

Contraste entre TaurusWebs y laboratorio

**para la estimación bromatológica de pasto Rodas
(*Pennisetum sp.*): Estudio de caso en Santa Ana**

*Victoria Delgado Tejena*¹

*Denzel Chevez Paredes*²

*Diego Nevárez Pérez*³

¹Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Facultad Ciencias de
la Vida Tecnologías, Manta, Ecuador,
<https://orcid.org/0009-0002-6610-1237>
victoriadelte2002@gmail.com

²Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Facultad Ciencias de
la Vida Tecnologías, Manta, Ecuador,
<https://orcid.org/0009-0006-9491-8876>
chevezparedesdenzelandres@gmail.com

³Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Facultad Ciencias de
la Vida Tecnologías, Manta, Ecuador,
<https://orcid.org/0000-0002-0336-2862>
diego.nevarez@uleam.edu.ec

DOI: 10.61854/rccedia.v1n1.003

Enviado: 16 de febrero de 2026

Aprobado: 27 de abril de 2026

Publicado: martes 14 de julio de 2026



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen

El presente trabajo tiene el propósito de comparar los resultados del ensayo del pasto Rodas (*Pennisetum* sp.), mediante el software TaurusWebs, con los obtenidos a través de métodos tradicionales de laboratorio, con énfasis en las variables: proteína, materia seca, energía neta de lactancia, fibra detergente neutra, fibra detergente ácida y minerales. La investigación se realizó en dos áreas definidas de pastizales en el cantón Santa Ana, provincia de Manabí, donde se aplicó un diseño experimental basado en tres muestreos durante periodos de 15, 30 y 45 días. El estudio consideró diversas condiciones lumínicas y tres altitudes de captura (20, 50 y 100 m s. n. m.) para evaluar la precisión de la respuesta frente a la variabilidad del entorno.

De acuerdo con las pruebas estadísticas, se concluye que el software de análisis de imágenes constituye una herramienta viable y eficiente para la estimación de proteína, materia seca y minerales en el pasto Rodas. No obstante, se identificaron limitaciones en la predicción de energía y fracciones de fibra. Estas discrepancias no restan validez a la herramienta, sino que derivan de las diferencias intrínsecas entre la espectroscopia y los métodos químicos del laboratorio. Por otro lado, su implementación debe considerarse como un complemento al método tradicional, especialmente en la evaluación de fibra, donde los valores difieren significativamente debido a la naturaleza de los algoritmos de procesamiento. Estos hallazgos subrayan la importancia de potenciar el uso de tecnologías digitales en la gestión ganadera local, optimizando la toma de decisiones nutricionales de manera ágil y económica.

Palabras clave:

análisis comparativo, espectroscopia de infrarrojo cercano, fibra detergente, forrajes, proteína bruta, valor nutricional.

Introducción

En el Ecuador, la provincia de Manabí ocupa el primer lugar en existencia de cabezas de ganado con aproximadamente 711 011 animales vivos. No obstante, según los datos de la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC), el rendimiento en relación con la superficie es de 1,00 res/ha, cifra que se sitúa por debajo de Guayas, Los Ríos, El Oro y Esmeraldas. Esta situación posiciona a la localidad en el decimoséptimo lugar a nivel nacional, lo que plantea la necesidad de revisar el manejo eficiente de los recursos forrajeros en el sector pecuario, lo que constituye el principal desafío para la sostenibilidad económica de la actividad ganadera (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos - INEC, 2024).

Fierro Cordero (2018) afirma que:

En Ecuador, uno de los principales problemas que se presenta en el manejo de pastizales es el desconocimiento de las especies utilizadas, lo que genera un uso inadecuado de los pastos, impidiendo llegar a resultados óptimos de producción. A esto se añade la carencia de nutrimentos existentes a nivel de suelo, la falta de sistemas de irrigación y la utilización de especies no adaptadas a las condiciones agroecológicas, factores que inciden en la escasez de materia seca en los forrajes en ciertas épocas del año. (p. 10)

En el cantón Santa Ana, la producción ganadera depende directamente de la calidad nutricional de las pasturas; sin embargo, existe una marcada deficiencia en el monitoreo técnico

de estos recursos. Esta situación genera que el aprovechamiento del pasto Rodas (*Pennisetum sp.*) se realice sin un sustento bromatológico preciso, lo que deriva en una suplementación inadecuada y un incremento innecesario de los costos de producción por unidad de producto.

La motivación detrás de esta investigación surge de la necesidad de validar alternativas tecnológicas que faciliten la toma de decisiones en el campo. Tradicionalmente, la caracterización de forrajes se ha limitado al análisis de laboratorio que, si bien es el referente de precisión, implica una inversión económica y de tiempo que muchos productores locales no pueden asumir con frecuencia. En este escenario, la implementación de herramientas de ganadería 4.0, específicamente el software TaurusWebs, se presenta como una solución innovadora. El interés central de este estudio es determinar si la estimación digital de nutrientes puede ofrecer resultados comparables a la metodología convencional bajo las condiciones específicas de Santa Ana.

Frente a la problemática, el objetivo general de este trabajo es realizar una evaluación comparativa bromatológica del pasto Rodas (*Pennisetum sp.*), contrastando los datos generados por el software TaurusWebs con los resultados obtenidos en laboratorio. Para alcanzar esto, se han planteado objetivos específicos que complementan la cuantificación de variables clave como proteína, materia seca, energía, fibra detergente neutra, fibra detergente ácida y minerales, buscando establecer el grado de fiabilidad de la herramienta tecnológica en el entorno local.

La cuantificación de los componentes nutricionales del forraje demandó la aplicación

de protocolos analíticos específicos para cada variable evaluada. La determinación del contenido de proteína bruta se realizó mediante el método Kjeldahl, fundamentado en la destilación del nitrógeno total de la muestra. Por otro lado, se empleó la técnica de gravimetría para el cálculo de materia grasa, porcentaje de humedad y ceniza, basándose en la diferencia de pesos tras someter las muestras a tratamientos térmicos controlados. También se obtuvieron en el laboratorio los carbohidratos mediante un cálculo indirecto y este valor fue utilizado posteriormente en la estimación del aporte energético del forraje.

Con el fin de robustecer la comparación con el software TaurusWebs, se integraron análisis adicionales de fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA). Estos parámetros, esenciales para estimar la digestibilidad del pasto Rodas, fueron procesados bajo principios de gravimetría (método de Van Soest), manteniendo así la coherencia metodológica y la rigurosidad necesaria para validar la precisión de los sistemas digitales frente a los estándares convencionales de laboratorio. Para los minerales como sodio, potasio, calcio, hierro, magnesio, cobre, zinc y manganeso, presentes en el pasto, se aplicó la técnica de “AA de llama” o espectroscopia de absorción atómica, también utilizada para la determinación de metales pesados.

La plataforma TaurusWebs integra capacidades de análisis basadas en los principios de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) para la estimación de componentes bromatológicos. Este proceso se fundamenta en la adquisición de datos mediante sensores aerotransportados en el dron, el cual captura información espectral a tra-

vés de algoritmos RGB. Esta tecnología descompone la luz reflejada por el dosel del pasto Rodas en sus tres bandas cromáticas primarias: Rojo (Red), Verde (Green) y Azul (Blue), permitiendo que el sistema interprete las longitudes de onda vinculadas a la actividad fotosintética y el vigor vegetativo para calcular el valor nutricional del forraje. El método NIRS tiene la capacidad de dar resultados de forma confiable, como la composición nutricional de fibra detergente neutra, fibra detergente ácida, proteína, materia seca, entre otros elementos (Ariza Nieto, 2018).

La investigación se fundamenta en la hipótesis de que no existen diferencias estadísticas significativas entre los valores reportados por ambos métodos de evaluación. De cumplirse este supuesto, se propone al sector ganadero de Santa Ana una metodología de diagnóstico ágil y de bajo costo, permitiendo optimizar la dieta animal y mejorar la competitividad de las fincas de la zona.

Métodos

La investigación se desarrolló en el cantón Santa Ana, ubicado en la zona centro-oeste de la provincia de Manabí, República del Ecuador. El área seleccionada para el análisis del pasto Rodas se localiza geográficamente en las coordenadas 1° 12' de latitud Sur y 80° 22' de longitud Oeste, situándose a una altura aproximada de 50 m s. n. m. Este entorno presenta las condiciones agroecológicas típicas de la región, caracterizadas por un clima que influye directamente en la composición bromatológica de los forrajes evaluados en este estudio.

La zona presenta temporadas de verano e invierno. Tiene un clima tropical húmedo, con una temperatura media anual de 26 °C. Su precipitación anual oscila entre los 500 mm y los 1 000 mm. El terreno tiene una superficie de 6 hectáreas con 56 metros cuadrados.

Diseño de muestreo

Para garantizar la calidad de los datos, se realizó una calibración del balance de blancos de la cámara del dron, ajustando el valor a 5 200 K. Este ajuste es fundamental para estandarizar la captura de imágenes y debe adaptarse a las especificaciones técnicas de la aeronave utilizada según lo recomendado por el software (TaurusWebs, 2025), evitando así interferencias cromáticas durante el levantamiento.

El proceso de recolección se llevó a cabo en dos parcelas del mismo terreno, efectuando capturas de tres niveles de altitud: 20, 50 y 100 metros. Estos vuelos se realizaron en condiciones de cielo despejado y con iluminación solar estable, con el fin de prevenir la formación de sombras proyectadas que generen irregularidades o sesgos en el procesamiento bromatológico de las

imágenes.

Para determinar la ventana cronológica más adecuada para la adquisición de datos multiespectrales, se definieron tres horarios de muestreo: 10:00, 14:00 y 17:00 horas, ejecutados específicamente durante los días 30 y 45 del ciclo del cultivo. Se determinó prescindir de la evaluación al día 15 en este horario y solo se capturó una imagen por cada altura tras constatar que la densidad de la cobertura vegetal era insuficiente para un análisis representativo.

Debido a que el software generaba un volumen de datos superior a la frecuencia de los análisis químicos, se procedió a calcular promedios diarios por variable evaluada. Este procedimiento de normalización permitió alinear la gradualidad de la información digital con los reportes de laboratorio, los cuales arrojaban un valor único por jornada de muestreo. Dicho ajuste fue determinante para fortalecer la estructura del análisis estadístico y garantizar la coherencia en la comparación de las metodologías.

El análisis de las imágenes se realizó de forma individual para determinar el contenido de proteína, materia seca, energía neta de lactancia (MJ/kg), fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA). Asimismo, se cuantificaron microminerales (Cu, Fe, Zn, Mn, B) y macrominerales (K, P, Ca, S, Mg) presentes en la materia seca de las gramíneas. Este procedimiento se llevó a cabo mediante algoritmos matemáticos que tiene el software y que son decodificados por las bandas RGB que proporcionan las imágenes tomadas por el dron.

De esta forma, se puede interpretar la reflectancia de las longitudes de onda vinculadas a la actividad fotosintética en los cloroplastos, facilitando la estimación indirecta de la concentra-

ción de nutrientes y minerales en el tejido vegetal. Pesantez (2024) indica que las imágenes espectrales captadas por cámaras RGB convencionales han permitido el monitoreo sobre el estado de la vegetación, el análisis de la cobertura terrestre y la identificación de distintos tipos de estrés, tanto hídrico como nutricional (p. 17).

Obtención de muestras para laboratorio

Para el muestreo de laboratorio se establecieron coordenadas GPS dentro de las dos parcelas de pasto Rodas, que fueron georreferenciadas mediante el uso de un dron. Este procedimiento se realizó con el fin de garantizar una comparación precisa y confiable de los resultados obtenidos entre ambas metodologías de análisis.

Previo a la toma de muestra de pasto, se efectuó un procesamiento inicial de la imagen capturada a una altura de 100 metros, utilizando el software correspondiente. Dicho procesamiento permitió identificar el área del cultivo que presentaba mejores condiciones. En el software, la imagen se visualiza mediante bandas de colores, donde las zonas con mayor vigor vegetativo se representan con un color verde intenso; no obstante, se verificó que dichas áreas correspondieran efectivamente al cultivo objeto de estudio.

Una vez seleccionada el área más representativa del pasto, se procedió a la recolección de las muestras. En total, se obtuvieron seis muestras, las cuales fueron mezcladas de manera homogénea para conformar una muestra compuesta. Posteriormente, esta se almacenó en una bolsa de poliestireno con cierre hermético para su envío y análisis en el laboratorio.

Cada muestra fue debidamente etiquetada con la coordenada exacta del punto de recolección y recibió el tratamiento correspondiente, conforme a los requerimientos establecidos por el laboratorio. La cantidad de muestra recolectada dependió de las especificaciones del laboratorio CESECCA, que solicitó un total de 200 gramos de muestra por parcela.

Este procedimiento se llevó a cabo en las tres tomas de muestra correspondientes a los dos días establecidos. En estas ocasiones se omitió el análisis previo en el software en las tomas 2 y 3, con el fin de mantener un registro continuo y minimizar posibles errores durante la recolección. Además, se definió un único sector fijo para la toma de muestras.

Para los análisis de minerales, FDA y FDN, se recolectó un kilogramo de biomasa por parcela, cumpliendo con las normativas de ingreso de los laboratorios de Agrocalidad en Tumbaco. Las muestras fueron selladas herméticamente y trasladadas en condiciones de refrigeración. Este proceso se realizó solamente en la fase final del estudio para complementar la comparación de datos con las funciones avanzadas del software, dado que estos análisis específicos no estaban disponibles en el laboratorio base CESECCA.

Para obtener los resultados, se emplearon diversos métodos de análisis. El porcentaje de proteína bruta se determinó mediante el método de Kjeldahl, un proceso de análisis químico que cuantifica el contenido total de nitrógeno en la muestra. Como explica la Universidad de Zaragoza (2024), en esta técnica “se digieren las proteínas y otros componentes orgánicos de los alimentos en una mezcla con ácido sulfúrico en presencia de catalizadores” (p. 2). De esta manera, el contenido de nitrógeno del pasto permite calcular su contenido de proteína bruta.

