

**Universidad Técnica Nacional
Sede Guanacaste
Ingeniería Agronómica con énfasis En Riego Y Drenaje**

**Determinación del rendimiento y la calidad del cultivo de
pasto Transvala (*Digitaria decumbens* Stent., Cv. *Transvala*)
mediante imágenes multiespectrales, Bagaces, Costa Rica, 2023.**

**Trabajo Final de Graduación como requisito para optar por
el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Agronómica
con énfasis en Riego y Drenaje**

**Juan Pablo Vargas Salas
Yeison Omar Baltodano Torres**

Cañas, 2023

Aprobación del Tribunal Evaluador

Ing Agr. Fabricio Camacho Calvo, MSc.
Tutor

Lic. José M. Mayorga Jiménez, MBA
Lector

Ing. Roberto Ramírez Matarrita, MSc.
Lector

Ing. María de los Ángeles Arias Alfaro, MSc
Directora de carrera

Juan Pablo Vargas Salas
Sustentante

Yeison Omar Baltodano Torres
Sustentante

Dedicatoria

Dedicar esta investigación a nuestros padres, quienes nos han brindado un apoyo constante en todos los aspectos: motivacional, espiritual y económico, durante todo nuestro trayecto académico y en nuestras vidas en general.

Agradecemos a los profesores y miembros de la Universidad Técnica Nacional por su valiosa formación académica y por ser una parte integral de nuestro desarrollo personal y profesional. Gracias a su dedicación, hoy nos encontramos aquí, aspirando al título de licenciatura.

A los productores de la zona, con la esperanza de que los resultados de este estudio les proporcionen beneficios concretos y apoyen su labor.

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestro agradecimiento a Dios, por brindarnos la sabiduría y la fortaleza necesaria para completar esta etapa de nuestras vidas y por inspirarnos a seguir persiguiendo nuevas metas. También deseamos agradecer sinceramente a nuestros seres queridos y amigos cercanos, cuyo apoyo y orientación han sido fundamentales para nuestro progreso y desarrollo personal y profesional. Finalmente, estamos muy agradecidos con los miembros del Tribunal Evaluador por su valioso tiempo, consejos y observaciones, los cuales han sido cruciales para la elaboración de este Trabajo Final de Graduación.

Tabla de contenidos

Aprobación del Tribunal Evaluador	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Tabla de contenidos.....	VI
Índice de tabla	X
Índice de figuras	XI
Resumen	XIII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Introducción	15
1.2 Área de estudio, delimitación del problema y justificación.....	16
1.2.1 Área de estudio	16
1.2.2 Aspectos físicos y climáticos del cantón de Bagaces.	17
1.3 Delimitación del problema	20
1.4 Justificación	24
1.5 Situación actual del conocimiento del tema.....	26
1.5.1 Antecedentes a nivel internacional	26
1.5.2 Antecedentes a nivel nacional	31
1.6 Objetivos.....	38
1.6.1 Objetivo general	38
1.6.2 Objetivos específicos	38
Capítulo II Marco Teórico Referencial.....	39
2. Marco teórico referencial.....	40
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO	64
3.1 Paradigma.....	65
3.2 Enfoque de la investigación.....	65
3.3 Tipo de investigación.....	66
3.4 Hipótesis	67

3.5 Metodología procedimiento de medición en campo	67
3.5.1 Descripción de la finca	67
3.5.2 Delimitación de área de estudio.	68
3.5.3 Análisis de suelo	69
3.5.4 Parámetros y edades de medición en el cultivo	69
3.6 Parámetros de calidad.....	70
3.6.1 Clorofila.....	70
3.6.2 Relación tallo hoja.....	71
3.6.3 Biomasa Seca.....	73
3.7 Reflectancia espectral.....	74
3.7.1 Procedimiento para estimación con vehículo aéreo no tripulado (drone)	74
3.7.2 Procesamiento de las imágenes	76
3.8 Medición de rendimiento.....	77
3.8.1 Rendimiento parcial.	77
3.8.2 Rendimiento total.	78
3.9 Análisis estadístico	78
3.10 Metodología de toma de datos	78
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	80
4. Análisis de resultados.	81
4.1 Análisis de indicadores de calidad.....	81
4.1.1 Indicadores de calidad y rendimiento en el pasto transvala	81
4.1.1.1 Relación hoja-tallo.....	81

4.1.1.2 Materia seca.	82
4.2 Rendimiento.	84
4.2.1 Análisis del rendimiento por tratamiento y días de evaluación	85
4.3 Caracterización de la reflectancia espectral del cultivo de pasto transvala en distintos estados fenológicos.	86
4.3.1 Clorofila.....	86
4.3.2 Análisis de suelo del ensayo (ver anexo 1)	88
4.3.3 Planos de índice de vegetación.....	88
4.3.3.1 Índice de vegetación NDRE a 45 días.....	89
4.3.3.2 Índice de vegetación NDVI a 70 días.	93
4.3.3.3 Índice de vegetación BNDVI a 95 días.	98
4.4 Grado de asociación entre la reflectancia espectral y los resultados de rendimiento y calidad en campo.	102
4.4.1 Análisis de correlación.	102
4.4.2 Dispersión.....	104
4.5 Análisis detallado sobre la interpretación de imágenes multiespectrales en cultivos a los 45.	104
4.5.1 Observaciones iniciales	104
4.5.2 Discrepancia observada.....	105
4.5.2.1 Tamaño del pasto y biomasa:	105
4.5.2.2 Resolución espacial y altura del vuelo:.....	105
4.5.2.3 Interpretación espectral:.....	106

4.5.2.1 Gráficos de dispersión a los 45 días.....	106
4.6 Análisis detallado sobre la interpretación de imágenes multiespectrales en cultivos a los 70 días.	109
4.6.1 Observaciones a los 70 días.....	109
4.6.2 Discrepancia observada.....	109
4.6.2.1 Tamaño del pasto y biomasa:	109
4.6.2.2 Resolución espacial y altura del vuelo:.....	110
4.6.2.3 Interpretación espectral:.....	110
4.6.3 Evaluaciones a los 70 días.....	110
4.6.3.1 Gráficos de dispersión a los 70 días.....	111
4.7 Análisis detallado sobre la interpretación de imágenes multiespectrales en cultivos a los 95 días.	114
4.7.1 Observaciones a los 95 días.....	114
4.7.2 Discrepancia observada.....	114
4.7.2.1 Tamaño del pasto y biomasa:	114
4.7.2.2 Resolución espacial y altura del vuelo:.....	114
4.7.2.3 Interpretación espectral:.....	114
4.7.3 Evaluaciones a los 95 días.....	115
4.7.3.1 Gráficos de dispersión a los 95 días.....	115
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
5. Conclusiones	120
6. Recomendaciones	122
CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	125

Índice de tabla

Tabla 1. Índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	60
Tabla 2. Manejo agronómico de la finca utilizada en el cultivo de pasto.	68
Tabla 3. Distribución de toma de datos en el cultivo.	70
Tabla 4. Matriz Operacional	79
Tabla 5. Parámetro de calidad en función de relación Hoja-Tallo.	82
Tabla 6. Parámetro de calidad en función de la Materia Seca (MS).	83
Tabla 7. Rendimiento parcial y total de los bloques evaluados.	84
Tabla 8. Correlación a 45 días después de cosecha.	103
Tabla 9. Correlación a 70 días después de cosecha.	103
Tabla 10. Correlación a 95 días después de cosecha.	103

Índice de figuras

Figura 1. Velocidad promedio del viento en Bagaces, Guanacaste	20
Figura 2. Condiciones de los indicadores de calidad y rendimiento en el pasto Transvala	44
Figura 3. Indicadores de la calidad de los suelos.	46
Figura 4. Generación de energía electromagnética	49
Figura 5. Ventajas de los sensores	51
Figura 6. Desventajas de los sensores.....	52
Figura 7. Beneficios de los métodos tradicionales de recopilación de datos de campo.....	56
Figura 8. Medición de clorofila.....	87
Figura 9. Índice de vegetación BNDVI (45 días).....	89
Figura 10. Índice de vegetación GNDVI (45 días).	90
Figura 11. Índice de vegetación LCI (45 días).	90
Figura 12. Índice de vegetación MCARI (45 días).	91
Figura 13. Índice de vegetación NDRE (45 días).....	91
Figura 14. Índice de vegetación NDRE (45 días).....	92
Figura 15. Índice de vegetación BNDVI (70 días).....	93
Figura 16. Índice de vegetación GNDVI (70 días).	94
Figura 17. Índice de vegetación LCI (70 días).	94
Figura 18. Índice de vegetación MCARI (70 días).	95
Figura 19. Índice de vegetación NDRE (70 días).....	95
Figura 20. Índice de vegetación NDVI (70 días).	96
Figura 21. Índice de vegetación BNDVI (95 días).....	98
Figura 22. Índice de vegetación GNDVI (95 días).	98

Figura 23. Índice de vegetación LCI (95 días).....	99
Figura 24. Índice de vegetación MCARI (95 días).....	99
Figura 25. Índice de vegetación NDRE (95 días).....	100
Figura 26. Índice de vegetación NDVI (95 días).....	100
Figura 27. Dispersión índice LCI 45 días.....	106
Figura 28. Dispersión índice MCARI 45 días.....	107
Figura 29. Dispersión índice NDRE 45 días.....	107
Figura 30. Dispersión índice GNDVI 45 días.....	108
Figura 31. Dispersión índice BNDVI 45 días.....	108
Figura 32. Dispersión índice NDVI 45 días.....	109
Figura 33. Dispersión índice LCI 70 días.....	111
Figura 34. Dispersión índice MCARI 70 días.....	111
Figura 35. Dispersión índice BNDVI 70 días.....	112
Figura 36. Dispersión índice GNDVI 70 días.....	112
Figura 37. Dispersión índice NDVI 70 días.....	113
Figura 38. Dispersión índice NDRE 70 días.....	113
Figura 39. Dispersión índice LCI 95 días.....	115
Figura 40. Dispersión índice MCARI 95 días.....	116
Figura 41. Dispersión índice GNDVI 95 días.....	116
Figura 42. Dispersión índice NDRE 95 días.....	117
Figura 43. Dispersión índice BNDVI 95 días.....	117
Figura 44. Dispersión índice NDVI 95 días.....	118

Resumen

El estudio se enfocó en el cultivo de pasto transvala, utilizando tecnología avanzada como sensores multiespectrales y drones para caracterizar su reflectancia espectral en diferentes etapas fenológicas. Se evaluaron índices de vegetación como el NDVI y GNDVI para medir el crecimiento y la salud del pasto, correlacionándolos con datos de rendimiento y calidad obtenidos en campo.

Se encontró que el NDVI a los 95 días mostró la correlación más alta con el rendimiento, indicando su utilidad para predecir el éxito agronómico del cultivo. Además, se recomendó realizar cosechas totales a los 45, 70 y 95 días para obtener datos más representativos y evitar sesgos por muestreos parciales.

Asimismo, se propuso realizar evaluaciones más frecuentes de reflectancia para identificar cambios tempranos en la salud del cultivo y aplicar medidas correctivas oportunas. Estas conclusiones subrayan la importancia de integrar métodos tradicionales con tecnologías avanzadas para mejorar la gestión agrícola y optimizar el rendimiento y la calidad del pasto transvala.

Palabras Claves: Pasto transvala, reflectancia espectral, índices de vegetación, NDVI, GNDVI, tecnología de teledetección.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El pasto transvala (*Digitaria decumbens* Stent., CV *Transvala*) es una gramínea forrajera de clima tropical y subtropical que se caracteriza por su alta producción de biomasa, su resistencia a las enfermedades y su adaptabilidad a diversos suelos. En Costa Rica, el pasto transvala se cultiva principalmente para la producción de heno, que es un alimento de alta calidad para el ganado vacuno. La evaluación del rendimiento y la calidad del pasto transvala es una tarea importante para los productores agrícolas, ya que permite identificar los factores que afectan la productividad de los cultivos y tomar decisiones sobre el manejo de estos.

La presente investigación busca aplicar técnicas de teledetección para evaluar el rendimiento y la calidad del cultivo de pasto transvala en Bagaces, Guanacaste. Las técnicas de teledetección ofrecen una serie de ventajas para la evaluación del rendimiento y la calidad del pasto transvala. En primer lugar, permiten obtener información a gran escala, lo que facilita la comparación de diferentes campos de cultivo. En segundo lugar, fáciles de implementar. En tercer lugar, pueden proporcionar información en tiempo real, lo que permite a los productores tomar decisiones oportunas sobre el manejo de sus cultivos.

La investigación se llevará a cabo en un campo de cultivo de pasto transvala ubicado en Bagaces, Guanacaste. Se utilizarán imágenes satelitales de alta resolución para evaluar el rendimiento y la calidad del cultivo. Las imágenes se procesarán utilizando técnicas de teledetección para generar índices de vegetación que permitan cuantificar el estado de crecimiento y desarrollo del pasto transvala.

La aplicación de técnicas de teledetección a la evaluación del rendimiento y la calidad del pasto transvala tiene el potencial de mejorar la productividad de estos cultivos. Los resultados de la presente investigación se analizarán para determinar el aporte de las técnicas de teledetección a la productividad del cultivo de pasto transvala y de esta forma buscar evaluar el aporte de estas herramientas a la producción agrícola de pastos para henificación en Costa Rica.

1.2 Área de estudio, delimitación del problema y justificación

1.2.1 Área de estudio

El cantón de Bagaces, es conocido por su diversidad productiva. Los principales cultivos son gramíneas como el arroz (*Oryza sativa*), la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y el pasto transvala (*Digitaria decumbens*). El área productiva donde se realizó el estudio es una parcela del productor Bryan Alvarado, la cual cuenta con ocho hectáreas dedicadas al cultivo de pasto transvala bajo condiciones de riego, ubicada en el asentamiento La Soga de la entrada principal de la soga 3 km Oeste y 1.5 km al Sur.

Este proyecto de ingeniería agronómica tiene un enfoque tecnológico, ya que utilizará sistemas de información geográfica y vehículos aéreos no tripulados.

La investigación, se centra en el manejo y conservación del suelo, ya que el tipo de suelo, su fertilidad y la preparación adecuada del terreno son factores cruciales que afectan el rendimiento y la calidad del pasto transvala. Al examinar

cómo estos factores interactúan con el cultivo, se demuestra la importancia del manejo del suelo en la ingeniería agronómica.

Este estudio se enmarca en el paradigma de la Ingeniería Agrícola Moderna, que combina la tecnología de vanguardia con los fundamentos agronómicos tradicionales para abordar los retos de la producción agrícola de manera innovadora y eficaz. Este paradigma se caracteriza por el uso de tecnologías como drones, sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos y análisis avanzados de datos para optimizar la producción, la calidad y la sostenibilidad de los cultivos. Se utilizan drones para supervisar y evaluar el rendimiento y la calidad del pasto transvala.

Finalmente, este trabajo enfatiza la adaptación de las prácticas agrícolas a la variabilidad espacial y temporal de los cultivos y los suelos. Permitiendo personalizar las intervenciones agronómicas, lo que se traduce en una mayor eficiencia de los procedimientos agrícolas.

1.2.2 Aspectos físicos y climáticos del cantón de Bagaces.

Las coordenadas geográficas medias del cantón de Bagaces están dadas por 10°30'38" latitud norte y 85°14'22" longitud oeste. El cantón se encuentra en una zona de vida Bs-T (Bosque Seco Tropical)

El sistema fluvial del cantón Bagaces proveniente de la vertiente del Pacífico, incluye cuencas de dos ríos principales, Bebedero y Tempisque.

En Bagaces, el promedio del porcentaje de nubosidad varía *extremadamente* en el transcurso del año durante la parte despejada se da la estación de verano que es aproximadamente de 6 meses y 6 meses de invierno a lo largo del año. Según Weather (2020) “la parte *más despejada* del año en Bagaces se aproxima en *noviembre*; con una duración de *4,7 meses* que concluye en abril, y la parte *más nublada* del año comienza aproximadamente en *abril* y se termina en *noviembre*” (pp. 3-4).

La estación más húmeda abarca un período de 6,0 meses, desde el 11 de mayo hasta el 11 de noviembre, donde la posibilidad de encontrarse con un día mojado supera el 22 %. Dentro de esta estación, septiembre se distingue como el mes con la mayor cantidad de días mojados, con un promedio de 12,7 días con al menos 1 milímetro de precipitación.

Por otro lado, la estación más seca se extiende por 6 meses, abarcando desde el 11 de noviembre hasta el 11 de mayo. Durante esta estación, enero se presenta como el mes con menor incidencia de días mojados, con un promedio de 0,3 días con al menos 1 milímetro de precipitación.

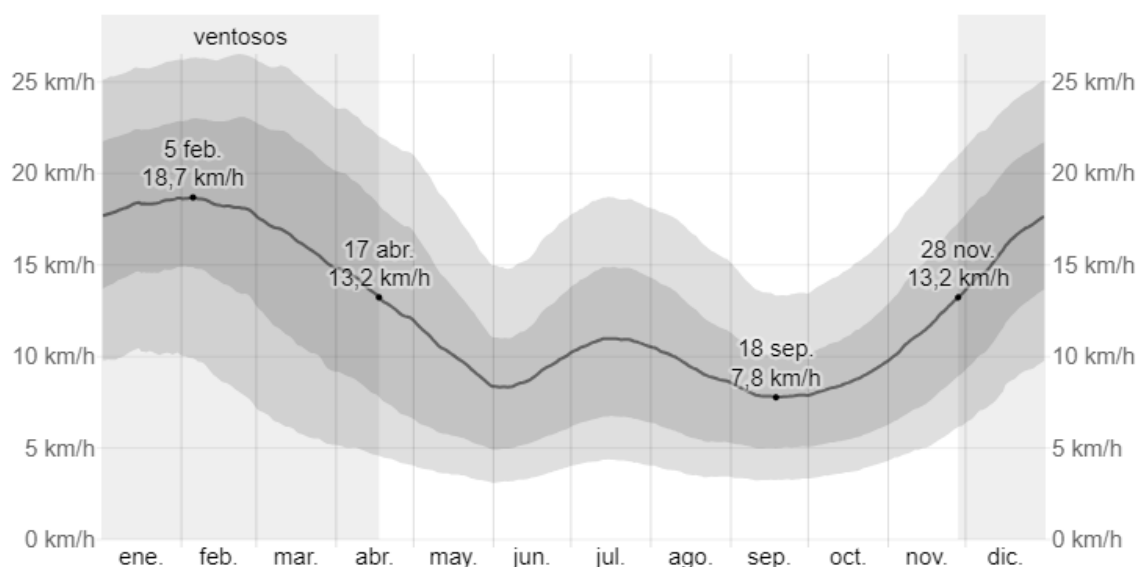
Es relevante destacar que, entre los días mojados, se realiza una distinción entre aquellos que presentan únicamente lluvia. Septiembre sobresale como el mes con más días de lluvia solamente en Bagaces, con un promedio de 12,7 días. El promedio anual de precipitación es de 1457 mm registrados en la Estación Bagaces. La distribución de la lluvia es irregular, alternándose una estación seca con una lluviosa.

La estación seca es muy marcada para los meses diciembre, enero, febrero, marzo y abril meses en los cuales el promedio de lluvia está por debajo de los 50 mm. La época lluviosa se extiende de mayo a noviembre, con máximos de lluvia durante los meses de mayo (220,7 mm) y octubre (263,2 mm). En julio y agosto el cantón es afectado “veranillo de San Juan y la canícula”, periodos durante los cuales se presentan varios días o semanas secas consecutivas (MAG, s.f, párr. 1, p 5)

Con respecto al vector del viento promedio por hora en la amplia área, se considera tanto la velocidad como la dirección, a una altitud de 10 metros sobre el suelo. El período más ventoso abarca 4,7 meses, comenzando el 28 de noviembre y extendiéndose hasta el 17 de abril, presentando velocidades promedio del viento que superan los 13,2 kilómetros por hora. En esta área, febrero destaca como el mes con mayores velocidades de viento, promediando 18,3 kilómetros por hora.

Contrastando esta estación ventosa, se encuentra un período más tranquilo que abarca 7,3 meses, desde el 17 de abril hasta el 28 de noviembre. Durante esta etapa, septiembre emerge como el mes de mayor calma en Bagaces, con vientos soplando a una velocidad promedio de 8,0 kilómetros por hora.

Figura 1. Velocidad promedio del viento en Bagaces, Guanacaste



Nota: Tomado de *Velocidad promedio del viento en Bagaces, Guanacaste* [Fotografía], por Weather Spark, 2024, Weatherspark.com (<https://es.weatherspark.com/y/14913/Clima-promedio-en-Bagaces-Costa-Rica-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-Summary>)

1.3 Delimitación del problema

¿Se puede implementar las técnicas de teledetección espacial para determinar parámetros de producción y calidad en cultivos de pasto transvala?

El sector productor de pasto transvala en la actualidad no cuenta con una herramienta diagnóstica previa que le permita estimar la producción futura que van a tener en sus diferentes lotes, por ende, no existe otro método aparte de la observación visual, que es llevada a cabo por los productores, para determinar si un pasto está prosperando adecuadamente o si requiere un refuerzo nutricional para alcanzar el rendimiento deseado. (Obando & Solano, 2022).

Según Arguello et al (2018), mencionan que, el aumento en la demanda de productos de origen animal implica un mayor control sobre los factores ambientales,

debido a que estos sustentan la producción de pasto para la alimentación del ganado. En el contexto actual, los cultivos se desarrollan en circunstancias desfavorables, especialmente en temporadas secas, lo cual reduce la capacidad del recurso hídrico o produce afectaciones al cultivo por el aumento en las temperaturas.

Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería MAG (2019), a pesar de la relevancia de la ganadería vacuna para la región, esta experimenta drásticas reducciones en su rentabilidad y productividad con los efectos ambientales consecuentes del cambio climático que afectan la producción de pasto como fuente principal de alimentación. Debido a que en la región el concentrado no se considera una opción adecuada en términos de calidad, sino de rapidez, resulta imprescindible enfocarse en las problemáticas o factores que afectan la calidad del cultivo de pastos o forrajes.

La producción de pasto transvala se ve desafiada por la limitada disponibilidad y la gestión inadecuada del recurso hídrico. La necesidad de agua para el crecimiento óptimo del cultivo se ve afectada por la irregularidad de las precipitaciones y periodos de sequía, lo que impacta negativamente su rendimiento y calidad. Además, la competencia por el agua entre distintos sectores agrava la situación. La implementación de estrategias de gestión hídrica sostenible se vuelve esencial para asegurar la productividad y el éxito de la producción de pasto Transvala en un entorno con recursos hídricos limitados.

El recurso hídrico, por ejemplo, es sustancial en la pureza del heno. De acuerdo con el Instituto Nacional de Innovación Agraria de Perú (2021) su

producción requiere reducir el contenido de agua del forraje con rapidez para su almacenamiento, fundamental para la alimentación de los bovinos en épocas muy secas o muy húmedas, por lo que resulta estratégico aumentar el rendimiento de los cultivos en las épocas prosperas en recursos y condiciones para su producción. Sin embargo, su utilidad depende de factores asociados a la calidad, como la pureza, el contenido de hojas, el color y la flexibilidad de los tallos.

Los cultivos de pasto son tan importantes como otros alimentos en términos de la fibra y energía que aportan a los bovinos. No obstante, alcanzar niveles adecuados de calidad requiere conocer las condiciones específicas para que esto suceda, abarcando los aspectos que exige una producción eficiente y rentable, determinada por la capacidad y calidad del pasto. Las condiciones climáticas y los recursos disponibles son decisivos en el rendimiento del cultivo, debido a su impacto en la calidad y, consecuentemente, en los ingresos de la producción (MAG, 2019).

Por otra parte, se tiene el problema de la incidencia de arvenses, que afectan la calidad de los cultivos, ya que como lo mencionan Brenes y Agüero “las arvenses cobran gran importancia debido al impacto sobre el desarrollo, crecimiento y por ende productividad del cultivo; en ciertos casos pueden ser hospederas alternas de plagas y enfermedades que afectan al cultivo” (2017, p. 239).

La incidencia de arvenses afecta de manera directa la producción de transvala al competir por recursos esenciales como luz, agua y nutrientes, resultando en un menor rendimiento y calidad del cultivo. La liberación de compuestos que inhiben el crecimiento y la posibilidad de propagar plagas y

enfermedades también contribuyen a reducir la producción. La gestión adecuada de las arvenses mediante métodos químicos, físicos o biológicos se torna crucial para mitigar esta competencia y garantizar un entorno favorable para el desarrollo y la producción óptima del Transvala (Brenes & Agüero, 2017).

Por último, se tiene la problemática de la oscilación del precio en el mercado del heno, ya que como lo indica Quesada (2018), la producción de heno en Costa Rica constituye una práctica histórica implementada tanto por productores ganaderos como agricultores. En respuesta a desafíos asociados al clima y la extensión de las áreas, los ganaderos en Costa Rica optan por obtener el heno de zonas guanacastecas que presentan condiciones más propicias para la práctica de producción de heno. El factor de la ausencia de una estación seca prolongada, junto con la influencia del patrón climático "caribeño" en la región, generan un clima caracterizado por la falta de estabilidad y una prevalencia de las precipitaciones, incluso durante la época seca. Todo lo anterior, dan como resultado una inestabilidad en el precio del producto.

La obtención de un rendimiento previo a la cosecha en la actualidad no existe manera de obtenerlo, debido a que no existen métodos ni tradicionales de estimar un rendimiento en el cultivo de pasto transvala, solo de manera visual y a lo largo de muchos años de experiencia los productores pueden al menos estimar si un lote les va a cosechar el aproximado de que ellos necesitan. Esto limita la negociación de compromisos de entrega en la cantidad de pacas con futuros clientes, así como el cálculo de área en bodegas o galerones para su almacenamiento.

