anexo P Resultado del análisis de varianza del porcentaje del almidón. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . .....	52
Anexo Q Resultado del análisis de varianza de la energía neta de lactancia. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor $p \leq 0.05$ . .....	53

Anexo R Resultado del análisis de varianza de los carbohidratos totales. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm$ EE. Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ . ..... 54

## Resumen

El maíz (*Zea mays* L.) para forraje constituye un cultivo estratégico en los sistemas ganaderos debido a su alto rendimiento y valor nutricional. Este estudio tuvo como objetivo comparar el efecto de cuatro tasas de fertilización (convencional, 50%, 100% y 150%) determinadas con base en análisis de suelo, sobre variables agronómicas, bromatológicas y económicas. El experimento se realizó en la Universidad Zamorano utilizando la variedad DK-7088, bajo un diseño de bloques completos al azar. Los resultados mostraron que niveles crecientes de fertilización promovieron un crecimiento más acelerado del cultivo, reflejado en mayor altura de planta, diámetro de tallo y tasa de crecimiento diaria. El rendimiento y la biomasa aérea total también aumentaron significativamente con la fertilización al 150%, siendo estadísticamente superior al tratamiento convencional. En cuanto a la calidad nutricional, únicamente el contenido de proteína cruda presentó diferencias significativas, incrementándose con las dosis más altas de fertilizante. Otras variables bromatológicas, como el contenido de fibra, extracto etéreo, almidón, energía neta de lactancia y carbohidratos totales no fueron significativamente afectadas. Desde el punto de vista económico, todos los tratamientos resultaron rentables, pero no se encontraron diferencias significativas en utilidad incremental ni en la eficiencia económica entre tratamientos. Estos hallazgos sugieren que, aunque mayores niveles de fertilización mejoran ciertos parámetros productivos, el retorno económico adicional puede ser limitado. Se concluye que una fertilización racional, ajustada mediante análisis de suelos, permite optimizar el uso de insumos, mejorar la calidad del forraje y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas productivos.

*Palabras clave:* análisis bromatológico, análisis de suelo, eficiencia económica, maíz forrajero, nutrición vegetal, rendimiento, *Zea mays*.

### Abstract

Corn (*Zea mays* L.) as a forage is a strategic crop in livestock systems due to its high yield and nutritional value. This study aimed to compare the effect of four fertilization rates (conventional, 50%, 100%, and 150%) determined based on soil analysis on agronomic, bromatological, and economic variables. The experiment was conducted at Zamorano University using the DK-7088 variety, under a randomized complete block design. Results showed that increasing fertilization levels promoted faster crop growth, reflected in greater plant height, stem diameter, and daily growth rate. Yield and total aboveground biomass also increased significantly with the 150% fertilization rate, showing statistical difference between the conventional treatment. Regarding nutritional quality, only crude protein content showed significant differences, increasing with higher doses. Other bromatological variables such as fiber content, extract, starch, net energy for lactation, and total carbohydrates were not significantly affected. From an economic perspective, all treatments were profitable, but no significant differences were found in incremental profit or economic efficiency between treatments. These findings suggest that although higher fertilization levels improve certain productive parameters, the additional economic return may be limited. It is concluded that rational fertilization, adjusted through soil analysis, allows for the optimization of input use, improvement of forage quality, and enhancement of the sustainability of production systems.

*Keywords:* bromatological analysis, economic efficiency, forage corn, plant nutrition, soil analysis, yield, *Zea mays*.

## Introducción

El maíz (*Zea mays L.*) es uno de los cultivos más importantes a nivel global, ocupando el tercer lugar en términos de producción y consumo humano y animal, solo por detrás del trigo y el arroz. Su elevada adaptabilidad a diversas condiciones edafoclimáticas, su eficiencia fisiológica como planta tipo C4, y su alta productividad lo convierten en un cultivo estratégico en numerosos sistemas agrícolas de América Latina, África y Asia (Ortigoza Guerreño et al., 2019). Además, su rápido crecimiento y alta eficiencia en el uso de agua y nutrientes lo hacen ideal para ser incorporado en rotaciones intensivas (Chowrasia y Mondal, 2020; Talukder et al., 2024)

El maíz forrajero se ha consolidado como una fuente fundamental de alimento para el ganado debido a su elevado valor nutricional, capacidad de producción de biomasa y buena respuesta al ensilaje, ofreciendo alta digestibilidad y energía por hectárea (Fassio et al., 2018; Kratika Alawe et al., 2020) En América Latina, el uso del maíz forrajero se ha incrementado en sistemas de producción ganadera intensiva, especialmente en países como México, donde su manejo adecuado ha demostrado mejorar la calidad del forraje y los rendimientos (Medina-Cuéllar et al., 2021). Uno de los principales factores que condiciona el rendimiento del maíz forrajero es el manejo de la fertilización. El cultivo requiere cantidades significativas de macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), así como calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y micronutrientes en menor proporción (Jurado Guerra et al., 2014). La deficiencia de uno solo de estos elementos puede limitar severamente el crecimiento y desarrollo de la planta, conforme a la Ley del Mínimo de Liebig, que establece que el rendimiento está limitado por el nutriente más escaso (Espinoza, 1993).

En muchas regiones de América Latina, los programas de fertilización suelen aplicarse sin un diagnóstico previo del suelo, lo cual reduce la eficiencia de uso de los insumos y contribuye al deterioro de las propiedades físicas y químicas del suelo (Dandasena et al., 2024; Kok et al., 2024). Estudios realizados en México han demostrado que el uso de fertilización biológica con extractos de algas o composta, así como el ajuste de dosis de N y P basado en análisis edáficos, mejora significativamente

el rendimiento y las condiciones del suelo (Ávarez-Solís et al., 2010). Asimismo, investigaciones en la Comarca Lagunera, México han evidenciado que el uso de aguas residuales tratadas combinadas con fertilización puede aumentar el contenido foliar de nutrientes y la productividad del maíz forrajero (Muñoz Villalobos et al., 2017) .

En este contexto, el análisis del suelo constituye una herramienta esencial para definir estrategias de fertilización racionales y sostenibles. Permite identificar las deficiencias específicas del suelo y ajustar las dosis de nutrientes a las necesidades reales del cultivo, promoviendo la eficiencia agronómica y económica (Wang et al., 2023). Además, la integración de tecnologías como sensores remotos ha permitido mapear espacialmente la variación del contenido de nitrógeno en cultivos de maíz forrajero, mejorando la toma de decisiones sobre fertilización sitio-específica (Rivera et al., 2017).

Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de tasas de fertilización en el cultivo de maíz para forraje, entre el programa de nutrición convencional manejado por la Unidad de Pastos y Forrajes, y un plan de fertilización basado en análisis de suelos.

## Materiales y Métodos

### Sitio de Estudio

El estudio se desarrolló en el lote 7 de San Nicolás, Universidad Zamorano (13°59'49" latitud norte y 87°0'40" longitud oeste), ubicada en el Km 30 Carretera de Tegucigalpa a Danlí, Valle de Yeguaré, San Antonio de Oriente, Francisco Morazán, Honduras, durante los meses de mayo a agosto del año 2024.

### Diseño y Establecimiento del Experimento

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar (BCA) (Figura 1), esto debido a la heterogeneidad intrínseca de los suelos que representó una fuente de variación para la evaluación, con lo cual al utilizar este diseño se buscó reducir el error experimental y aumentar la precisión. El experimento constó de 4 tratamientos, los cuales corresponden a: la dosis aplicada regularmente en la unidad, denominada como dosis convencional y 50%, 100% y 150% de la tasa de fertilización (Cuadro 1) calculada con base en el análisis de suelo (Anexo A y B).