La determinación cuantitativa de la fracción del extracto etéreo (materia grasa) y el contenido hídrico (humedad) del forraje se fundamentó en el análisis gravimétrico. Para este propósito, se aplicó específicamente el método de volatilización, que consiste en medir con precisión la variación de la masa de la muestra tras la eliminación de sus componentes volátiles mediante tratamientos térmicos controlados en mufla y estufa. Este procedimiento permitió aislar y cuantificar cada residuo con el rigor necesario para su posterior contraste estadístico con las estimaciones digitales. Montero (2021) afirma que “la estrategia se modificará en caso de que volatilicemos el analito y midamos la acumulación después de la volatilización; posteriormente, la reducción de peso soportada se relaciona con el analito que se ha volatilizado” (p. 20).

La obtención de la materia seca se realizó mediante el método gravimétrico clásico, procedimiento de química analítica estandarizado por la AOAC (Asociación de Químicos Analíticos Oficiales). El cálculo se efectuó restando el porcentaje de humedad del total de la muestra (100 %), lo cual representa la suma de los componentes sólidos del pasto: carbohidratos, materia seca, ceniza y proteína bruta, siguiendo los protocolos del laboratorio CESECCA.

Para estimar el contenido energético del forraje, el laboratorio empleó la fórmula desarrollada por Wilbur Olin Atwater, quien fue un pionero en la nutrición en Estados Unidos y quien se destacó por enfocarse en el interés ganadero y agrícola (Farías Reyes, 2025, p. 2). Dicho modelo matemático se basa en el principio de conservación de la energía y utiliza los porcentajes de proteína, grasa y carbohidratos como variables principales. La expresión matemática utilizada es Energía =

$4(\%P) + 9(\%G) + 4(\%C)$. Para la determinación de FDA y FDN, se utilizó el método detergente de Van Soest. Este proceso de fraccionamiento emplea soluciones detergentes específicas para cuantificar los componentes estructurales de la pared celular (Sniffen, 1992, como se citó en Lery, 2016, p. 3).

Según Lery (2016), el procesamiento de las muestras inició con su registro, secado y molienda, tras lo cual fueron transferidas a sobres de papel filtro vegetal. Para la determinación de FDN, se añadió la solución detergente neutra (SDN), compuesta por agua destilada, lauril, sulfato de sodio, fosfato disódico y 2-etoxietanol. La mezcla se sometió a una ebullición durante una hora en una plancha de calentamiento, manteniendo un volumen constante mediante la adición de agua destilada. Posteriormente, las muestras se secaron en una estufa para la cuantificación de los residuos finales. Un método análogo se empleó para la obtención de FDA, sustituyendo el reactivo por la solución detergente ácida (SDA), la cual contiene ácido sulfúrico 1N y bromuro de cetiltrimetilamonio (Lery, 2016).

Con el propósito de ampliar las comparaciones entre las variables analizadas por el software y los datos empíricos, se realizaron análisis minerales complementarios en el laboratorio de Agrocalidad utilizando las muestras del día 45. Allende Céspedes (2024) indica que, para la determinación de nitrógeno, se empleó el método DUMAS, fundamentado en la combustión completa de la muestra. Este proceso se ejecutó en un horno a 950 °C durante 2,8 minutos, seguido de una transferencia a una cámara de purga sellada. La combustión genera una mezcla gaseosa que se homogeniza en un balasto, desde donde se extrae una porción representativa para su detección final en el analizador.

En cuanto a la cuantificación del fósforo, se utilizó la metodología de colorimetría (Páez Ordóñez & Ortiz Burbano, 2015) que indica:

Según la literatura, el método estándar para la determinación de fosfato se basa en la reacción del fósforo con iones de molibdeno y antimonio para formar un complejo, el cual puede ser reducido utilizando cloruro de estaño o ácido ascórbico, resultando una coloración azul característica que puede ser detectada mediante colorimetría. (p. 41)

En cuanto a los demás elementos (K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn), se determinaron mediante espectroscopia de absorción atómica. Según Peñaloza (2023), este procedimiento consiste en conducir la materia líquida hacia el nebulizador del equipo para ser llevada a la llama, donde se transforma en átomos libres. La combustión de aire-acetileno alcanza aproximadamente los 2 300 °C, temperatura suficiente para la atomización de diversos elementos. No obstante, para alcanzar una mayor energía térmica, se puede emplear una mezcla de óxido nitroso y acetileno, capaz de producir temperaturas cercanas a los 2 900 °C. Una vez que los átomos libres se encuentran en estado gaseoso, son expuestos a la radiación térmica emitida por la lámpara de cátodo hueco (construida con un tubo de vidrio que contiene un gas inerte de neón o argón).

La fracción de la radiación que no es absorbida continúa su trayectoria hasta el detector. Durante este proceso, los electrones absorben energía y pasan a un nivel energético superior de forma transitoria. Al medir la diferencia entre la energía emitida y la detectada a una longitud de onda específica, se cuantifica la radiación absorbi-

da mediante la ley de Lambert-Beer, estableciendo así una relación directa entre la señal obtenida y la concentración del elemento analizado (Peñaloza, 2023).

Diseño experimental

El presente estudio se fundamentó en la comparación de dos sistemas de análisis aplicados sobre las mismas unidades experimentales, con el propósito de evaluar la concordancia o diferencias entre los métodos. Esta configuración técnica facilitó una contrastación directa entre las estimaciones digitales de TaurusWebs y los reportes químicos de laboratorio, con el propósito de determinar la eficiencia de cada herramienta y su impacto real en la optimización de los recursos económicos del productor ganadero en el cantón Santa Ana.

Para el procesamiento, el contraste entre ambos métodos se ejecutó mediante la prueba *t* de Student para muestras relacionadas. Esta herramienta estadística permitió determinar la existencia o ausencia de diferencias significativas entre los resultados obtenidos por ambos métodos, facilitando así una valoración bromatológica precisa del forraje al identificar posibles discrepancias entre las mediciones.

Las variables que se presentan por parte de la investigación son las siguientes:

- Variable dependiente: resultado del análisis bromatológico del forraje Rodas (*Pennisetum* sp.) manifestado en los porcentajes de proteína, materia seca y energía neta de lactancia.
- Variable independiente: Análisis bromatológico de laboratorio y software TaurusWebs.

Resultados

Tabla 1

Comparativa de parámetros bromatológicos promedio en la parcela 1

Día	Método	Proteína (%)	FDN (%)	FDA (%)	Materia seca (%)	Energía (ENL) MJ/kg
15	TaurusWebs	7,25	64,96	35,20	18	3,95
30	TaurusWebs	10,74	61,42	33,59	18	4,39
45	TaurusWebs	19,11	51,59	22,65	18	5,42
15	Laboratorio	2,56			12,12	0,18
30	Laboratorio	2,20			10,91	0,15
45	Laboratorio	2,51	91,31	56,07	19,96	0,29

Los resultados bromatológicos comparativos presentados en la Tabla 1 exponen discrepancias sustanciales entre las estimaciones del software TaurusWebs y las determinaciones analíticas de laboratorio. En cuanto a la fracción proteica, el software proyectó un incremento atípico hasta alcanzar un 19,11 % al día 45, mientras que el análisis químico reportó valores significativamente inferiores y estables (media 2,42 %), evidenciando una sobreestimación teórica por parte del modelo digital.

Esta tendencia se acentúa en los componentes estructurales de la pared celular. Al día 45, el método gravimétrico de laboratorio registró niveles críticos de 91,31 % para FDN y 56,07 % para FDA, contrastando con la reducción del

contenido fibroso que el software predijo (51,59 % y 22,65 % respectivamente). Esta divergencia se fundamenta en la diferencia metodológica: TaurusWebs opera mediante modelos matemáticos predictivos que, en este estudio, demostraron limitaciones para extrapolar la cinética de lignificación real en condiciones de campo. Por el contrario, el método de laboratorio (Van Soest) es de naturaleza gravimétrica, permitiendo la cuantificación física de los componentes estructurales de la pared celular.

Un punto crítico de variación se observa en la materia seca, donde el software mantuvo un valor paramétrico constante de 18 %. Esta homogeneidad responde al uso de valores pre-configurados o por defecto basados en promedios

de tablas nutricionales estándar. No obstante, el análisis químico identificó fluctuaciones de humedad, para el día 15 (12,12 %) y para el día 45 (19,96 %). Estas diferencias analíticas impactaron directamente en el cálculo de la energía neta de lactancia (ENL); mientras que el software proyec-

tó un progresivo aumento de 3,95 MJ/kg a 5,42 MJ/kg basado en la estimación de fibra baja, el laboratorio determinó un incremento que va desde 0,18 MJ/kg a 0,29 MJ/kg, debido a que la FDA (lignina) penaliza matemáticamente la digestibilidad y el aporte energético.

Tabla 2

Prueba t de Student de proteína de ambas metodologías, parcela 1

Día	Anal. del soft. (A)	Anal. del lab. (B)	A-B	(A-B) ²
15	7,25	2,56	4,69	22
30	10,74	2,20	8,54	72,93
45	19,11	2,51	16,60	275,56
Σ	32,1	7,27	29,83	370,49
$\bar{x}$	12,37	2,42	9,94	123,50
S^2	$\sqrt{S^2}$	GL	Datos de Tukey	t
12,31	3,51	2	0,05 = 4,303 0,01 = 9,925	2,83

Con el objetivo de determinar la fiabilidad de las herramientas de ganadería 4.0 frente a los métodos convencionales, se aplicó una prueba t de Student para muestras pareadas. Se comparó el contenido de proteína obtenido mediante el software (A) y el laboratorio (B). Para este análisis, se promediaron los valores registrados por el software en los días 15, 30 y 45, consolidando un valor representativo por etapa para una comparación directa con los resultados del análisis de laboratorio.

Los resultados estadísticos mostraron un valor de t calculado (2,83) inferior a los valores críticos establecidos para ambos niveles de significancia del 5 % (4,303) y 1 % (9,925). Por consiguiente, se acepta la hipótesis de similitud entre las estimaciones del software y los análisis de laboratorio para el parámetro evaluado.

Tabla 3

Prueba t de Student de materia seca de ambas metodologías, parcela 1

Día	Anal. del soft. (A)	Anal. del lab. (B)	A-B	(A-B) ²
15	18	12,12	5,88	34,57
30	18	10,91	7,09	50,27
45	18	19,96	-1,96	3,84
Σ	54	42,99	11,01	88,68
$\bar{x}$	18	14,33	3,67	29,56
S^2	$\sqrt{S^2}$	GL	Datos de Tukey	t
8,04	2,84	2	0,05 = 4,303 0,01 = 9,925	1,29

El análisis del software (A) muestra una estabilidad absoluta, ya que durante los tres días mantiene un valor constante de 18, mientras que el análisis de laboratorio (B) presenta una fluctuación importante, con una media

de 14,33. Pese a que se presenta diferencia aritmética, los datos indican que no hay evidencia estadística para afirmar que un método sea superior al otro o que entreguen resultados distintos de forma sistemática.

Tabla 4

Prueba t de Student de energía (MJ/kg) de ambas metodologías, parcela 1

Día	Anal. del soft. (A)	Anal. del lab. (B)	A-B	(A-B) ²
15	3,9	0,18	3,72	13,84
30	4,4	0,15	4,25	18,06
45	5,40	0,29	5,11	26,11
Σ	13,7	0,62	13,08	58,01
$\bar{x}$	4,57	0,21	4,36	19,34
S^2	$\sqrt{S^2}$	GL	Datos de Tukey	t
0,16	0,41	2	0,05 = 4,303 0,01 = 9,925	10,77

Al contrastar el rendimiento energético mediante las dos metodologías propuestas, se determinó que el software y el laboratorio no arrojan resultados equivalentes. El valor de t calculado (10,77) superó los valores de referencia críticos para los niveles de confiabilidad de Tukey

para el rigor estadístico del 5 % y 1 %. En consecuencia, se rechaza la hipótesis de igualdad y se concluye que existe diferencia estadísticamente significativa entre ambos métodos analíticos durante las fases de 15, 30 y 45 días.

Tabla 5

Resultados de comparación del día 45 de FDA y FDN, parcela 1

Día	Método	FDN	FDA
45	TaurusWebs	51,60	22,70
45	Laboratorio	91,31	56,07

De manera complementaria, se efectuó la determinación de fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA) durante la fase final del periodo de muestreo (día 45).

Al contrastar ambas metodologías en la tabla 5, se identificó una discrepancia sustancial en los valores absolutos obtenidos.

Tabla 6

Comparativa de parámetros minerales promedio en la parcela 1 en el día 45

Día	Método	Ca (%)	P (%)	Mg (%)	K (%)	Cu (%)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mn (mg/kg)	N (%)
45	TaurusWebs	0,32	0,40	0,16	4,28	6,35	164	29,11	50,56	3,06
45	Laboratorio	0,22	0,17	0,15	2,62	9	170	28	51,50	2,13

El análisis de minerales en la finca de Santa Ana permitió identificar la composición elemental del pasto Rodas, factor crucial para el balance metabólico del ganado. Se observó una estabilidad relativa en los macronutrientes, destacando niveles promedio de calcio (0,32 %), fósforo (0,40 %), magnesio (0,16 %), potasio (4,28 %) y nitrógeno (3,06 %). Asimismo, se identificó la presencia de micronutrientes como hierro (164 mg/kg), zinc (29,11 mg/

kg) y manganeso (50,56 mg/kg) por parte del software; en comparación con los resultados de laboratorio, se identificó que las cantidades no son muy alejadas de la realidad. Para esto tenemos calcio (0,22 %), fósforo (0,17 %), magnesio (0,15 %), potasio (2,62 %) y nitrógeno (2,13 %) y, por parte de los micronutrientes, se identificó la presencia de hierro (170 mg/kg), zinc (28 mg/kg) y manganeso (51,50 mg/kg).

Parcela 2

En la parcela 2, la evaluación del pasto Rodas mediante el software TaurusWebs mostró una tendencia incremental en la concentración de nutrientes a medida que avanzaba el ciclo fenológico. Al día 15, se registró un promedio inicial de proteína bruta de 4,20 %, el cual ascendió significativamente hasta alcanzar el 16,61 % al finalizar el periodo de 45 días.