1.4 Justificación

Costa Rica se encuentra ubicada en una zona intertropical en la cual presenta condiciones climáticas muy marcadas. Por esta razón, las actividades ganaderas como lo son la producción cárnica y lechera, así como el cuidado de equinos, experimentan drásticas variaciones debido al efecto que tiene sobre los cultivos y, por ende, la producción del pasto como elemento esencial para el balance alimenticio de los bovinos durante la época seca (Abdalla, 2016).

Las altas temperaturas y escasez de agua durante esta época son factores que según Ramírez et. al. (2017) dificultan el rendimiento del cultivo, sin embargo, la demanda del pasto constante en el sector ganadero. En estas circunstancias, resulta oportuno buscar condiciones que eleven la productividad de los cultivos de pasto, especialmente durante la época lluviosa, en la cual se obtiene con mayor facilidad los recursos y condiciones necesarias para su producción.

De acuerdo con la Cámara Nacional de Productores de Leche (2017) es fundamental apostar por innovaciones tecnológicas en la producción de forrajes y alimentos necesarios para aumentar el rendimiento y la calidad del pasto, principal fuente de alimentación de los bovinos. Esto debido a que la optimización de los cultivos beneficia directamente a sus productores y, a su vez, tiene impacto sobre la calidad de los productos ganaderos.

En la actualidad la producción de pasto de corta de transvala (*Digitaria decumbens* Stent., cv. *Transvala*), en Costa Rica no cuenta con métodos de estimación de rendimiento y calidad del heno previos a la cosecha, los productores

no tienen una herramienta que les permita conocer cuál será su rendimiento y así poder generar compromisos de venta con los compradores, realizar correcciones nutricionales para ver si se puede aumentar el rendimiento (Cámara Nacional de Productores de Leche, 2017).

En Costa Rica el Departamento de Servicios Técnicos del Instituto Nacional de Investigación y Transferencia de Tecnología (INTA) es el ente subordinado al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) para el estudio de suelos y usos agrícolas en territorio nacional mediante la elaboración de cartografía, según la Ley No. 7779 de 1998. No obstante, la investigación en el área de pastos y forraje es escasa en función de la atención gubernamental a este sector productivo.

Según Obando y Solano (2022), la estimación correcta del área en el cultivo de transvala con imágenes satelitales ayuda a una mejora en la toma de decisiones pues permite identificar las zonas y condiciones más idóneas para aumentar los rendimientos y calidad del cultivo. Además, con el uso de esta herramienta se planifica de manera correcta toda la logística de siembra para realizar renovaciones de cultivo y resiembras buscando una óptima densidad de siembra.

Ramírez et. al. (2017) realizaron un estudio sobre la influencia de los factores meteorológicos en la producción de pastos y consideran conveniente evaluar las tendencias en calidad y rendimiento en diferentes zonas de América Latina y el Caribe. Los autores determinan que los suelos salinos, las altas precipitaciones y la sequía son factores que pueden afectar al cultivo, ante lo cual algunos productores internacionales han optado por variedades más adaptables.

Por esta razón se espera que la toma de decisiones basados en un cálculo preciso de la calidad y el rendimiento del cultivo de transvala utilizando índices de vegetación, pueda proporcionar una nueva herramienta a los técnicos y productores del sector, esto buscando ofrecer una alternativa para la toma de decisiones, así como para predecir el rendimiento y la calidad del cultivo, al mismo tiempo que contribuye a la reducción en el uso de los recursos económicos.

1.5 Situación actual del conocimiento del tema

Se realizó una investigación exhaustiva en diferentes libros físicos y publicaciones en línea de la base de datos de Biblioteca Virtual de la Universidad Técnica Nacional, tanto en las bases de datos de acceso abierto, como de acceso restringido. A continuación, se brinda una breve descripción de los principales hallazgos:

1.5.1 Antecedentes a nivel internacional

Como primer antecedente se tiene la investigación de Murrieta (2023), en la cual desarrolló “Inteligencia artificial en el agro para mejorar la productividad sustentable agropecuaria del Ecuador”, se plantea el propósito de explorar la aplicación de la inteligencia artificial en el sector agropecuario de Ecuador, destacando su influencia en la mejora de la productividad y sostenibilidad en la producción agrícola. Se desarrolla un caso de estudio cualitativo que aborda la implementación de la inteligencia artificial en el ámbito agropecuario.

La investigación se basa en la descripción detallada de la aplicación de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial, para la optimización de los

procesos de producción y la resolución de desafíos sectoriales. Como principal resultado se obtiene que la integración de tecnologías avanzadas en la agricultura, como sensores remotos y drones, permite un monitoreo constante y en tiempo real de diversos aspectos del campo, incluyendo la salud de las plantas, infestación de enfermedades, plagas, condiciones del suelo, temperatura y humedad.

La relación que ésta investigación tiene con el trabajo que se presenta es que ambos reflejan la creciente tendencia hacia la aplicación de la IA y la tecnología en el sector agrícola, con el fin de optimizar la producción y promover la sostenibilidad en la agricultura. Además, sugieren un interés compartido en abordar los desafíos relacionados con la productividad y la gestión de cultivos mediante enfoques innovadores y tecnológicamente avanzados.

Como segundo antecedente a nivel internacional, se menciona a Rambauth (2022), el cual presenta “Agricultura de Precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola”. En éste trabajo se plantea el principal propósito de proporcionar una revisión conceptual de la agricultura de precisión, enfocándose en las tecnologías de la información y la comunicación que facilitan su aplicación y mejora. Se emplea una metodología cualitativa al mismo tiempo que conceptual-descriptiva que se basa en la exploración de diversas fuentes bibliográficas disponibles en bases de datos científicas. La revisión se centra en la conceptualización de la agricultura de precisión y en la identificación de las TIC que respaldan su implementación. Como principal conclusión Rambauth (2022) cita que la integración de tecnologías de la información y comunicación en la agricultura, alineadas con los principios de la agricultura de precisión, tiene un impacto

significativo en la mejora de los procesos agrícolas. Esta revisión cualitativa subraya la importancia de la agricultura de precisión y su relación con las TIC para lograr una producción más eficiente y sostenible. El principal Aporte al presente estudio fue proporcionar una visión clara de cómo la agricultura de precisión y las tecnologías de la información y comunicación están interrelacionadas para optimizar la producción agrícola. Al comprender mejor esta relación, se puede evaluar de manera más precisa cómo las tecnologías pueden influir en el rendimiento y calidad del cultivo de pasto transvala.

La relación de ésta investigación y éste proyecto es que comparten un interés común en la aplicación de tecnologías avanzadas en el sector agrícola para mejorar la productividad y la gestión de los cultivos. Mientras que la investigación de Rambauth (2022) establece el marco teórico y conceptual para la integración de las TIC en la agricultura de precisión, el estudio realizado en Costa Rica en 2023 ofrece un ejemplo concreto de cómo estas tecnologías pueden aplicarse en la práctica para optimizar la producción agrícola de un cultivo específico como el pasto transvala.

Como tercer antecedente, se tiene el trabajo de Bonilla (2021), “Estudio del uso de técnicas de inteligencia artificial aplicadas para análisis de suelos para el sector agrícola”, planteándose el principal objetivo de analizar la influencia de la inteligencia artificial (IA) en el sector agrícola, abordando su aplicabilidad en la optimización y sostenibilidad de diversas áreas, como el manejo de cultivos, control de malezas y enfermedades, y gestión del suelo. El principal aporte a la presente investigación se extrae la importancia y la eficacia de la inteligencia artificial en la optimización de la producción agrícola y la gestión sostenible de los recursos. Estos

conocimientos enriquecerán la evaluación de rendimiento y calidad del cultivo de pasto Transvala al considerar las posibles aplicaciones de la IA en este contexto específico.

El estudio de Bonilla (2021) y el éste comparten relación con el enfoque en la aplicación de tecnologías avanzadas para mejorar la gestión y la productividad en el sector agrícola. Mientras que el primero se centra en el análisis del suelo, el segundo se enfoca en el cultivo específico de pasto transvala. Sin embargo, ambos tienen como objetivo final mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la producción agrícola mediante el uso de tecnologías innovadoras.

Otro antecedente de mucha importancia es el trabajo de Ramón (2020), “Inteligencia artificial y agricultura: nuevos retos en el sector agrario”, el cual tiene como objetivo llevar a cabo un análisis exhaustivo de la integración de la inteligencia artificial en el ámbito agrícola, explorando sus diversas aplicaciones y examinando la legislación pertinente que rige esta interacción. Para abordar esta investigación, se emplea una metodología de enfoque cualitativo, la cual se basa en el estudio detallado de la legislación en vigor y la revisión de la doctrina especializada relacionada con la aplicación de la inteligencia artificial en el sector agrícola. A partir de este análisis, se formula una hipótesis sustentada en la deducción doctrinal, permitiendo abordar las cuestiones planteadas.

El resultado más relevante en este estudio es que pone de relieve una variedad de aplicaciones prácticas de la inteligencia artificial en el ámbito agrícola, incluyendo el uso de máquinas y sensores para diversas actividades agrarias. Asimismo, se identifican múltiples marcos legales aplicables a dichas aplicaciones

y se analizan cuestiones fundamentales referentes a la protección de datos utilizados en estos contextos.

Ambos trabajos, Ramón (2020) y el proyecto para la determinación del rendimiento y la calidad del cultivo de pasto transvala (*Digitaria Decumbens decumbens* Stent., cv. Transvala) mediante imágenes multiespectrales, Cañas, Costa Rica, 2023. Están relacionados por su enfoque en la aplicación de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el análisis de imágenes, en el sector agrícola. Mientras que el artículo sobre "Inteligencia artificial y agricultura" ofrece una visión general de los nuevos retos y oportunidades que enfrenta el sector agrario, la investigación en Costa Rica proporciona un ejemplo específico de cómo estas tecnologías pueden aplicarse para mejorar la gestión y la productividad en un cultivo particular, en este caso, el pasto transvala.

Finalmente, se tiene el estudio de García y Herrera (2015) "Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multiespectral en vehículos aéreos no tripulados" tuvo como objetivo evaluar el potencial y posibles aplicaciones de UAV para generar mosaicos para la interpretación visual e índices de vegetación (IV) para el monitoreo y seguimientos en el cultivo de la caña de azúcar.

El estudio se realizó con un vehículo multirotor cuadricoptero para capturar imágenes, con una cámara ADC lite cuyo sensor de 3.2 megapíxeles (longitudes de onda entre 520 nm - 920 nm, índices de vegetación NDVI, Green NDVI y SAVI, entre otros). Las imágenes se procesaron con el software ArcGis y se halló una correlación entre índices de vegetación y contenido de biomasa de buen

desempeño, la correlación de TCH con el índice SAVI presentó un $R^2 = 0.52$, mientras que la correlación con el NDVI fue mayor con un $R^2 = 0.70$.

El trabajo demostró que hay un gran potencial en la utilización sistema no tripulado (UAV) con sensores infrarrojo en el campo de la percepción remota aplicado al monitoreo e identificación de anomalías en el cultivo de la caña de azúcar. Igualmente se demostró que las imágenes de la cámara ADC son útiles para generar mosaicos infrarrojos con los cuales se pueden calcular algunos índices de vegetación como el NDVI y SAVI. Además, estos índices pueden ser utilizados para estimar el contenido de Biomasa en edades tempranas del cultivo con una correlación de $R^2 = 0.70$. Para futuras aplicaciones es necesario implementar una calibración radiométrica para convertir los ND de las imágenes a valores de reflectancia. Igualmente es importante materializar puntos de control en campo para realizar correcciones geométricas y convertir los mosaicos en ortho-mosaicos.

Aunque los cultivos estudiados son diferentes (caña de azúcar versus pasto transvala), ambos trabajos comparten un enfoque común en la aplicación de tecnologías de percepción remota, específicamente imágenes multiespectrales, para mejorar la gestión y la productividad en el sector agrícola. Ambos demuestran cómo estas técnicas avanzadas pueden utilizarse para recopilar datos detallados sobre el estado de los cultivos, lo que permite a los agricultores tomar decisiones más informadas y eficientes en la gestión de sus campos.

1.5.2 Antecedentes a nivel nacional

Como primer antecedente se tiene el estudio de Serrano (2023), en su documento "Implementación de un sistema de monitoreo para pastoreo de precisión

mediante el análisis de suelo y gestión a través de información de sensores remotos para la mejora en la calidad y optimización en la producción de forrajes.” El objetivo primordial fue optimizar la producción de forrajes al implementar un sistema de monitoreo de pastoreo de precisión basado en teledetección remota. Se abordó la problemática de los altos costos de producción en el sector ganadero al proponer una solución basada en la optimización de recursos.

Se implementa un sistema de monitoreo de pastoreo de precisión utilizando tecnología de teledetección remota. Este sistema busca identificar cualidades bromatológicas clave de los forrajes, centrándose específicamente en la proteína y materia seca de los mismos. Como principal resultado, se determinó que el muestreo del suelo reflejó el estado de la finca con respecto a las características físicas como humedad volumétrica con niveles mínimos de 50% permitiendo una buena retención y movilidad de agua y aire, también la resistencia a la penetración cuales valores promedio fueron de 1.0 Mpa que permiten al cultivo buena penetración y adherencia de las raíces, y el pH que se encontraba en niveles de neutralidad lo cual favorece la absorción de los nutrientes para el aprovechamiento del cultivo. Por lo que, se considera que las características de suelo no inciden en la producción del forraje.

La correlación espacial permitió la agrupación de los valores nutricionales de la calidad con los valores de los índices de vegetación, obteniendo distintos modelos de monitoreo, los mismos se evaluaron según su coeficiente de correlación R^2 , los cuales para el caso de la proteína el que presento menor grado de asocio con el índice de GLI con un R^2 de 0.0275 y en su contraparte los mayores fue con la

combinación multivariable de los índices RGBVI, GRVI, VARI, GLI y NGRDI con un R² de 0.4808, para la materia seca el índice con menor coeficiente fue el RGBVI con un R² de 0.4262 y con el mayor coeficiente fue la combinación de todos los índices con un R² de 0.838.

El modelo de gestión de pastoreo que se propone se compone tanto del porcentaje de materia seca como de proteína por lo que debe de tener una relación de ambos, debido a esto, el punto óptimo de pastoreo se encuentra mayor a 30 días después de la cosecha, ya que se obtiene un alto nivel de los componentes nutricionales analizados según los modelos elegidos que indican que porcentaje de proteína se encuentran entre el rango de 20-25% y para el porcentaje de materia seca esta entre el 14-20%.

Ambos proyectos comparten el objetivo común de optimizar la producción agrícola del pasto transvala, pero lo abordan desde perspectivas y tecnologías diferentes. Mientras que el primero se enfoca en el monitoreo y la gestión del pastoreo mediante tecnología de sensores remotos y análisis de suelo, el segundo utiliza imágenes multiespectrales y técnicas de inteligencia artificial para estimar el rendimiento y la calidad del cultivo.

Como segundo antecedente, está el estudio de Gómez (2021), "Evaluación del uso de imágenes multiespectrales como herramienta para la predicción del estado nutritivo y riesgo de floración natural en el cultivo de piña (*Ananas comosus*). El estudio, de enfoque cuantitativo, tuvo como objetivo evaluar la efectividad de la herramienta computacional Layers®, un software utilizado en el mercado de tecnologías agrícolas, para estimar la condición nutricional y el riesgo de floración

natural en plantaciones de piña (*Ananas comosus*) en fincas de la zona norte de Costa Rica.

Los resultados reflejan que, aunque los análisis foliares de laboratorio mostraron niveles altos y óptimos de N, P y K, no se logró correlacionar estos valores con los obtenidos del procesamiento de imágenes multiespectrales debido a la baja resolución de las imágenes procesadas por Layers®. El desarrollo del sistema predictor de la condición nutricional y de floración natural en el cultivo de piña (*A. comosus*) no pudo completarse debido a estas limitaciones. La resolución espacial y radiométrica son aspectos importantes a considerar en cualquier estudio que utilice imágenes multiespectrales, incluido el estudio de "Evaluación del uso de imágenes multiespectrales como herramienta para la predicción del estado nutritivo y riesgo de floración natural en el cultivo de piña (*Ananas comosus*)".

La resolución espacial se refiere a la capacidad de la imagen para distinguir entre diferentes objetos o características en el terreno. En el contexto de este estudio, la resolución espacial determina qué tan detalladas son las imágenes para capturar las variaciones en el cultivo de piña. Por ejemplo, una resolución espacial más alta permite detectar diferencias más pequeñas en el estado de salud de las plantas, como la presencia de estrés nutricional o el riesgo de floración.

Por otra parte, la resolución radiométrica, se refiere a la capacidad de la imagen para distinguir entre diferentes niveles de intensidad de radiación electromagnética en cada píxel. En el estudio de la piña, esto se relacionaría con la capacidad de la imagen para capturar diferentes propiedades de la vegetación, como la cantidad de clorofila o la absorción de luz en diferentes longitudes de onda.

Una mayor resolución radiométrica permite una mayor precisión en la caracterización de las propiedades del cultivo, lo que puede ser crucial para predecir su estado nutritivo y el riesgo de floración.

Por lo tanto, en el estudio de la piña, una alta resolución espacial permitiría detectar variaciones sutiles en el campo de cultivo, mientras que una alta resolución radiométrica permitiría caracterizar con precisión las propiedades de las plantas. Ambos aspectos son fundamentales para el éxito del estudio y para utilizar imágenes multiespectrales como herramienta eficaz para la predicción del estado nutritivo y el riesgo de floración natural en el cultivo de piña.

Como tercer antecedente se tiene el estudio de Brenes (2020), "Sistemas de apoyo a la toma de decisiones que usan inteligencia artificial en la agricultura de precisión: un mapeo sistemático de literatura". Su objetivo fue caracterizar estos sistemas en el contexto de la agricultura de precisión bajo invernadero, mediante un enfoque cuantitativo que incluyó un mapeo sistemático de la literatura se evalúan las técnicas de inteligencia artificial empleadas en los sistemas, las variables de entrada y salida, el tipo de procesamiento realizado y los métodos de evaluación utilizados.

Entre los principales resultados identificaron 39 estudios primarios que abordan la implementación de técnicas de inteligencia artificial en la agricultura de precisión bajo invernadero, destacando las redes neuronales, algoritmos genéticos y sistemas de lógica difusa. Concluyeron que estas técnicas son una tendencia creciente, facilitando decisiones para mejorar la producción y optimizar recursos,

destacando su importancia en la evaluación del cultivo de pasto transvala con vehículos aéreos no tripulados.

Aunque los enfoques son distintos, ambos estudios reflejan el creciente interés en la aplicación de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial y el análisis de imágenes, en el sector agrícola. Mientras que el primero ofrece una visión general de las diferentes herramientas y enfoques en este campo, el segundo proporciona un ejemplo concreto de cómo estas tecnologías pueden aplicarse para mejorar la gestión y la productividad en un cultivo específico, en este caso, el pasto transvala.

Finalmente, Bedolla y Pacheco (2019) “Reconocimiento automático de patrones y características de las imágenes de los cultivos como alternativa para el desarrollo agrícola”. El estudio presenta una metodología basada en algoritmos de reconocimiento de ingeniería del software para identificar patrones y características en cultivos. Se enfoca en procesar información sobre el progreso de las plantas mediante la comparación de imágenes capturadas por drones con objetos en una Base de Datos que representan características normales y anormales de plantas. Los resultados muestran que la aplicación automatizada logra identificar patrones normales y anormales en los cultivos, incluida la detección de plagas y enfermedades. Esta metodología innovadora tiene el potencial de beneficiar a los agricultores al permitirles identificar riesgos y anomalías en sus cultivos de manera temprana. Además, destaca la relevancia de los sensores remotos en la agricultura y sugiere cómo estas tecnologías pueden aplicarse en la evaluación del rendimiento

y la calidad del pasto transvala, influyendo positivamente en su productividad y calidad.

La investigación sobre la aplicación de tecnologías avanzadas en el sector agrícola refleja una tendencia global hacia la optimización y sostenibilidad de la producción agrícola. Desde el desarrollo de sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en inteligencia artificial hasta la implementación de herramientas de monitoreo remoto y análisis de suelos, los estudios revisados proporcionan una visión integral de cómo la innovación tecnológica está transformando la agricultura.

Los estudios destacan la importancia de la inteligencia artificial y la percepción remota, así como su potencial para mejorar la eficiencia, la productividad y la sostenibilidad en el cultivo de pasto transvala y otros cultivos agrícolas. Estos avances ofrecen nuevas oportunidades para los agricultores al proporcionarles herramientas y conocimientos que les permiten tomar decisiones más informadas y eficaces en la gestión de sus cultivos.

Los antecedentes revisados muestran un interés compartido en la aplicación de tecnologías emergentes para abordar los desafíos en el sector agrícola, desde la mejora de la productividad hasta la gestión sostenible de los recursos. Estos estudios proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el campo de la agricultura de precisión.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Optimizar la gestión de la producción agrícola del cultivo de pasto transvala (*Digitaria Decumbens* Stent., cv. Transvala), mediante el desarrollo y aplicación de un enfoque basado en imágenes multiespectrales para la estimación precisa del rendimiento y la calidad del cultivo, Bagaces, Costa Rica, 2023.

1.6.2 Objetivos específicos

Interpretar los indicadores de calidad y rendimiento en el pasto transvala utilizando el método tradicional de recopilación de datos de campo, como base comparativa para el análisis del rendimiento del cultivo.

Aplicar la caracterización de la reflectancia espectral del cultivo de pasto transvala en distintos estados fenológicos, mediante la utilización de sensores multiespectrales, para el establecimiento de índices de vegetación que permitan una evaluación detallada y certera del crecimiento.

Analizar el grado de asociación entre la reflectancia espectral y los resultados de rendimiento y calidad en campo, mediante un análisis de correlación, para la validación de modelos de predicción.

Capítulo II Marco Teórico Referencial

2. Marco teórico referencial

El presente capítulo proporciona un marco teórico y referencial para el estudio del cultivo de pasto Transvala (*Digitaria Decumbens* Stent., cv. Transvala) y la implementación de tecnologías basadas en imágenes multiespectrales para la optimización de su producción agrícola. Se abordarán conceptos clave, estudios previos y teorías relacionadas que sustentan la base científica y técnica de este proyecto.

2.1 Indicadores de calidad y rendimiento en el pasto transvala

Para evaluar y optimizar la producción del pasto, es crucial definir y utilizar indicadores precisos de calidad y rendimiento. Estos indicadores permiten a los productores tomar decisiones informadas y mejorar tanto la cantidad como la calidad del cultivo. A continuación, se presentan las generalidades, los principales indicadores de calidad y rendimiento utilizados en la gestión del pasto transvala:

2.1.1 Generalidades del pasto transvala

Según, Sáenz (2002); el pasto transvala, es “una gramínea provista de largos estolones rastreros que fácilmente desarrollan raíces. Los tallos son erectos y crecen entre 20 a 30 cm, su inflorescencia es una espiga digitada con 10 ramificaciones” (p. 7).

Asimismo, Restrepo (1992), indica que este pasto

Es nativo del África del Sur, se adapta a regiones tropicales y subtropicales húmedas, desde el nivel del mar hasta los 1600 m de altura, y con más de

1000 mm de precipitación al año. Esta especie requiere suelos de mediana a alta fertilidad y bien drenados; responde magníficamente al riego y a la fertilización tolerando pastoreos pesados, pero preferiblemente rotacionales. (p. 3)

Cerdas (2012) señala que el pasto transvala es un pasto perenne estolonífero, vigoroso, de porte semierecto, que cubre densamente el suelo y alcanza hasta 120 cm de altura, este pasto presenta hojas lineales de 10 a 25 cm de largo y entre 2 y 7 mm de ancho, lisas por ambas caras. El transvala tolera bien los regímenes subtropicales en condiciones moderadas de lluvia, con más de 800 mm anuales. Se cultiva entre el nivel del mar hasta los 1.000 msnm, con temperaturas entre 25 y 40 grados centígrados. Tolera mal el exceso de humedad, y si bien soporta cortos períodos de inundación, el anegamiento prolongado lo ahoga. Este pasto responde bien a la fertilización con NPK y micronutrientes como el cobre (CTAHR, 2002, p. 10).

Morfología de la planta: El cultivar transvala es una especie perenne y estolonífera; presenta, al igual que el Pangola, características físico anatómicas muy parecidas a las especies forrajeras de clima templado. Hojas y tallos finos, vegetación densa y una altura máxima de 60 cm. Se adapta bien desde el nivel del mar hasta los 1200 m y en suelos de buena fertilidad, requiere un manejo adecuado y de un buen programa de fertilización. No tolera suelos mal drenados y periodos de sequía mayores de 4 a 5 meses (Palma & Sánchez, 2001).

Malezas: Gutiérrez (1996), indica la existencia de una serie de medidas y procedimientos que son utilizados para el combate de las malezas (preventivas, erradicación y control). Y dentro de estas existen métodos que se pueden agrupar de la siguiente manera:

- Cultural - Mecánico - Químico - Biológico - Integrado

Eusse, (1982) propone que las malezas tienen ciertas características por el cual compiten con los pastos:

Alta capacidad reproductiva

Buena adaptación

Conservación de la viabilidad de las semillas enterradas

Ciclo de vida parecida al cultivo

Desarrollo rápido de raíces y partes aéreas

Alelopáticas

Plagas: En ciertas oportunidades cuando se está cerca de fincas dedicadas a cultivos muy susceptibles a plagas y enfermedades, donde estas se controlan principalmente con productos químicos, pueden inducir a que los pastos sean utilizados por insectos, hongos u otros, como hospederos alternos, los cuales se pueden controlar químicamente cuando la población de plagas se relativamente alta (Gutiérrez, 1996), además afirma que las plagas más comunes que causan pérdidas en los pastos están, salivazo (*Aeneolamia sp*), gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), gallina ciega

(*Phyllophaga sp*), gusano medidor (*Mocis repanda*), chinche de los pastos (*Blissus leucopterus*), crisomélidos (*Diabrotica sp*), zompopos (*Atta sp*) y el erróneamente llamado *psyllide* (*Heteropsylla cubana*).