### Cuadro 1

*Nutrientes utilizados para las diferentes tasas de fertilización (50%, 100%, 150% y Convencional) aplicadas en el experimento de análisis comparativo de tasas de fertilización en el cultivo de maíz para forraje, en el lote 7 de San Nicolás, entre los meses de mayo a agosto del 2024.*

Fertilizantes	Convencional (kg ha <sup>-1</sup> )	50% (kg ha <sup>-1</sup> )	100% (kg ha <sup>-1</sup> )	150% (kg ha <sup>-1</sup> )
N	116.12	207.55	415.11	622.66
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	83.46	49.53	99.07	148.60
K <sub>2</sub> O	-	46.12	92.23	138.35
CaO	-	5.46	10.92	16.38
MgO	-	7.35	14.69	22.04

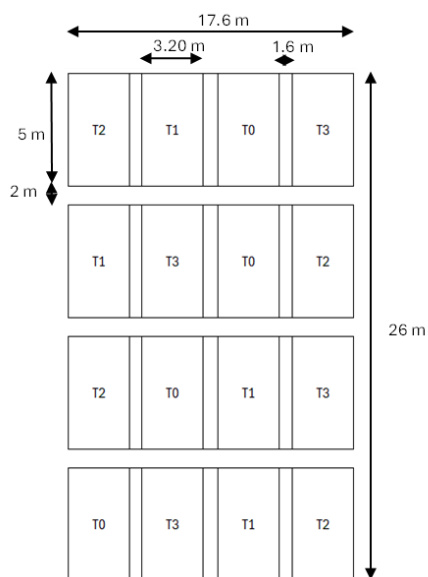
*Nota.* N = Nitrógeno; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Pentóxido de fósforo (fósforo disponible); K<sub>2</sub>O = Óxido de potasio (potasio disponible); CaO = Óxido de calcio (calcio); MgO = Óxido de magnesio (magnesio).

Este diseño fue conformado por 4 bloques, los cuales, a su vez, representaron un mismo número de repeticiones. El área experimental contó con 26 m de largo y 17.6 m de ancho, con un área de 457.6 m<sup>2</sup> (Figura 1). Las unidades experimentales (UE) contaron con dimensiones de 5 m x 3.2 m, para un área total de 16 m<sup>2</sup> por cada una (Figura 2). Esto se traduce a 180 plantas por UE tomando en

cuenta que el porcentaje de germinación de la semilla fue del 90% y un total de 2880 plantas en todo el experimento. El experimento contó con un total de 16 unidades experimentales.

**Figura 1**

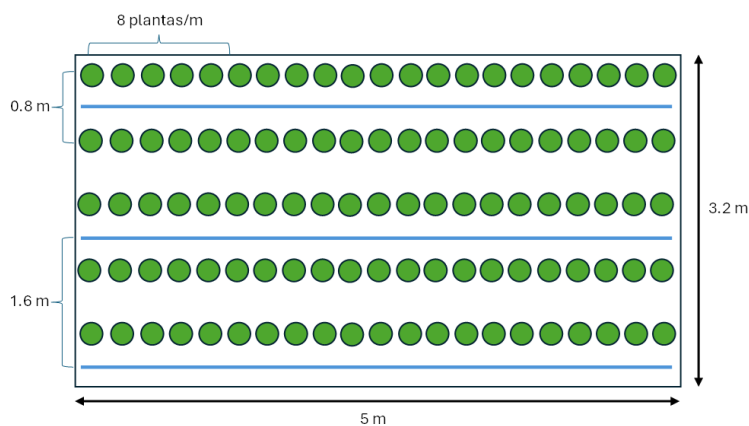
*Mapa del diseño de bloques completos al azar (BCA) en el experimento de análisis comparativo de tasas de fertilización en el cultivo de maíz para forraje, en el lote 7 de San Nicolás, entre los meses de mayo a agosto del 2024.*



La siembra se efectuó el mes de mayo del año 2024, bajo un sistema de siembra convencional utilizando como semilla la variedad DK-7088 VT Triple PRO, el cual se caracteriza por su resistencia al herbicida glifosato, cuenta con protección contra plagas de follaje, raíz y mazorca. La siembra se realizó a hilera simple con un distanciamiento de 0.80 m entre líneas de riego por goteo y 0.125 m entre plantas lo que significa que tuvo una densidad de siembra de 100,000 plantas por hectárea (Figura 2).

**Figura 2**

*Croquis de las unidades experimentales en el experimento de análisis comparativo de tasas de fertilización en el cultivo de maíz para forraje, en el lote 7 de San Nicolás, entre los meses de mayo a agosto del 2024.*



Se instaló una cinta de riego para 2 hileras, la cual ha regado alternadamente una hilera en una jornada de riego y luego la otra; los turnos de riego se han efectuado en base a la evapotranspiración del cultivo (ETc). El manejo de fertilización se ha realizado según la extracción de nutrientes en base al requerimiento del cultivo y balance de nutrientes aportados por el suelo. El control de malezas, insectos plaga, enfermedades se han efectuado de manera preventiva de acuerdo con el manejo convencional que se realiza en la Unidad de Pastos y Forrajes.

## **Variables Medidas**

### ***Altura de Planta***

Para medir la altura de planta (cm) se escogió cuatro plantas al azar de cada unidad experimental. Se midió en centímetros la distancia desde la base del suelo hasta la inserción de la espiga. Las mediciones se llevaron a cabo 15 días después de cada fertilización, con el fin de dar seguimiento a los efectos de cada nivel de fertilización.

### ***Diámetro de Tallo***

Se midió con un pie de rey, a la altura de la terminación del primer anillo de raíces. La medición se realizó 15 días después de cada fertilización.

### ***Número de Hojas***

Se contó el número de hojas de cuatro plantas de maíz de cada unidad experimental, en la etapa vegetativa final.

### ***Tasa de Crecimiento***

Se estimó la tasa de crecimiento de las plantas de maíz mediante la medición de las alturas desde la base de la planta hasta el dosel, las mediciones fueron 15 días después de cada fertilización y una medición final previo a la cosecha, luego se restará la altura inicial a la altura final para dividirlo entre el tiempo transcurrido en ese intervalo.

### ***Variables de Rendimiento***

Se midió la biomasa de hojas, tallo y mazorca de manera independiente a la hora de la cosecha, luego se obtuvo la biomasa total del cultivo en un área determinado ( $t\ ha^{-1}$ ). Para obtener la biomasa del tallo y la biomasa total, el corte del tallo fue a los 30 cm de altura del suelo, ya que esto va acorde a la calibración de la máquina cortadora que se usa en la Unidad de Pastos y Forraje.

### **Variables Bromatológicas**

#### **Almidón (%)**

El porcentaje de almidón fue obtenido por diferencia entre el porcentaje de fibra detergente neutra (FDN), porcentaje de cenizas, extracto etéreo (porcentaje de grasa) y proteína cruda.

#### **Cenizas (%)**

Obtenido mediante la incineración en seco de muestras forraje, a temperaturas de 600 °C por 12 horas para eliminar toda la materia orgánica; la fracción inorgánica (ceniza) que resta fue cuantificado gravimétricamente para calcular la proporción de cenizas en la muestra mediante la fórmula 1:

$$\frac{\text{Peso de la ceniza (g)}}{\text{de la muestra (g)}} \times 100 \quad [1]$$

#### **Proteína Cruda en Base Seca (%)**

Para la determinación de proteína se llevó a cabo mediante el método Kjeldahl, el cual comprendió tres etapas: digestión, destilación y titulación. En la digestión, se pesaron  $1 \pm 0.0050$  g de muestra, las cuales se mezclaron con ácido sulfúrico concentrado y tabletas catalizadoras, y se calentaron a 420 °C durante 60 minutos hasta obtener una solución de coloración verde. Posteriormente, se realizó la destilación, donde el amoníaco liberado fue neutralizado con hidróxido de sodio y atrapado en ácido bórico. Finalmente, se llevó a cabo la titulación con ácido clorhídrico 0.1 N hasta alcanzar un viraje rosado. El contenido de nitrógeno se calculó mediante la fórmula 2, para luego obtener el porcentaje de proteína mediante la fórmula 3.

$$\%N = NHCl \times \frac{Tc}{M} \times \frac{14g}{mol} \times 100 \quad [2]$$

$$\% \text{ Proteína} = \%N \times 6.25 \quad [3]$$

Tc= Volumen de ácido corregido

N= Normalidad del ácido clorhídrico estandarizado

M= Peso de la muestra

### **Energía Neta de Lactancia (Mcal kg<sup>-1</sup>)**

La energía neta de lactancia se obtuvo a partir de la composición química del forraje, utilizando ecuaciones basadas en el contenido de fibra detergente ácida (FDA). Este componente refleja la fracción menos digestible de la pared celular, por lo que su concentración se utilizó como indicador de la digestibilidad general del material. A partir del valor de FDA, se estimaron los nutrientes digestibles totales (TDN), los cuales posteriormente sirvieron como base para calcular la energía neta disponible para la producción de leche. De esta manera, fue posible estimar el aporte energético del forraje sin realizar análisis de digestibilidad directa.