Al igual que en la parcela 1, existe una brecha notable al contrastar estos datos con los análisis de laboratorio, especialmente en las etapas finales del cultivo. Mientras que el software estimó niveles de proteína superiores al 16 %, el método químico reportó una concentración de 2,85 % al día 45. Una discrepancia similar se observó en los niveles de energía neta de lactancia (ENL), donde el sistema digital proyectó 5,11 MJ/kg frente a los 0,33 MJ/kg validados en el laboratorio.

Tabla 7
Comparativa de parámetros bromatológicos promedio en la parcela 2

Día	Método	Proteína (%)	FDN (%)	FDA (%)	Materia seca	Energía (ENL MJ/kg)
15	TaurusWebs	4,20	68,41	35,14	18	3,57
30	TaurusWebs	10,89	60,86	33,54	18	4,40
45	TaurusWebs	16,61	54,41	26,98	18	5,11
15	Laboratorio	2,91			9,66	0,14
30	Laboratorio	2,03			16,57	0,24
45	Laboratorio	2,85	92,61	56,57	22,37	0,33

Con relación a la fracción fibrosa, el laboratorio determinó valores de 92,61 % para FDN y 56,57 % para FDA. Estas cifras superan am-

pliamente las estimaciones del software, lo que refuerza la hipótesis de la interpretación espectral del algoritmo RGB.

Tabla 8

Prueba t de Student de proteína de ambas metodologías, parcela 2

Día	Anal. del soft. (A)	Anal. del lab. (B)	A-B	(A-B) ²
15	4,20	2,91	1,29	1,66
30	10,89	2,03	8,86	78,50
45	16,61	2,85	13,76	189,34
	31,7	7,79	23,76	269,50
$\bar{x}$	10,57	2,60	7,97	89,83
S ²	$\sqrt{S^2}$	GL	Datos de Tukey	t
13,15	3,63	2	0,05 = 4,303 0,01 = 9,925	2,20

La evaluación de la proteína en la parcela 2 no mostró discrepancia crítica entre el método digital y el laboratorio. Tras ejecutar el balance estadístico, se obtuvo un coeficiente de contraste de 2,20. Al situarse este valor por debajo de los

umbrales de significancia, se determina que las variaciones entre ambos métodos carecen de relevancia estadística, evidenciando una paridad entre los resultados reportados.

Tabla 9

Prueba t de Student de materia seca de ambas metodologías, parcela 2

Día	Anal. del soft. (A)	Anal. del lab. (B)	A-B	$(A-B)^2$
15	18	9,66	8,34	69,56
30	18	16,57	1,43	2,04
45	18	22,37	-4,37	19,10
	54	48,6	5,40	90,70
$\bar{x}$	18	16,20	1,80	30,23
S^2	$\sqrt{S^2}$	GL	Datos de Tukey	t
13,49	3,67	2	0,05 = 4,303	0,49
			0,01 = 9,925	

Con el mismo método, se evaluó el contenido de materia seca entre ambas técnicas de diagnóstico, siendo el valor de t (0,49) drásticamente

inferior al valor crítico mínimo (4,303); el análisis cae plenamente en la zona de aceptación de la hipótesis nula.

Tabla 10

Prueba t de Student de energía (MJ/kg) de ambas metodologías, parcela 2

Día	Anal. del soft. (A)	Anal. del lab. (B)	A-B	(A-B) ²
15	3,57	0,14	3,43	11,76
30	4,4	0,24	4,16	17,31
45	5,11	0,33	4,78	22,85
Σ	13,08	0,71	12,37	51,92
$\bar{x}$	4,36	0,24	4,12	17,31
s^2	$\sqrt{s^2}$	GL	Datos de Tukey	T
0,15	0,39	2	0,05 = 4,303 0,01 = 9,925	10,57

Los resultados referentes a la densidad energética (MJ/kg) muestran una divergencia crítica en la evolución. El coeficiente de contraste

alcanzado (10,57) se posiciona muy por encima de los valores tabulados por Tukey, lo que obliga a rechazar la hipótesis de igualdad.

Tabla 11

Resultados de comparación del día 45 de FDA y FDN parcela 2

Día	Método	FDN	FDA
45	TaurusWebs	54,41	26,98
45	Laboratorio	92,61	56,57

Se llevó a cabo la evaluación de las fracciones estructurales fibra detergente neutra y ácida (FDN, FDA) en la etapa final del proceso de muestreo. La comparación evidenció un sesgo

importante entre los valores obtenidos, denotando una escasa concordancia entre los resultados de las determinaciones de laboratorio y las estimaciones del software.

Tabla 12

Comparativa de parámetros minerales promedio en la parcela 2 en el día 45

Día	Método	Ca (%)	P (%)	Mg (%)	K (%)	Cu (%)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Mn (mg/kg)	N (%)
45	TaurusWebs	0,33	0,36	0,19	3,46	5,66	138	28,44	55,89	2,66
45	Laboratorio	0,19	0,18	0,14	2,38	8,5	127	36,49	12,15	1,87

El estudio de los componentes inorgánicos en la parcela 2 permitió establecer un perfil de nutrientes esenciales para el ganado bovino. Se determinaron concentraciones promedio de calcio (0,33 %), fósforo (0,36 %), magnesio (0,19 %), potasio (3,46 %) y nitrógeno (2,66 %). Asimismo, se identificó la presencia de micronutrientes como hierro (138 mg/kg), zinc (28,44 mg/kg) y manganeso (55,89 mg/kg) por parte del software. En

comparación con los resultados de laboratorio, se identificó que las cantidades no son muy alejadas de la realidad; para esto tenemos calcio (0,19 %), fósforo (0,18 %), magnesio (0,14 %), potasio (2,38 %) y nitrógeno (1,87 %) y, por parte de los micronutrientes, se identificó la presencia de hierro (127 mg/kg), zinc (36,49 mg/kg) y manganeso (12,15 mg/kg).

Figuras

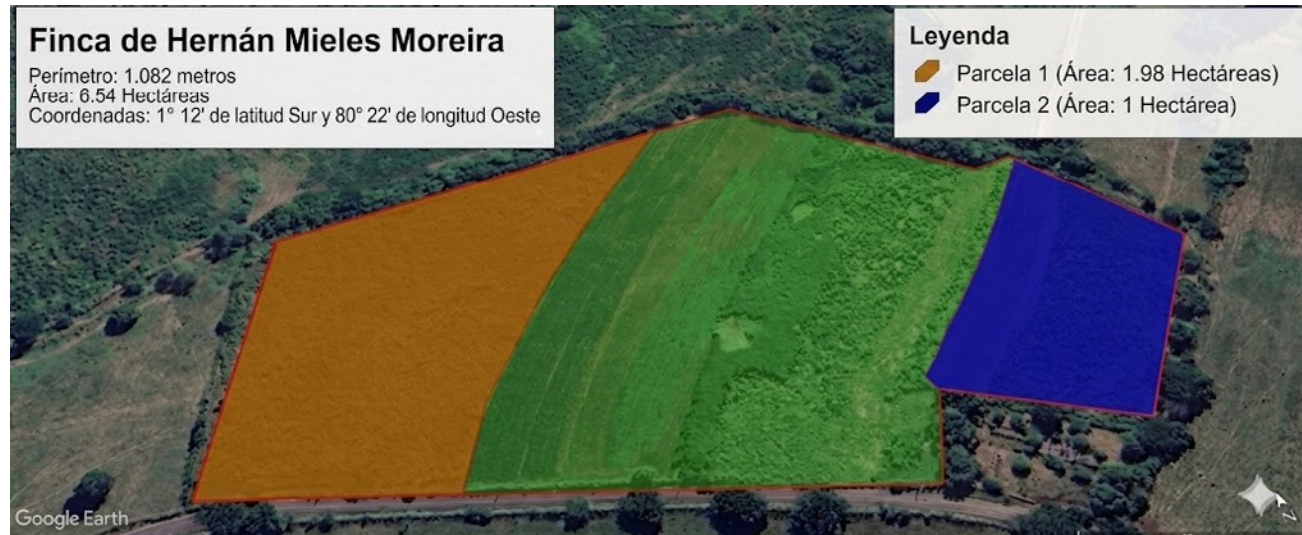


Figura 1

Polígono de la finca de Hernán Mieles Moreira.

Nota. Para la ejecución del análisis bromatológico del pasto Rodas, se seleccionaron unidades de muestreo representadas dentro de la superficie total de la finca (Figura 1). La recolección de la biomasa se centró específicamente en la parcela 1, con una extensión de 1,98 hectáreas, y en la parcela 2, que comprende 1,00 hectárea.

Esta sectorización de la finca ubicada dentro del cantón Santa Ana permitió capturar la variabilidad del forraje en condiciones de campo reales, facilitando la correlación entre la gestión espacial del predio y los indicadores nutricionales obtenidos en el laboratorio y en el software.

Parcela 1

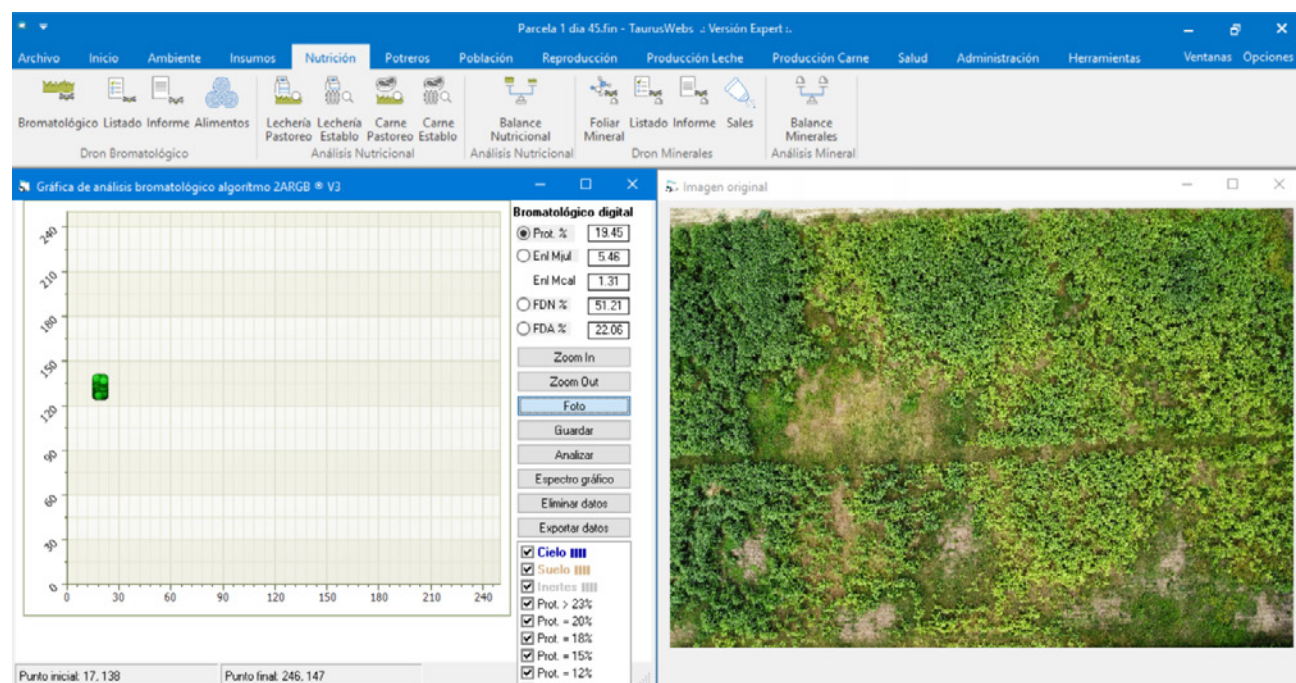


Figura 2

Análisis bromatológico a 100 metros de altura

Nota. La secuencia conformada por las Figuras 2 a 9 ilustra el proceso de teledetección y procesamiento digital aplicado en el estudio. Estas figuras exponen la morfología del terreno y la densidad del follaje mediante capturas aéreas obtenidas a altitudes de 100 m, 50 m y 20 m. La

progresión gráfica permite constatar la integración de estas imágenes en el software TaurusWebs, plataforma en la cual se ejecutó la interpretación de los datos para la estimación de los parámetros bromatológicos y minerales del pasto Rodas dentro del cantón Santa Ana.

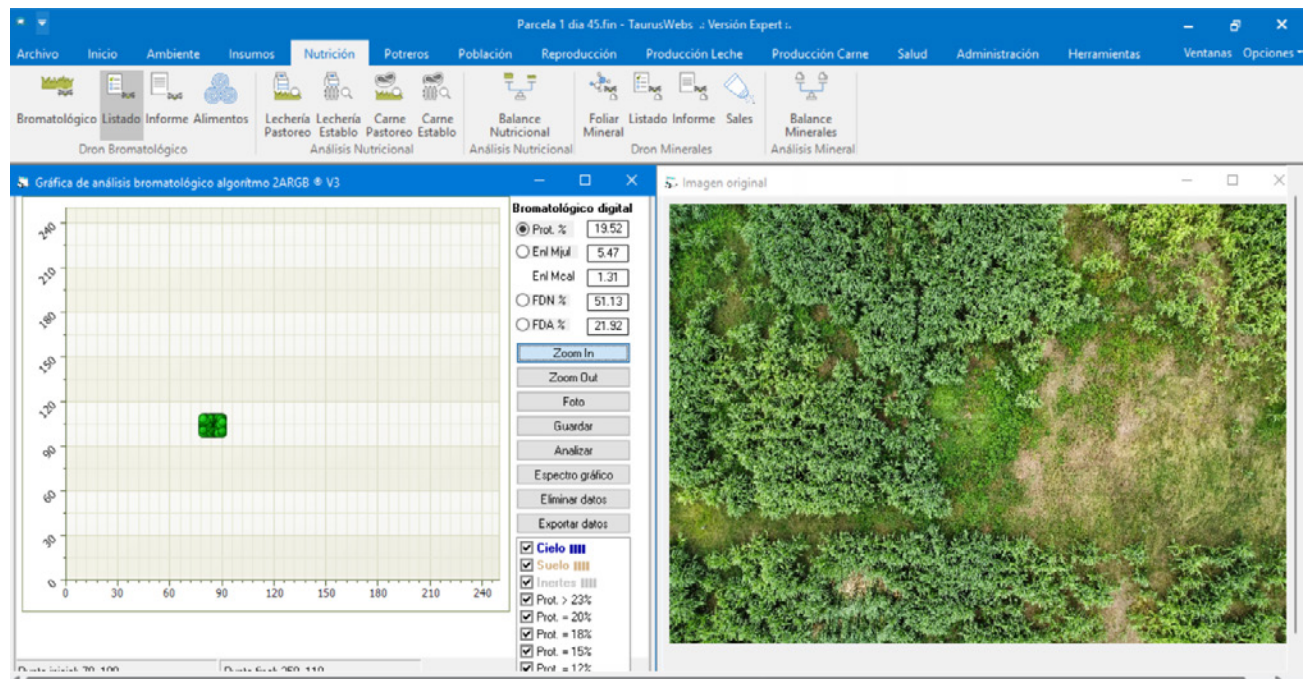


Figura 3

Análisis bromatológico a 50 metros de altura

Nota. Imagen obtenida a una altura media para evaluar la resolución de la biomasa y su impacto en la precisión de las estimaciones digitales.