2.1.2 Cultivo de transvala (*digitaria decumbers stent*)

Morales (2002), menciona que

Esta especie se encuentra establecida en varias zonas del país, pero particularmente en la región Chorotega donde su principal utilización es para heno. El sistema tradicional de henificación de esta y otras especies es de secano, con buenas producciones de pacas, pero de calidades muy bajas, comparables a las pacas de arroz. Asimismo, “ingresó a los Estados Unidos en 1935 y probablemente de ahí se trajo a Costa Rica en la década de los 70`s. Esta variedad vino a sustituir al pasto Pangola el cual presentó muchos problemas de plagas y enfermedades”. (p. 1)

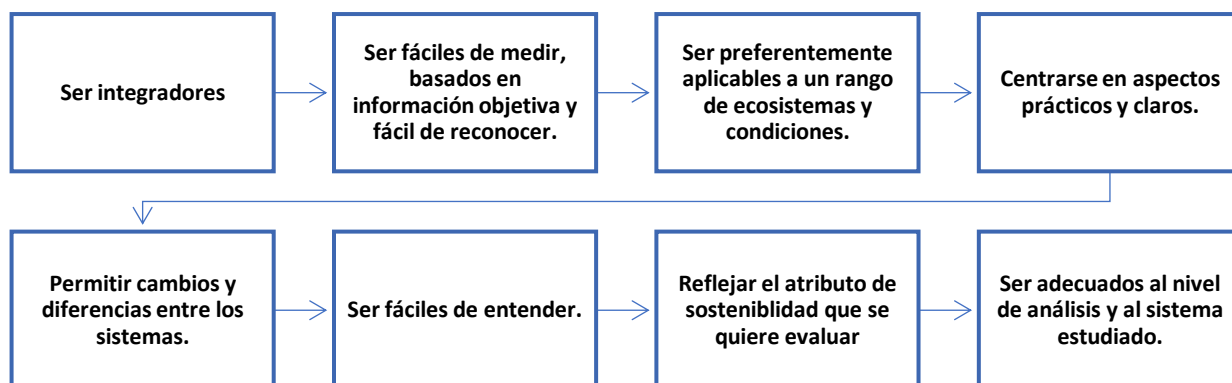
2.1.3 Manejo agronómico

Según Guzmán Bermúdez (2016), los factores que favorecerán la siembra del cultivo de transvala y el establecimiento de un cultivo adecuado comprenden un sistema de riego de buena calidad, drenaje, semilla de alta calidad y evitar el uso de fertilizantes químicos con el fin de reducir los impactos negativos en el ecosistema. Por otra parte, la tecnología es una herramienta fundamental que ayuda a la supervisión de los cultivos y genera respuestas para la toma de decisiones.

2.1.4 Indicadores de calidad y rendimiento en pasto transvala

Para que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo sean consideradas indicadores de la calidad deben cubrir las siguientes condiciones (Masera et al., 1999)

Figura 2. Condiciones de los indicadores de calidad y rendimiento en el pasto Transvala



Baltodano Vargas (2024), menciona el concepto de indicadores integradores, fáciles de medir, basados en información objetiva y fácil de reconocer, preferentemente aplicables a un rango de ecosistemas y condiciones, centrados en aspectos prácticos y claros, permitiendo cambios y diferencias entre los sistemas, fáciles de entender, que reflejan el atributo de sostenibilidad que se quiere evaluar, y adecuados al nivel de análisis y al sistema estudiado, se refiere a variables o medidas que cumplen con una serie de criterios específicos para ser efectivos en la evaluación y gestión de sistemas agrícolas y ambientales.

Integradores Se refieren a indicadores que capturan múltiples dimensiones o procesos dentro de un sistema agrícola, proporcionando una visión holística de su desempeño y sostenibilidad en lugar de evaluar solo aspectos aislados.

Fáciles de Medir: Son variables que pueden ser cuantificadas de manera precisa y reproducible utilizando métodos estandarizados o técnicas accesibles, permitiendo obtener datos de forma eficiente y confiable.

Basados en Información Objetiva: Los indicadores deben estar fundamentados en datos confiables y verificables, evitando interpretaciones subjetivas y asegurando que las mediciones sean válidas y libres de sesgos.

Aplicables a un Rango de Ecosistemas y Condiciones: Deben ser adaptables y relevantes para diferentes contextos ambientales y agrícolas, permitiendo comparaciones significativas entre diferentes sistemas y regiones geográficas.

Centrados en Aspectos Prácticos y Claros: Los indicadores deben evaluar aspectos tangibles y relevantes para la gestión agrícola y ambiental, proporcionando información clara y útil para la toma de decisiones.

Permiten Cambios y Diferencias entre Sistemas: Deben ser sensibles a las variaciones naturales y al manejo agrícola, permitiendo detectar mejoras o problemas específicos dentro de diferentes sistemas de producción agrícola.

Fáciles de Entender: Deben ser comprensibles para una variedad de audiencias, incluyendo técnicos, agricultores y tomadores de decisiones, utilizando métricas y términos accesibles y claros.

Reflejan el Atributo de Sostenibilidad: Los indicadores deben capturar aspectos clave de la sostenibilidad agrícola, como la eficiencia en el uso de recursos, la conservación del suelo y la biodiversidad, y la resiliencia frente a cambios climáticos.

Adecuados al Nivel de Análisis y al Sistema Estudiado: Deben ser seleccionados y definidos de acuerdo con el alcance específico del estudio (por ejemplo, parcela, finca, región) y ser pertinentes para los objetivos de evaluación de rendimiento y sostenibilidad del sistema agrícola considerado.

Además de las condiciones anteriores, dentro de los atributos seleccionados como indicadores de la calidad de los suelos, Ramírez (2004) señaló que:

Figura 3. *Indicadores de la calidad de los suelos.*



2.1.4.1 Rendimiento del pasto trasvala, según (FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)

Rendimiento en condiciones óptimas: La biomasa total la cual la cantidad de hojas sea mayor al 60% es considerado un pasto de calidad optima en función de su relación hoja-tallo.

Hoja: 60-70%

Tallo: 30-40%

Total: 12-15 t/ha de materia seca al año

Rendimiento en condiciones subóptimas: La biomasa total la cual la cantidad de hojas sea mayor 50% es considerado un pasto de calidad subóptima en función de su relación hoja-tallo.

Hoja: 50-60%

Tallo: 40-50%

Total: 5-8 t/ha de materia seca al año

Promedio general: La biomasa total la cual la cantidad de hojas sea mayor al 45% es considerado un pasto de calidad optima en función de su relación hoja-tallo.

Hoja: 55-65%

Tallo: 35-45%

Total: 8-10 t/ha de materia seca al año

2.2 Caracterización de la reflectancia espectral del cultivo de pasto trasvala en distintos estados fenológicos, mediante la utilización de sensores multiespectrales.

La caracterización de la reflectancia espectral mediante sensores multiespectrales es una herramienta poderosa para mejorar la gestión y optimización del cultivo de pasto transvala. Al entender cómo varía la reflectancia en diferentes estados fenológicos, los productores pueden tomar decisiones más informadas y aplicar prácticas agrícolas más precisas y sostenibles.

2.2.1 Agricultura de precisión

Es el conjunto de una serie de herramientas informáticas para mejorar la generación, captación, almacenamiento y análisis de información para contribuir a la toma de decisiones. (Vargas, 2021, p. 35)

Además, es un enfoque avanzado que utiliza tecnologías modernas para optimizar la gestión de las explotaciones agrícolas. Se caracteriza por la aplicación específica y adaptativa de insumos agrícolas y prácticas de manejo, con el objetivo de mejorar la eficiencia, la productividad y la sostenibilidad de la producción agrícola. Este enfoque se basa en la recopilación y análisis detallado de datos espaciales y temporales sobre las condiciones del suelo, cultivos y clima, utilizando herramientas como sistemas de información geográfica (GIS), teledetección, sensores remotos, sistemas de posicionamiento global (GPS) y tecnología de drones.

2.2.2 Teledetección

Di Bella (2008), define la teledetección como la observación a distancia de los objetos, sin estar en contacto directo con ellos. Montados sobre distintas plataformas, los sensores remotos pasivos capturan la energía electromagnética

proveniente del sol que es reflejada, así como la emitida por la superficie terrestre en distintas longitudes de onda. Por su parte, no dependen de la energía electromagnética del sol ni de las propiedades térmicas de la Tierra, sino que generan su propia energía electromagnética (p. 3).

Figura 4. *Generación de energía electromagnética.*



2.2.3 Vehículos aéreos no tripulados

Los vehículos aéreos no tripulados (VANT) son parte de una tecnología que ha transformado múltiples actividades que conforman procesos productivos como la siembra de pasto transvala. Los VANT se crearon en la Segunda Guerra Mundial por diferentes países con fines de sobrevolar otros territorios, lo cual impulsó la investigación para desarrollar diferentes tipos, con diversas funciones y capacidades para la captación de imágenes o información (García, 2017, p. 18).

Por otra parte, el autor menciona que se categorizan en diferentes tipos. Según señala, en cuanto a las alas estas pueden ser fijas o móviles (también denominadas rotóricas), las primeras no tienen movimiento propio y se mueven por motores con hélices ubicadas de forma horizontal en la parte inferior, mientras los de alas móviles operan con cuatro motores con hélice de forma vertical al suelo. Por

otra parte, pueden controlarse de forma manual o automático, para el cual se establece el plan de vuelo con el piloto remoto de forma previa.

2.2.4 Imágenes multiespectrales

Cárdenas (2023), establece que las imágenes multiespectrales son aquellas que capturan los datos de la imagen dentro de rangos longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético. Una imagen multiespectral divide la luz en un pequeño número de bandas espectrales, generalmente de 3 a 10 bandas por imagen (p 15).

2.2.5 Sensor remoto

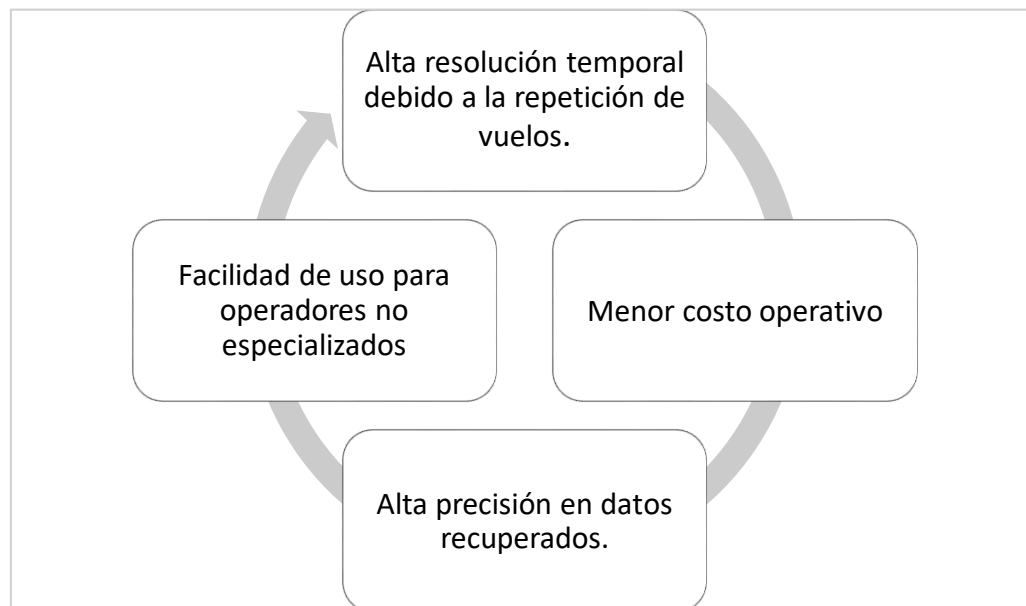
Los sensores remotos permiten la adquisición de información sobre un objeto o fenómeno sin estar en contacto con el mismo, esto implica que los instrumentos deben estar acoplados sobre alguna plataforma, como satélites, aviones, VANT, vehículos terrestres o sensores de proximidad. Por lo general, los sensores relacionados con la cobertura de plantas miden la radiación electromagnética que es reflejada o emitida por un objeto. Esto puede variar según los cambios morfológicos, fisiológicos y químicos en las plantas, también pueden ser afectados por factores como edad de las hojas, grosor, contenido de agua, ataque de plagas y enfermedades, deficiencias nutricionales (Usha & Singh, 2013; Weiss et al., 2020 citado en Guzmán 2022, p. 3).

2.2.6 Tipos de sensores, RGB, RGB-NIR, RGB-RE

El sensor de imagen, permite crear una representación visual de lo que se percibe por el VANT. En este caso el desarrollo de diferentes cámaras ha sido fundamental para la toma de decisiones en las áreas de investigación que se utilizan, las cuales en la última década se han sofisticado, dando origen a las cámaras réflex, técnicas o infrarrojas y multiespectrales, cuyo aumento en la demanda ha reducido el costo de estos artículos (García, 2017).

Guevara-Bonilla et. al. (2020) señalan algunas ventajas y limitaciones de los vehículos aéreos no tripulados en función del aporte que tienen en los diferentes campos de aplicación. En cuanto a las ventajas, se menciona:

Figura 5. Ventajas de los sensores



Los sensores remotos ofrecen una ventaja significativa en la agricultura al proporcionar monitoreo continuo y detallado de grandes extensiones de terreno sin la necesidad de presencia física constante. Esta capacidad no solo permite una cobertura extensa y eficiente del área de estudio, sino que también facilita la detección temprana de problemas como estrés hídrico, enfermedades o plagas en los cultivos. Además, los datos obtenidos son rápidos, actualizados y pueden ser procesados para tomar decisiones informadas en tiempo real.

Por otra parte, algunas desventajas o limitaciones señaladas por Guevara-Bonilla et. al. (2020) incluyen:

Figura 6. Desventajas de los sensores



Las desventajas de los sensores remotos en agricultura incluyen la susceptibilidad a condiciones climáticas adversas que pueden afectar la calidad de las imágenes y la efectividad del monitoreo. Además, la interpretación precisa de los datos obtenidos requiere habilidades especializadas y conocimientos técnicos avanzados. Otro aspecto a considerar es el costo inicial significativo asociado con

la adquisición y mantenimiento de equipos adecuados, así como la necesidad de calibración y validación periódica para asegurar la precisión de los resultados. Además, existe la preocupación por la privacidad y seguridad de los datos recolectados, especialmente cuando se trata de información detallada sobre propiedades agrícolas y sensibles.

2.2.7 Espectro electromagnético

Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética. (Ordóñez, 2012, p. 18)

2.2.8 Análisis espectral

Rodríguez (2017) establece que:

Los sistemas ópticos de caracterización y análisis espectral tienen como objetivo principal conseguir evaluar un dispositivo óptico que se pone bajo test para poder comprobar sus especificaciones de trabajo y poder realizar acciones como la comparación con otros de su tipo. (p. 1).

2.3 Grado de asociación entre la reflectancia espectral y los resultados de rendimiento y calidad en campo

La reflectancia espectral proporciona una medida indirecta pero efectiva del estado fisiológico y la salud de las plantas. Al correlacionar estos datos con el rendimiento y la calidad del pasto, se puede mejorar significativamente la gestión agrícola. Los sensores multiespectrales capturan datos en diferentes bandas del espectro electromagnético, lo que permite identificar variaciones en el crecimiento, la salud y el desarrollo del cultivo.

2.3.1 Índices de vegetación

Las propiedades físicas de la vegetación podrían ser medidas indirectamente a partir de índices de vegetación comprendidos como la combinación de distintos rangos espectrales a partir de sumas, restas, multiplicaciones o divisiones que tienen como objetivo cuantificar indirectamente el vigor de la vegetación, a partir de la fracción fotosintéticamente activa de la vegetación, donde altos valores del índice estarían relacionados con vegetación saludable (Campbell, 2006).

2.3.2 Calidad del suelo

La calidad del suelo como la capacidad que posee esta matriz para funcionar dentro de un ecosistema natural o alterado, para sustentar la vida, el desarrollo y la producción de plantas y animales. El suelo, como medio biofísico que está en contacto directo con el ambiente, muchas veces es afectado por acciones del ser humano que generan cambios en el paisaje, pérdida considerable de fertilidad,

compactación, entre otros factores que reducen su capacidad para sostener las actividades agrícolas. (Askari, 2014).

2.3.3 Material vegetal aéreo

Se refiere a la biomasa que se encuentra sobre la superficie del suelo, como las hojas, tallos y ramas de las plantas. (Galicia, 2015)

2.3.4 Material vegetal subterráneo

Comprende la biomasa que está debajo de la superficie del suelo, como las raíces y otros tejidos subterráneos de las plantas. (Galicia, 2015)

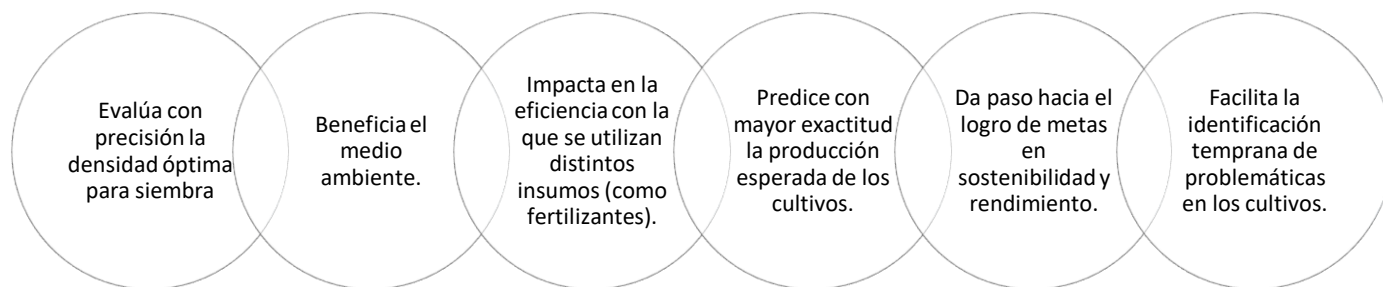
2.3.5 Biomasa

La biomasa es la cantidad de materia orgánica acumulada en un ecosistema forestal, compuesta por la masa de material vegetal aéreo y subterráneo. Es fundamental para entender la distribución de nutrientes en las plantas y comparar diferentes especies o tipos de vegetación. La cuantificación de la biomasa es crucial para estimar la fijación de carbono, lo que tiene implicaciones importantes en relación con el cambio climático. (Fonseca, 2019)

2.3.6 Métodos tradicionales de recopilación de datos de campo:

La recolección de datos agronómicos puede dar una mayor supervisión del crecimiento de las plantas que, entre otros:

Figura 7. Beneficios de los métodos tradicionales de recopilación de datos de campo.



Fuente., Adaptado de *Beneficios de los métodos tradicionales de recopilación de datos de campo* por Promotora de Comercio Exterior, 2021, PROCOMER (https://www.procomer.com/alertas_comerciales/exportador-alerta/la-agricultura-de-precision-permite-tener-mayor-control-en-los-cultivos/)

Detectar problemas a tiempo permite tomar medidas de corrección y prevención en mejor tiempo, impactando de manera positiva el valor del producto (Procomer, 2021).

2.3.7 Método tradicional para estimar la biomasa

Fonseca (2019), establece que existen dos métodos principales para estimar la biomasa forestal: el método directo y el método indirecto. El método directo incluye el enfoque destructivo, donde se corta el árbol y se pesan sus componentes, como hojas, ramas y tronco, para determinar la biomasa. Por otro lado, el método indirecto implica técnicas de cubicación del árbol, donde se calcula el volumen de madera y se obtienen muestras para calcular la densidad específica, es decir, la conversión de volumen a peso seco.

Además, se utilizan ecuaciones o modelos de regresión basados en variables recolectadas en el campo, como el diámetro del árbol a la altura del pecho (d), la altura comercial y total, el crecimiento dimétrico, el área basal y la densidad específica de la madera. Estos modelos son no destructivos y extrapolables a situaciones de crecimiento similares.

2.3.8 Manejo de malezas

El control de malezas es imprescindible para la calidad del cultivo de transvala, cuyo nivel de vegetación puede variar las prácticas utilizadas. De acuerdo con Morales et. al. (2002), si las hojas son anchas no leñosas o gramíneas de poca altura se pueden controlar con herbicidas de contacto o quemantes. Tras efectuarse el resultado esperado, puede requerirse la mecanización con un pase de arado y dos de rastra. Consecuentemente, se permite el rebrote de la maleza y entre la tercera y cuarta semana se aplica algún agente fisiológico y en el transcurso de dos semanas se evidencia el efecto, tras lo cual conviene aplicar uno o dos pases de rastra para proceder con la siembra, riego, segado y embalado. Existen dos métodos principales para estimar la biomasa forestal: el método directo y el método indirecto.

2.3.9 Relación tallo-hoja

“Siempre es deseable una alta RH-T donde la mayor proporción de asimilados se destinen a la producción de hojas, por estar esto con una mejor calidad de la pastura”. (Liendo, 2019, p. 2).

Araya y Boschini (2005), establecen que:

Las pasturas con mayor proporción de hojas verdes dentro de la mata, presentan un más alto contenido de proteínas y una mejor calidad nutricional. Las hojas, que cumplen función de síntesis y asimilación de carbohidratos, presentan un alto volumen de tejido parenquimatoso localizado en el mesófilo; esto ayuda a una mejor acumulación de proteínas y carbohidratos no estructurales que definen sus altos valores nutritivos. Los tallos, en cambio, presentan gran cantidad de tejido vascular y de sostén, por lo que su valor nutricional promedio es significativamente inferior al de las hojas y depende mucho del contenido y tipo de carbohidratos estructurales que presenten. (p.40).

2.3.10 Niveles de clorofila

La clorofila es el pigmento responsable del color verde en los vegetales que se encarga de absorber la luz necesaria para la fotosíntesis (síntesis de sustancias orgánicas a partir de las inorgánicas, mediante la transformación de la energía luminosa en energía química). La abundancia de este pigmento en hojas y tejidos vegetales es la razón de que las plantas sean verdes, en cambio, en algunas hojas, la clorofila se oculta por otros pigmentos. (Gómez, 2020, p.24)

2.3.11 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Los índices de vegetación son composiciones que se realizan con las bandas espectrales, estas se registran en los sensores especializados que llevan los satélites, posee como función realzar la cubierta vegetal de acuerdo a la respuesta

espectral, se deben suavizar algunos detalles del suelo e iluminación. (Piscoya, 2019, p.8).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada fue 9 propuesto por Rouse et al. (1974), el NDVI se calcula usando la reflectancia de las regiones o bandas la roja e infrarroja cercana del espectro electromagnético. La diferencia normalizada de las dos bandas ya mencionadas tiene un rango comprendido entre -1 y +1 (Gilabert et al, 1997, p. 4).