### **Carbohidratos Totales (%)**

Una vez realizado el análisis proximal completo, se ha estimado la cantidad de carbohidratos totales por diferencia de gramos de alimento – (g humedad + g lípidos + g proteína cruda + g cenizas

### **Extracto Etéreo (%)**

El extracto etéreo o grasa fue obtenido mediante el método de Soxhlet que consistió en la ebullición de la muestra del forraje seco y molido en un disolvente de éter anhidro para separar las grasas totales de la muestra. Todo este proceso fue ejecutado mediante el uso del equipo de extracción FOSS Soxtec™ 8000 donde se realizó la ebullición, aclarado y recuperación de disolventes. Posteriormente se pesó la grasa obtenida y se calculó el porcentaje que representó este en la muestra mediante la fórmula 4:

$$\%Grasa = \frac{W3-W2}{W1} \times 100 \quad [4]$$

W3 = Peso del recipiente

W2 = Peso de la grasa

W1 = Peso de la muestra

### **Fibra Detergente Neutra (%)**

Ha sido determinado por el método Van Soest, en el cual se pesó una muestra seca y molida (0.5 g), la cual se digirió durante 60 minutos con una solución de detergente neutro a ebullición. Esta solución eliminó los contenidos celulares solubles, dejando la pared celular intacta. El residuo se filtró,

se lavó con acetona, y luego se secó a 105 °C. Finalmente, se pesó el residuo seco para calcular el contenido de FDN sobre base seca.

#### **Fibra Detergente Ácida (%)**

La FDA se determinó usando el método de Van Soest, con muestras secas y molidas (0.5 g) tratada con una solución detergente ácida, que eliminó las hemicelulosas tras una digestión de 60 minutos a ebullición. El residuo fue filtrado, lavado y secado a 105 °C. El peso del material seco representó el contenido de FDA, compuesto por celulosa y lignina, expresado en base seca.

#### ***Variables Económicas***

La utilidad incremental evaluó cuánto aumentó la rentabilidad, la producción o la eficiencia al incrementar los recursos invertidos en comparación con el nivel previo. Este concepto permitió determinar si las inversiones adicionales generaron retornos proporcionales o si se alcanzó un punto de rendimientos decrecientes, en el cual cada unidad extra de inversión aportó un beneficio progresivamente menor.

Se ha realizado un análisis de relación beneficio-costos incremental el cual se calculó dividiendo el valor presente de los beneficios entre el valor presente de los costos de fertilización, para determinar si los beneficios de la inversión adicional en fertilizantes supera los costos de producción del maíz para forraje entre los diferentes tratamientos.

#### **Análisis Estadístico**

El análisis estadístico se realizó por medio de software estadístico JMP® Pro 18.0.1. Para asegurar que los datos cumplan las premisas normalidad y homocedasticidad, se llevaron a cabo las pruebas de Shapiro Wilk y Levene respectivamente. Solo después de confirmar que los datos cumplieron todas las premisas, los datos colectados se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANDEVA) y separación de medias por el método de Tukey con una probabilidad <0.05. Para aquellos datos no paramétricos que no cumplen con la normalidad y homocedasticidad, se realizó un ANDEVA de Welch y una prueba de Games-Howell para determinar la separación de medias.

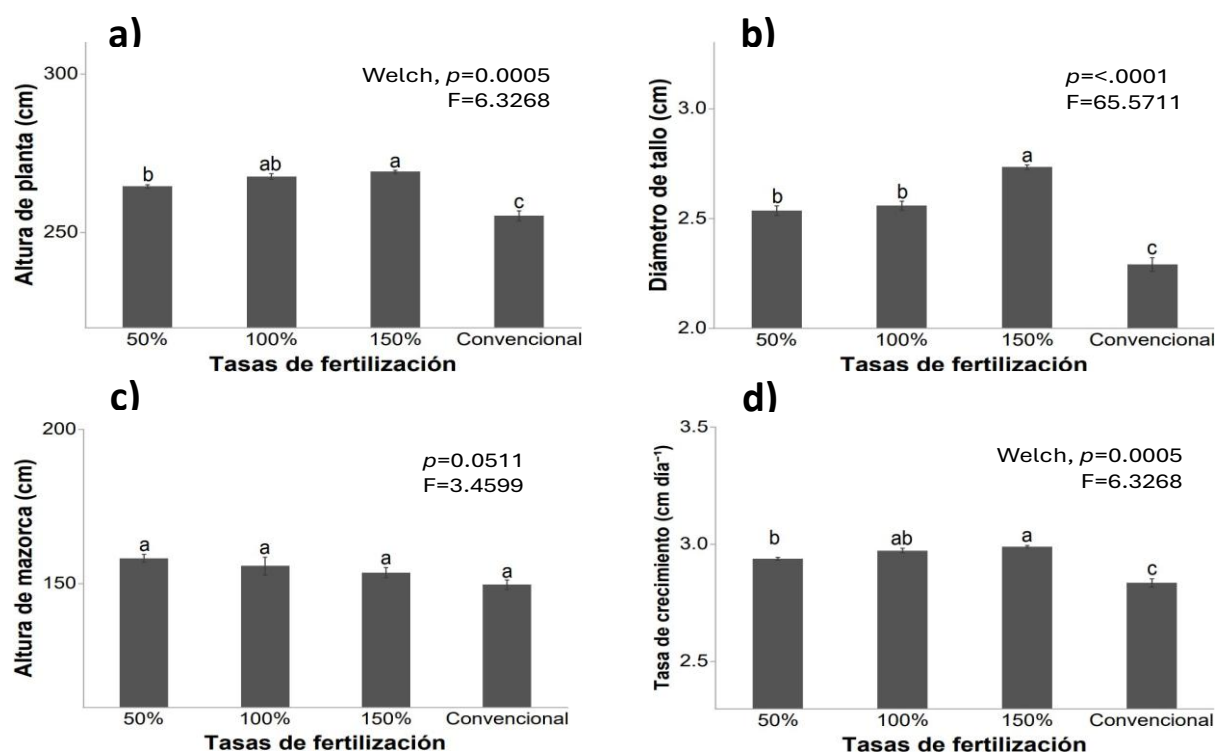
## Resultados y Discusión

### Crecimiento del Cultivo

El crecimiento del cultivo fue evaluado al finalizar el experimento mediante la medición de la altura de la planta (cm), diámetro del tallo (cm), altura de la mazorca (cm) y tasa de crecimiento (cm día<sup>-1</sup>). Los resultados evidenciaron un efecto de la tasa de fertilización sobre la altura de la planta, diámetro del tallo y la tasa de crecimiento, sin embargo, no se observaron diferencias significativas en la altura de la mazorca (Figura 3).

### Figura 3

Efecto de cuatro tasas de fertilización en el crecimiento del cultivo de maíz, variedad DK-7088, al final del ciclo de cultivo. (a) Altura de planta (cm); (b) Diámetro del tallo (cm); (c) Altura de mazorca y (d) Tasa de crecimiento (cm día<sup>-1</sup>). Las barras de error representan  $\pm$  error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un  $p < 0.05$  de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey.



Estos hallazgos coinciden con múltiples estudios que demuestran que mayores dosis de fertilización nitrogenada tienden a incrementar el crecimiento vegetativo (altura y diámetro del tallo), sin necesariamente afectar la altura de inserción de la mazorca (Kaleri, 2025). Las plantas que recibieron el 150% de la dosis de fertilización alcanzaron una altura significativamente mayor que aquellas tratadas con el 50% de la fertilización y la fertilización convencional. Por otro lado, las plantas que recibieron el 50% de la fertilización exhibieron una mayor altura que aquellas fertilizadas con la dosis convencional (Figura 3a y Anexo C). Asimismo, se observó que, las plantas fertilizadas con el 100% no se diferenciaron estadísticamente de las tratadas con el 50% y el 150% de fertilización (Figura 3a y anexo C). Esta tendencia ha sido ampliamente reportada en estudios de campo donde se observa un aumento progresivo en la altura de la planta a medida que se incrementa la dosis de nitrógeno, hasta alcanzar niveles óptimos (Piazzoli et al., 2021).

Cuando se midió el diámetro del tallo, se observó que las plantas que recibieron el 150% de la fertilización exhibieron un diámetro de tallo significativamente mayor que aquellas plantas que recibieron dosis de fertilización más bajas (Figura 3b y Anexo D). El diámetro del tallo en plantas que recibieron el 50% y 100% de la dosis de fertilización fue mayor comparado con aquellas que recibieron la dosis convencional (Figura 3b y Anexo D). Estos resultados son consistentes con investigaciones que muestran una relación directa entre la tasa de fertilización y el engrosamiento del tallo (Lim et al., 2014; Mahdi y Bhiah, 2023).