El procesamiento se realizó mediante la plataforma TaurusWebs, siguiendo los lineamientos metodológicos descritos anteriormente.

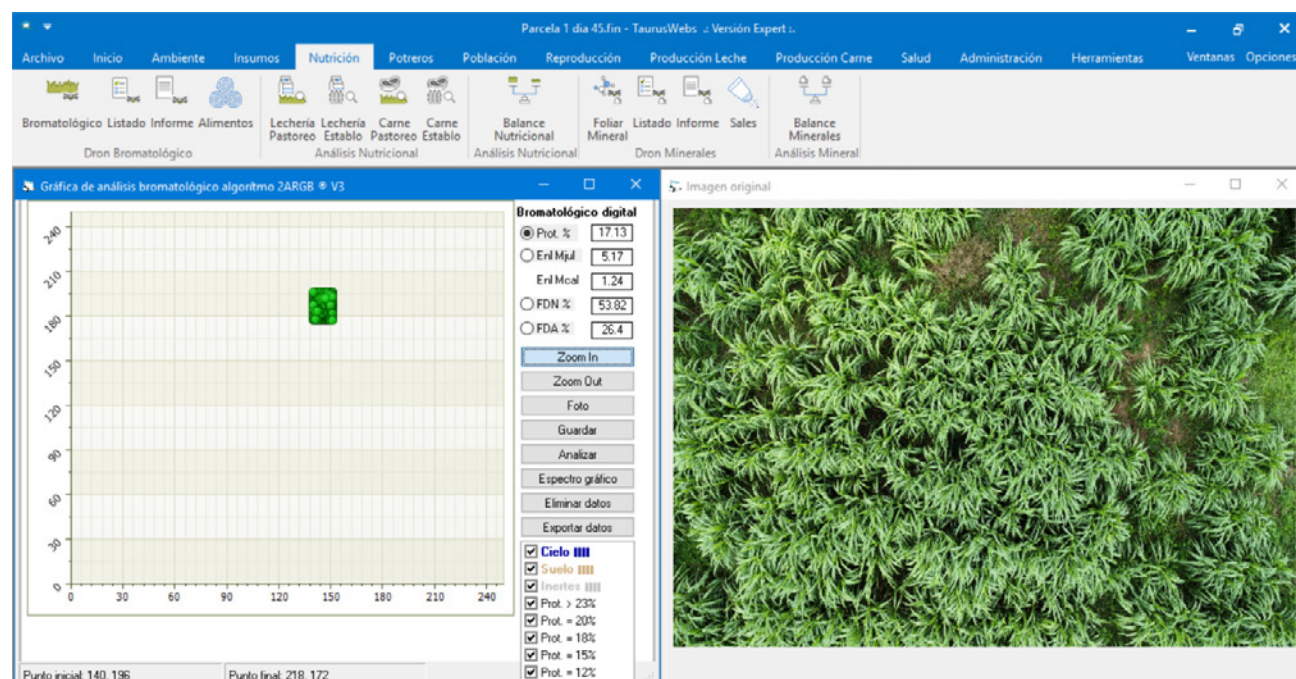


Figura 4

Análisis bromatológico a 20 metros

Nota. Captura de alta resolución que permite una inspección detallada de la densidad y calidad del forraje en las parcelas de estudio.

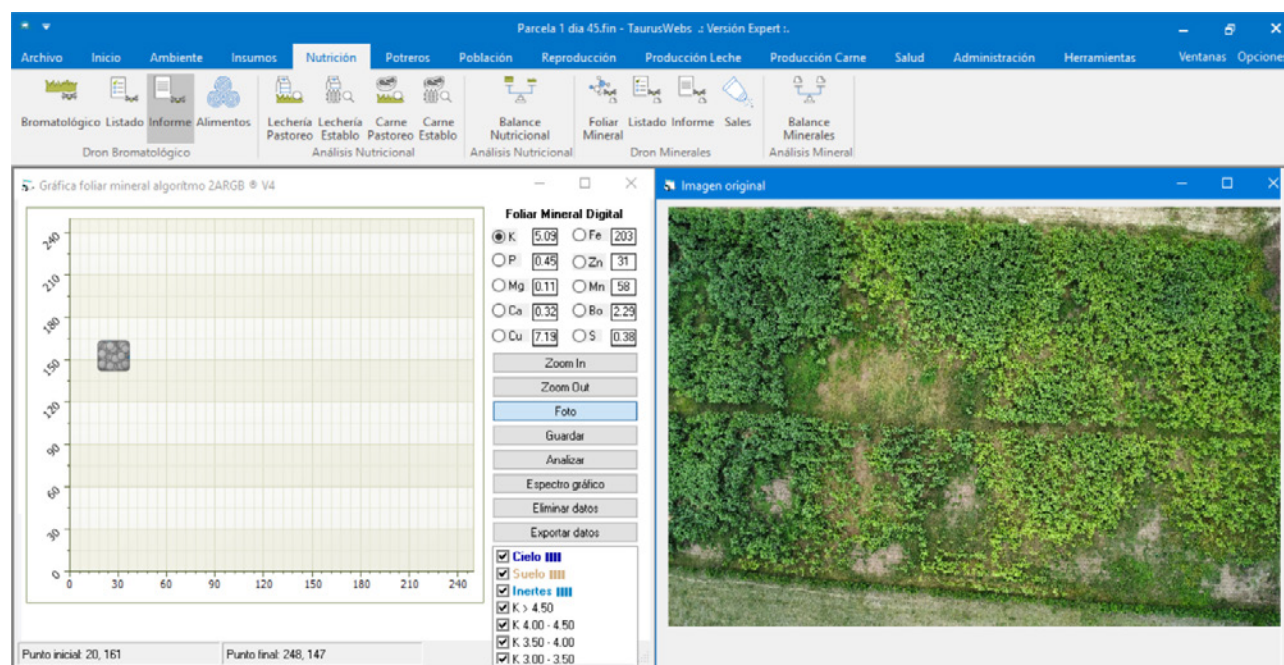


Figura 5

Análisis mineral

Nota. Imagen procesada para la identificación de concentraciones minerales específicas.

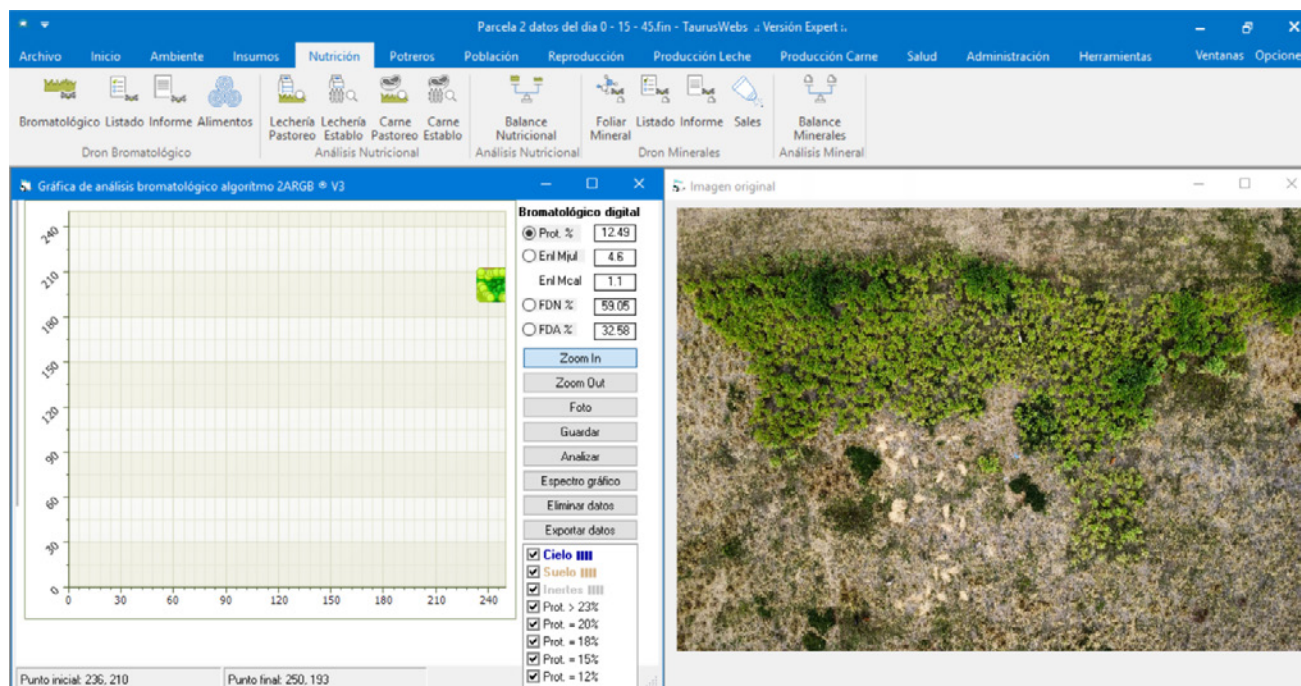


Figura 6

Análisis bromatológico a 100 metros de altura en la parcela 2

Nota. Captura aérea de zona seleccionada utilizada para la validación del perfil bromatológico en el software TaurusWebs.

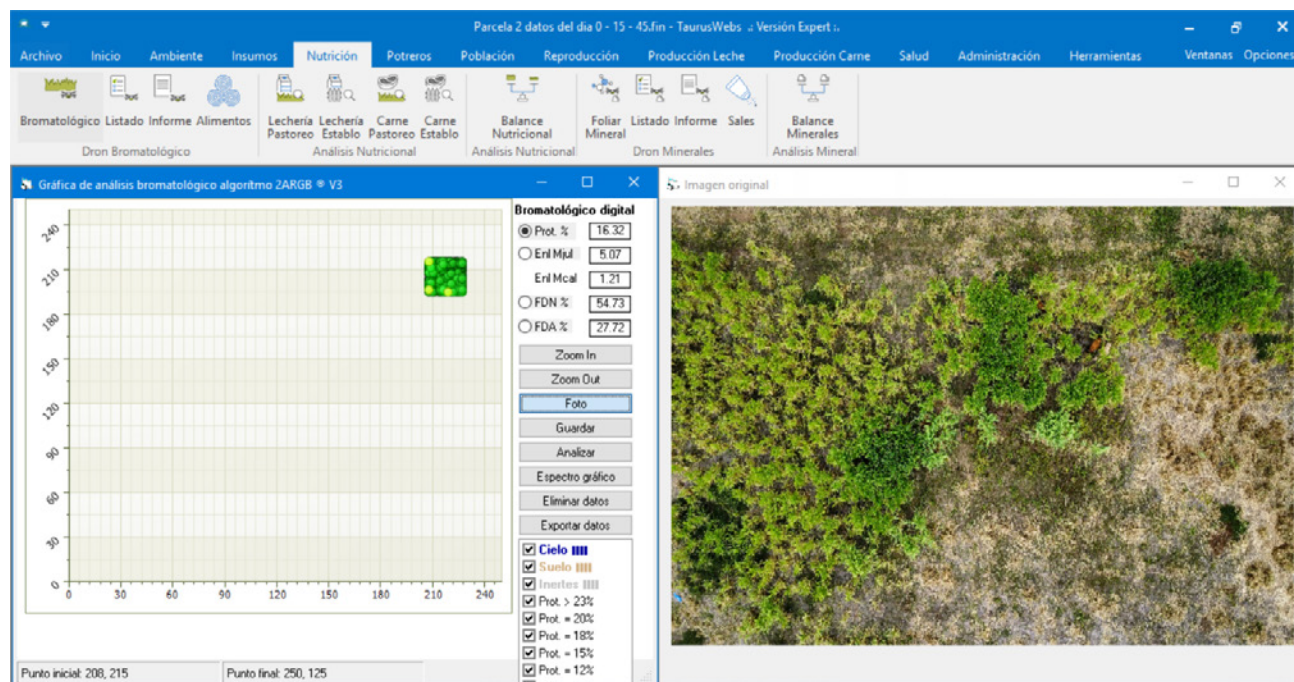


Figura 7

Análisis bromatológico a 50 metros de altura.

Nota. Registro multiespectral destinado al contraste de niveles nutricionales en el pasto Rodas.