De estos valores, los valores positivos corresponden a zonas de vegetación mientras que los valores negativos generados por una mayor reflectancia en el visible que en el infrarrojo, pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas; así mismo el valor del NVDI puede variar en función del uso del suelo, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona (Gómez, 2005, p. 43). En la tabla 3, se muestran los diferentes índices de vegetación y sus características:

Tabla 1. Índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Índice	Definición	Forma de cálculo
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	Estudia el comportamiento radiométrico de la vegetación con base en su actividad fotosintética y estructura foliar para valorar su vigorosidad, cuyos niveles se establecen de acuerdo con la energía evidenciada en las plantas en el espectro electromagnético. Díaz (2015)	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
Índice de vegetación rojo (RVI)	Peason y Miller (1972) citados por Díaz (2015) como “el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del rojo, estando este basado en la diferencia espectral en la vegetación en las longitudes de onda del rojo y del infrarrojo cercano” (p. 44).	$RVI = \frac{NIR}{RED}$
Índice de vegetación de diferencia normalizada (GNDVI)	Es considerado una variante del NDVI cuya banda verde reemplaza la banda del rojo y de acuerdo con Moreno-García, citados por Díaz (2015) ha mostrado eficiencia en diferentes cultivos que requieren diversas dosis de fertilizantes para mejorar el rendimiento en zonas específicas, pues brinda coeficientes de determinación elevados (p. 43).	$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$
Índice de vegetación de diferencia de rojo normalizado (RNDVI)	Posada-Asprilla et. al. (2019) citan a Rouse et. al. (1974) según quienes este índice busca hallar relaciones entre los datos de las imágenes espectrales y los niveles de clorofila, así como con factores nutricionales y otras propiedades de la vegetación, basándose en la diferencia entre la banda del borde rojo y el NIR (p. 2).	$RNDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)	Según Muñoz (2013) “incorpora una constante de suelo, la cual se usa de acuerdo con vegetación de baja, intermedia o alta densidad” (p. 6). Considera factores como la reflectividad del suelo y diferencia información en torno a los nutrientes de la vegetación ubicados en la tierra, sin embargo, la baja densidad de la cobertura de la vegetación puede evidenciar una mayor incidencia de factores asociados al suelo en los valores de reflectancia encontrados.	$SAVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R + L)(1 + L)}$

Índice de vegetación mejorado (EVI)	De acuerdo con Ruiz-Huanca et. al. (2005) se recomienda su uso ya que “optimiza la representación de la vegetación, reduciendo al mínimo el ruido inherente al fondo del follaje, influencias atmosféricas y no se satura con valores altos del IAF” (p. 170). El aumento en el IAF puede saturar el NDVI, por lo que puede sustraerse información más precisa con el EVI.	$EVI = Gx \frac{(NIR - RED)}{(NIR + C1xRED - C2xBlue + 1)}$
Índice de color de hojas (CIG)	El índice de clorofila verde, también índice de color de hojas, o CIG GreenSea utiliza en agricultura de precisión para establecer una relación entre la reflectancia de la clorofila de una planta evidenciada en la bandeja del Infrarrojo Cercano (NIR) y la reflectancia de la banda verde (EOS Data Analytics, 2023).	$CIG = (NIR/GREEN) - 1$
Índice de color de hojas rojo-verde (CIRG)	De acuerdo con EOS Data Analytics (2023) el índice de clorofila o CI permite identificar los niveles de clorofila en una planta, con el uso de dos bandas, CI verde o CGI y CI del borde rojo (RCI) para identificar variaciones importantes en los nutrientes que pueden afectar la salud del cultivo y responder de manera oportuna a la escasez o cambios en estos, así como planificar su gestión en una temporada.	$CIRG = \frac{(NIR/GREEN) - 1}{(NIR/REED) - 1}$
Índice de reflectancia del estadio de la planta (PSRI)	Según NV5 Geospatial (2023) el índice de reflectancia del estadio de la planta o PSRI por sus siglas en Ingles (Plant Senescence Reflectance Index) “maximiza la sensibilidad del índice a la proporción de carotenoides a granel (por ejemplo, alfacaroteno y betacaroteno) a clorofila”. Conforme el PSRI aumenta, el estrés de la planta es mayor, por lo que su estudio permite conocer el estado de salud de la planta y la detección oportuna de factores que podrían afectar la productividad de los cultivos.	$PSRI = \frac{(R - G)}{NIR}$
Índice de carbono en la hoja (LCI)	Es una herramienta avanzada en el campo de la teledetección y el análisis de imágenes satelitales que se utiliza para estimar la cantidad de carbono presente en las hojas de la vegetación. El contenido de carbono en la hoja es un indicador crucial de la salud de las plantas y su contribución	$LCI = \frac{(NIR - REEDGE)}{(NIR + RED)}$

	al ciclo del carbono en los ecosistemas.	
Índice del ratio de absorción de clorofila modificado (MCARI)	Absorción de clorofila modificada en el índice reflectante. Índice utilizado para medir las concentraciones de clorofila, incluidas las variaciones en el índice de área foliar.	$MCARI = \frac{1.2 * (2.5 * (nir - red) - \dots)}{\text{normalizado al valor maximo de}}$
Índice Normalizado Diferencial de Borde Rojo (NDRE)	Es un índice muy similar al NDVI. Su principal diferencia radica en una solución más segura, ya que puede detectar las variaciones en la salud de los cultivos en sus estadios más avanzados. Índice sensible al contenido de clorofila en las hojas frente a los efectos de fondo del suelo. Este índice solo se puede formular cuando la banda de borde rojo está disponible.	$NDRE = \frac{(NIR - RED EDGE)}{(NIR + RED EDGE)}$
Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Azul (BNDVI)	Es un índice sin disponibilidad de canal rojo que utiliza el azul visible, para áreas sensibles al contenido de clorofila.	$BNDVI = \frac{(NIR - BLUE)}{(NIR + BLUE)}$

2.3.12 Herramienta SPAD 502

El medidor de clorofila SPAD 502 es un instrumento que permite evaluar indirectamente y en forma no destructiva el contenido de clorofila en la hoja y, por ende, el estado nutricional del cultivo a través de una simple lectura. (Sainz & Echeverría, 1998, p. 38)

2.4 Análisis de correlación

La finalidad de la correlación es examinar la dirección y la fuerza de la asociación entre dos variables cuantitativas. Así conoceremos la intensidad de la

relación entre ellas y si, al aumentar el valor de una variable, aumenta o disminuye el valor de la otra variable. (Laguna, 2020. p. 2).

Spiegel y Stephen (2009) afirman lo siguiente:

Si X y Y son las dos variables en consideración, un diagrama de dispersión sirve para mostrar la localización de los puntos (X, Y) en un sistema de coordenadas rectangulares. Si en este diagrama de dispersión todos los puntos parecen encontrarse cerca de una línea recta, como en las figuras 14-1a) y 14-1b), a la correlación se le llama lineal. (p.345)

2.4.1 Coeficientes de correlación lineal por Pearson.

El estimador muestral más utilizado para evaluar la asociación lineal entre dos variables X e Y es el coeficiente de correlación de Pearson (r). Se trata de un índice que mide si los puntos tienen tendencia a disponerse en una línea recta. Es un método estadístico paramétrico, ya que utiliza la media, la varianza y, por tanto, requiere criterios de normalidad para las variables analizadas. (Laguna, 2020, p.2).

“El signo del coeficiente, que es el signo de la covarianza, nos indica si la relación lineal entre las variables directa (positivo: cuando los valores de una variable crecen, los de la otra también lo hacen) o inversa (negativo: cuando los valores de una variable crecen, los de la otra decrecen).” (Hernández, 2012, p.147)

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Paradigma

El paradigma de la investigación es positivista Ricoy (2006) indica que el paradigma positivista se califica de cuantitativo, empírico-analítico, racionalista, sistemático gerencial y científico tecnológico”. Por tanto, el paradigma positivista sustentará a la investigación que tenga como objetivo comprobar una hipótesis por medios estadísticos o determinar los parámetros de una determinada variable mediante la expresión numérica (p 14).

En esta investigación predomina el enfoque cuantitativo, ya que se busca determinar cantidad de biomasa y calidad como objetivo del proyecto, además utiliza teoría previa como guía para el correcto análisis y valoración de todas las características agronómicas del cultivo y del medio ambiente en que se desarrolla.

3.2 Enfoque de la investigación

Según Ramos 2015:

El positivismo y post-positivismo son los paradigmas que guían la investigación cuantitativa, los cuales tienen como objeto explicar el fenómeno estudiado, para en una última instancia, predecirlo y controlarlo (Guba & Lincoln, 1994). La investigación de tipo cuantitativo utiliza la recopilación de información para poner a prueba o comprobar las hipótesis mediante el uso de estrategias estadísticas basadas en la medición numérica, lo cual permitiría al investigador proponer patrones de comportamiento y probar los diversos fundamentos teóricos que explicarían dichos patrones (Hernández et al., 2010). (p. 4)

El enfoque de la investigación es cuantitativo porque se busca relacionar el valor de los índices de vegetación obtenidos de las imágenes multiespectrales con drone, con la biomasa y calidad en el campo de cultivo de pasto transvala.

3.3 Tipo de investigación

Este trabajo presenta un tipo de investigación aplicada o tecnológica. Este tipo investigaciones están orientadas a mejorar, perfeccionar u optimizar el funcionamiento de los sistemas, los procedimientos, normas, reglas tecnológicas actuales a la luz de los avances de la ciencia y la tecnología; por tanto, este tipo de investigación no se presta a la calificación de verdadero, falso o probable sino a la de eficiente, deficiente, ineficiente, eficaz o ineficaz (Ñaupas, 2013, p. 69-70).

Asimismo, se establece como investigación aplicada, por las siguientes razones:

- La investigación busca resolver problemas concretos relacionados con el rendimiento y la calidad del cultivo de pasto transvala, lo cual tiene aplicaciones directas en la agricultura y la ganadería.
- Emplea imágenes multiespectrales para obtener datos precisos y detallados sobre el cultivo, lo que indica un enfoque práctico y tecnológico.
- Se realiza en una ubicación geográfica particular (Bagaces, Costa Rica) y en un período de tiempo definido (2023), lo que sugiere que los resultados pueden aplicarse de manera directa a esa región y contexto.

3.4 Hipótesis

Según Izcara (2014), las hipótesis son explicaciones tentativas de un fenómeno investigado, formuladas a manera de proposiciones. Una hipótesis debe desarrollarse con una mente abierta y dispuesta a aprender, pues de lo contrario se estaría tratando de imponer ideas, lo cual es completamente erróneo. A continuación, se establecen las hipótesis de ésta investigación:

Hipótesis Nula: La biomasa calculada con imágenes espectrales con drone genera un estimado de producción y calidad aceptable comparada con los datos en campo

Hipótesis alternativa: El método de cálculo de biomasa con imágenes espectrales con drone no genera un resultado de producción, calidad aceptable y confiable de lo presente en el campo.

3.5 Metodología procedimiento de medición en campo

3.5.1 Descripción de la finca

El estudio se realizó en la parcela del productor Bryan Alvarado, ubicada en la zona del Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT) en el cantón de Bagaces, asentamiento La Soga, ubica a una altitud de 10° 26'57" N y longitud de 85°09'38" W la cual se dedica al cultivo de pasto Transvala (*Digitaria Decumbens Stent*), puesto que es la variedad comercial más usada en la provincia de Guanacaste, esta finca cuenta aproximadamente 8 ha que se encuentran sembradas del forraje transvala, de las cuales se tomó un área de 0.31 ha para la realización del estudio, el cual está destinado para la producción de alimentación de los animales . La finca maneja un sistema de producción de tres cosechas al año la cual se realiza a

mediados de diciembre, la segunda a finales de marzo, principios de abril y por último medias de julio de cada año.

La finca cuenta con un cultivo establecido de hace 8 años con un tipo de suelo franco arcilloso, la cual tienen un manejo agronómico de la siguiente manera.

Tabla 2. Manejo agronómico de la finca utilizada en el cultivo de pasto.

Actividad	Descripción	Dosis
Fertilizante de siembra	Formula de siembra (NPK) 10-30-10	4 sacos/ha
Fertilizante Nitrogenado	Urea Granular N. 46%	8 sacos/ha
Aplicación de biológicos	Fungimix, bombaton y polvo de montaña	30 l/ha
Herbicidas	Aminopiralyd + 2,4 -D	1,5 l/ha
	Basagram 48	2 l/ha
	bispiribac	0,2 l/ha
Insecticidas	Cipermetrina	0,350 l/ha

El estudio se llevó a cabo durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre del año 2023.

3.5.2 Delimitación de área de estudio.

Se utilizó estadística inferencial a través de análisis de paramétricos mediante bloques aleatorios, se emplearon 20 muestras o parcelas de evaluación de dimensiones (12.5m X 12.5m) 156,2 metros cuadrados. Las parcelas se

delimitaron con estacas y cinta de color naranja para facilitar la visualización aérea desde el procesamiento de las imágenes, cada parcela va a tener un metro de distanciamiento una de otra.

Se utilizó estadística inferencial a través de análisis paramétricos mediante bloques aleatorios, al ser una investigación de este tipo lo que busca es caracterizar las diferentes variables mediante imágenes multiespectrales y poder predecir una variable en función de otra, razón por la cual este tipo de investigaciones no se adaptan a los diseños experimentales tradicionales.

3.5.3 Análisis de suelo

Se realizó un análisis de suelo del área de estudio previo a la cosecha total de los ensayos, el cual se va a realizar de la toma de las 5 submuestras de cada una de las parcelas o bloques, para crear una muestra representativa del terreno, con el objetivo de evaluar el contenido nutricional en el suelo y así poder validar el contenido de clorofila en las plantas y así descartar al problema de mal nutrición en el análisis de clorofila.

3.5.4 Parámetros y edades de medición en el cultivo

Las mediciones se desarrollaron en tres etapas del cultivo, a los 45 días, 70 días y 95 días después del último corte, en las tres mediciones se evaluó la calidad, la reflectancia espectral y el rendimiento.

Tabla 3. Distribución de toma de datos en el cultivo.

Distribución de mediciones en el cultivo				
Parámetro	Medición	Días		
		45	70	95
Calidad	Clorofila	X	X	X
	Relación tallo/hoja			X
	% MS			X
Reflectancia Espectral	Imágenes multiespectrales	X	X	X
	Muestreo Parcial	X	X	
Rendimiento	Cosecha total ensayos			X

3.6 Parámetros de calidad.

Los parámetros de calidad evaluados fueron relación hoja-tallo y cantidad de materia seca, esto con el fin de determinar si la calidad se ve influenciada por el rendimiento del lote bajo las condiciones de estudio.

3.6.1 Clorofila.

Se midió mediante la herramienta del spad, en la cual consistió en el lanzamiento de un cuadro de 25x25 cm (ver anexo 3) al azar por tratamiento y se tomó la medición donde caía el cuadro, esto con el fin de obtener resultados más precisos.

3.6.2 Relación tallo hoja

Se analizó la relación hoja-tallo en cada una de las áreas de evaluación, para determinar la calidad presente en el cultivo en función de esta variable, para lo cual se siguió el siguiente procedimiento.

3.6.2.1 Procedimiento: Muestreo Pre-Cosecha:

Se realizó un muestreo 8 días antes de la cosecha, siguiendo la metodología de Obando y Solano (2022). Se seleccionaron 5 plantas al azar por tratamiento.

3.6.2.2 Separación y Pesaje Inicial:

Las plantas seleccionadas se dividieron en hojas y tallos.

Cada componente (hojas y tallos) se pesó por separado utilizando una balanza analítica.

3.6.2.3 Secado:

Las muestras se colocaron en un horno de secado a 65 grados Celsius durante 48 horas.

3.6.2.4 Pesaje de Materia Seca:

Después del secado, se pesaron nuevamente las hojas y los tallos por separado utilizando una balanza analítica marca OCONY, modelo ES-1000H.

3.6.2.5 Cálculo de la Relación Tallo-Hoja

Para determinar la proporción de hojas respecto a tallos, se sigue el siguiente cálculo:

Peso Seco de Hojas (WSH) y Peso Seco de Tallos (WST)

Se registran los pesos secos de hojas y tallos obtenidos después del proceso de secado.

Proporción Hoja-Tallo:

La proporción de hojas (PH) y la proporción de tallos (PT) se calcula utilizando las siguientes fórmulas:

$$PH = \frac{WSH}{WSH + WST} \times 100$$

$$PT = \frac{WST}{WSH + WST} \times 100$$

Evaluación de la Calidad del Heno

Una alta proporción de hojas indica una mejor calidad del heno, ya que las hojas son más nutritivas y digestibles que los tallos. Los resultados obtenidos pueden compararse con los porcentajes eficientes previamente mencionados para evaluar la calidad del forraje producido.

Barnes (2007), establece los porcentajes eficientes de relación Tallo-Hoja en el Pasto Trasvala:

3.6.2.6 Alta relación hoja-tallo (de alta calidad)

70-80% Hojas / 20-30% Tallos: Indica un forraje de excelente calidad, adecuado para ganado de alto rendimiento, como vacas lecheras en producción o

animales jóvenes en crecimiento. Las hojas son más ricas en nutrientes y tienen una mayor digestibilidad.

60-70% Hojas / 30-40% Tallos: También se considera de buena calidad, adecuado para la mayoría de los animales de producción. Aún mantiene un buen balance entre nutrientes y fibra

3.6.2.7 Moderada relación hoja-tallo

50-60% Hojas / 40-50% Tallos: Indica un forraje de calidad aceptable, adecuado para animales con menores requerimientos nutricionales, como ganado de carne en mantenimiento o animales adultos. Este rango proporciona un buen equilibrio entre calidad y cantidad de forraje.

3.6.2.8 Baja relación hoja-tallo (de menor calidad)

40-50% Hojas / 50-60% Tallos: Considerado de menor calidad, más fibroso y menos digestible. Este forraje es más adecuado para animales de mantenimiento o ganado de carne en situaciones donde la cantidad de forraje es más importante que la calidad.

Menos de 40% Hojas / Más de 60% Tallos: Indica un forraje de baja calidad, altamente fibroso y menos nutritivo. Utilizado principalmente como suplemento de fibra en dietas donde el forraje de alta calidad no está disponible o es costoso.

3.6.3 Biomasa Seca

Se determinó el porcentaje de materia seca presente en cada una de las áreas de estudio, tomando una muestra previamente a la cosecha, primero se realizó una muestra de 100 gramos obtenida de 5 sub muestras cortadas

aleatoriamente dentro del área de cada bloque de estudio, posteriormente se introdujo en bolsas de doble polietileno en donde serán trasladadas hasta el laboratorio en donde serán pesados los 100 gramos de materia fresca en una balanza analítica marca OCONY, y por último se ingresaron en un horno marca PRECISION, el cual las muestras van a estar a 65 grados durante 48 horas, para así obtener después de ese proceso la materia seca, la cual cada muestra ya seca se pesa de nuevo y la cantidad de biomasa seca se obtendrá al aplicar la siguiente formula:

PS: Peso seco (gram)

PV: Peso verde (gram)

$$MS(\%) = \left(\frac{PS}{PV} \right) * 100$$

3.7 Reflectancia espectral

La reflectancia espectral se evaluó mediante índices de vegetación calculados con el software Qgis versión 3.32.3, obtenidos de imágenes multiespectrales tomadas con el dron Phantom 4, las imágenes serán tomadas a los 45, 70 y 95 días después del último corte del pasto.

3.7.1 Procedimiento para estimación con vehículo aéreo no tripulado (drone)

En esta etapa consiste en capturar de manera adecuada el área de estudio, mediante la cámara multiespectral del Drone. El Drone que se va a utilizar para el

análisis es un Phantom 4 con cámara multiespectral (ver anexo 4) propiedad de la empresa Horizon Bioagro, la cual brindara el servicio de toma de imágenes multiespectrales.

3.7.1.1 Tipo cámara

Primeramente, se deben establecer algunos parámetros de vuelo.

3.7.1.2 Resolución espacial

La resolución espacial que se va a utilizar son pixeles de 3 cm x 3 cm, este tamaño es obtenido de acuerdo con la altura de vuelo que se va a realizar.

3.7.1.3 Altura de vuelo

Este parámetro es relativo ya que va en función de las capacidades del sensor o la capacidad focal del mismo y también la resolución espacial. La altura de vuelo que se va a utilizar es de 60 metros, la cual es la adecuada para el tipo de estudio y así no tener gran variabilidad y así obtener la reflectancia lo más cercana a la realidad en el campo.

3.7.1.4 Traslape

Este parámetro es indispensable para la toma de imágenes, ya que habilita el reconocimiento de los puntos para la creación del orto mosaico, y garantiza varios puntos de vista desde diferentes ángulos.

Para la toma de las imágenes se va a utilizar un traslape frontal de 80% y un traslape lateral del 60% para así garantizar una mayor resolución y evitar errores, esto puede hacer un poco más lento la toma de imágenes, pero es un proceso necesario.

Concluido estas calibraciones se procede a hacer el vuelo de las tomas de las imágenes.

3.7.2 Procesamiento de las imágenes

En procesamiento de imágenes, se realizará en un software Pix4Dfields en el cual se trabajan las imágenes para pasarlas a un formato que se pueda trabajar en Qgis. En procesamiento de imágenes, el proceso de filtrado tiene como objetivo eliminar o resaltar información de una imagen, dicho proceso se realizará en software Qgis.

3.7.2.1 Filtro de vecinos

Este proceso consiste en reducir al mínimo las transiciones fuertes que existen entre pixeles, que generan desenfoque o la imagen borrosa.

3.7.2.2 Operación de bandas

Se delimita el área de estudio mediante polígonos. Se combinan las bandas de esta manera al realizar un ajuste, recorte o demás se da a todas las bandas por igual. En función al polígono de extensión del área de estudio se recorta para procesar y analizar el área identificada para la prueba

Se realizó una combinación de bandas Red-Green-Blue (R-G-B) para visualizar mejor la imagen, mediante la calculadora de bandas ubicada en el complemento SCP. Realizar la combinación de bandas mediante los algoritmos específicos para obtener los índices de vegetación.

Para el cálculo de este índice se va a utilizar el software Quantum Gis (Qgis).

Se tomaron las imágenes del área en estudio y se creó una foto orto mosaico para luego seccionar los lotes en 50 metros cuadrados, y proceder a calcular los índices por separado de cada área, se hacen los algoritmos respectivos con calculadora ráster para discriminar las áreas, posterior a ello se categorizan los índices y se vectorizan para luego hacer los respectivos cálculos de biomasa.

Se hizo el análisis de correlación por medio de un ANOVA para la evaluación del método con los datos tomados en campo inicialmente, luego de esto se analizó los datos arrojados por ambos métodos, siendo evaluados por diferentes parámetros como la exactitud, facilidad de proceso, tiempo de estudio, rendimiento de análisis, y costos.

3.8 Medición de rendimiento.

La medición del rendimiento es un aspecto clave en la gestión agrícola y ganadera, ya que permite optimizar la producción de forraje y asegurar la alimentación adecuada de los animales. A continuación, se describen algunos métodos y consideraciones para medir el rendimiento del pasto:

3.8.1 Rendimiento parcial.

Para obtener el dato de rendimiento a los 45 y 70 días después de el corte, se tomó una muestra de cosecha manual de un metro cuadrado, la cual se va extrapoló a los 156,2 metros para así obtener un dato de rendimiento en pacas por hectárea o kilogramos por metro cuadrado, que se pueda correlacionar con las imágenes multiespectrales y los índices de vegetación, ya que por condiciones de clima y manejo del cultivo, la cosecha final de todas las muestras se realizaron a los 95 días que es cuando se da la cosecha tradicionalmente en la zona de estudio.

3.8.2 Rendimiento total.

3.8.2.1 Determinación de rendimientos de campo en pasto Transvala.

Para determinar el rendimiento de la biomasa obtenida en campo en cada área de estudio se efectuó mediante un proceso de cosecha convencional, para la cual se necesita primero segar el área de estudio, luego acordonar para aprovechar al máximo el pasto cortado (segado) y por último ingresar la embaladora, la cual forma la paca de una manera estandarizada con un peso promedio de 18 kg, posteriormente se procedió a contar la cantidad de pacas obtenida en cada una de las áreas para así tener el dato de rendimiento.

3.9 Análisis estadístico

Para realizar la validación de los datos se llevó a cabo un análisis de correlación, lo cual consistió en tomar todos los datos de rendimiento de campo de cada una de las áreas ya delimitadas previamente, y tomar todos los datos de índices de vegetación promedios en cada una de las áreas de estudio, con estos dos datos se pretendió aplicar una correlación múltiple para determinar si los datos de índices de vegetación y los de rendimiento tienen un grado de asociación alto o bajo según sea el caso, para así poder llegar a asociar el valor de un índice, con un determinado rendimiento.

3.10 Metodología de toma de datos

A continuación, se presenta la matriz operacional donde se muestra la metodología utilizada en la toma de datos.

Tabla 4. Matriz Operacional

Objetivos Específicos	Variable	Conceptual	Operacional	Instrumental
Evaluar los Indicadores de calidad y rendimiento en el pasto transvala utilizando el método tradicional de recopilación de datos de campo, como base comparativa para el análisis del rendimiento del cultivo.	Indicadores de calidad y rendimiento en el pasto transvala	Se refiere a las métricas y parámetros utilizados para evaluar la productividad y la salud del cultivo, así como su valor nutricional y económico	La cantidad de materia seca de pasto transvala. Proporción de la masa de las hojas respecto a la masa de los tallos del pasto transvala. Cantidad total de materia seca producida por hectárea.	Drones equipados con sensores multiespectrales
Aplicar la caracterización de la reflectancia espectral del cultivo de pasto transvala en distintos estados fenológicos, mediante la utilización de sensores multiespectrales, para el establecimiento de índices de vegetación que permitan una evaluación detallada y certera del crecimiento.	Caracterización de la reflectancia espectral del cultivo de pasto transvala en distintos estados fenológicos	Consiste en utilizar tecnología avanzada para estudiar cómo el pasto refleja la luz en diferentes etapas de su crecimiento	Imágenes en diferentes momentos del ciclo de crecimiento del cultivo, para la caracterización detallada de la reflectancia espectral en cada estado fenológico	Medidor Spad, Libreta, Bolígrafo. Imágenes del pasto transvala mediante drones equipados con sensores multiespectrales
Analizar el grado de asociación entre la reflectancia espectral y los resultados de rendimiento y calidad en campo, mediante un análisis de correlación, para la validación de modelo de predicción.	Grado de asociación entre la reflectancia espectral y los resultados de rendimiento y calidad en campo	Se refiere a la evaluación de las mediciones de reflectancia espectral, y su relación con los parámetros de rendimiento y calidad del pasto transvala.	Mediciones de la reflectancia espectral del cultivo Datos de campo sobre rendimiento: biomasa cosechada por hectárea y calidad. Análisis estadístico de correlación para examinar la relación entre las mediciones de reflectancia espectral y los datos de rendimiento y calidad.	Computadora, Software Qgis.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4. Análisis de resultados.

El análisis de los resultados sobre el cultivo de pasto Transvala mediante teledetección espacial implica varias etapas clave para interpretar adecuadamente los datos obtenidos y responder a las preguntas de investigación planteadas.

4.1 Análisis de indicadores de calidad

Los indicadores de calidad son medidas o variables específicas que se utilizan para evaluar y cuantificar diversos aspectos relacionados con la calidad de un producto, servicio o proceso. Estos indicadores proporcionan información objetiva y cuantitativa que permite realizar comparaciones, tomar decisiones informadas y realizar mejoras continuas.