No se observaron diferencias estadísticas significativas en la altura de inserción de la mazorca entre los tratamientos de fertilización (Figura 3c y anexo E). Este patrón también ha sido descrito en trabajos previos, donde la altura de la mazorca se muestra menos sensible al manejo nutricional comparado con otros parámetros de crecimiento (Lim et al., 2014).

Finalmente, las plantas fertilizadas al 150% mostraron una tasa de crecimiento significativamente mayor que aquellas que recibieron el 50% de la fertilización y las fertilizadas con la

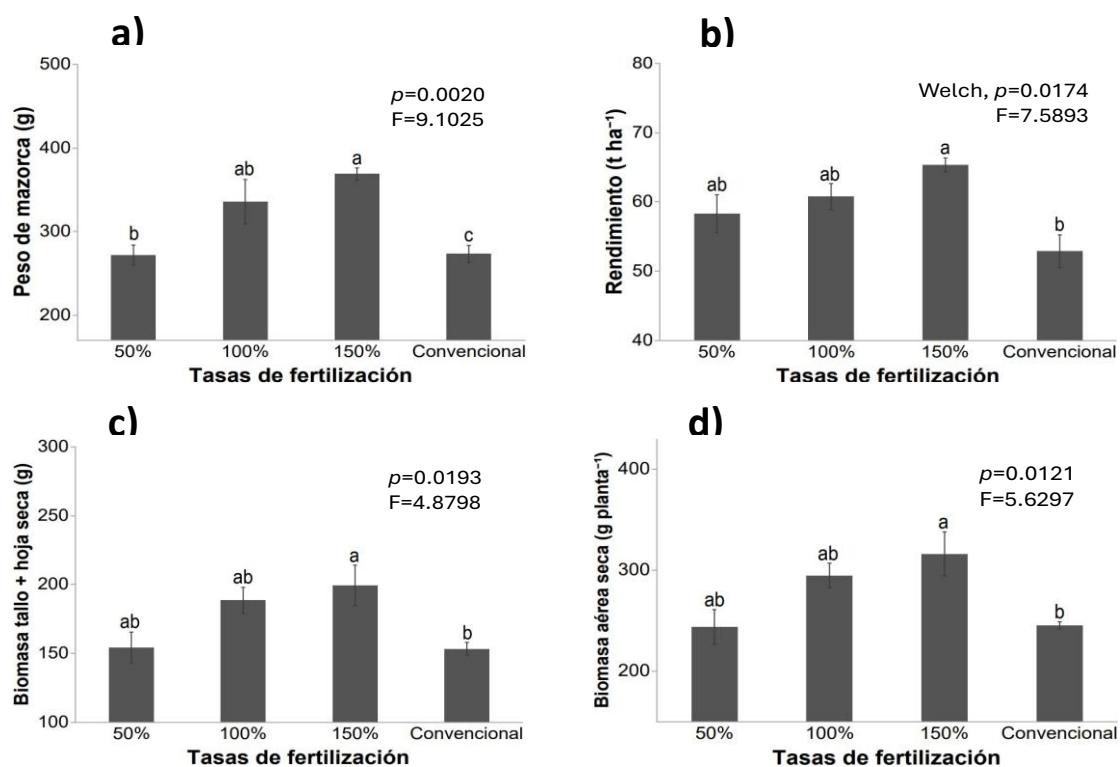
dosis convencional. Las tasas de crecimiento en las plantas que recibieron el tratamiento del 100% de fertilización no mostraron diferencia frente a las tratadas con el 50% ni el 150%, pero han superado significativamente al tratamiento convencional (Figura 3d y Anexo F). Este comportamiento sugiere una respuesta positiva a la fertilización intensiva en términos de acumulación diaria de biomasa, lo cual es coherente con estudios que reportan mayor velocidad de crecimiento bajo dosis elevadas de nitrógeno (Zhao et al., 2020).

### **Rendimiento del Cultivo**

El rendimiento del cultivo y la producción de biomasa fueron evaluados al finalizar el experimento, durante la cosecha, mediante la medición del peso de mazorca (g), el rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ ), la biomasa del tallo + hoja seca ( $g\ planta^{-1}$ ) y la biomasa aérea seca ( $g\ planta^{-1}$ ). Los resultados evidenciaron un efecto significativo de los niveles de fertilización sobre todas las variables evaluadas (Figura 4).

**Figura 4**

Efecto de cuatro tasas de fertilización en el rendimiento del cultivo de maíz, variedad DK-7088, al final del ciclo de cultivo. (a) Peso de mazorca (g); (b) Rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ ); (c) Biomasa del tallo + hoja seca (g) y (d) biomasa aérea seca ( $g\ planta^{-1}$ ). Las barras de error representan  $\pm$  error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un  $p < 0.05$  de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey.



Las plantas fertilizadas al 150% alcanzaron el mayor peso de mazorca, siendo significativamente superiores a aquellas fertilizadas con el 50% de la dosis y a las tratadas con fertilización convencional (Figura 4a y Anexo G). Este comportamiento ha sido reportado previamente, donde la aplicación incremental de nitrógeno mejora la formación de grano hasta alcanzar un punto de saturación (Han et al., 2019; Zhai et al., 2022). Las plantas fertilizadas al 100% no se diferenciaron estadísticamente de las plantas tratadas con las otras dosis (Figura 4a y Anexo G). De manera similar, el rendimiento en toneladas por hectárea fue mayor en las plantas que recibieron el 150% de fertilización, siendo significativamente mayor que aquellas plantas fertilizadas con la dosis convencional, aunque estadísticamente igual a aquellas plantas que recibieron el 50% y 100% de fertilización (Figura 4b y Anexo H).

Esta tendencia ha sido confirmada en diversos estudios que evidencian una respuesta positiva del rendimiento a la fertilización nitrogenada, particularmente cuando se optimiza la dosis aplicada (Alves et al., 2023).

En cuanto a la biomasa de tallo + hoja seca, se observó un patrón comparable, donde el 150% de fertilización resultó en valores significativamente mayores que la fertilización convencional, sin diferencias estadísticas con los tratamientos del 50% y 100% (Figura 4c y Anexo I). Finalmente, la biomasa aérea seca también fue mayor con la fertilización al 150%, presentando diferencias estadísticas con respecto al tratamiento convencional, pero no frente al 50% ni al 100% (Figura 4d y Anexo J).