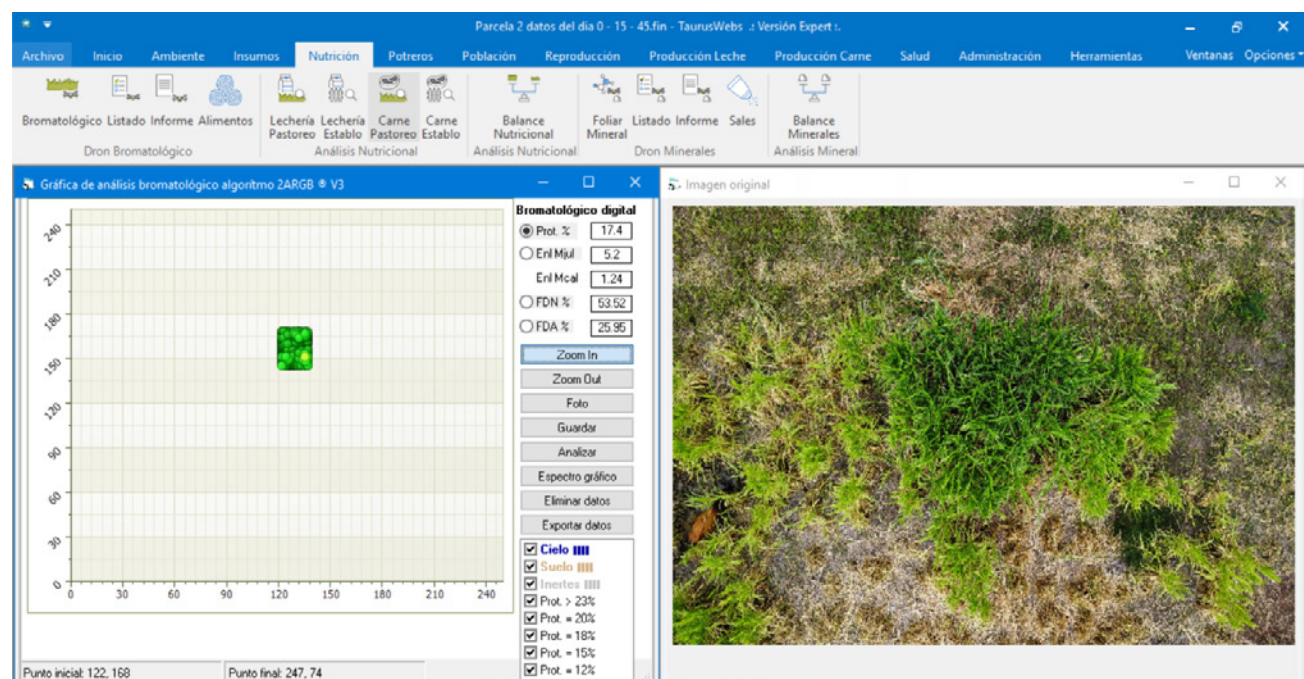


Figura 8

Análisis bromatológico a 20 metros de altura.

Nota. Imagen utilizada para validar parámetros nutricionales del pasto Rodas en TaurusWebs.

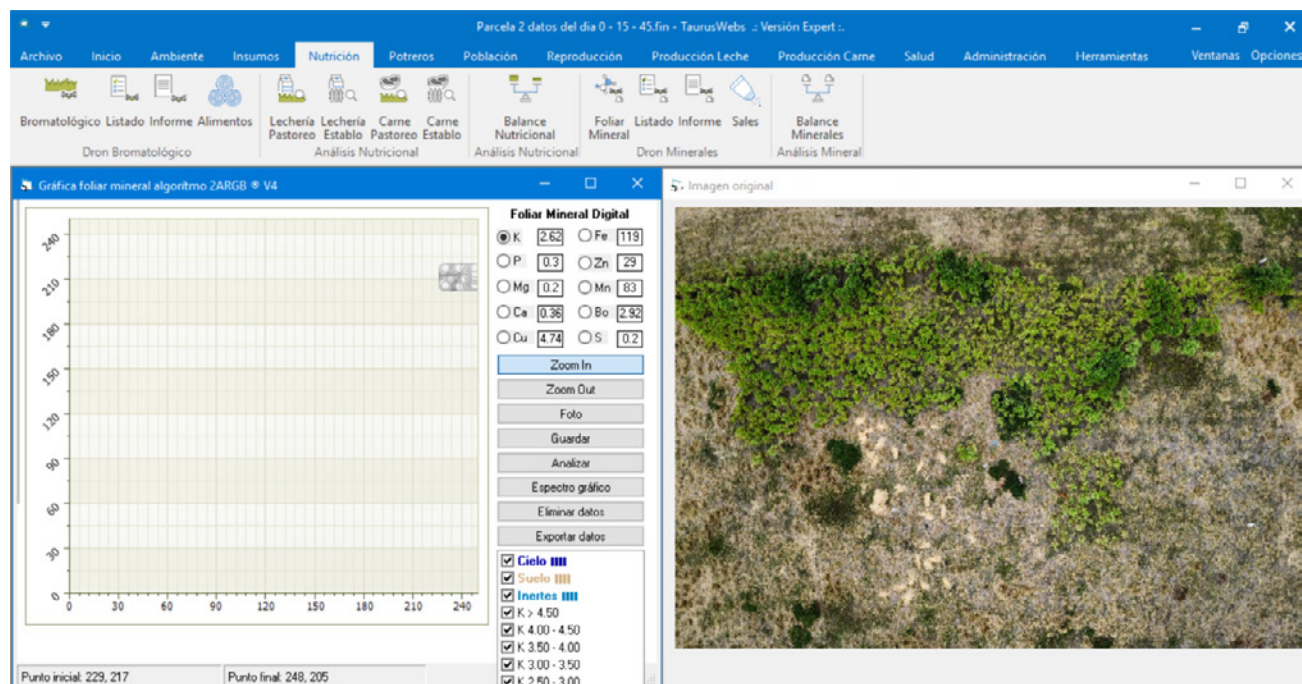


Figura 9

Análisis mineral.

Nota. Fotografía empleada para complementar el estudio del parámetro mineral del pasto Rodas.

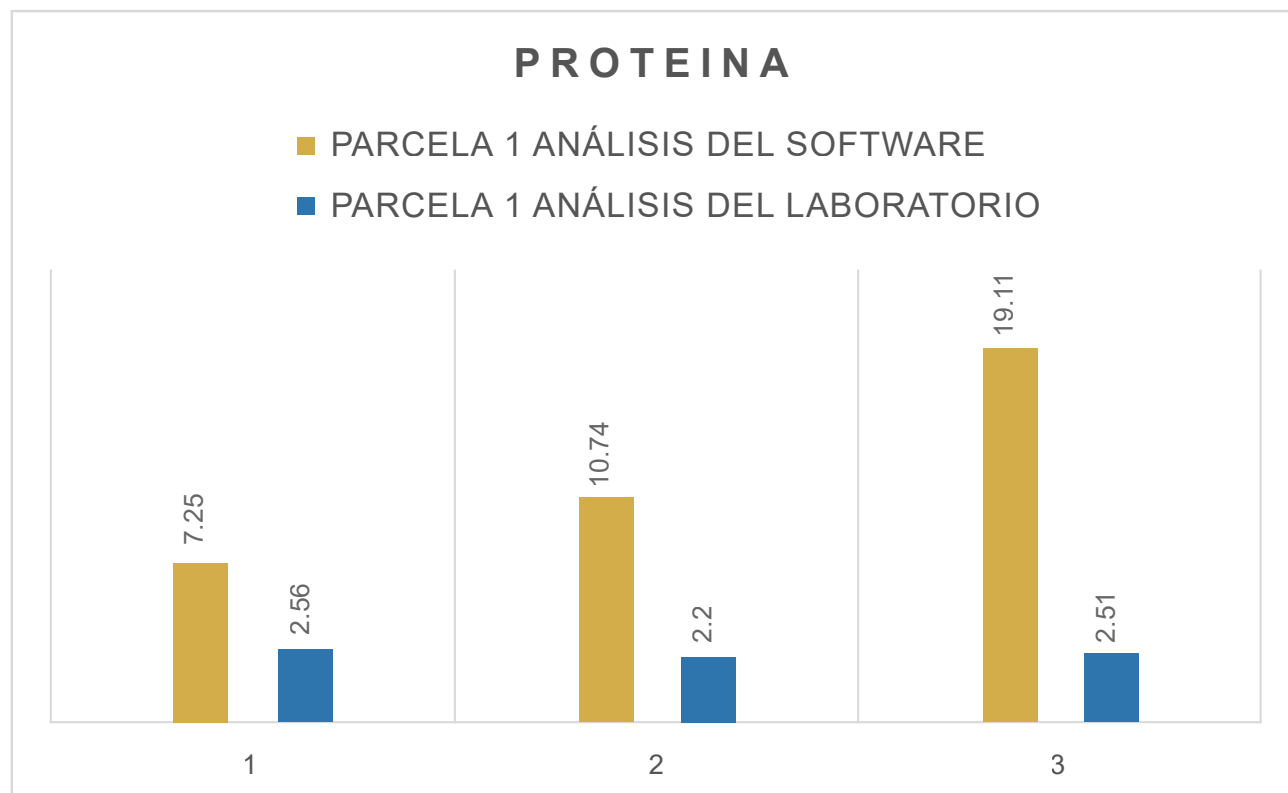


Figura 10

Comparación de los niveles de proteína en la parcela 1: estimaciones digitales del software TaurusWebs vs. análisis instrumental de laboratorio.

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

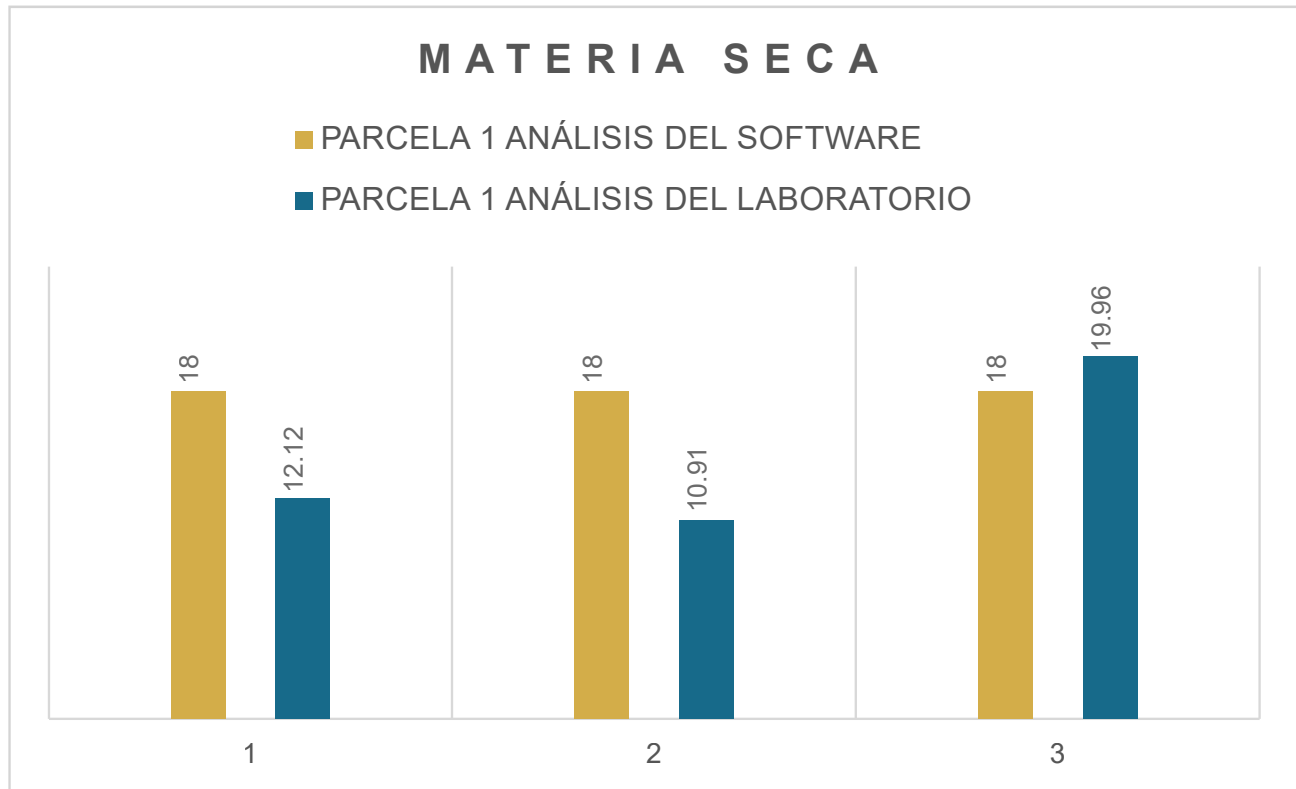


Figura 11

Comparación de los niveles de materia seca en la parcela 1: estimaciones digitales del software TaurusWebs vs. análisis instrumental de laboratorio

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

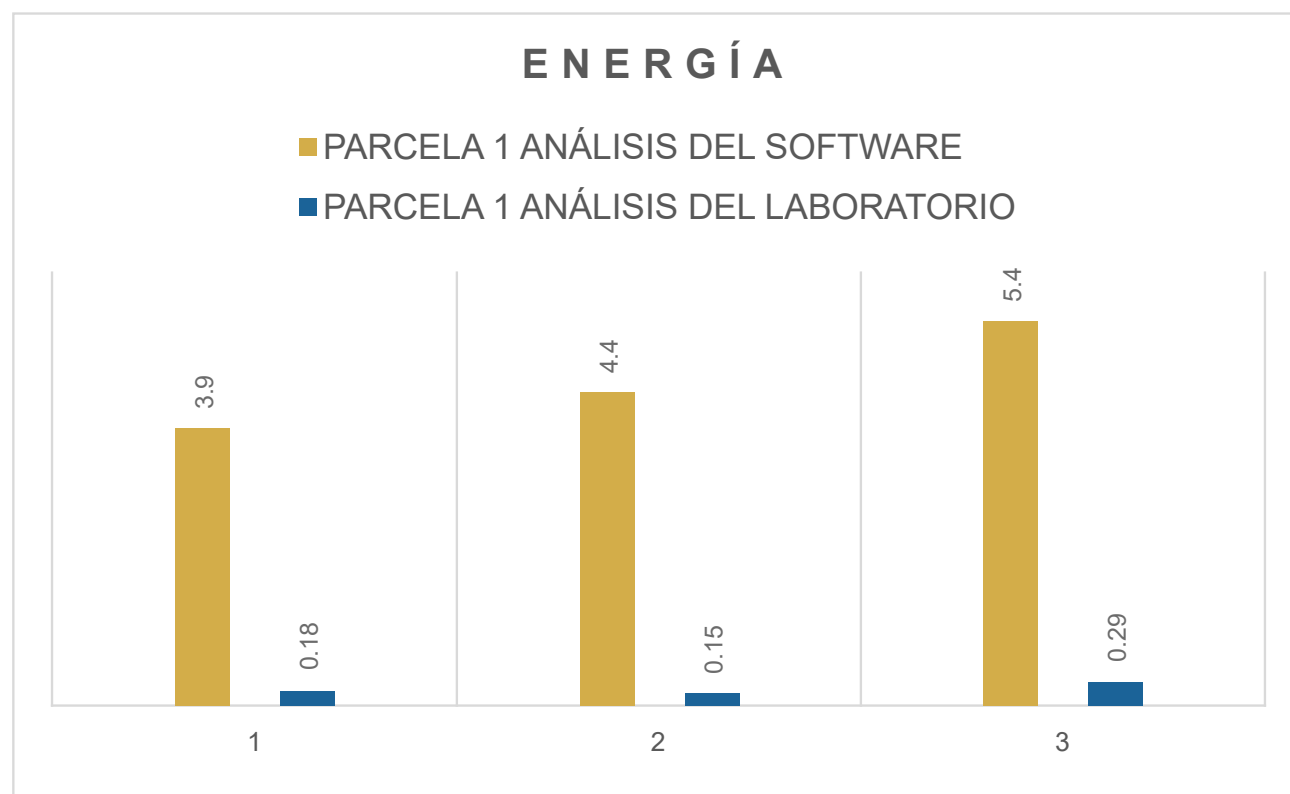


Figura 12

Comparación de los niveles de energía en la parcela 1: estimaciones digitales del software TaurusWebs vs. análisis instrumental de laboratorio.