4.1.1 Indicadores de calidad y rendimiento en el pasto transvala

Los indicadores de calidad y rendimiento del pasto son elementos fundamentales en la evaluación agronómica que permiten medir tanto la cantidad como la calidad de la producción de pasto. Estos indicadores son críticos para entender el éxito y la eficiencia de la gestión agrícola en términos de producción animal, conservación del suelo y manejo de recursos naturales. En el contexto del análisis se refleja a continuación los resultados obtenidos:

4.1.1.1 Relación hoja-tallo.

Los análisis de relación hoja-tallo se realizó con la ayuda de los equipos del laboratorio de la Universidad Técnica Nacional sede Cañas, donde se obtuvo los pesos secos de las muestras de hojas y las de tallos, el valor promedio de la relación

hoja-tallo a los 8 días antes de la cosecha total del ensayo fue de 1,1. Los valores específicos de este análisis se presentan en la siguiente Tabla 6.

Tabla 5. *Parámetro de calidad en función de relación Hoja-Tallo.*

Lote	H-T	Lote	H-T	Lote	H-T	Lote	H-T	Lote	H-T
A1	0.96	B1	3.96	C1	0.75	D1	1.45	E1	0.79
A2	1.03	B2	0.34	C2	0.95	D2	0.75	E2	0.68
A3	1.03	B3	1.08	C3	0.61	D3	2.07	E3	0.29
A4	0.61	B4	0.87	C4	0.48	D4	2.12	E4	1.20

Como se muestra en el punto 3.1.7 Parámetros de calidad, el forraje que se obtuvo como resultado es de excelente calidad, adecuado para ganado de alto rendimiento, como vacas lecheras en producción o animales jóvenes en crecimiento. Las hojas son más ricas en nutrientes y tienen una mayor digestibilidad.

4.1.1.2 Materia seca.

En la tabla 7, se detalla el porcentaje de materia seca se obtuvo con la utilización de los equipos de laboratorio de la Universidad Técnica Nacional sede Cañas, en donde se obtuvieron los datos de peso fresco y peso seco, el valor promedio de materia seca para las muestras fue de 39.84%.

Obando y Solano (2022). Indica que, para la evaluación de la calidad del heno basado en materia seca, se debe obtener los siguientes resultados:

Contenido Óptimo de MS: Para pacas de heno, se recomienda un contenido de materia seca de al menos 85%. Esto minimiza el riesgo de moho y asegura una mejor conservación.

Análisis Comparativo: Comparar los valores obtenidos con estándares y rangos eficientes para asegurar que el pasto transvala cosechado tiene una calidad adecuada.

Tabla 6. *Parámetro de calidad en función de la Materia Seca (MS).*

Lote	% MS	Lote	% MS	Lote	% MS	Lote	% MS	Lote	% MS
A1	56.91	B1	30.74	C1	37.33	D1	34.83	E1	37.91
A2	59.06	B2	39.46	C2	47.83	D2	36.97	E2	34.83
A3	34.6	B3	38.16	C3	34.67	D3	36.68	E3	35.65
A4	47.85	B4	41.58	C4	38.56	D4	33.75	E4	39.43

Los valores de materia seca se encuentran dentro del nivel promedio registrado en estudios anteriores para el cultivo de pasto transvala tales como los reportados por Morales y Acuña (2009) en la revista alcances tecnológicos, en donde se logra apreciar que el porcentaje de materia seca está estrictamente relacionado con la cantidad de nitrógeno por ha aplicado. Cabe destacar que el pasto evaluado es de un rebrote a los 95 días, por lo cual algunas condiciones de calidad tienden a bajar ya que pueden llegar a tener tejidos más lignificados.

4.2 Rendimiento.

La medición de rendimiento se obtuvo en campo, a los 45 y 70 días se obtuvo de manera parcial, utilizando un cuadro de 25 cm x 25 cm, donde se lanzó aleatoriamente en las parcelas y se tomó la muestra en cada una de ellas; a los 95 días se realizó mediante el uso de maquinaria (cortador, acordonador y embaladora), donde se logró obtener los resultados de la siguiente manera. La tabla 8, muestra los datos obtenidos.

Tabla 7. Rendimiento parcial y total de los bloques evaluados.

Tratamiento	Días de evaluación		
	45	70	95
	Ton/ha	Ton/ha	Ton/ha 95
A1	1,72	7,00	10,37
A2	1,94	6,41	10,37
A3	2,17	7,70	12,10
A4	3,56	5,50	9,79
B1	1,69	4,80	9,79
B2	1,96	5,60	9,22
B3	2,26	6,11	8,64
B4	2,86	5,88	6,91
C1	1,91	6,90	9,79
C2	2,34	4,10	10,37
C3	2,17	6,60	9,22
C4	2,41	7,00	5,18
D1	2,00	6,80	8,06
D2	2,38	7,30	7,49
D3	2,76	5,70	5,76
D4	2,29	3,23	4,03
E1	2,89	5,20	10,37
E2	2,91	5,10	9,79
E3	2,28	5,15	9,22
E4	3,02	6,70	8,64

4.2.1 Análisis del rendimiento por tratamiento y días de evaluación

Días 45:

Los tratamientos que muestran un rendimiento relativamente alto a los 45 días incluyen A4 (3.56 Ton/ha), E1 (2.89 Ton/ha), E2 (2.91 Ton/ha) y E4 (3.02 Ton/ha).

Los tratamientos B1 (1.69 Ton/ha) y D4 (2.29 Ton/ha) muestran rendimientos más bajos en esta etapa inicial.

Días 70:

En el día 70, los tratamientos A3 (7.70 Ton/ha), D2 (7.30 Ton/ha), A2 (6.41 Ton/ha) y E4 (6.70 Ton/ha) muestran los rendimientos más altos.

Los tratamientos B4 (5.88 Ton/ha), D3 (5.70 Ton/ha) y E3 (5.15 Ton/ha) muestran un rendimiento más moderado en comparación.

Días 95:

A los 95 días, los tratamientos A3 (12.10 Ton/ha), C2 (10.37 Ton/ha), A1 (10.37 Ton/ha) y E1 (10.37 Ton/ha) muestran los rendimientos más altos.

Los tratamientos D4 (4.03 Ton/ha), D3 (5.76 Ton/ha) y C4 (5.18 Ton/ha) muestran los rendimientos más bajos en esta etapa final.

Existe una variabilidad significativa en el rendimiento del pasto trasvala entre los diferentes tratamientos y períodos de evaluación. Algunos tratamientos muestran una capacidad superior para producir materia seca en todas las etapas evaluadas. Se observa un aumento general en el rendimiento a medida que avanza

el tiempo de evaluación, lo cual es esperado debido al crecimiento continuo de la planta.

Basado en estos datos y lo que se indica en la página 45, los tratamientos A3, E1, y E4 muestran consistentemente buenos resultados en términos de rendimiento en las diferentes etapas evaluadas.

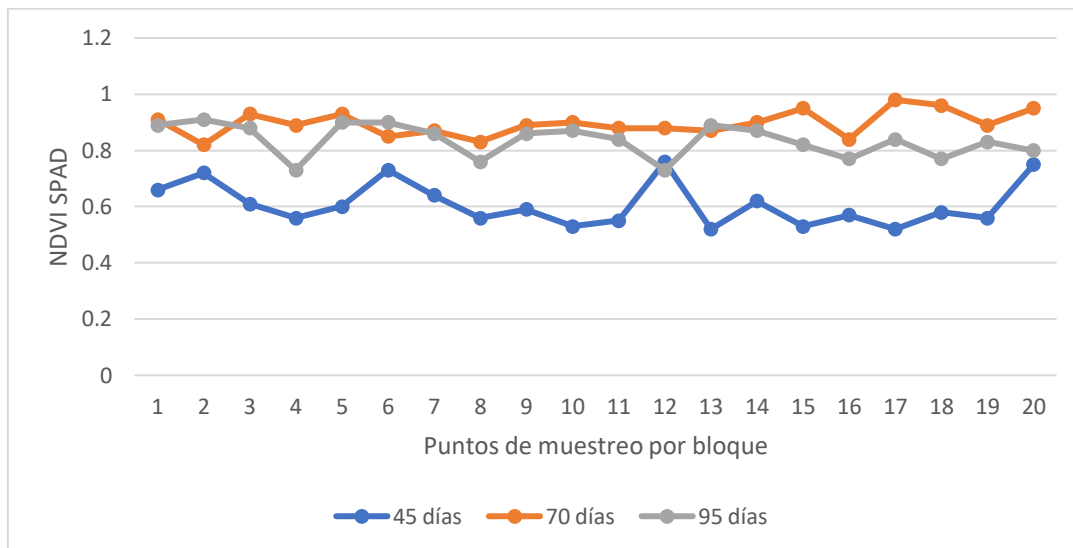
4.3 Caracterización de la reflectancia espectral del cultivo de pasto transvala en distintos estados fenológicos.

Este proceso de caracterización implica la recolección de datos espectrales mediante el uso de sensores multiespectrales, como los montados en drones o satélites, que capturan información en varias bandas del espectro electromagnético (visible e infrarrojo cercano). Estos datos fueron analizados para determinar la variación de la reflectancia del pasto en función de su estado fenológico. A continuación, se presentan los resultados:

4.3.1 Clorofila.

La medición de clorofila se obtuvo en tiempo real en el campo, con el uso del SPAD propiedad de la Universidad Técnica Nacional sede Cañas, los valores promedio de índice medición obtenidos a los 45 días fue de 0.61, a los 70 días los valores promedio fueron de 0.89 y a los 95 días fue de 0.84.

Figura 8. Medición de clorofila



Se pudo observar que los valores de clorofila más altos en el pasto transvala se encuentran a los 70 días con un valor de 0.89, los valores altos de clorofila según la literatura están ligados a niveles altos de proteína cruda, por lo que se puede analizar que la mayor calidad nutricional del pasto la podemos encontrar alrededor de los 70 días.

Otro aspecto que se ve beneficiado por altos niveles de clorofila es la reflectancia, esta debe darnos una imagen de mayor representatividad del estado del cultivo, principalmente con algunos índices que reflejaban gracias a la cantidad de clorofila en la planta.

4.3.2 Análisis de suelo del ensayo (ver anexo 1)

El resultado del análisis de suelo se basó en la tabla de “análisis de suelos y su interpretación” del ingeniero Eloy Molina del Centro de Investigaciones Agronómicas donde se presenta un suelo con una alta acidez, con niveles altos de Fe, el P se encuentra muy bajo y debido a la acidez se estima que la gran mayoría de elementos presentan fijados. El K se encuentra en un buen nivel y otros elementos como el Ca y Mg se encuentran en niveles promedio

Para contrarrestar los efectos de la carencia y la acidez del suelo el productor aplica solubilizadores de P biológicos a través de bacterias como pseudomonas flourenses y además se realizan altas dosis de materia orgánica y microorganismos presentan en los productos biológicos utilizados.

Razón por la cual el suelo no es una variable a considera para analizar un bajo rendimiento ya que se considera que a pesar de su carencia gracias a las correcciones realizadas por el productor no influyen.

4.3.3 Planos de índice de vegetación.

Con la ayuda del Software Qgis se generaron los planos de índices de vegetación, a los 45,70 y 95 días, utilizando los datos de reflectancia obtenidos de las imágenes con el drone y procesados en la calculadora raster para la obtención de la combinación de bandas.

En las siguientes figuras se presentan los mapas de los índices calculados a los 45, 70 y 95 días después de la cosecha.

4.3.3.1 Índice de vegetación NDRE a 45 días.

Figura 9. Índice de vegetación BNDVI (45 días).

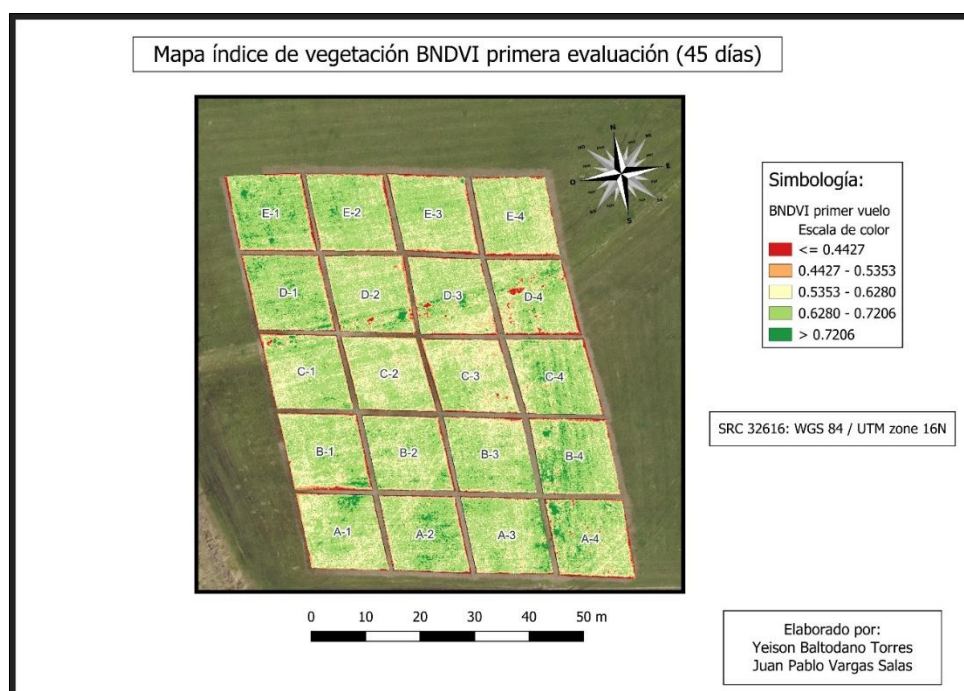


Figura 10. Índice de vegetación GNDVI (45 días).

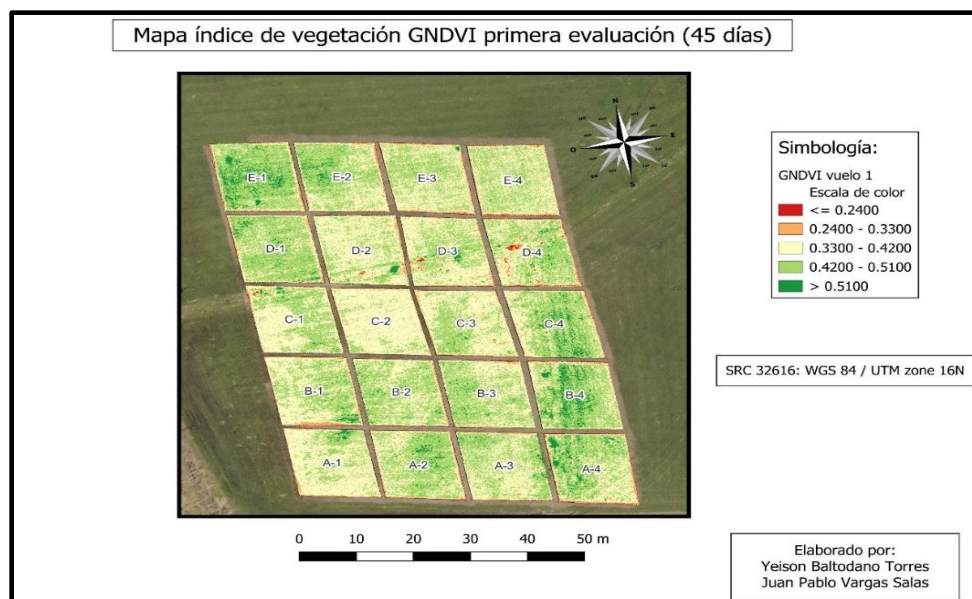


Figura 11. Índice de vegetación LCI (45 días).

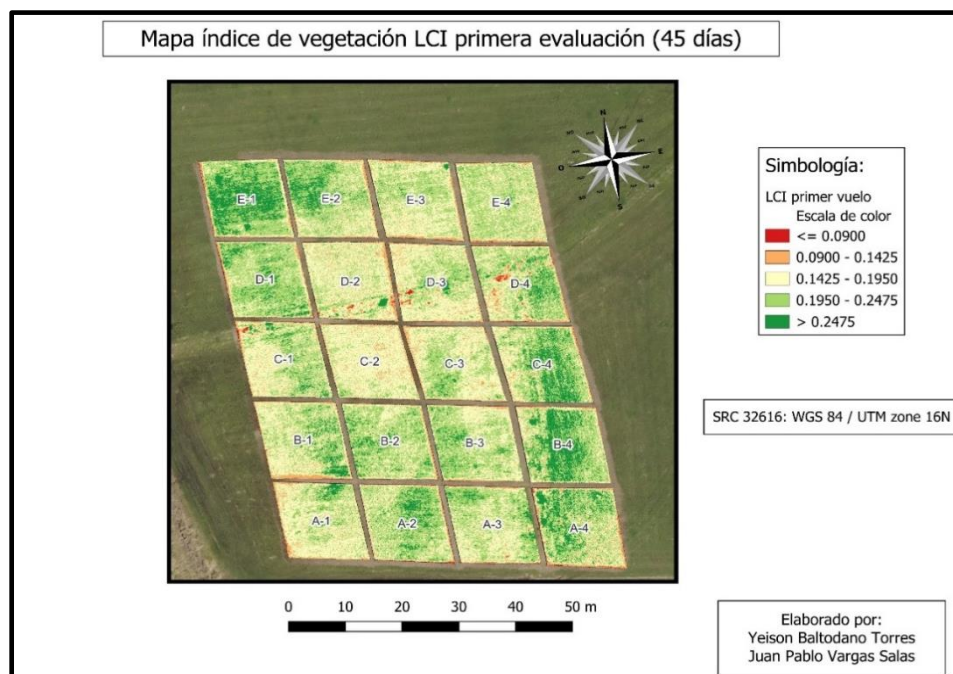


Figura 12. Índice de vegetación MCARI (45 días).

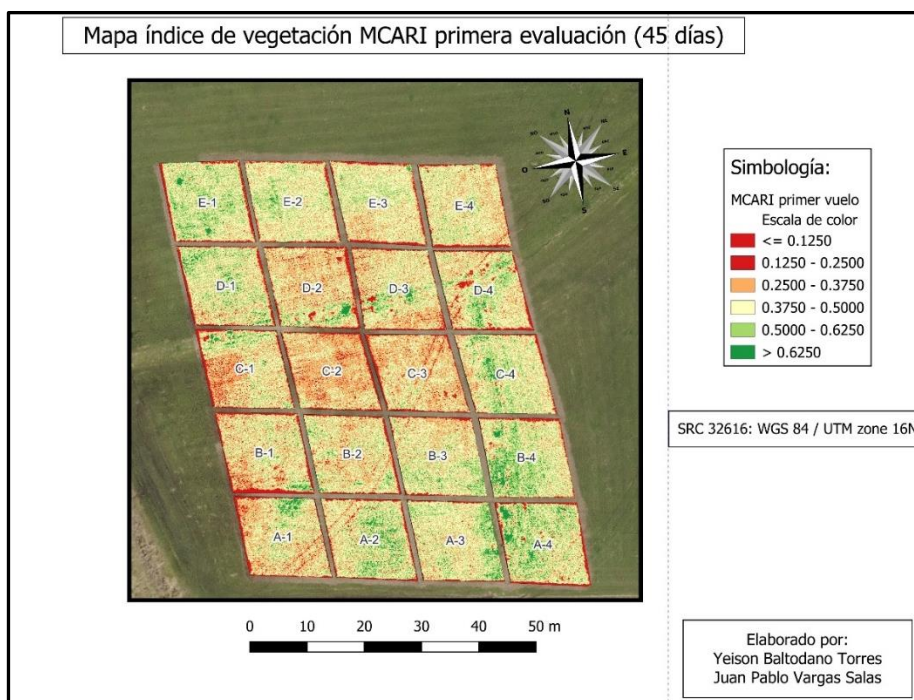


Figura 13. Índice de vegetación NDRE (45 días).

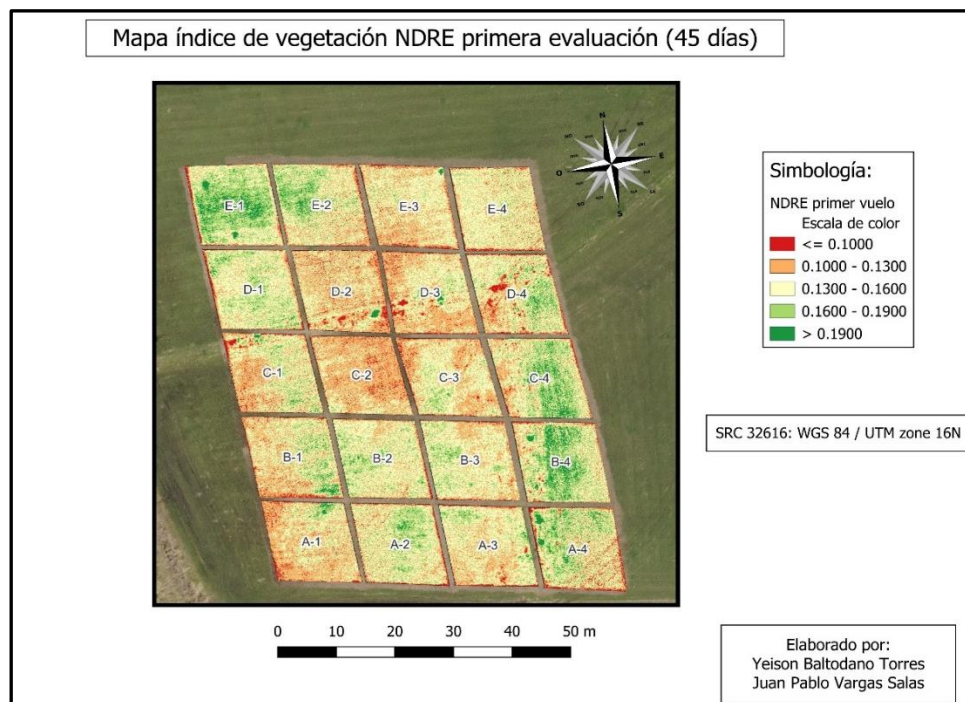
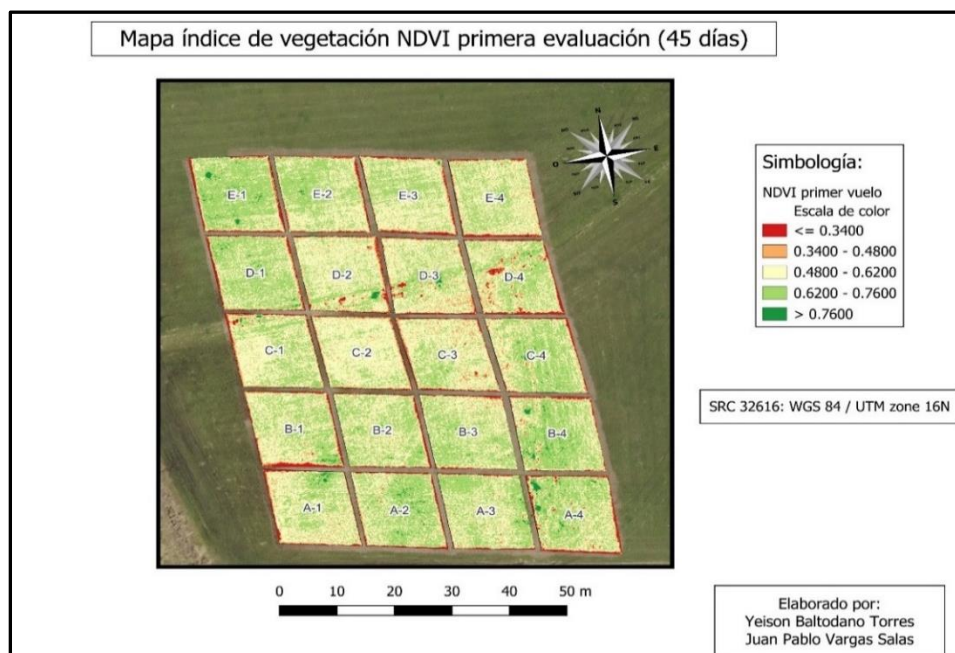


Figura 14. Índice de vegetación NDRE (45 días).



El análisis de los resultados revela que la reflectancia a los 45 días no coincide completamente con lo observado directamente en el campo, especialmente debido a la baja biomasa presente. Esto se refleja visualmente en la aparición de áreas con tonalidades rojizas, indicativas de una menor cantidad de vegetación. Esta discrepancia dificulta realizar una comparación precisa entre las mediciones de reflectancia y las condiciones reales del pasto transvala en ese momento específico del ciclo de crecimiento.

Entre los índices espectrales evaluados, el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) emerge como el más representativo, mostrando una predominancia de tonalidades verdes en los valores registrados. Específicamente, la mayoría de los bloques de cultivo exhiben valores de NDVI que oscilan entre

0.62 y 0.76. Estos rangos indican niveles saludables de vegetación activa y densidad foliar, corroborando visualmente el vigor del pasto transvala en esas áreas.

Este análisis subraya la importancia del NDVI como una herramienta efectiva para evaluar el estado y la salud del cultivo, superando las limitaciones visuales de la reflectancia simple y proporcionando una métrica cuantitativa que facilita la comparación objetiva entre diferentes áreas y estados fenológicos del pasto transvala. Este enfoque es crucial para una gestión agrícola informada y eficaz, permitiendo ajustes oportunos en las prácticas de manejo para maximizar el rendimiento y la calidad del cultivo.

4.3.3.2 Índice de vegetación NDVI a 70 días.

Figura 15. Índice de vegetación BNDVI (70 días).