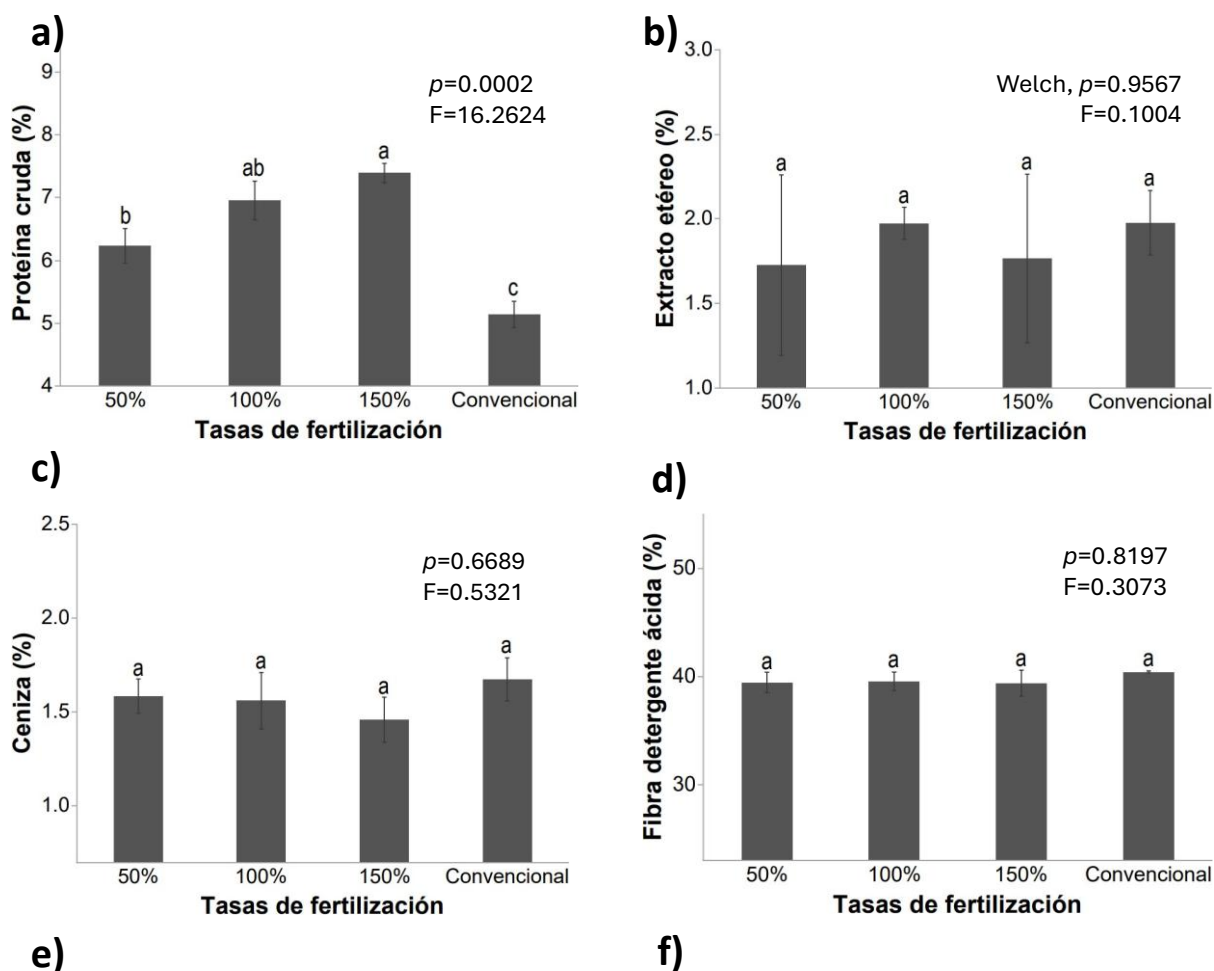
### **Análisis Bromatológico**

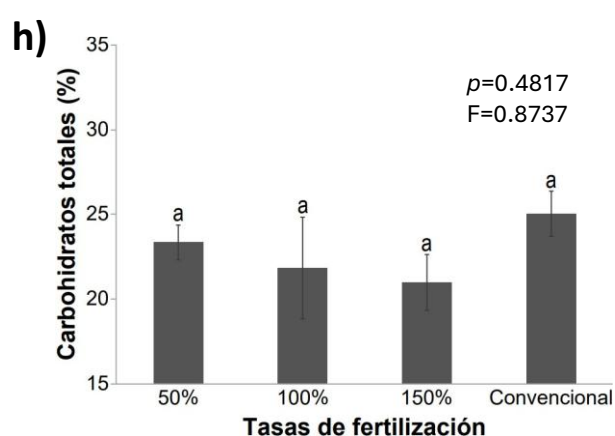
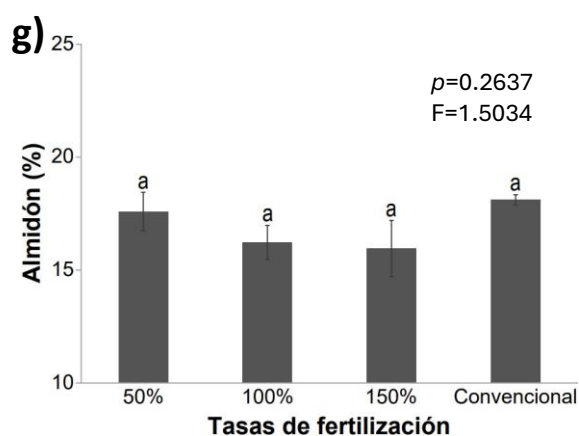
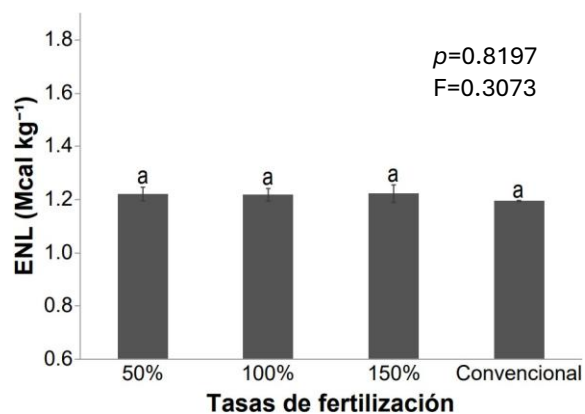
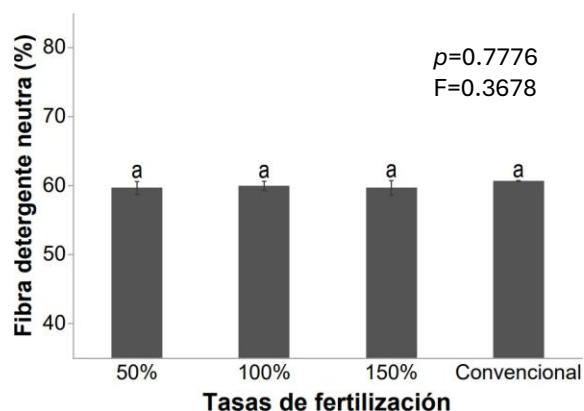
El análisis bromatológico ha sido evaluado en el laboratorio de análisis de alimentos Zamorano (LAZ), posterior a la cosecha. Este evidenció que la tasa de fertilización tuvo un efecto significativo sobre el contenido de proteína cruda en el forraje, mientras que no se observaron diferencias estadísticamente significativas para el extracto etéreo, cenizas, fibra detergente ácida (FDA), fibra detergente neutra (FDN), almidón, energía neta de lactancia (ENL) ni carbohidratos totales (Figura 5).

Este hallazgo concuerda con diversos estudios previos que señalan que el principal efecto de la fertilización, especialmente nitrogenada, se refleja en el aumento del contenido de proteína cruda, sin influir significativamente en otros componentes bromatológicos (Guevara et al., 2018; Katoch, 2023).

**Figura 5**

*Efecto de cuatro tasas de fertilización en las variables bromatológicas del cultivo de maíz, variedad DK-7088, al final del ciclo de cultivo. (a) Proteína cruda (%); (b) Extracto etéreo (%); (c) Cenizas (%); (d) Fibra detergente ácida; (e) Fibra detergente neutra; (f) Energía neta de lactancia; (g) Almidón; (h) Carbohidratos totales. Las barras de error representan  $\pm$  error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un  $p < 0.05$  de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey.*





Las plantas que recibieron el 150% de la dosis de fertilización mostraron un contenido de proteína significativamente mayor en comparación con aquellas tratadas con la fertilización convencional, las cuales presentaron el menor porcentaje de proteína (Figura 5a y Anexo K). Esta diferencia ha sido ampliamente documentada: múltiples investigaciones han evidenciado que dosis elevadas de fertilización nitrogenada aumentan de forma considerable el contenido de proteína en el forraje (Reta et al., 2017). Las plantas con el 100% de fertilización, no se diferenciaron estadísticamente de los tratamientos con 50% y 150% de fertilización. En cambio, las plantas con el

50% de fertilización mostraron un contenido de proteína menor, aunque estadísticamente similar al tratamiento con 100% de fertilización (Figura 5a y Anexo K).

Se han presenciado resultados similares en estudios realizados por (Soto O. et al., 2004) donde al aumentar la dosis de fertilización, han observado un aumento en el porcentaje de proteína, mientras que el porcentaje de almidón se ha mantenido estable. Reporta que la proteína cruda en ensilaje de maíz varía entre 7–9 % y almidón entre 25–35 %, según la etapa de madurez y variedad. Además, Muestra una tendencia donde el almidón aumenta con la madurez y la proteína relativa disminuye.

No se encontraron diferencias significativas en el contenido de extracto etéreo entre los distintos niveles de fertilización (Figura 5b y Anexo L). Del mismo modo, el contenido de cenizas no presentó diferencias estadísticas, manteniéndose estable entre tratamientos (Figura 5c y Anexo M). Respecto a las fracciones fibrosas, tanto la fibra detergente ácida (Figura 5d y Anexo N) como la fibra detergente neutra (Figura 5e y Anexo O) no mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. Asimismo, el contenido de energía neta de lactancia (ENL), almidón y carbohidratos totales no presentó diferencias significativas entre tratamientos (Figuras 5f, 5g y 5h).