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

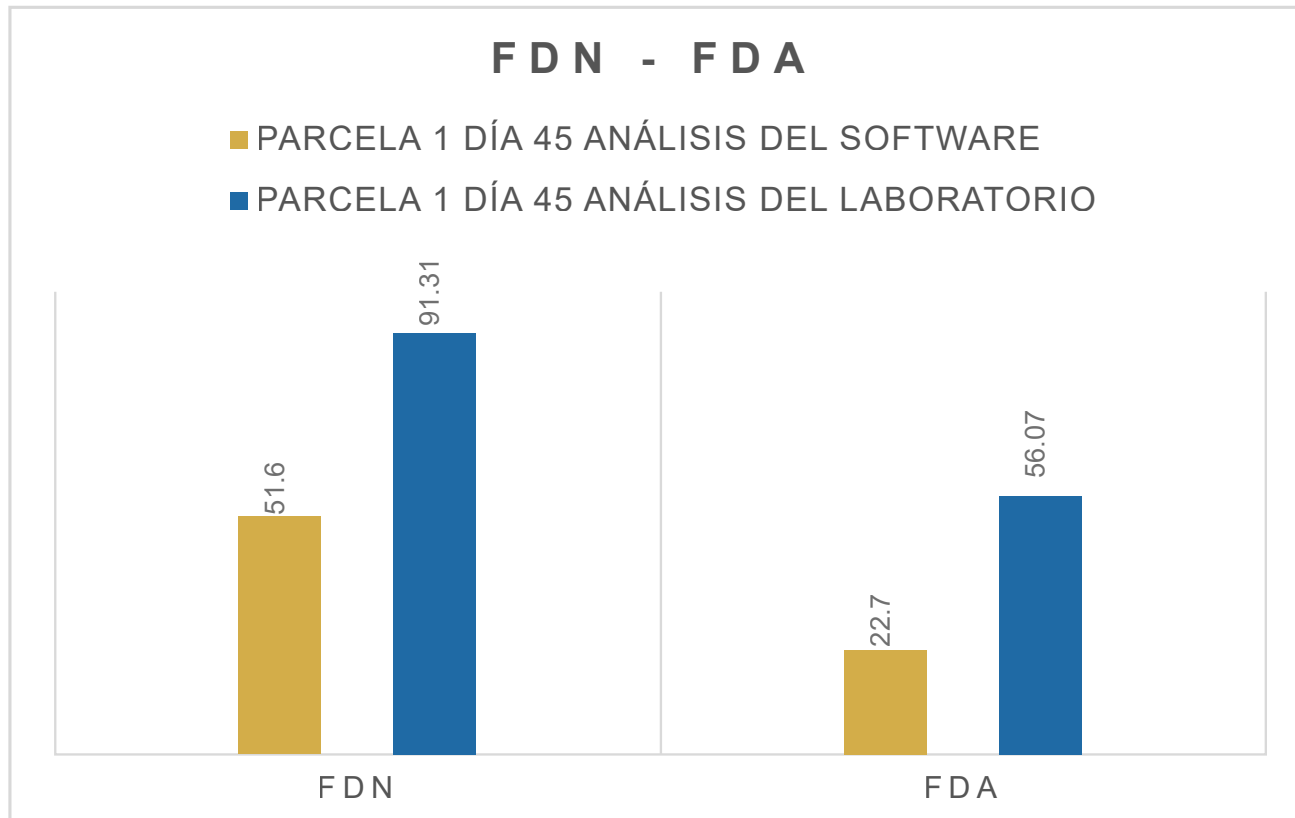


Figura 13

Comparación de los niveles de FDN y FDA en la parcela 1: estimaciones digitales del software TaurusWebs vs. análisis instrumental de laboratorio.

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

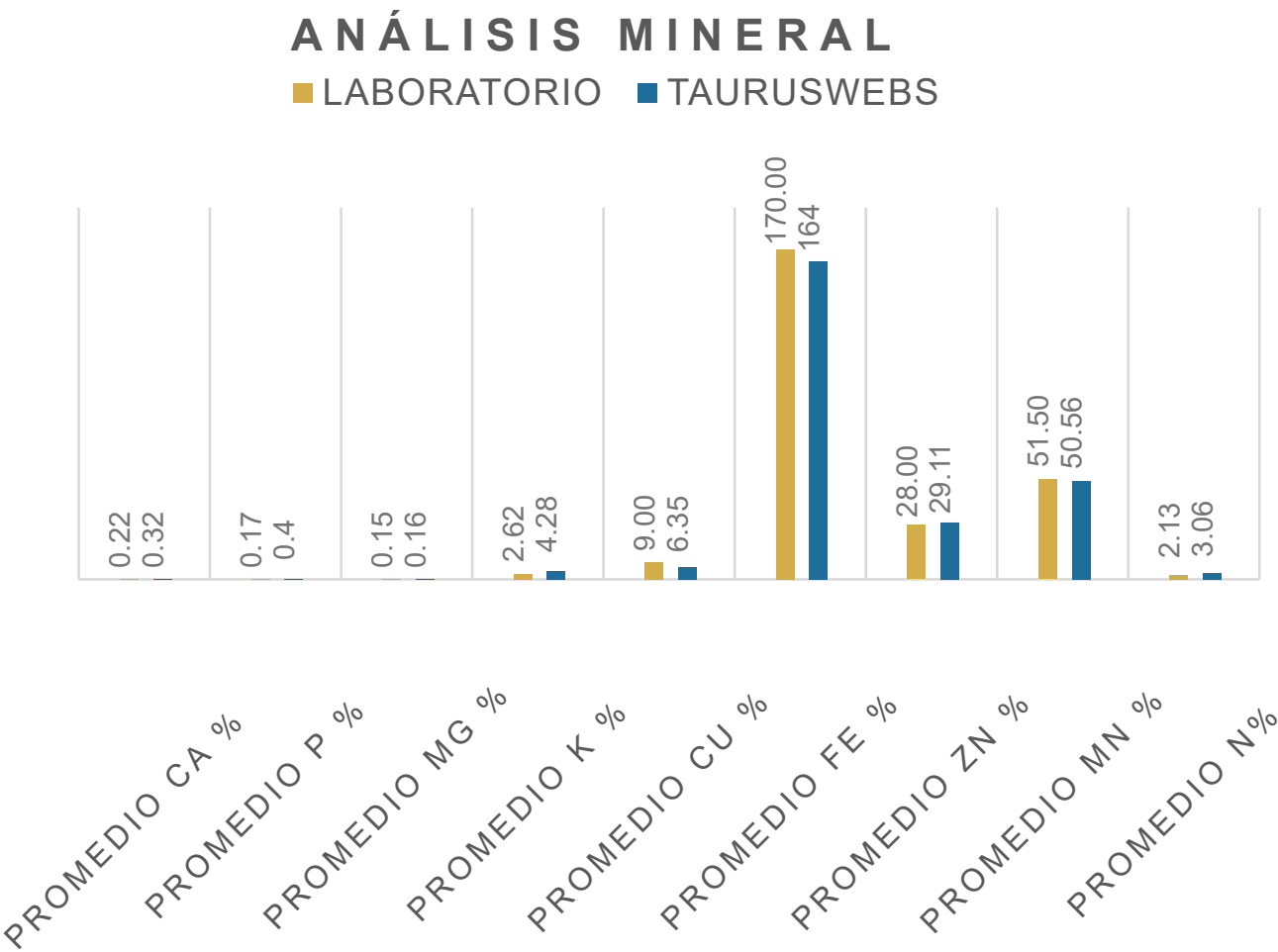


Figura 14
Comparación de los niveles de los minerales en la parcela 1: estimaciones digitales del software TaurusWebs vs. análisis instrumental de laboratorio.

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

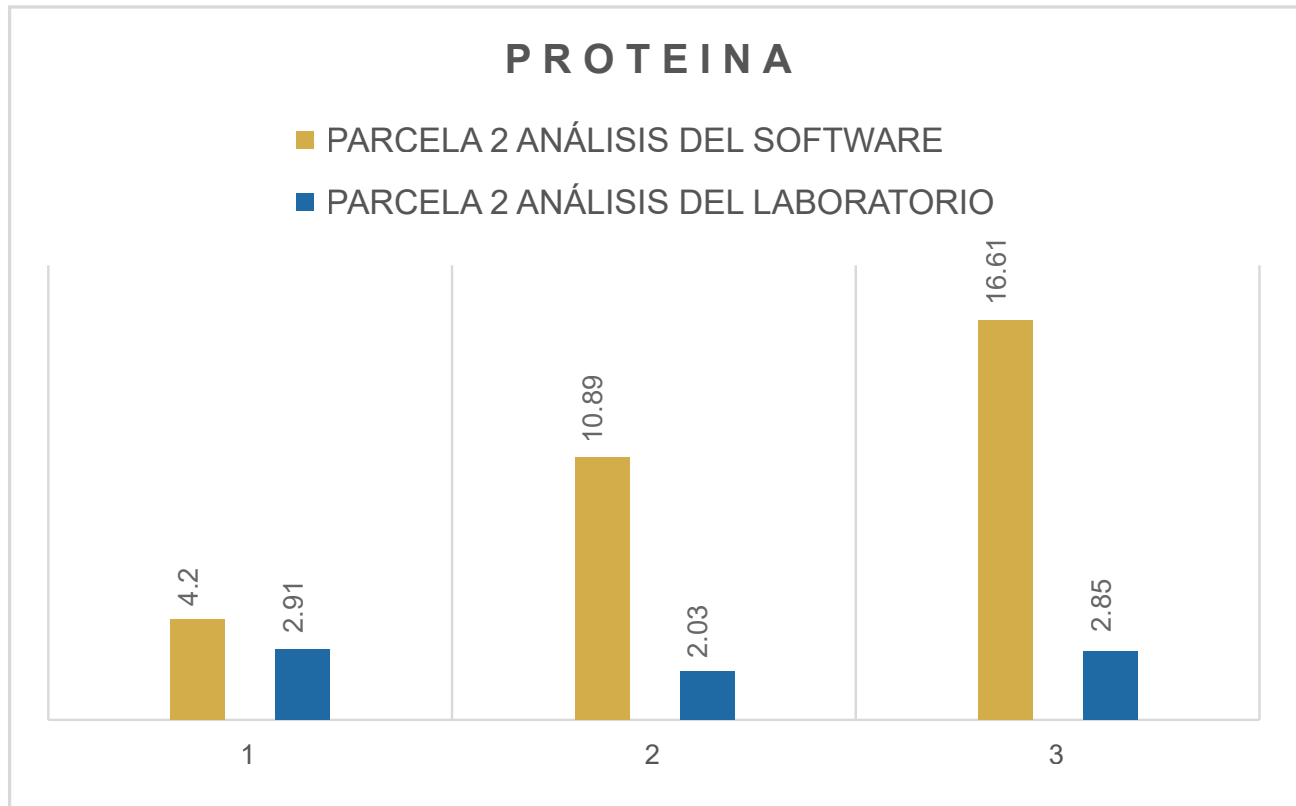


Figura 15

Comparación de los niveles de proteína en la parcela 2: estimaciones digitales del software TaurusWebs vs. análisis instrumental de laboratorio.