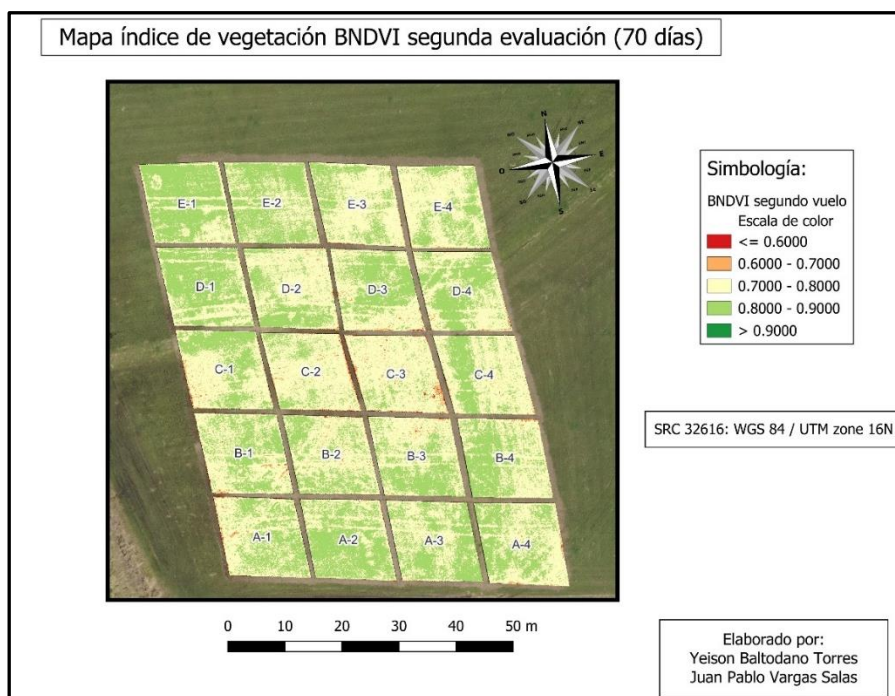


Figura 16. Índice de vegetación GNDVI (70 días).

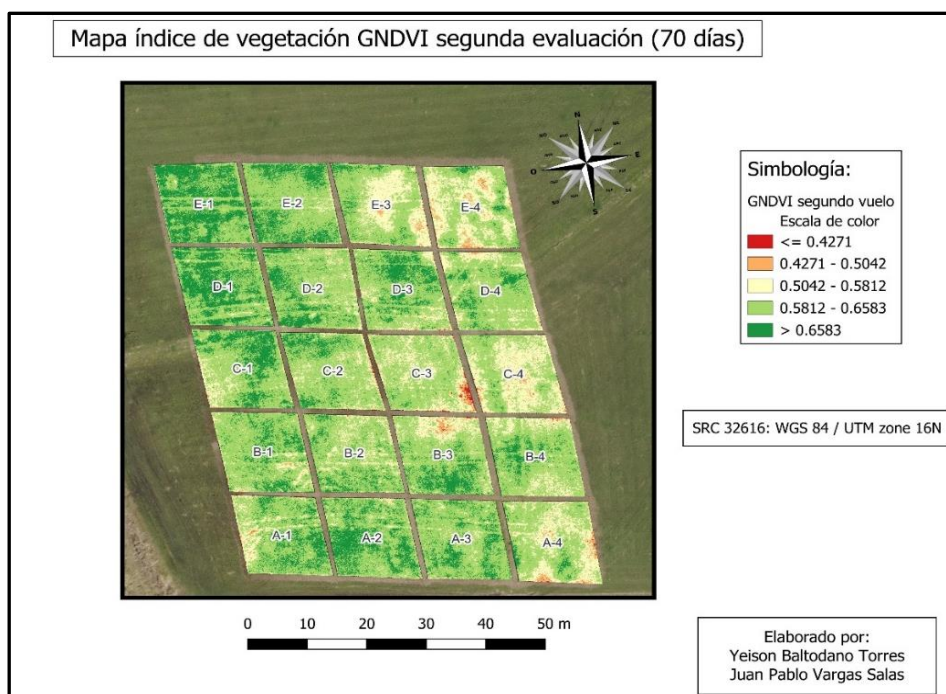


Figura 17. Índice de vegetación LCI (70 días).

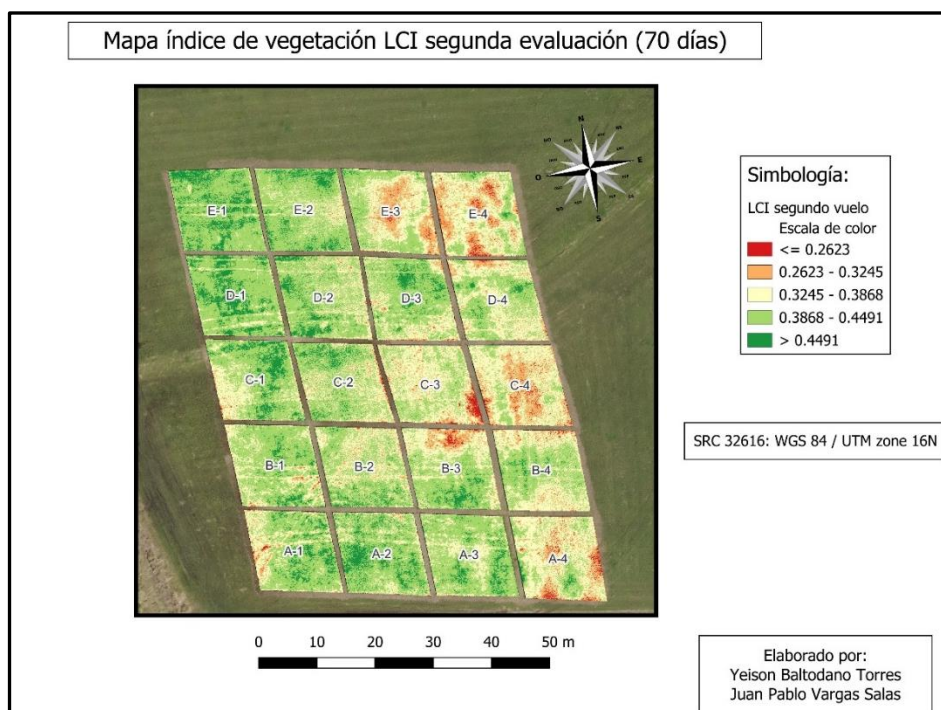


Figura 18. Índice de vegetación MCARI (70 días).

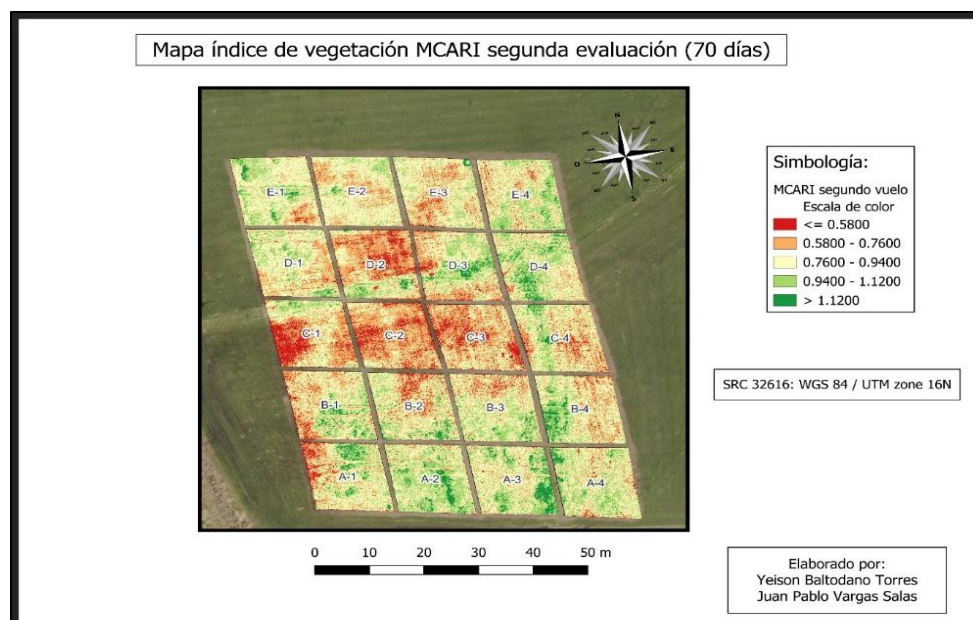


Figura 19. Índice de vegetación NDRE (70 días).

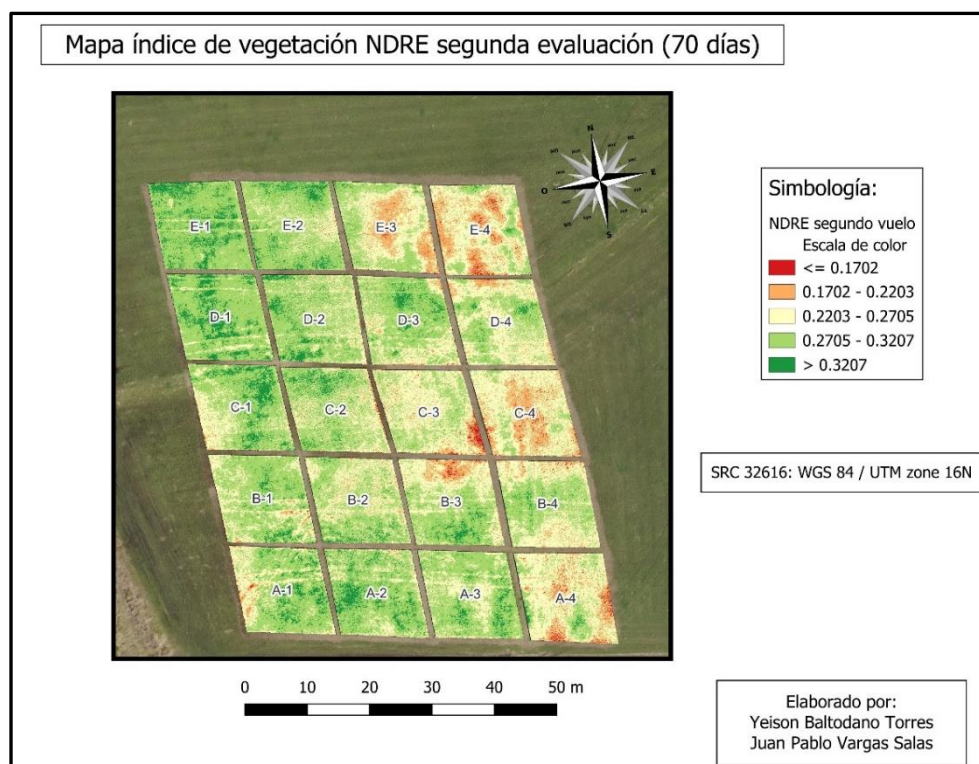
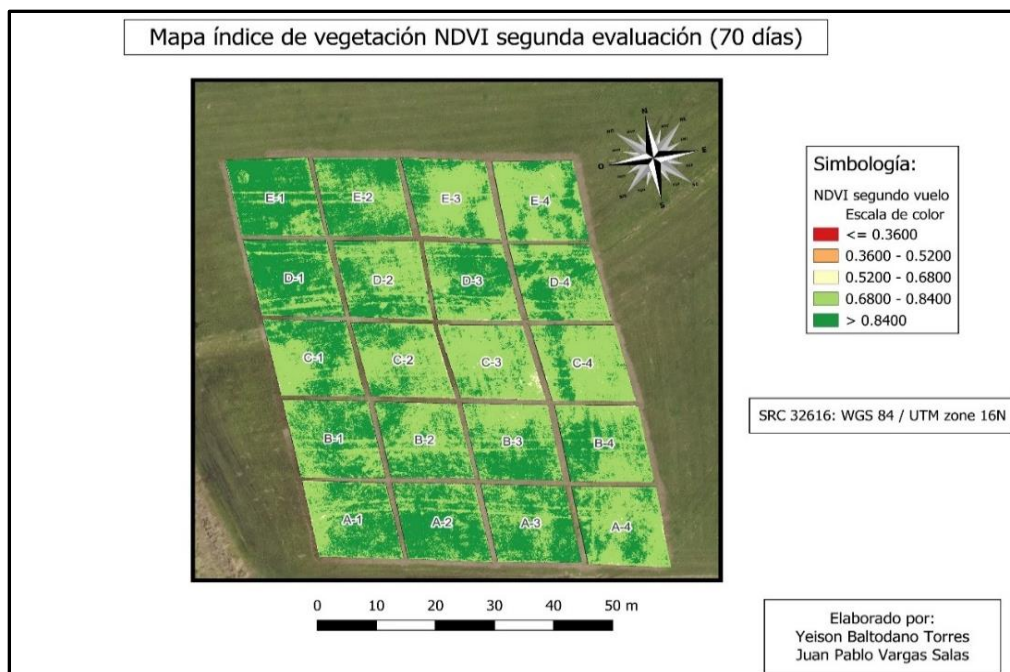


Figura 20. Índice de vegetación NDVI (70 días).



El análisis de las imágenes calculadas por medio de algebra de bandas a los 70 días mostró a nivel visual mayor uniformidad y una caracterización visual cercana a observada en campo. Los valores cercanos a 1 en los índices indican tonalidades de verde oscuro, lo cual sugiere una mayor densidad y salud de la vegetación en esas áreas específicas.

Al observar el NDVI, se destaca la homogeneidad en la reflectancia de los bloques A1, A2 y A3, los cuales mostraron rendimientos considerables de 7, 6.41 y 7.70 toneladas por hectárea, respectivamente. Esta consistencia en la reflectancia sugiere una biomasa saludable y una población vegetal vigorosa en estos bloques, lo cual se correlaciona directamente con los altos rendimientos obtenidos a nivel de campo.

Sin embargo, es importante señalar que la interpretación visual de la reflectancia no siempre refleja con precisión los datos de rendimiento obtenidos en campo. Por ejemplo, el bloque E1 muestra una coloración verde oscuro uniforme en el índice NDVI a los 70 días, indicativo de buena biomasa y salud del cultivo. No obstante, el rendimiento registrado en este bloque es de 5.20 toneladas por hectárea, inferior al de los bloques A1, A2 y A3 mencionados anteriormente. Esta discrepancia sugiere que la relación entre la reflectancia y el rendimiento puede verse influenciada por otros factores agronómicos como la densidad de siembra, la gestión del agua y los nutrientes, que pueden variar incluso dentro de áreas visualmente similares en reflectancia.

Finalmente, aunque los índices de vegetación como NDVI y GNDVI proporcionan una herramienta valiosa para evaluar la salud y el rendimiento del pasto transvala, es esencial complementar el análisis visual con datos cuantitativos obtenidos en campo para una interpretación más completa y precisa. Esto permite una mejor comprensión de los factores que afectan el rendimiento agronómico y facilita la toma de decisiones informadas en la gestión del cultivo.

4.3.3.3 Índice de vegetación BNDVI a 95 días.

Figura 21. Índice de vegetación BNDVI (95 días).

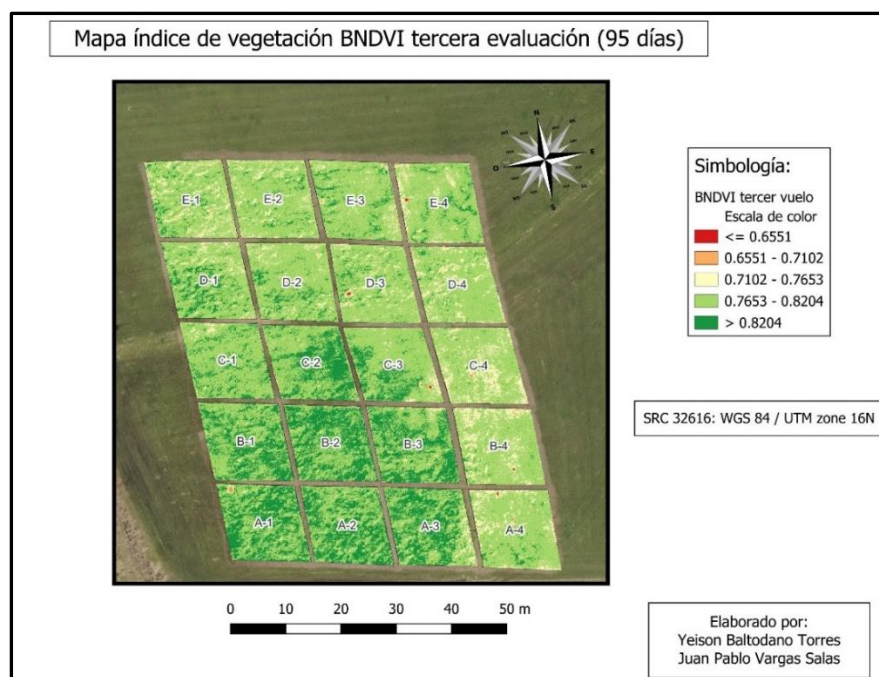


Figura 22. Índice de vegetación GNDVI (95 días).

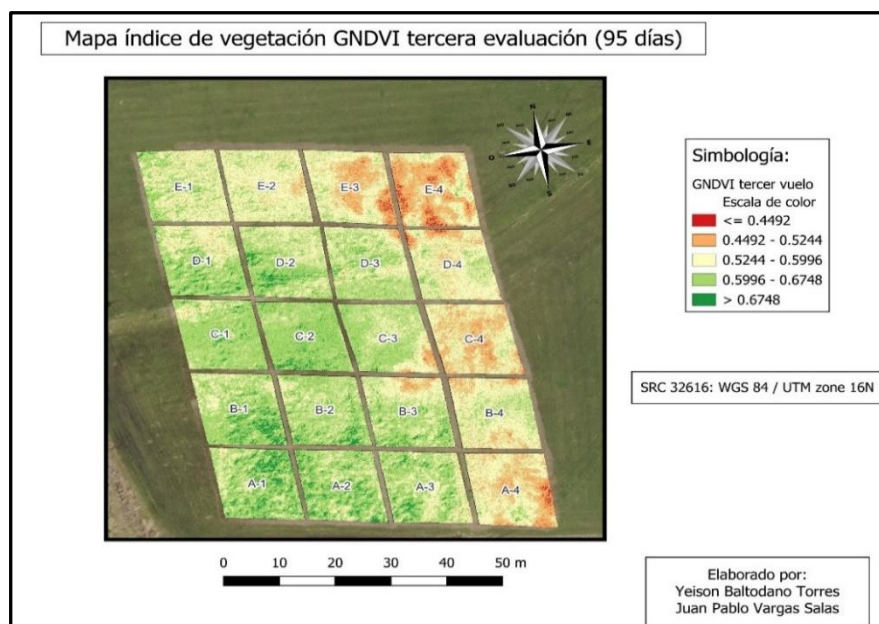


Figura 23. Índice de vegetación LCI (95 días).

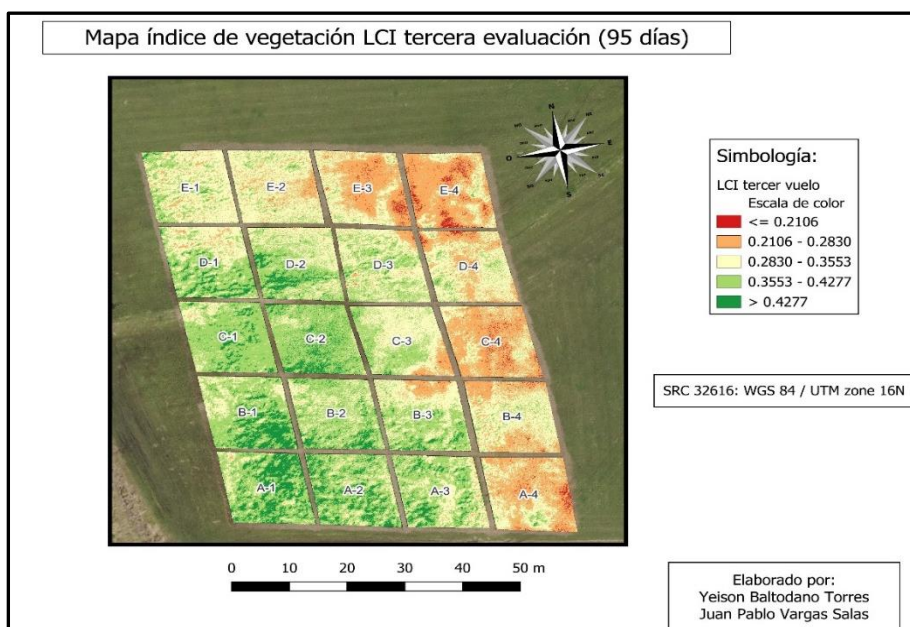


Figura 24. Índice de vegetación MCARI (95 días).

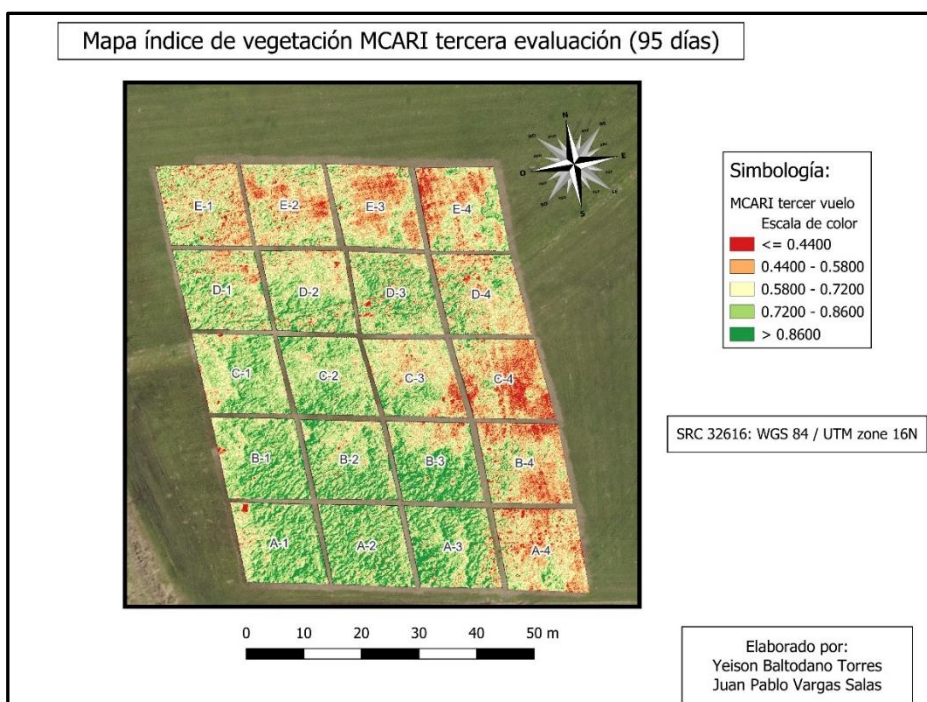


Figura 25. Índice de vegetación NDRE (95 días).

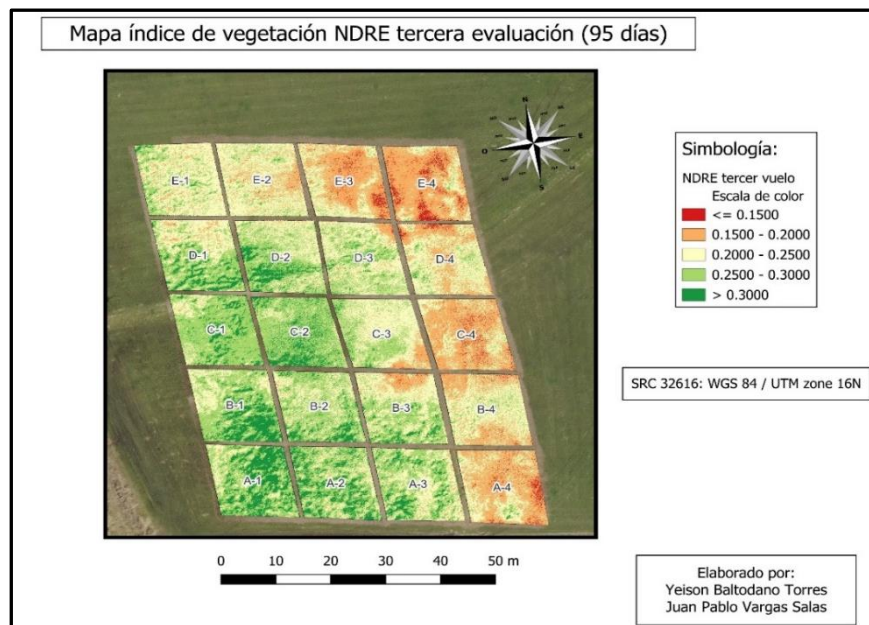
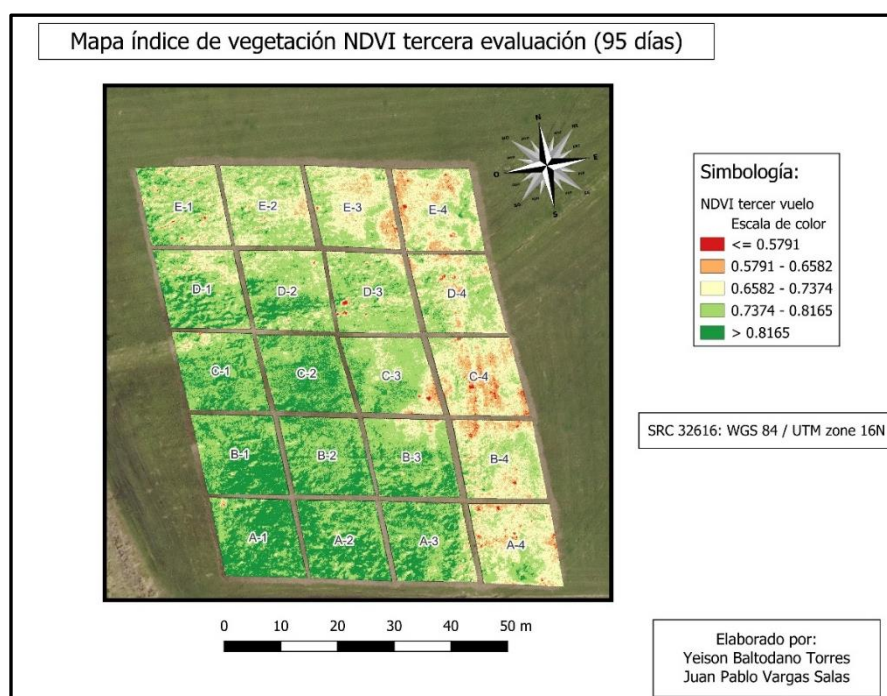


Figura 26. Índice de vegetación NDVI (95 días).