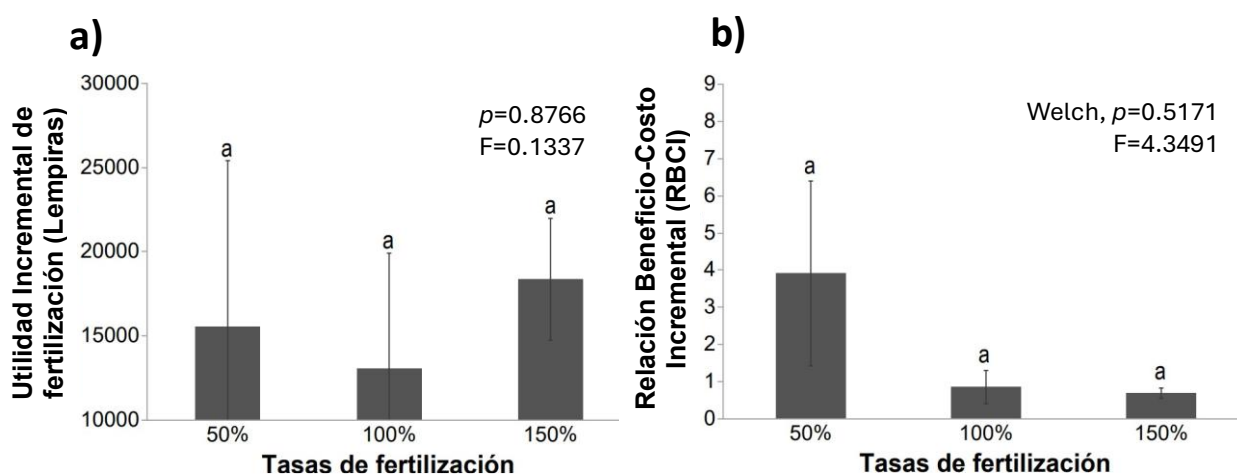
(Gilli et al., 2023) demostraron que el incremento en las dosis de fertilización nitrogenada en maíz forrajero reduce significativamente los contenidos de fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN), lo que mejora la digestibilidad del forraje. Además, el aumento de nitrógeno elevó la energía metabolizable del cultivo, esto difiere con lo obtenido en este experimento, sin embargo, (Tanumihardjo et al., 2020) concluyen que, aunque es común que FDA y FDN disminuyan con nitrógeno, en algunos contextos esa respuesta no ocurre, o es muy leve, dependiendo del clima, variedad y momento de cosecha. En conjunto, estos resultados indican que el principal efecto de la fertilización se reflejó en el incremento del contenido de proteína cruda, sin afectar significativamente otras variables nutricionales como la fibra, energía o carbohidratos del forraje.

## Análisis Económico

Para determinar la viabilidad o rentabilidad de la adición de mayores cantidades de fertilizantes en el maíz para forraje, se han evaluado dos indicadores económicos los cuales fueron: relación beneficio-costos y utilidad incrementales, sin embargo, ninguno de estas dos variables ha demostrado diferencia significativa (Figura 6a y 6b) (Anexo R y S).

**Figura 6**

*Análisis de utilidad y relación costo beneficio incremental de las cuatro tasas de fertilización en el cultivo de maíz, variedad DK-7088. (a) Utilidad incremental (Lempiras); (b) Relación beneficio-costos incremental (RBCI). Las barras de error representan  $\pm$  error estándar. Las medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas a un  $p < 0.05$  de acuerdo con la prueba post-hoc HSD de Tukey.*



Diversos estudios han demostrado que, en el cultivo de maíz para forraje, el incremento en las tasas de fertilización mejora el rendimiento físico del cultivo, aunque no siempre se traduce en una mayor rentabilidad económica. Investigaciones como las de (Dawar et al., 2024; Kafle et al., 2023) han reportado que dosis elevadas de fertilización, como el 150% del requerimiento, continúan generando incrementos en biomasa, pero con una eficiencia económica decreciente, ya que el costo marginal del fertilizante tiende a superar el ingreso marginal generado. Este comportamiento se enmarca en el

concepto de rendimientos económicos decrecientes, que se explica por la Ley de Rendimientos Decrecientes y la reducción de la eficiencia en el uso de nutrientes (EUN) cuando se sobrepasan las dosis óptimas (Zhao et al., 2020).

No obstante, si todas las relaciones beneficio-coste incrementales (RBCI) son mayores a 1, como ocurrió en el presente estudio, se puede afirmar que todos los tratamientos fueron rentables, aunque con distintas eficiencias. El tratamiento convencional mostró la mayor relación B/C, pero plantea riesgos agronómicos a mediano y largo plazo, como el agotamiento progresivo de nutrientes y una posible reducción en la calidad nutricional del forraje (Liimatainen et al., 2022).

### **Conclusiones**

El incremento en los niveles de fertilización promovió un crecimiento más acelerado del maíz para forraje, reflejándose en mayores alturas, diámetros de tallo y tasas de crecimiento. Este efecto fisiológico se tradujo en un aumento significativo del rendimiento y del contenido de proteína cruda, indicadores clave para la producción forrajera de alta calidad. Sin embargo, otras variables nutricionales como el contenido de fibra, energía neta de lactancia y almidón no mostraron respuesta a los diferentes niveles de fertilización.

A pesar de que mayores niveles de fertilización generan mejoras agronómicas, dichas mejoras no necesariamente se reflejan en beneficios económicos proporcionales, posiblemente debido al incremento en los costos variables.

Por tanto, la fertilización técnica basada en análisis de suelo representa una estrategia eficiente para maximizar el rendimiento y mejorar la calidad nutricional del forraje, al tiempo que se asegura la sostenibilidad productiva mediante un uso racional de los insumos.

### **Recomendaciones**

Se recomienda Implementar programas de fertilización basados en análisis de suelos, ajustando las dosis a las condiciones específicas del terreno para evitar deficiencias o excesos que comprometan la eficiencia del sistema. Incorporar enmiendas orgánicas en esquemas de fertilización convencional para mejorar la salud del suelo, aumentar la eficiencia en el uso de nutrientes y mitigar impactos ambientales.

Monitorear la rentabilidad de las prácticas agrícolas no solo en términos de rendimiento físico, sino también en función de su retorno económico, priorizando estrategias que mantengan la relación beneficio-costos por encima de 1 con mínima inversión adicional.

Finalmente se recomienda realizar investigaciones de largo plazo que evalúen el efecto acumulativo del manejo nutricional sobre la fertilidad del suelo, la eficiencia en el uso de nutrientes y la resiliencia del sistema productivo frente a escenarios de cambio climático.

## Referencias

- Alves, D. K. M., Teixeira, M. B., Cunha, F. N., Cabral Filho, F. R., Cunha, G. N. y Andrade, C. L. L. de (2023). Grain Yield of Maize Crops under Nitrogen Fertigation Using Wastewater from Swine and Fish Farming. *Agronomy*, 13(7), 1834. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071834>
- Ávarez-Solís, J. D., Gómez-Velasco, D. A., León-Martínez, N. S. y Gutiérrez-Miceli, F. A. (2010). Manejo integrado de fertilizantes y abonos orgánicos en el cultivo de maíz. *Agrociencia*, 44(5). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952010000500007&script=sci\\_arttext&utm\\_source=chatgpt.com](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952010000500007&script=sci_arttext&utm_source=chatgpt.com)
- Chowrasia, S. y Mondal, T. K. (2020). C4 photosynthesis with Kranz anatomy evolved in the *Oryza coarctata* Roxb. *BioRiv*, 7. <https://doi.org/10.1101/2020.07.12.199232>
- Dandasena, N. K., Pal, P., Mollah, N., Das, S. y Bhattacharya, P. (2024). Soil fertility evaluation and mapping. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8(4), 363–367. <https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i4e.967>
- Dawar, K., Dawar, A., Tariq, M., Mian, I. A., Muhammad, A., Farid, L., Khan, S., Khan, K., Fahad, S., Danish, S., Al-Ghamdi, A. A., Elshikh, M. S. y Tahzeeb-Ul-Hassan, M. (2024). Enhancing nitrogen use efficiency and yield of maize (*Zea mays* L.) through Ammonia volatilization mitigation and nitrogen management approaches. *BMC Plant Biology*, 24(1), 74. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04749-7>
- Espinoza, J. (1993). Informaciones agronomicas: La ley del maximo. *INPOFOS*(12). [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/8ADF5DFD4FAD27498525801300594AA9/\\$FILE/Art%201.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/8ADF5DFD4FAD27498525801300594AA9/$FILE/Art%201.pdf)
- Fassio, A., Ibañez, W., Fernández, E., Cozzolino, D., Pérez, O. y Restaino, E. (2018). El cultivo de maíz para la producción de forraje y grano y la influencia del agua. *Instituto Nacional De Investigacion Agropecuaria*(239). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8897/1/st-239-2018.pdf>
- Gilli, B. R., Grassmann, C. S., Mariano, E. y Rosolem, C. A. (2023). Nitrogen Fertilization Boosts Maize Grain Yield, Forage Quality, and Estimated Meat Production in Maize–Forage Intercropping. *Agriculture*, 13(12), 2200. <https://doi.org/10.3390/agriculture13122200>
- Guevara, D., García, A. y Velásquez, W. (2018). Establecimiento de banco de forraje hidropónico como suplemento alimenticio para ganado bovino del Casanare en época de sequía. *Ingeniería Y Región*, 20, 38–45. <https://doi.org/10.25054/22161325.1936>
- Han, X., Han, N., Zhou, Q., Kang, J. y Bai, X. (2019). Effects of nitrogen application on growth and yield of maize. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 304(5), 52054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/5/052054>
- Jurado Guerra, P., Lara Macías, C. R. y Saucedo Terán, R. A. (2014). Paquete tecnológico para la producción de maíz forrajero en Chihuahua. *Instituto Nacional De Investigaciones Forestales, Agrícolas Y Pecuarias [INIFAP]*, Artículo 53. <https://www.producechihuahua.org/paqs/PT-0012MaizForrajero.pdf> (financiado por la Fundación Produce Chihuahua A.C.).