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

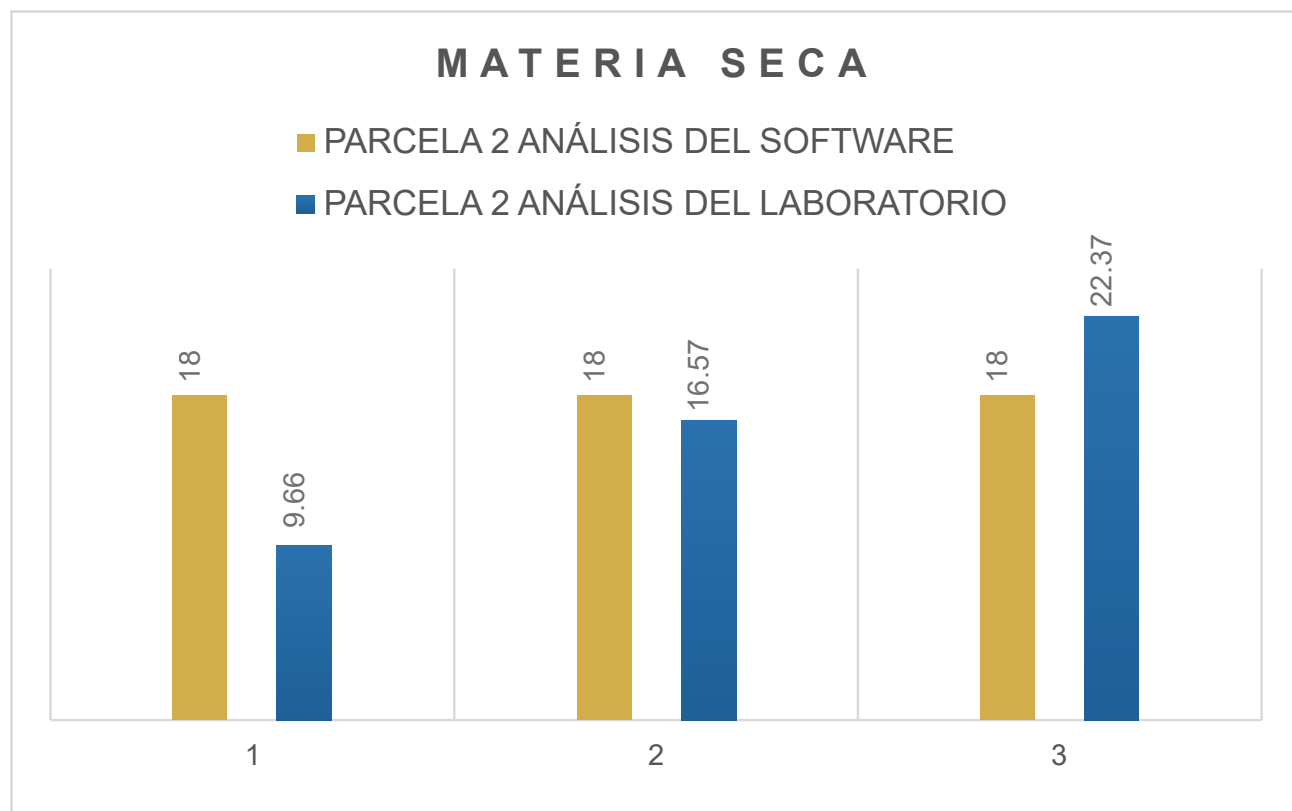


Figura 16

Comparación de los niveles de materia seca en la parcela 2: estimaciones digitales del software TaurusWebs vs. análisis instrumental de laboratorio.

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

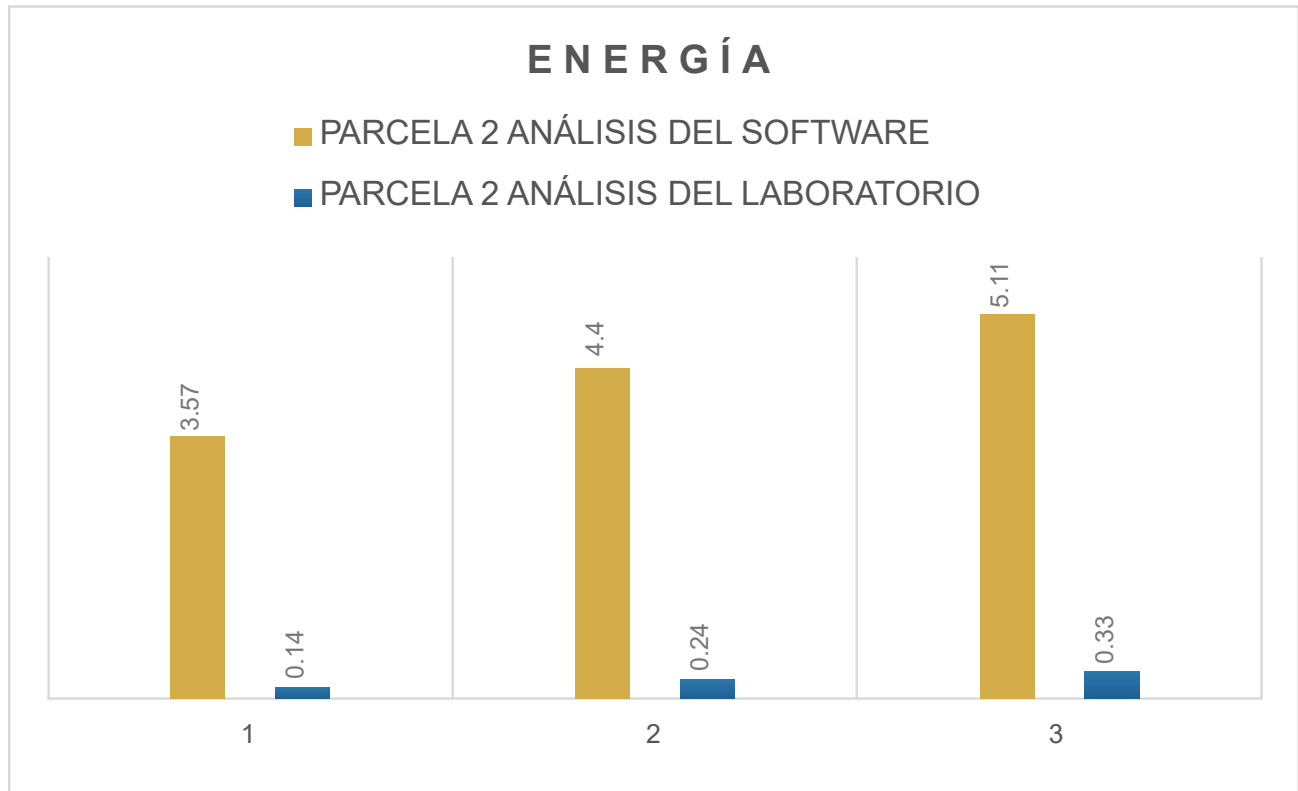


Figura 17

Comparación de los niveles de energía en la parcela 2: estimaciones digitales del software TaurusWebs vs. análisis instrumental de laboratorio.

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

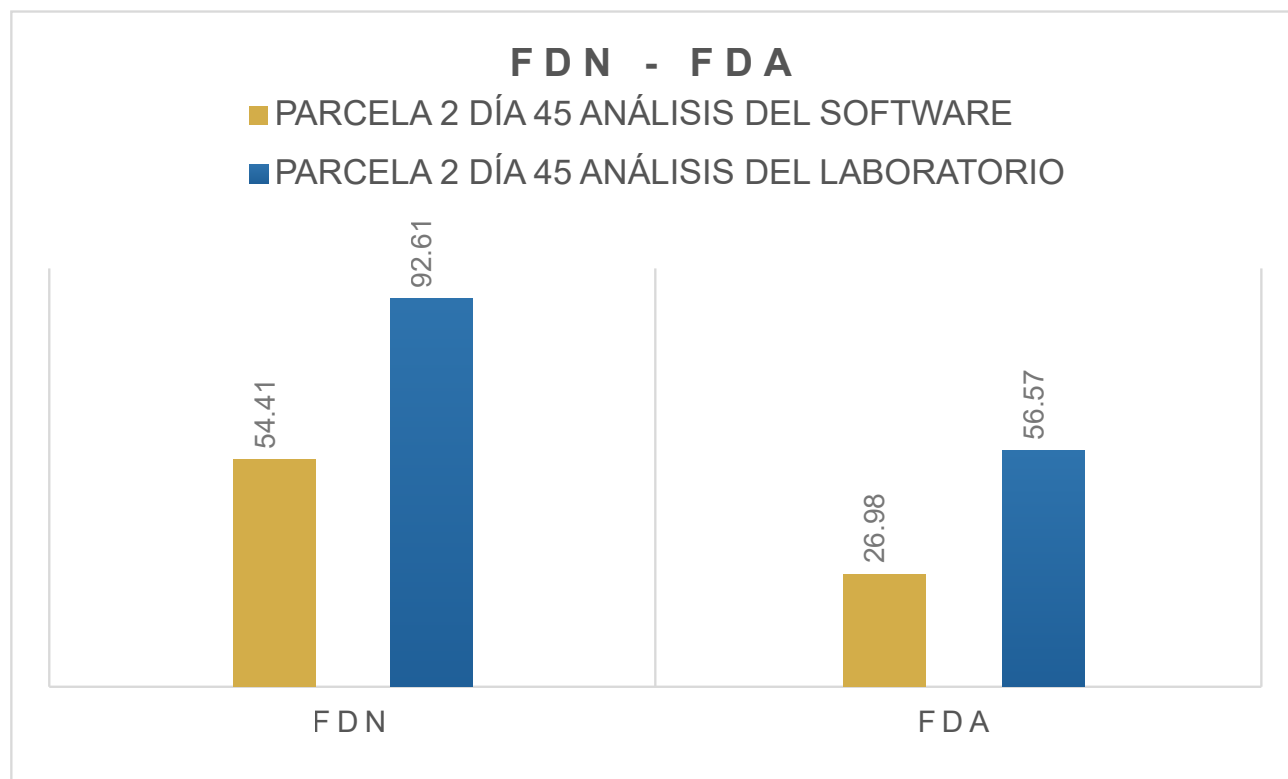


Figura 18

Comparación de los niveles de FDN y FDA en la parcela 2: estimaciones digitales del software TaurusWebs vs. análisis instrumental de laboratorio.

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

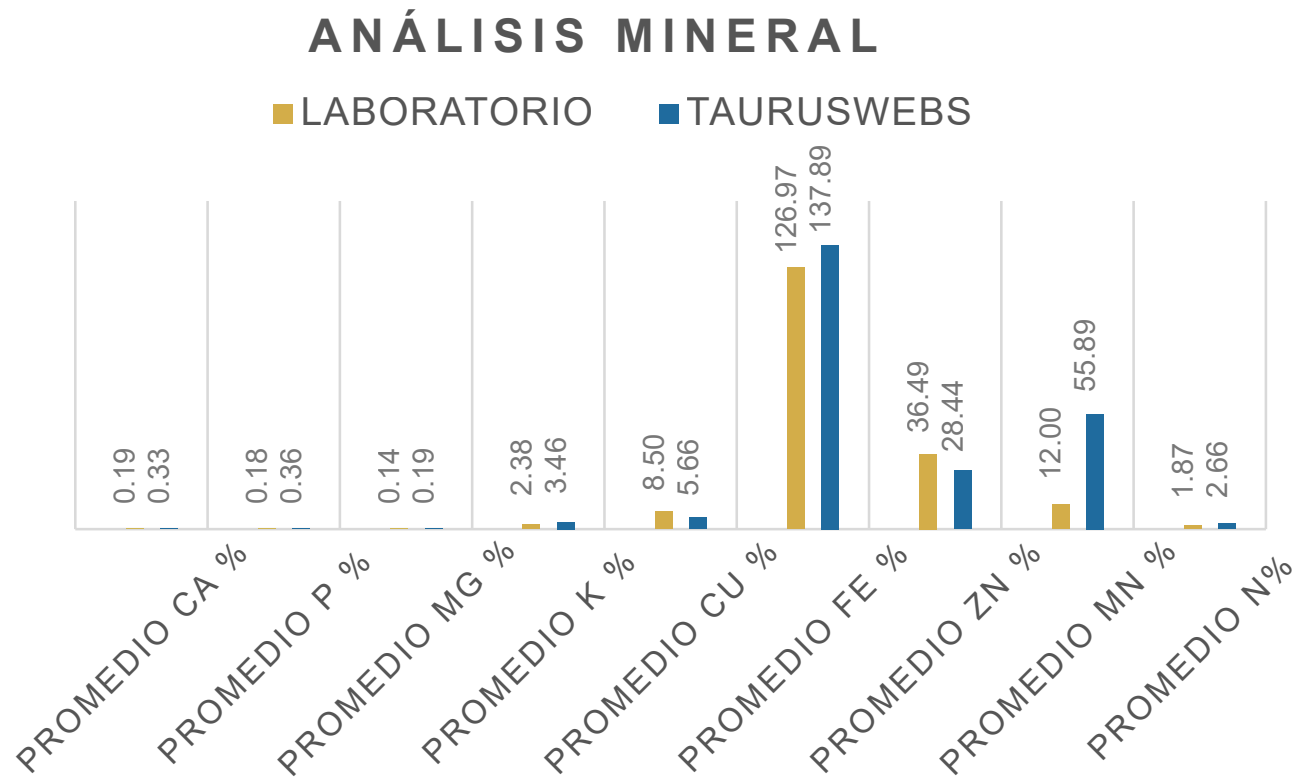


Figura 19

Nota. Los valores representados en las barras corresponden a los resultados obtenidos en los muestreos dentro de la misma unidad de manejo en Santa Ana. La diferencia visual entre

el software y el laboratorio permite contrastar la hipótesis de investigación sobre la precisión de las herramientas digitales para el análisis del pasto Rodas.

Ecuaciones

Hipótesis nula

$$H_o = VA = VB$$

Hipótesis afirmativa

$$H_a = VA \neq VB$$

Varianza

$$S^2 = \frac{\Sigma D^2 - \frac{(\Sigma D)^2}{n}}{n(n-1)}$$

Desviación estándar

$$\sqrt{S^2}$$

Grado de libertad

$$gl = n_r - 1$$

Prueba de t student

$$t = \frac{\bar{X} D}{S}$$

Discusión

El estudio comparativo de la aplicación de las técnicas de determinación de proteína cruda (PC), materia seca (MS) y energía neta de lactancia demostró que existen diferencias entre los valores obtenidos por los análisis realizados en ambas metodologías, de las columnas A y B, como se muestra en las tablas (2, 3 y 4) de la parcela 1 y de la parcela 2 en las tablas (8, 9 y 10). En efecto, esto se debe a la naturaleza propia de los procedimientos analíticos convencionales, que se realizaron en el laboratorio: método Kjeldahl y gravimetría. Mientras que el programa TaurusWebs se apega a algoritmos de procesamiento de imágenes de RGB.

A pesar de la divergencia en los procedimientos analíticos, la aplicación de la prueba estadística *t* de Student permitió determinar, mediante la rigurosa comparativa de Tukey (0,05 y 0,01), que no existen diferencias significativas entre ambos resultados tomados en los tres días correspondientes a las variables de proteína y materia seca, lo que indica que, a pesar de la variación de principios fisicoquímicos y algorítmicos, existe una coincidencia en las estimaciones en el caso del pasto Rodas (*Pennisetum* sp.).

Los resultados guardan consistencia con lo reportado por Ospina (2020), quien evaluó la correlación entre técnicas de teledetección y análisis del laboratorio (NIRS). En dicho estudio, mediante la aplicación de pruebas no paramétricas como

las correlaciones de Kendall, Spearman y el test de Kruskal-Wallis (0,05), se demostró una alta correlación y ausencia de diferencias significativas en la determinación de parámetros proteicos. Lo anterior valida que los métodos indirectos basados en sensores ópticos o algoritmos de imagen poseen una fortaleza comparativa frente a los métodos químicos de referencia (p. 4).