El mejor análisis visual se realizó con el NDVI a los 95 días. En las imágenes obtenidas mediante el uso de drones, se pueden apreciar diferencias de rendimiento claramente marcadas al asociar la coloración de la reflectancia con los datos de rendimiento. Por ejemplo, uno de los lotes con tonalidades más rojizas, el lote C4, presentó una coloración distintiva que reflejaba un estado de salud y biomasa menos favorable en comparación con otros lotes. Esta observación fue coherente con los datos de rendimiento, ya que al final de la cosecha, el lote C4 registró el rendimiento más bajo con solo 5.18 toneladas por hectárea.

La validez de estos análisis se confirmó mediante una correlación significativa entre los datos de reflectancia y los datos de rendimiento en campo. Esto sugiere que las imágenes multiespectrales, específicamente el índice NDVI, pueden ser una herramienta eficaz para predecir el rendimiento del pasto Transvala. La capacidad del NDVI para distinguir variaciones en la biomasa y la salud de las plantas proporciona a los productores una visión temprana y precisa del rendimiento potencial, permitiendo tomar decisiones informadas sobre el manejo del cultivo.

Este enfoque no solo valida la utilidad del NDVI para la monitorización del pasto Transvala, sino que también destaca la importancia de continuar perfeccionando las técnicas de análisis y muestreo para mejorar la precisión y la fiabilidad de las predicciones de rendimiento. Con un seguimiento adecuado y ajustes en las metodologías de muestreo, es posible maximizar la eficiencia y productividad de los cultivos mediante el uso de tecnología avanzada de imágenes multiespectrales.

4.4 Grado de asociación entre la reflectancia espectral y los resultados de rendimiento y calidad en campo.

4.4.1 Análisis de correlación.

Se realizó la correlación múltiple, con la ayuda del programa Excel para conocer la relación que existe entre los datos calculados de campo, el índice del SPAD y los índices de vegetación obtenidos de imágenes con dron.

Asimismo, se generaron modelos en ecuaciones que nos permiten predecir valores en función de las variables previamente establecidas, además se obtiene el R^2 para cada uno de los índices aplicados en las diferentes etapas del cultivo analizadas. El índice de vegetación que presentó mejor correlación fue el NDVI con 0.95 a los 95 días después de cosecha.

Tabla 8. Correlación a 45 días después de cosecha.

Índice	R ²	F	F Crítico	Modelo
LCI	0.34	1.15	0.34	$LCI = 0.15 + 0.01 * Rend\ C. + 0.03 * Spad$
MCARI	0.44	2.04	0.16	$MCARI = 0.28 + 0.03 * Rend\ C. + 0.10 * Spad$
NDRE	0.36	1.27	0.31	$NDRE = 0.11 + 0.01 * Rend\ C. + 0.02 * Spad$
NDVI	0.25	0.55	0.59	$NDVI = 0.54 + 0.01 * Rend\ C. + 0.05 * Spad$
BNDVI	0.13	0.14	0.87	$BNDVI = 0.62 + 0.01 * Rend\ C. + 0.01 * Spad$
GNDVI	0.3	0.86	0.44	$GNDVI = 0.38 + 0.01 * Rend\ C. + 0.02 * Spad$

Tabla 9. Correlación a 70 días después de cosecha.

Índice	R2	F	F Crítico	Modelo
LCI	0.27	0.65	0.53	$LCI = 0.24 + 0.01 * Rend\ C. + 0.16 * Spad$
MCARI	0.17	0.26	0.77	$MCARI = 1.11 + 0.01 * Rend\ C. + -0.29 * Spad$
NDRE	0.28	0.70	0.51	$NDRE = 0.15 + 0.01 * Rend\ C. + 0.13 * Spad$
NDVI	0.17	0.24	0.79	$NDVI = 0.78 + 0.01 * Rend\ C. + 0.05 * Spad$
BNDVI	0.05	0.02	0.98	$BNDVI = 0.78 + 0.01 * Rend\ C. + 0.01 * Spad$
GNDVI	0.26	0.63	0.54	$GNDVI = 0.49 + 0.01 * Rend\ C. + 0.14 * Spad$

Tabla 10. Correlación a 95 días después de cosecha.

Índice	R2	F	F Crítico	Modelo
LCI	0.93	58.91	2.27E-08	$LCI = -0.17 + 0.01 * Rend\ C. + 0.49 * Spad$
MCARI	0.92	45.86	1.41E-07	$MCARI = -0.26 + 0.02 * Rend\ C. + -0.97 * Spad$
NDRE	0.93	52.14	5.58E-08	$NDRE = 0.15 + 0.01 * Rend\ C. + 0.13 * Spad$
NDVI	0.95	78.73	2.54E-09	$NDVI = 0.26 + 0.01 * Rend\ C. + 0.52 * Spad$
BNDVI	0.87	26.97	5.32E-06	$BNDVI = 0.63 + 0.01 * Rend\ C. + 0.20 * Spad$
GNDVI	0.92	46.99	1.19E-07	$GNDVI = 0.21 + 0.01 * Rend\ C. + 0.36 * Spad$

Al analizar los datos de la correlación, se puede observar que las imágenes tomadas con drone si se pueden utilizar para predecir y estimar el rendimiento en el cultivo de pasto transvala con un alto grado de confiabilidad, todos los índices de vegetación utilizados a los 95 días muestran un R^2 mayor a 0.90 lo cual es muy alto para un tipo de estudio como este.

La correlación a los 45 y 70 días es muy baja con un R^2 que no llega ni a 0.5 en ninguno de los índices aplicados, sin embargo, se puede atribuir a factores como la baja biomasa y que los datos de cosecha son obtenidos mediante un muestreo parcial, lo cual no va a reflejar al cien por ciento el rendimiento real del bloque si no que es un resultado de una extrapolación del área.

4.4.2 Dispersión.

Se realizó un análisis de la dispersión de los datos de rendimiento de campo versus el índice de vegetación obtenido de las imágenes con el drone, para así observar líneas de tendencia entre los datos, la mayor asociación de los datos se observa a los 95, siendo el NDVI el índice que presenta más asociación a la hora de aumentar los valores.

4.5 Análisis detallado sobre la interpretación de imágenes multiespectrales en cultivos a los 45.

4.5.1 Observaciones iniciales

A los 45 días del ciclo de cultivo, las imágenes multiespectrales capturadas sobre los lotes con alto rendimiento mostraban predominantemente colores rojizos.

Normalmente, estos tonos rojizos en imágenes multiespectrales se asocian con áreas de baja biomasa y plantas no saludables. Sin embargo, esta interpretación no coincidía con la realidad observada en campo, donde se detectaba un alto rendimiento en los mismos lotes.

4.5.2 Discrepancia observada

La discrepancia entre las imágenes multiespectrales y las observaciones de campo puede atribuirse a varios factores críticos:

4.5.2.1 Tamaño del pasto y biomasa: A los 45 días, el pasto aún no había alcanzado un tamaño considerable y la cantidad de biomasa presente era baja. Esta falta de desarrollo vegetal significativo dificulta la capacidad de las imágenes multiespectrales para diferenciar claramente entre el suelo desnudo y el cultivo en crecimiento. La biomasa insuficiente contribuye a la confusión en la interpretación de los datos espectrales, dado que las firmas espectrales de suelo y plantas jóvenes pueden superponerse.

4.5.2.2 Resolución espacial y altura del vuelo: Los drones utilizados volaban a una altura de 60 metros. Aunque esta es una altura relativamente baja que generalmente proporciona una resolución espacial alta, en el caso de cultivos con poca biomasa, la discriminación entre suelo y plantas sigue siendo problemática. La resolución espacial alta es esencial para capturar detalles finos, pero la presencia de vegetación esporádica y de baja densidad puede no ser suficiente para proporcionar una firma espectral distintiva.

4.5.2.3 Interpretación espectral: Los colores rojizos en las imágenes multiespectrales suelen indicar estrés hídrico, deficiencias nutricionales o enfermedades en las plantas. No obstante, en este caso, la coloración rojiza podría estar reflejando simplemente la exposición del suelo debido a la cobertura insuficiente del cultivo, más que problemas de salud en las plantas.

Los siguientes gráficos muestran la dispersión a los 45 días:

4.5.2.1 Gráficos de dispersión a los 45 días.

Figura 27. Dispersión índice LCI 45 días.

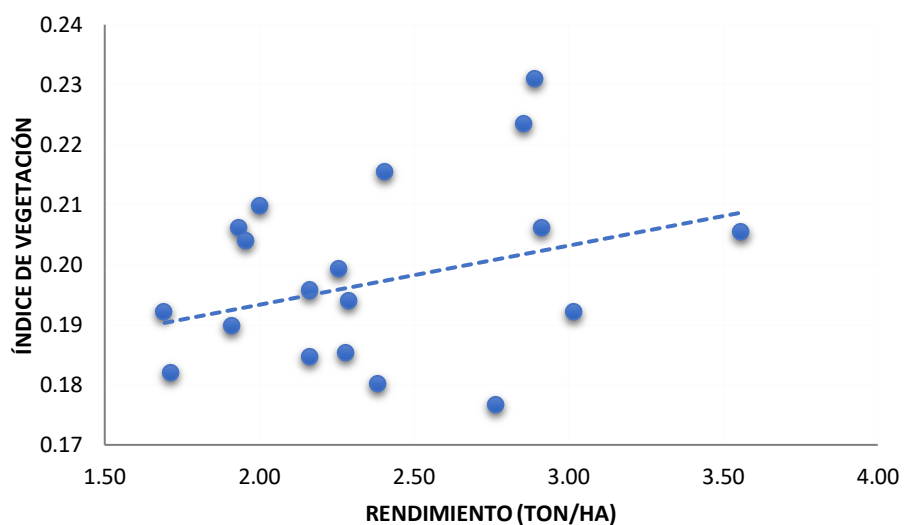


Figura 28. *Dispersión índice MCARI 45 días.*

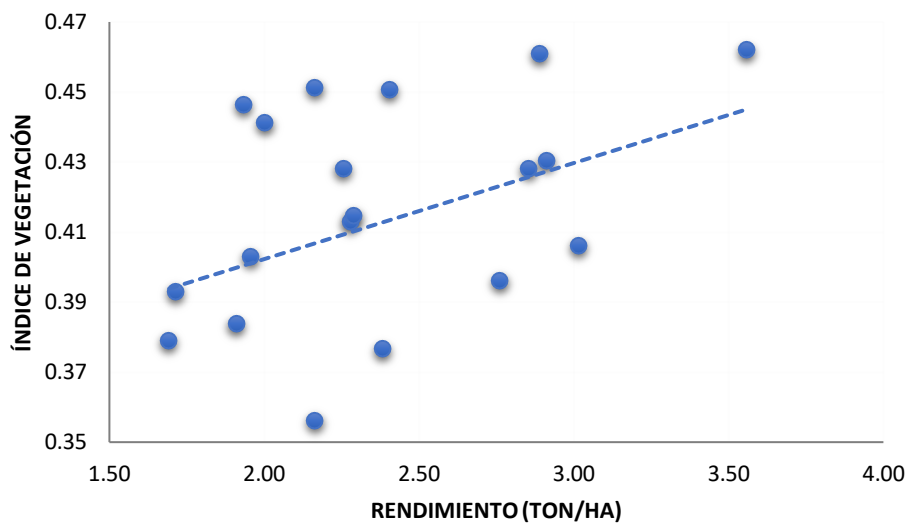


Figura 29. *Dispersión índice NDRE 45 días*

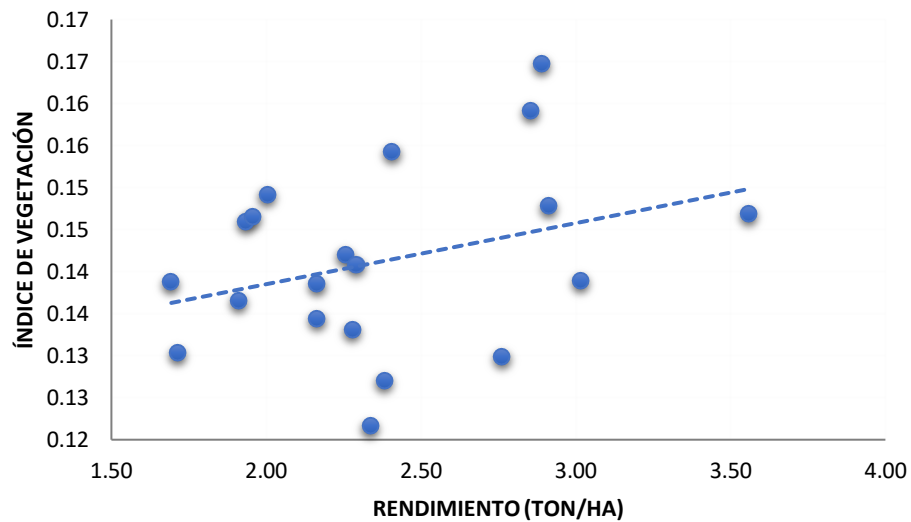


Figura 30. Dispersión índice GNDVI 45 días.

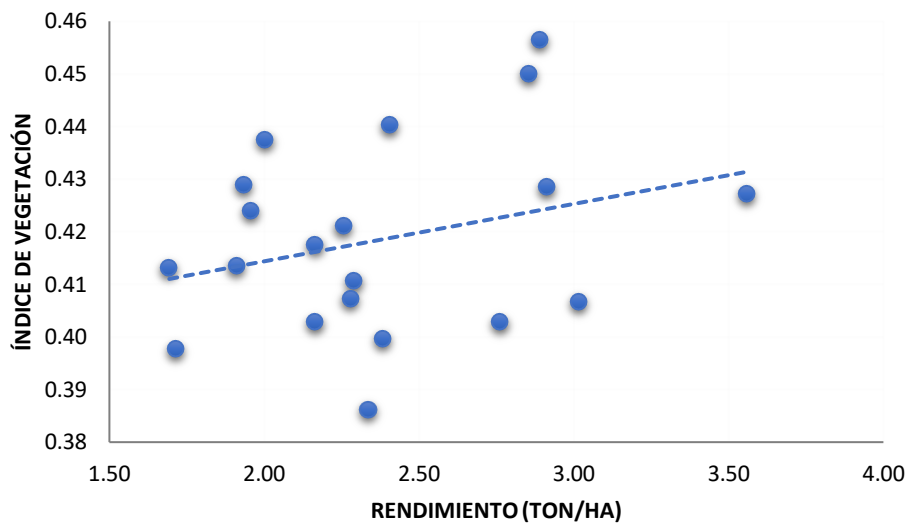


Figura 31. Dispersión índice BNDVI 45 días.

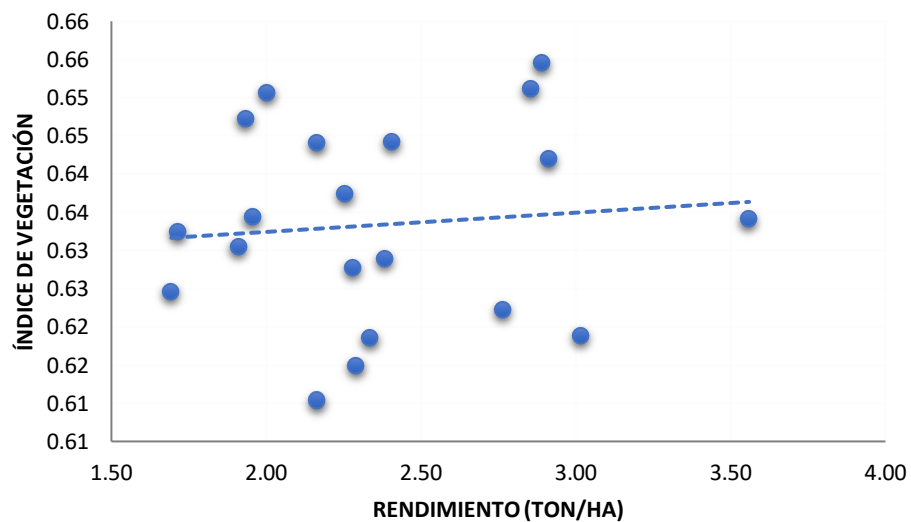
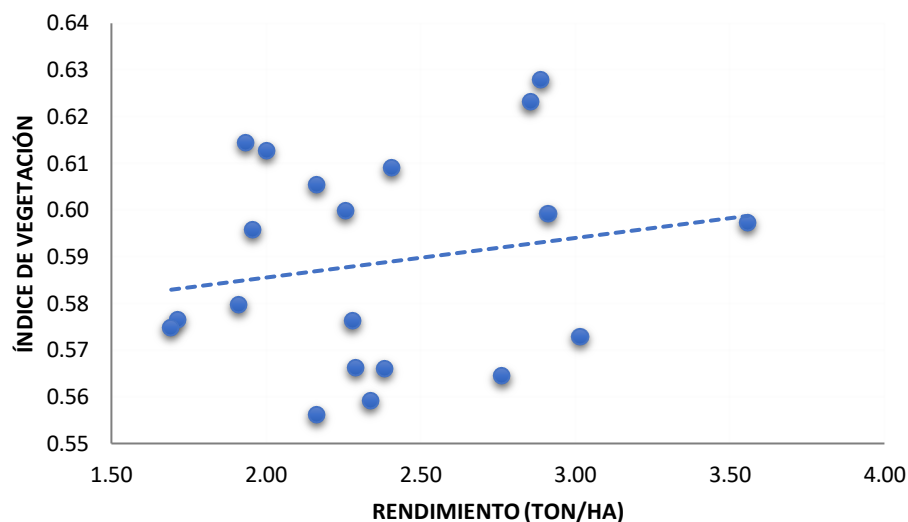


Figura 32. Dispersión índice NDVI 45 días.



4.6 Análisis detallado sobre la interpretación de imágenes multiespectrales en cultivos a los 70 días.

4.6.1 Observaciones a los 70 días

A los 70 días del ciclo de cultivo, las imágenes multiespectrales capturadas comenzaron a mostrar una mayor variabilidad en los colores, reflejando una etapa más avanzada del crecimiento del pasto. En esta fase, se observaron colores rojizos en algunas áreas, aunque las observaciones de campo indicaban que las plantas estaban en mejor estado de salud comparado con lo observado a los 45 días.

4.6.2 Discrepancia observada

4.6.2.1 Tamaño del pasto y biomasa: A los 70 días, el pasto ha crecido significativamente en comparación con los 45 días, pero puede no haber

alcanzado su máxima biomasa. Este crecimiento intermedio puede seguir presentando desafíos para la discriminación clara entre suelo y cultivo. La biomasa aún en desarrollo puede contribuir a interpretaciones espectrales ambiguas.

4.6.2.2 Resolución espacial y altura del vuelo: A una altura de 60 metros, los drones siguen proporcionando una resolución espacial alta. Sin embargo, la variabilidad en la densidad de la biomasa a esta etapa puede llevar a errores en la interpretación si algunas áreas aún muestran suelo expuesto.

4.6.2.3 Interpretación espectral: Los colores rojizos en esta etapa pueden estar asociados a factores de estrés transitorio, como cambios en la disponibilidad de nutrientes o agua, que no necesariamente reflejan problemas graves de salud del cultivo, sino condiciones temporales de estrés que no afectan significativamente el rendimiento final.

4.6.3 Evaluaciones a los 70 días

1. Se debe continuar con el monitoreo regular para capturar la evolución del cultivo, especialmente en etapas críticas de crecimiento.
2. Además, es necesario ajustar los modelos espectrales para considerar la mayor biomasa y la densidad de plantas presentes en esta etapa, mejorando así la precisión en la identificación de áreas de estrés real.
3. Es importante emplear sensores adicionales para capturar información complementaria que pueda ayudar a discernir entre el suelo y las plantas con mayor biomasa.