- Kafle, J., Bhandari, L., Neupane, S. y Aryal, S. (2023). A Review on Impact of Different Nitrogen Management Techniques on Maize (*Zea mays* L.) Crop Performance. *AgroEnvironmental Sustainability*, 1(2), 192–198. <https://doi.org/10.59983/s20230102012>
- Kaleri, A. A. (2025). Impact of different nitrogen levels on maize (*Zea mays* L.) growth and yield. *Pure and Applied Biology*, 14(2). <https://doi.org/10.19045/bspab.2025.140026>
- Katoch, R. (2023). *Techniques in Forage Quality Analysis*. Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-6020-8>
- Kok, M., Sarjant, S., Verweij, S., Vaessen, S. F. y Ros, G. H. (2024). On-site soil analysis: A novel approach combining NIR spectroscopy, remote sensing and deep learning. *Geoderma*, 446, 116903. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116903>
- Kratika Alawe, A. K. Mehta y Ompal Singh (2020). Genetic Analysis of Correlation Coefficient and Path Analysis of Fodder Yield and its Components in Maize (*Zea mays*). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(12), 791–796. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.912.094>
- Liimatainen, A., Sairanen, A., Jaakkola, S., Kokkonen, T., Kuoppala, K., Jokiniemi, T. y Mäkelä, P. (2022). Yield, Quality and Nitrogen Use of Forage Maize under Different Nitrogen Application Rates in Two Boreal Locations. *Agronomy*, 12(4), 887. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040887>
- Lim, J. T., Chang, J.-H., Rho, Y.-J., Ryu, J.-H., Chung, D. Y. y Cho, J.-W. (2014). The Effect of Nitrogen Rates on The Growth and Yield of Maize in Agricultural Fields with the Stream. *Korean Journal of Crop Science*, 59(1), 101–108. <https://doi.org/10.7740/KJCS.2014.59.1.101>
- Mahdi, H. F. y Bhih, K. M. (2023). Response of some Growth Traits of Maize Plants to Conventional and Nano-Fertilizers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1262(8), 82067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1262/8/082067>
- Medina-Cuéllar, S. E., Tirado-González, D. N., Portillo-Vázquez, M., Orozco-Cirilo, S., López-Santiago, M. A., Vargas-Canales, J. M., Medina-Flores, C. A. y Salem, A. Z. M. (2021). Optimal Nitrogen Fertilization to Reach the Maximum Grain and Stover Yields of Maize (*Zea mays* L.): Tendency Modeling. *Agronomy*, 11(7), 1354. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071354>
- Muñoz Villalobos, J., Macías ,Rodríguez, H., Delgado, Ramírez, G., Rivera, González, M., Inzunza, Ibarra, M. y Jacobo Salcedo, M. d. R. (2017). Niveles de nitrógeno y fosforo en maíz (*zea mayz* l.) forrajero bajo riego con aguas residuales tratadas. *Agrofaz: Publicación Semestral De Investigación Científica*, 17(2). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6512473>
- Ortigoza Guerreño, J., López Talavera, C. A. y Gonzalez Villalba, J. D. (Eds.). (2019). *Guía técnica: Cultivo de maíz*. Agencia de Cooperación Internacional del Japón. [https://www.jica.go.jp/Resource/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gke-att/gt\\_04.pdf](https://www.jica.go.jp/Resource/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gke-att/gt_04.pdf)
- Piazzoli, D., Da Sapucay, M. J. L. C., Prando, A. M., Oliveira Júnior, J. A. de y Zucareli, C. (2021). Plant density and nitrogen topdressing of high-altitude main-season corn. *Semina: Ciências Agrárias*, 42(5), 2651–2668. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021V42N5P2651>
- Reta, D., Sánchez, J., Reyes, A., Ochoa, E., Chew, Y. y Gaytán, A. (2017). Evaluación semicomercial de cártamo forrajero en siembras tardías durante otoño-invierno en la Comarca Lagunera,

- México. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 17(1), 51–63. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6505177>
- Rivera, M., Delgado, G., Valle, E., Servin, A., Reyes, A., Servín, M. y Estrada, J. (2017). Estimacion de la variacion espacial y temporal de la concentracion de nitrogeno en maiz forrajero mediante sensoria remota. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 17(2), 53–59. [https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6512474&utm\\_source=chatgpt.com](https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6512474&utm_source=chatgpt.com)
- Soto O., P., Jahn B., E. y Arredondo S., S. (2004). Mejoramiento del porcentaje de proteína en maíz para ensilaje con el aumento y parcialización de la fertilización nitrogenada. *Agricultura Técnica*, 64(2). <https://doi.org/10.4067/S0365-28072004000200004>
- Talukder, P., Sinha, B., Biswas, S., Ghosh, A., Banerjee, A. y Paul, S. (2024). A study on the prospect of converting C3 plants into C4 plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 58, 103191. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103191>
- Tanumihardjo, S. A., McCulley, L., Roh, R., Lopez-Ridaura, S., Palacios-Rojas, N. y Gunaratna, N. S. (2020). Maize agro-food systems to ensure food and nutrition security in reference to the Sustainable Development Goals. *Global Food Security*, 25, 100327. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100327>
- Wang, H., Zhang, X., Zhang, G [Guoping], Fang, Y., Hou, H., Lei, K. y Ma, Y. (2023). Regulation of Density and Fertilization on Crude Protein Synthesis in Forage Maize in a Semiarid Rain-Fed Area. *Agriculture*, 13(3), 715. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030715>
- Zhai, J., Zhang, G [Guoqiang], Zhang, Y., Xu, W., Xie, R., Ming, B., Hou, P., Wang, K., Xue, J. y Li, S [Shaokun] (2022). Effect of the Rate of Nitrogen Application on Dry Matter Accumulation and Yield Formation of Densely Planted Maize. *Sustainability*, 14(22), 14940. <https://doi.org/10.3390/su142214940>
- Zhao, Y., Huang, Y., Li, S [Shuai], Chu, X. y Ye, Y. (2020). Improving the growth, lodging and yield of different density-resistance maize by optimising planting density and nitrogen fertilisation. *Plant, Soil and Environment*, 66(9), 453–460. <https://doi.org/10.17221/178/2020-pse>

## Anexos

## Anexo A

Resultados del análisis de químico de suelos elaborado por el Laboratorio de Suelos de Zamorano