En lo que respecta a la determinación de la materia seca, los resultados exhibieron una variabilidad entre las metodologías empleadas. No obstante, el análisis estadístico evidenció la ausencia de diferencias significativas, tal como se detalla en las tablas 3 y 9. Resulta pertinente señalar que los valores arrojados por el software mantuvieron una notable constancia entre las tres fases de muestreo; esto se debe a que la herramienta no cuantifica la humedad de forma dinámica, sino que opera con un parámetro preestablecido.

Dado que la humedad es un factor determinante para el cálculo de materia seca por método gravimétrico, esta particularidad del algoritmo podría sugerir una limitación teórica. Sin embargo, la evidencia estadística ratifica que el procesamiento de imágenes mediante el software ofrece una precisión comparable a los métodos convencionales bajo condiciones controladas. Estos hallazgos concuerdan con lo reportado por Oliveira y otros (2021), quienes señalan que las imágenes RGB de alta

resolución representan técnicas altamente prometedoras para la estimación del rendimiento de materia seca en pastos.

Los coeficientes de contraste detallados en las tablas de energía (4 y 10) se sitúan por encima de los valores tabulados por Tukey. Esta discrepancia se fundamenta en que el software se encarga de identificar la cantidad real de energía que el animal aprovecha para producir leche y mantenerse (energía neta de lactancia), mientras que el análisis de laboratorio proporciona la energía total (o bruta) contenida en el alimento (pasto).

Al respecto, Ospina Rivera (2021) reporta la existencia de una correlación entre los resultados del laboratorio y los obtenidos mediante algoritmo de TaurusWebs; dicha relación fue validada mediante una prueba t de Student, en la cual no se evidenciaron diferencias significativas en la energía neta de lactancia (ENL). Estos antecedentes confirman que ambas metodologías de estudio son complementarias y respaldan la eficiencia del software en la estimación de parámetros nutricionales del pasto.

Aunque no se dispuso de datos completos de laboratorio para fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácida (FDA) y minerales del pasto Rodas (*Pennisetum* sp.), estos parámetros fueron considerados en la última evaluación, lo que permitió realizar una comparación básica entre ambas metodologías, como se ob-

serva en las tablas (5, 6, 11 y 12). En el caso de FDN y FDA, se aprecia un alejamiento entre los valores; no obstante, Ospina (2021) indicó que “hay una alta correlación entre los resultados de la fibra detergente neutra (FDN) calculados por espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) y el análisis de imágenes RGB” (p. 5). Estas conclusiones provienen de investigaciones orientadas a evaluar la similitud entre valores generados por software y los resultados de laboratorio calibrados mediante NIRS, lo que respalda los resultados obtenidos en la investigación.

Respecto a la fibra detergente ácida (FDA), Ospina (2020) establece, a partir de un estudio comparativo entre las metodologías del software y del laboratorio que utilizan NIRS como fuente de análisis, que “hay una fuerte correlación entre los resultados de la FDA calculados por NIRS versus los del análisis de imágenes RGB” (p. 7), reforzando la confiabilidad de las estimaciones obtenidas mediante herramientas basadas en imágenes.

El perfil mineral del pasto Rodas evaluado en la zona de Santa Ana muestra correlación estrecha entre las estimaciones del software y las determinaciones de laboratorio, especialmente en minerales como el magnesio y el zinc. Esta precisión sugiere que las bases de datos de ganadería 4.0 son herramientas confiables para el diagnóstico de estos parámetros en la región.

No obstante, las variaciones observadas

en los niveles de potasio y nitrógeno entre ambos métodos subrayan la influencia directa de las características edáficas locales y el manejo de la fertilización en la parcela. La identificación de estos indicadores es vital para el sector ganadero local, ya que permite transitar de una suplementación mineral genérica a una específica. Por ejemplo, los niveles de calcio y fósforo detectados sirven como base para diseñar correctores minerales que optimicen el balance electrolítico del ganado bovino en Santa Ana, minimizando desperdicios económicos y mejorando la eficiencia metabólica del hato.

La estabilidad observada en los niveles de minerales entre ambos métodos puede atribuirse a que el laboratorio de Agrocalidad empleó técnicas como la colorimetría y la espectroscopia de absorción atómica, las cuales, al igual que el software, se fundamentan en la interacción de la luz, ya sea a partir de la composición química y energética o mediante el análisis de imágenes.

El algoritmo 2ARGB® y la espectroscopia de inducción de plasma (EIP) producen resultados estadísticamente equivalentes en la estimación de macrominerales (K, P, Ca, Mg y S) en la materia seca de gramíneas. Este hallazgo, demostrado por Ospina Rivera y Baracaldo Martínez (2024), valida el análisis digital de imágenes con una alternativa precisa, no destructiva y la implementación de tecnologías de análisis de imágenes sobre las metodologías tradicionales

de laboratorio. En consecuencia, estos resultados refuerzan la utilidad del software para agilizar el diagnóstico nutricional y estructurar planes de suplementación mineral o fertilización, siempre que se calibren los datos según el tipo de aeronave empleado y las condiciones de luminosidad del área.

Conclusiones

La presente investigación demuestra que las herramientas de ganadería 4.0, específicamente aquellas basadas en algoritmos de procesamiento de imágenes como TaurusWebs, constituyen una alternativa viable para el monitoreo nutricional. Tras el análisis estadístico mediante la prueba *t* de Student, se concluye lo siguiente:

- Parámetros de alta concordancia (proteína y minerales): Se confirmó la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre el modelo digital y la determinación analítica química para la proteína bruta y el perfil mineral. La estabilidad observada en estos indicadores refuerza la fiabilidad del software para diagnósticos rápidos en el campo, permitiendo una toma de decisiones informada sobre el estado del pasto Rodas (*Pennisetum sp.*).
- Materia seca y variabilidad biológica: Aunque el software operó bajo valores paramétricos constantes (18 %), el análisis estadístico ratificó su similitud con los promedios de laboratorio. No obstante, se identificó que el método gravimétrico es superior para captar las fluctuaciones causadas por factores ambientales y el estado fenológico, especialmente hacia el día 45 de muestreo.
- Discrepancia en energía y fracciones fibrosas (FDN/FDA): En los parámetros de energía (ENL) y fibra, se identificaron diferencias estadísticamente significativas que superaron los valores críticos de referencia. Estas discrepancias estadísticas no obedecen a una inconsistencia metodológica, sino más bien a la naturaleza intrínseca del parámetro evaluado en cada escenario.

- Fortalezas del modelo óptico: La estabilidad en la determinación de minerales refuerza la teoría de que los métodos basados en la interacción de la luz poseen una alta fortaleza comparativa, posicionándolos como un complemento de valor en el monitoreo de la ganadería moderna.

Para futuras investigaciones, se recomienda que los análisis bromatológicos se realicen en centros especializados que garanticen la calibración rigurosa de sus instrumentos, priorizando el uso de la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS). Esta tecnología permite una transición fluida entre la química y los modelos digitales, ya que, al emplear longitudes de onda para identificar enlaces químicos específicos, reduce las discrepancias metodológicas entre el laboratorio y los algoritmos del software como TaurusWebs.

Asimismo, es fundamental estandarizar las condiciones ambientales de recolección para minimizar el error experimental y optimizar la respuesta de los sensores ópticos. Se aconseja realizar las mediciones en días despejados y en la ventana horaria de 09:00 a 16:00 horas, período en el cual la estabilidad y el ángulo cenital favorecen una reflectancia uniforme del dosel del pasto. Esta precisión lumínica es crucial para que el software procese la información sin las interferencias causadas por la nubosidad o la luz difusa, permitiendo que los indicadores de calidad nutricional obtenidos posean un alto grado de confiabilidad, lo que favorece la toma de decisiones informadas.

Declaración de conflictos de interés

Quienes firman este artículo declaran no tener conflictos de interés.

Fuentes de financiación

Quienes firman este artículo declaran que esta investigación no recibió financiamiento ex-

terno de ninguna agencia de financiamiento del sector público, comercial o sin fines de lucro.

Contribución de autoría (CRedit)

Victoria Anais Delgado Tejena: Conceptualización; metodología; software; validación; análisis formal; investigación; recursos; gestión de datos; redacción - borrador original; redacción - revisión y edición; visualización; supervisión; administración del proyecto.

Denzel Andrés Chevez Paredes: Conceptualización; metodología; software; validación; análisis formal; investigación; recursos; gestión de datos; redacción - borrador original; redacción - revisión y edición; visualización; supervisión; administración del proyecto.

Diego Javier Nevárez Pérez: Conceptualización; metodología; software; validación; análisis formal; investigación; recursos; gestión de datos; redacción - borrador original; redacción - revisión y edición; visualización; supervisión; administración del proyecto.

Referencias

- Allende, E. E. B. (2024). *Funciones desempeñadas como analista de laboratorio instrumental en la empresa Société Générale De Surveillance S.A.* – Lima, optimizando métodos para la caracterización eficiente de matrices de harina de pescado y otros [Trabajo de titulación, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo].
<https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/12801>
- Ariza Nieto, C., Mayorga, O. L., Mojica, B., Parra, D., & Afanador-Tellez, G. (2018). Use of LOCAL algorithm with near infrared spectroscopy in forage resources for grazing systems in Colombia. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 26(1), 44–52.
<https://doi.org/10.1177/0967033517746900>
- de Oliveira, G. S., Junior, J. M., Polidoro, C., Osco, L. P., Siqueira, H., Rodrigues, L., Jank, L., Barrios, S., Valle, C., Simeão, R., Carromeu, C., Silveira, E., Jorge, L. A. de C., Gonçalves, W., Santos, M., & Matsubara, E. (2021). Convolutional neural networks to estimate dry matter yield in a guineagrass breeding program using UAV remote sensing. *Sensors*, 21(12).
<https://doi.org/10.3390/s21123971>
- Farías Reyes, J. C. (2025). Joel Vargas Domínguez, Cuerpos anormales. Metabolismo y alimentación en el México posrevolucionario [Reseña de libro]. Oficio. *Revista de Historia e Interdisciplina*, 2.
<https://doi.org/10.15174/orhi.vi21.16>
- Fierro Cordero, J. C. (2018). *Evaluación de la producción y valor nutricional del pasto Mombaza (Panicum maximum c.v) en diferentes edades y alturas de corte en la zona de Babahoyo*. [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Babahoyo].
<https://dspace.utb.edu.ec/server/api/core/bitstreams/bf22cc62-d059-41dc-93ea-efc-2c54ae1c3/content>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2024). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) 2024. INEC.
- Lery, E. L. (2016). *Entrenamiento en técnicas de laboratorio para la determinación de fibra detergente ácida y fibra detergente neutra*. [Material de capacitación, Universidad Nacional del Nordeste].
<https://repositorio.unne.edu.ar/server/api/core/bitstreams/c05c8b4d-2a5a-423b-b0e7-711da-8fb1bca/content>

- Montero, C. W. D. (2021). *Análisis gravimétrico* [Material académico, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle].
<https://repositorio.une.edu.pe/server/api/core/bitstreams/85b5038d-6e75-45e7-a459-12ed8e190273/content>
- Ospina, O., Anzola, H., Ayala, O., Baracaldo, A., Arévalo, J., & Lozada, P. (2021). Comparison between red, green and blue images and near-infrared spectroscopy methods in the neutral detergent fiber (NDF) analysis. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(1), 5.
<https://doi.org/10.15381/RIVEP.V32I1.17498>
- Ospina, O., Anzola Vásquez, H., Duarte, O. A., & Baracaldo Martínez, A. (2020). Validation of an algorithm for processing red green blue (RGB) images for the estimation of crude protein in grasses vs. near infrared reflectance spectroscopy technology (NIRS). *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(2), 4.
<http://www.scielo.org.pe/pdf/rivep/v31n2/1609-9117-rivep-31-02-e17940.pdf>
- Ospina Rivera, O. F., Anzola Vásquez, H. J., Ayala Duarte, O. A., Baracaldo Martínez, A., Arévalo Cantor, J. S., Benavides Arciniegas, I., Benavides Perez, D. E., & Galvis Enriquez, G. A. (2021). Producción de leche real vs la calculada a partir de la enl estimada por el algoritmo de análisis de imágenes red-green-blue de gramíneas. *Ciencia Rural*, 51(2), 1–6.
<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200551>
- Ospina Rivera, O. F., Baracaldo Martínez, A., & Anzola Vásquez, H. J. (2024). Validación de la estimación porcentual de K, P, Ca, Mg y S en la materia seca de gramíneas calculadas mediante un algoritmo de análisis de imágenes rojo, verde y azul RGB. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 35(3), e25341.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1609-91172024000300002
- Páez Ordóñez, P. A., & Ortiz Burbano, Y. D. (2015). *Evaluación de los métodos analíticos usados en el laboratorio de análisis químico y aguas de la Universidad de Nariño para determinar fósforo total en aguas y lixiviados con base en la NTC-ISO/IEC 17025 : 2005*. [Trabajo de grado, Universidad de Nariño].
<https://sired.udenar.edu.co/2818/1/91352.pdf>
- Peñaloza, D. J., Barúa, M. G., Escalada, J. P., & Pajares, A. M. (2023). Técnica espectroscópica de absorción atómica para determinaciones en química ambiental. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 15(3), 157–176.
<https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v15.n3.987>

Pesantez Muñoz Edu Beбето. (2024). Identificación de deficiencias nutricionales en pasto *Brachiaria* sp., mediante fotografía espectral [Trabajo de titulación, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí Extensión El Carmen].

<https://repositorio.ulearn.edu.ec/handle/123456789/6391>

TaurusWebs. (2025). *Calibración de cámaras de drones*. <https://tauruswebswp.com/soporte/>

Universidad de Zaragoza. (2024). *Protocolo de análisis físico - químico*.

https://ocw.unizar.es/ocw/pluginfile.php/6377/mod_folder/content/0/An%C3%A1lisis%20composici%C3%B3n/Determinacion%20de%20proteinas.pdf