Identificación de la muestra	Textura	Granulometría (%)			pH* (H <sub>2</sub> O)	%			Elementos menores (mg kg <sup>-1</sup> )				
		Arena	Limo	Arcilla		C.O.	M.O.	N <sub>total</sub>	Cu	Fe	Mn	Zn	B
Pivote Laguna	Franco Arenoso	54	28	18	5.16	1.29	2.22	0.11	2.1	238	178	1.0	0.3
Espinal	Franco Arenoso	52	26	22	4.99	1.32	2.28	0.11	3.0	258	162	3.5	0.8
Toviatá	Franco Arenoso	52	30	18	5.18	1.06	1.84	0.09	1.7	298	188	1.2	0.3
Ficensa	Franco Arenoso	64	20	16	4.63	1.47	2.53	0.13	2.1	219	152	1.8	0.6
San Nicolas 3 Y 8	Franco Arenoso	62	22	16	4.95	1.41	2.43	0.12	2.3	233	180	1.6	0.2
San Nicolas 2 y 4	Franco Arenoso	62	22	16	5.06	1.18	2.04	0.10	1.9	247	175	1.3	0.1
San Nicolas 3 y 7	Franco Arenoso	62	22	16	5.10	1.16	2.01	0.10	1.4	243	170	1.6	0.2
San Nicolas 4 y 5	Franco Arenoso	64	20	16	5.72	1.30	2.23	0.11	1.6	216	157	2.2	0.3

Rango Medio					1.2	2	0.1	1.7	56	28	1.7	0.5
					2.3	4	0.2	6.5	112	112	3.4	8

Identificación de la muestra	Complejo de cambio (mg kg <sup>-1</sup> )				cmol <sub>(+)</sub> kg <sup>-1</sup> CICE	Saturación de bases (%)				Relaciones iónicas				mg kg <sup>-1</sup>	
	Ca	Mg	K	Na		Ca	Mg	K	Na	Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	Ca+Mg/K	S	P
Pivote Laguna	981	153	206	21	6.78	72.30	18.58	7.75	1.37	4	2	9	12	10	38
Espinal	1164	156	458	22	8.37	69.50	15.38	14.00	1.12	5	1	5	6	7	28
Toviatá	1056	156	283	13	7.34	71.89	17.50	9.86	0.75	4	2	7	9	7	46
Ficensa	772	111	469	9	6.01	64.18	15.17	19.98	0.67	4	1	3	4	12	35
San Nicolas 3 Y 8	951	94	326	30	6.49	73.24	11.90	12.84	2.02	6	1	6	7	14	32
San Nicolas 2 y 4	957	77	276	22	6.22	76.91	10.21	11.33	1.55	8	1	7	8	12	27
San Nicolas 3 y 7	931	74	355	14	6.23	74.68	9.78	14.56	0.98	8	1	5	6	11	47
San Nicolas 4 y 5	1416	139	440	13	9.41	75.25	12.19	11.97	0.59	6	1	6	7	9	54

Rango Medio					1000	180	150	< 230	10	55	15	3	< 5	3	8	15	20	20	13
					2500	250	280		20	70	20	5		6	10	30	40	80	30

### Anexo B

*Datos del analisis de suelo y recomendaciones de fertilizacion brindado por el Laboratorio de Suelos*

*de Zamorano*

Textura	Franco Arenoso				
pH	5.10				
Necesidades nutricionales por Hectarea					
Produccion (Kg/ha)	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg
Necesidades ajustadas al plan	325	13	77	13	17

### Anexo C

*Resultado del análisis de varianza de Welch de Altura de planta. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	Welch, $p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
6.3268	3	0.0005	50%	264.500 $\pm$ 0.545
			100%	297.650 $\pm$ 0.896
			150%	269.150 $\pm$ 0.465
			Convencional	255.250 $\pm$ 1.579

### Anexo D

*Resultado del análisis de varianza del diámetro del tallo. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	$p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
65.571	3	<.0001	50%	2.535 $\pm$
			100%	2.558 $\pm 0.021$
			150%	2.733 $\pm 0.011$
			Convencional	2.298 $\pm 0.031$

### Anexo E

*Resultado del análisis de varianza de altura de la mazorca. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	$p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
3.4599	3	0.0511	50%	158.300 $\pm$ 1.277
			100%	155.750 $\pm$ 0.289
			150%	153.650 $\pm$ 1.642
			Convencional	149.750 $\pm$ 1.554

### Anexo F

*Resultado del análisis de varianza de Welch de tasa de crecimiento. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se ha usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	Welch, $p$	Niveles de fertilizacion	Media $\pm EE$
6.3268	3	0.0005	50%	2.939 $\pm$ 0.006
			100%	2.974 $\pm$ 0.010
			150%	2.990 $\pm$ 0.005
			Convencional	2.836 $\pm$ 0.018

### Anexo G

*Resultado del análisis de varianza de peso de mazorca. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se ha usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	$p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
9.103	3	0.002	50%	272.000 $\pm$ 11.923
			100%	335.750 $\pm$ 26.581
			150%	368.800 $\pm$ 7.446
			Convencional	273.250 $\pm$ 10.258

### Anexo H

*Resultado del análisis de varianza de Welch del rendimiento. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	Welch, $p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
7.5893	3	0.0174	50%	58.315 $\pm$ 2.743
			100%	60.769 $\pm$ 1.901
			150%	65.352 $\pm$ 1.001
			Convencional	52.894 $\pm$ 2.364

### Anexo I

*Resultado del análisis de varianza de la biomasa de tallo + hoja seca. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se usó el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	p	Niveles de fertilización	Media
4.874	3	0.0193	50%	154.300 $\pm$ 11.255
			100%	188.610 $\pm$ 9.421
			150%	199.343 $\pm$ 14.793
			Convencional	153.824 $\pm$ 4.698

### Anexo J

*Resultado del análisis de varianza de la biomasa aérea seca. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	Lg	p	Niveles de fertilización	Media
5.629	3	0.0121	50%	243.934 $\pm$ 17.134
			100%	294.897 $\pm$ 12.191
			150%	316.245 $\pm$ 21.845
			Convencional	245.399 $\pm$ 3.633

### Anexo K

*Resultado del análisis de varianza del porcentaje de proteína. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	$p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
16.262	3	0.0002	50%	6.237 $\pm$ 0.275
			100%	6.967 $\pm$ 0.308
			150%	7.398 $\pm$ 0.153
			Convencional	5.143 $\pm$ 0.209

### Anexo L

*Resultado del análisis de varianza de Welch del porcentaje del extracto etéreo. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	Welch, $p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
0.1004	3	0.9567	50%	1.727 $\pm$ 0.533
			100%	1.975 $\pm$ 0.094
			150%	1.767 $\pm$ 0.498
			Convencional	1.978 $\pm$ 0.190

### Anexo M

*Resultado del análisis de varianza del porcentaje de cenizas. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	$p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
0.5321	3	0.6689	50%	1.585 $\pm$ 0.091
			100%	1.561 $\pm$ 0.150
			150%	1.460 $\pm$ 0.125
			Convencional	1.675 $\pm$ 0.115

### Anexo N

*Resultado del análisis de varianza del porcentaje de fibra detergente acida. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	p	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
0.3073	3	0.8197	50%	39.449 $\pm$ 0.942
			100%	39.543 $\pm$ 0.862
			150%	39.380 $\pm$ 1.199
			Convencional	38.510 $\pm$ 0.095

### Anexo O

*Resultado del análisis de varianza del porcentaje de fibra detergente neutra. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	p	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
0.3678	3	0.7776	50%	59.714 $\pm$ 0.938
			100%	60.020 $\pm$ 0.664
			150%	59.723 $\pm$ 1.067
			Convencional	60.728 $\pm$ 0.071

### Anexo P

*Resultado del análisis de varianza del porcentaje del almidón. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	$p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
1.503	3	0.264	50%	17.593 $\pm$ 0.851
			100%	16.226 $\pm$ 0.754
			150%	15.953 $\pm$ 1.247
			Convencional	18.107 $\pm$ 0.228

### Anexo Q

*Resultado del análisis de varianza de la energía neta de lactancia. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	$p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
0.3073	3	0.8197	50%	1.221 $\pm$ 0.025
			100%	1.218 $\pm$ 0.024
			150%	1.223 $\pm$ 0.033
			Convencional	1.194 $\pm$ 0.003

### Anexo R

*Resultado del análisis de varianza de los carbohidratos totales. Las medias van acompañadas del error estándar que se muestra expresado como  $\pm EE$ . Para determinar diferencias significativas se a usado el valor  $p \leq 0.05$ .*

Valor F	gl	$p$	Niveles de fertilización	Media $\pm EE$
0.8747	3	0.4817	50%	23.352 $\pm$ 1.025
			100%	21.843 $\pm$ 3.002
			150%	20.992 $\pm$ 1.648
			Convencional	25.049 $\pm$ 1.337