A continuación, se presentan los gráficos de dispersión a los 70 días

4.6.3.1 Gráficos de dispersión a los 70 días.

Figura 33. *Dispersión índice LCI 70 días.*

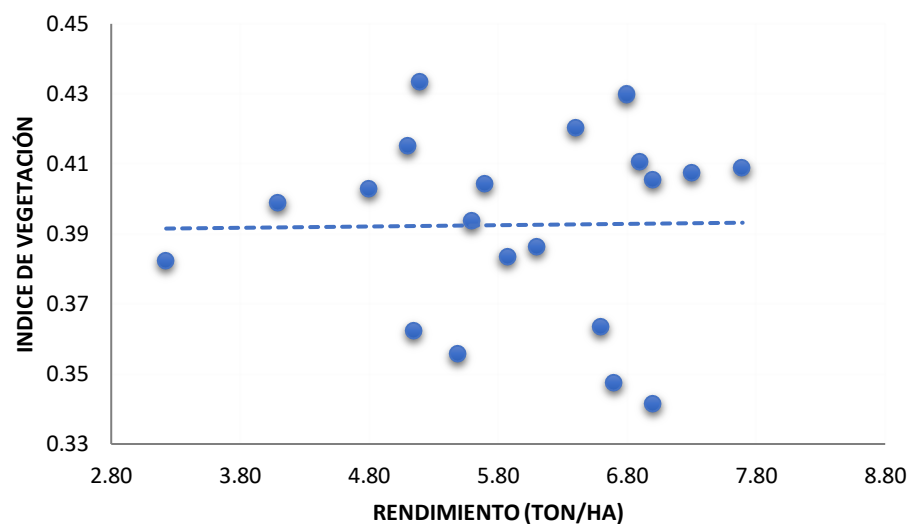


Figura 34. *Dispersión índice MCARI 70 días.*

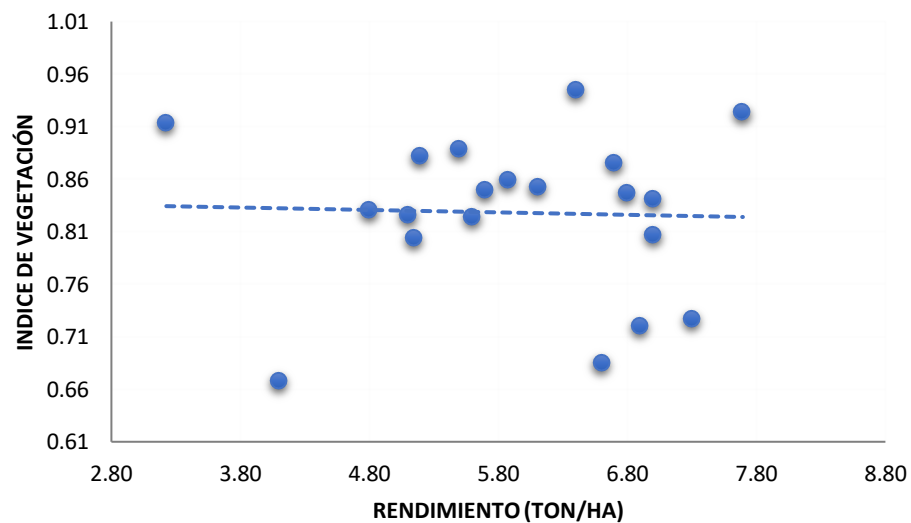


Figura 35. *Dispersión índice BNDVI 70 días.*

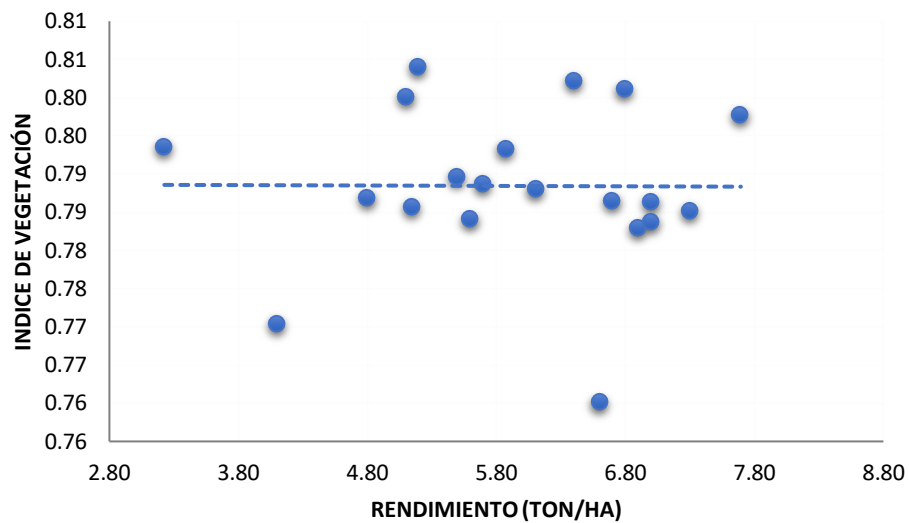


Figura 36. *Dispersión índice GNDVI 70 días*

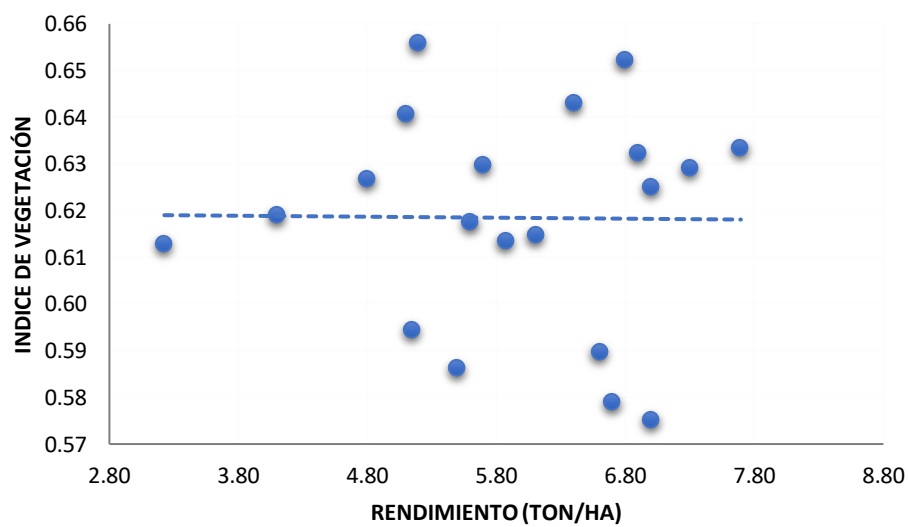


Figura 37. *Dispersión índice NDVI 70 días.*

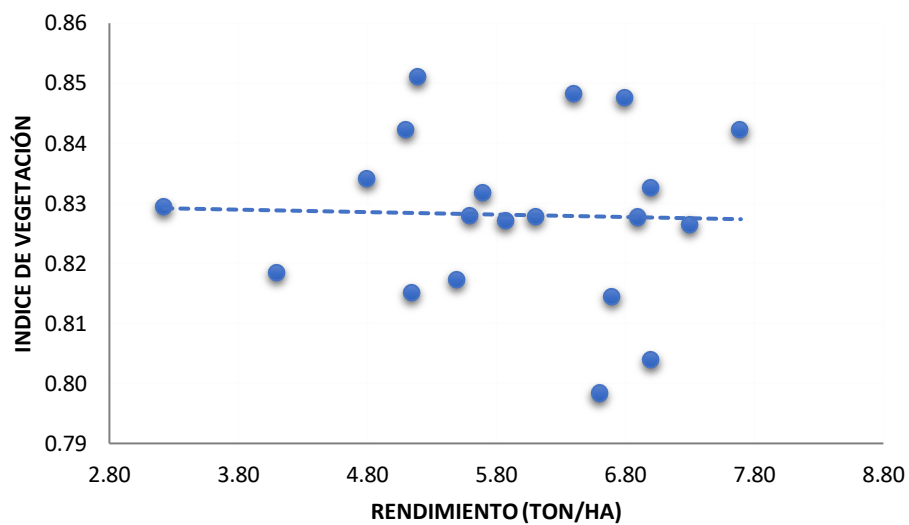
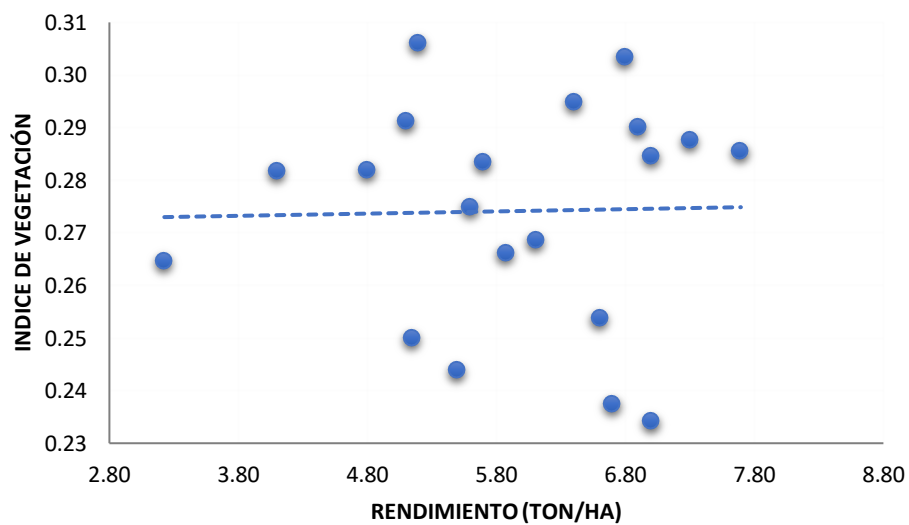


Figura 38. *Dispersión índice NDRE 70 días.*



4.7 Análisis detallado sobre la interpretación de imágenes multiespectrales en cultivos a los 95 días.

4.7.1 Observaciones a los 95 días

A los 95 días, el pasto ha alcanzado una fase avanzada de crecimiento, con una biomasa significativamente mayor y una cobertura del suelo más densa. Las imágenes multiespectrales mostraron colores más verdes y menos variabilidad rojiza, alineándose mejor con las observaciones de campo que indican un cultivo saludable.

4.7.2 Discrepancia observada

4.7.2.1 Tamaño del pasto y biomasa: A esta etapa, la biomasa es alta y la cobertura del suelo por parte del cultivo es casi completa. Esto facilita la interpretación de las imágenes multiespectrales, reduciendo las discrepancias observadas en etapas anteriores.

4.7.2.2 Resolución espacial y altura del vuelo: La resolución espacial sigue siendo adecuada, pero la mayor densidad de biomasa y la cobertura completa del suelo ayudan a reducir errores en la interpretación.

4.7.2.3 Interpretación espectral: Los colores verdes predominantes en las imágenes multiespectrales reflejan una biomasa alta y un cultivo saludable, confirmando las observaciones de campo. Las áreas rojizas remanentes podrían indicar zonas específicas de estrés que requieren atención puntual.

4.7.3 Evaluaciones a los 95 días

1. Es necesario mantener el monitoreo para detectar cualquier cambio tardío en el estado del cultivo que pueda afectar el rendimiento final.
2. Se debe asegurar que los modelos espectrales estén ajustados para detectar diferencias sutiles en biomasa y salud del cultivo en esta etapa avanzada.
3. Además, se debe continuar utilizando sensores adicionales para obtener una visión más completa de la salud del cultivo y anticipar problemas antes de la cosecha.

4.7.3.1 Gráficos de dispersión a los 95 días.

Figura 39. Dispersión índice LCI 95 días.

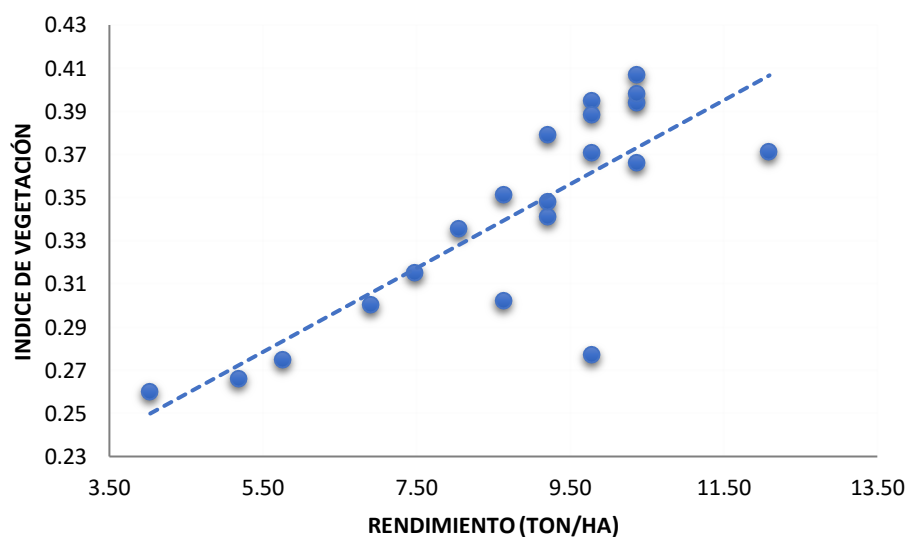


Figura 40. *Dispersión índice MCARI 95 días.*

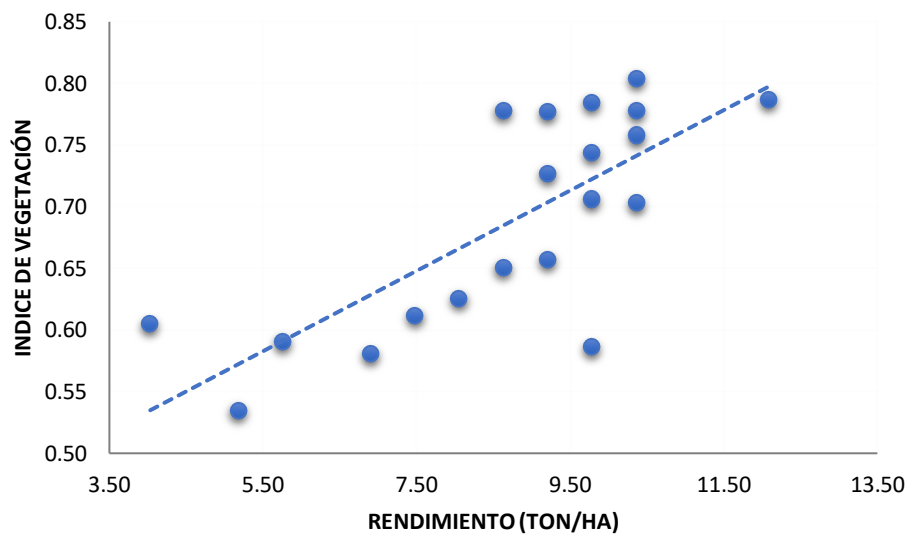


Figura 41. *Dispersión índice GNDVI 95 días.*

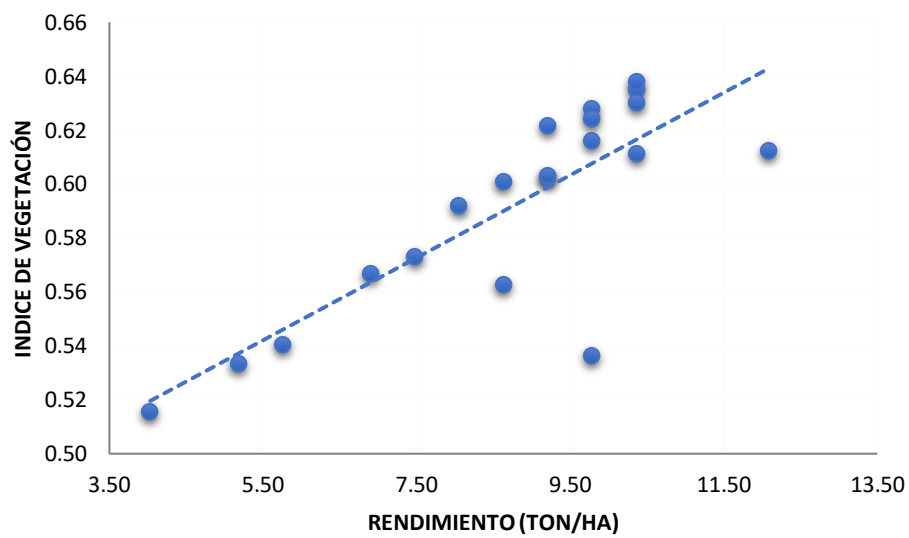
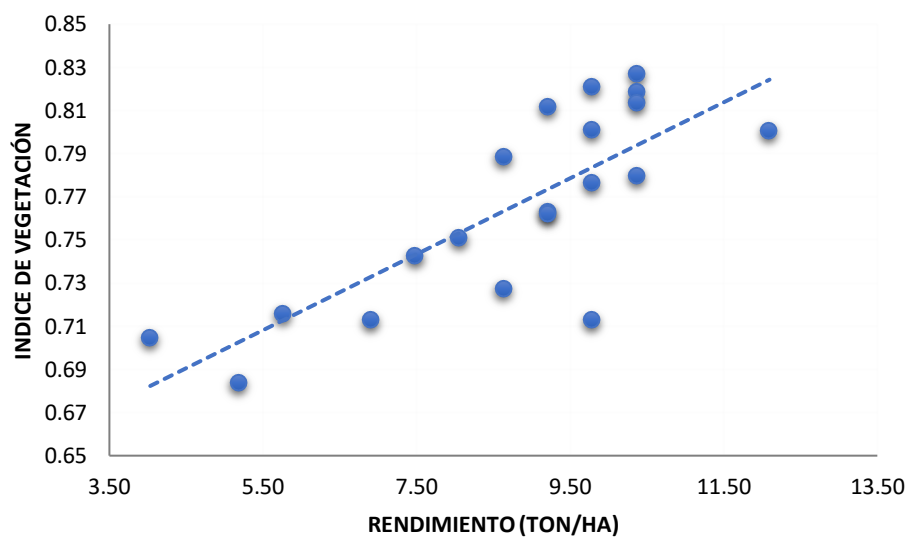


Figura 44. *Dispersión índice NDVI 95 días.*



El análisis de las imágenes multiespectrales a los 70 y 90 días proporciona una visión más clara de la evolución del cultivo. A medida que la biomasa aumenta y el pasto cubre más completamente el suelo, las interpretaciones de las imágenes multiespectrales se alinean mejor con las observaciones de campo. La implementación de estrategias adicionales y el refinamiento continuo de los métodos de análisis son cruciales para mejorar la precisión y la utilidad de estas imágenes en la gestión agrícola.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. Conclusiones

A continuación, se sintetizan los hallazgos clave derivados del análisis exhaustivo de datos y estudios revisados. Se discutirán las implicaciones prácticas de estos hallazgos:

1. Interpretación de Indicadores de Calidad y Rendimiento:

La evaluación de la calidad y el rendimiento del pasto transvala mediante métodos tradicionales mostraron que la calidad en función de materia seca y relación tallo hoja fueron buenas con valores positivos, los cuales se asocian al alto rendimiento presentado en cada uno de los bloques, el promedio de rendimiento fue de 422 pacas por hectárea lo cual para las condiciones de la zona es un rendimiento alto. Morales et al. (2002), indica que:

Se obtiene una abundante cosecha de forraje que va de las 500 a las 700 pacas de “heno”, la producción máxima mencionada cuando se aplica fertilizantes, particularmente nitrogenado. Estas pacas tienen un promedio de peso de 15 kg de forraje de 90% de materia seca (10% de humedad). (p.7)

2. Caracterización de Reflectancia Espectral y Índices de Vegetación:

La aplicación de la caracterización de la reflectancia espectral del pasto transvala mediante sensores multiespectrales proporcionó información valiosa sobre su crecimiento en diferentes estados fenológicos. Los índices de vegetación obtenidos a través del SPAD reflejaron un incremento gradual del nitrógeno durante el ciclo, lo que aporta información importante del nivel de proteína cruda en el cultivo. El punto máximo se observó a los 70 días, indicando la etapa de mayor calidad según las mediciones de clorofila. Sin embargo, la reflectancia espectral medida con el drone no mostró una alta efectividad en los estudios tempranos del cultivo ya que debido a la baja biomasa se obtienen imágenes sesgadas que no reflejan la calidad en algunos casos.

3. Análisis de Asociación entre Reflectancia Espectral y Rendimiento:

El método de estimación de rendimiento mediante imágenes multiespectrales logró una alta correlación en todos los índices aplicados a los 95 días, el índice que presentó mayor correlación fue el NDVI con un R^2 de 0.95, por lo cual es un índice que bajo las condiciones de este estudio es altamente preciso para obtener el rendimiento estimado del cultivo. Las correlaciones a los 45 y 70 días mostraron valores de R^2 de 0.44 y 0.28 respectivamente por lo cual no presentan una alta correlación para este tipo de estudios.

6. Recomendaciones

A continuación, se detallan las recomendaciones las cuales buscan optimizar la precisión y utilidad de los datos obtenidos en el estudio para mejorar la eficiencia operativa y económica en la producción agrícola mediante la aplicación estratégica de tecnologías avanzadas y métodos tradicionales de manejo de cultivos.

1. Interpretación de Indicadores de Calidad y Rendimiento:

Para mejorar la interpretación de los indicadores de calidad y rendimiento en el pasto transvala utilizando métodos tradicionales de recolección de datos de campo, se recomienda realizar cosechas totales en los bloques a los 45, 70 y 95 días del rebrote. Esto asegurará datos más representativos y cercanos a la realidad del campo, evitando posibles sesgos que podrían surgir de muestreos parciales. Además, se sugiere ampliar el estudio a áreas más extensas, lo cual facilitará el uso de maquinaria agrícola como tractores y cosechadoras, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo costos logísticos.

2. Aplicación de Caracterización de Reflectancia Espectral:

Para optimizar la caracterización de la reflectancia espectral del cultivo de pasto transvala en diferentes estados fenológicos mediante sensores multiespectrales, se propone realizar evaluaciones con intervalos más cercanos entre tomas de datos. Esto permitirá identificar puntos de máxima reflectancia con mayor precisión y anticipación, facilitando la detección temprana de variaciones en

el crecimiento y la salud del cultivo. Estos datos podrían ser fundamentales para la implementación oportuna de medidas correctivas en el manejo agronómico.

Para mejorar la discriminación entre la relación de suelo y biomasa, especialmente en las etapas iniciales del cultivo (como el día 45 y 70), se pueden considerar implementar una combinación de otros índices de vegetación que proporcionará una visión más completa de la interacción entre el suelo y la biomasa, lo que podría mejorar el manejo del cultivo en las etapas iniciales y las decisiones agronómicas.

3. Análisis de Asociación entre Reflectancia Espectral y Rendimiento:

Para analizar el grado de asociación entre la reflectancia espectral, el rendimiento y la calidad en campo, se sugiere incorporar la medición de la materia seca como un método complementario en las tres etapas de evaluación. Esto proporcionaría una base adicional para correlacionar la calidad del pasto con la reflectancia espectral y el rendimiento obtenido. Además, el uso continuo del NDVI y otros índices de vegetación puede fortalecer la precisión de los modelos de predicción, mejorando así la capacidad para tomar decisiones informadas en la gestión del cultivo, además de la implementación de medidas correctivas a nivel nutricional para así establecer un análisis económico que nos permita establecer la viabilidad económica de la implementación de la tecnología en el cultivo.

4. Evaluación de Viabilidad de la Tecnología de Teledetección:

Para evaluar la viabilidad económica de la inversión en tecnologías de teledetección espacial en la comercialización de productos de rendimiento y calidad conocida, se recomienda realizar análisis económicos de costo/beneficio. Estos análisis deberían identificar los bloques con menor rendimiento y realizar correcciones nutricionales específicas según los datos obtenidos por dron. Esto permitirá determinar si el aumento en la fertilización y el uso de tecnología de dron compensan adecuadamente la inversión inicial. Además, se podría considerar la implementación de sistemas de gestión de datos agrícolas que integren información espacial con registros de rendimiento, facilitando una evaluación continua y una mejora en la gestión del cultivo.

CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdalla, K. 2016. Planeamiento y preparación preliminar de la Misión ECOSTRESS en Costa Rica para medición radiométrica de temperatura en plantaciones agrícolas [Proyecto de Graduación Lcdo. Ing. Agr.]. Guácimo (CR): Universidad EARTH. p. 118.
- Askari M, Holden N. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*
- Alonso, D. (2023). Los 6 índices de vegetación para completar el NDVI. <https://mappinggis.com/2020/07/los-6-indices-de-vegetacion-para-completar-el-ndvi/>
- Amarillo, G., Amarillo, M., González, A., Sarmiento, F. (Marzo, 2016). *Drones Aplicados a la Agricultura de Precisión*. Publicaciones e Investigación. (Vol 10). P.25, 26, 27.
- Araya M., Boschini C. (2005). Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de *Pennisetum purpureum* en la meseta central de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana* 16 (1): 37-43.
- Argüello, J., Monge, J., Solórzano, M. (2018). Efecto del cambio climático en la producción de hortalizas en Costa Rica. Informe final para el Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Barnes, R. F., Nelson, C. J., Collins, M., & Moore, K. J. (2007). *Forages: An Introduction to Grassland Agriculture* (Vol. 1). Wiley.

- Bonilla, J. S., Dávila, F. A., & Villa, M. W. (2021). Estudio del uso de técnicas de inteligencia artificial aplicadas para análisis de suelos para el sector agrícola. *RECIMUNDO*, 5(1), 4-19.
- Brenes, S. y Agüero, R. (2017). Reconocimiento taxonómico de arvenses y descripción de su manejo, en cuatro fincas productoras de piña (ananas comosus L.) en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana* 18(2): 239-246.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/5053/4860>
- Brenes, J. A. Martínez, A. Quesada, C. Jenkins, M. (2020). *Sistemas de apoyo a la toma de decisiones que usan inteligencia artificial en la agricultura de precisión: un mapeo sistemático de literatura*. Universidad de Costa Rica, Escuela de Ciencias de la Computación e Informática, San José, Costa Rica.
- Cámara Nacional de Productores de Leche. (2017). Red Nacional de Pastos y Forraje.
- Carballo, D. J., Matus, M., Betancourt, M., & Ruíz Fonseca, C. (2005). Manejo de pasto I.
- Cárdenes Díaz, G. (2023). *Fusión de imágenes multiespectrales y datos LIDAR para el análisis forestal* (Bachelor's thesis).
- Galicia, L., Saynes, V., & Campo, J. (2015). Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Botanical Sciences*, 93(3), 473-484.

- Cerdas, R., & Vallejos, E. (2012). Comportamiento productivo de varios pastos tropicales a diferentes edades de cosecha en Guanacaste, Costa Rica. *InterSedes*, 13(26).
- Cuervo, K. (2020) *Adquisición y análisis de imágenes uav para la estimación de coberturas vegetales y biomasa*. Recuperado de
- De la Lengua Española, R. A. (2011). RAE. (2001). *Diccionario de la Real Academia de la Lengua*. (21^a. ed).
- Di Bella, C. M., Posse, G., Beget, M. E., Fischer, M. A., Mari, N., & Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas*, 17(3).
- Díaz, J. J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión. Universidad Complutense de Madrid. Trabajo Fin de Máster.
- EOS Data Analytics. (2023). Índice de clorofila en agricultura.
- Fonseca, W., Alice, F., & Rey, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*, 30(1), 36-47.
- García, C y Herrera, F. (2015) *Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multiespectral en vehículos aéreos no tripulados*.
- García, I. (2017). *Estudio sobre vehículos aéreos no tripulados y sus aplicaciones*. Universidad de Valladolid. Grado en Ingeniería Eléctrica.

- García, J. L., & Martínez, M. J. (2014). Biomasa y Biotecnología. https://digital.csic.es/bitstream/10261/137345/5/Sem%40aforo_2014_Garcia_Martinez.pdf
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., & García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(1), 1-10.
- Gómez, A. J. (2021). *Evaluación del uso de imágenes multiespectrales como herramienta para la predicción del estado nutritivo y riesgo de floración natural en el cultivo de piña (Ananas comosus)*. Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Agronomía como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía. Instituto Tecnológico de Costa Rica Campus Tecnológico Local San Carlos, Costa Rica.
- Gómez, M. (2005). Índice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales (Tesis). Universidad de Piura, Perú.
- Gómez Pareja, A.M. (2020). Química del color. (Trabajo Fin de Grado Inédito). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- González Arias, L. E. (2013). Implementación de prácticas de mejoramiento de pastos y su efecto sobre la productividad de una finca lechera en Tilarán, Guanacaste.
- Guevara-Bonilla, M; Meza-Leandro, A; Esquivel-Seguro, E; Arias-Aguilar, D; Tapia-Arenas, A; Masís-Meléndez, F. Uso de vehículos aéreos no tripulados

(VANT's) para el monitoreo y manejo de los recursos naturales: una síntesis.

Tecnología en Marcha. Vol. 33-4. Octubre-Diciembre 2020.

Guevara-Escobar, E.; Cervantes-Jiménez, M.; Lemus-Ramírez, V.; et al. Estimación de masa de forraje en una pradera mixta por aprendizaje automatizado, datos del manejo de la pradera y meteorológicos satelitales.

Guzmán, J. A. Gonzáles, M. Sandoval, J. A. Calvo, J. C. (2022). *Uso de sensores remotos en la agricultura: aplicaciones en el cultivo del banano*. Tesis Doctoral en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia.

Hernández, M. (2018) Análisis de la demanda hídrica de los cultivos de caña de azúcar, arroz, sandía y melón en la cuenca media y baja del río tempisque, mediante el tratamiento de imágenes satelitales en el periodo de 1990-2017. (Tesis inédita de licenciatura) Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2021). Preparación de heno para la alimentación animal.

Instituto Nacional de Innovación y Tecnología Agraria (INTA); Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI). (2006). Manejo y utilización de pasturas: producción y calidad.

Kendall, c.; Leonardi, c.; Hoffman, p. c. y Combs, d. k. (2009). Intake and Milk Production of Cows Fed Diets that Differed in Dietary Neutral Detergent Fiber

and Neutral Detergent Fiber Digestibility. *Journal of dairy science*, 92 (1), 313-323.

Khorram, S., Koch, F. H., Van der Wiele, C. F., & Nelson, S. A. (2012). *Remote sensing*. Springer Science & Business Media.

Liendo, M. E., Coletti, A. A., Olea, L. E., Alegre, A., Suarez, L., Guerineau, M., ... & Toll Vera, J. R. (2019). Relación hoja-tallo en el estado fenológico de floración, en gramíneas naturales y cultivadas del chaco occidental semiárido del departamento trancas, Tucumán, Argentina. *Revista agronómica del noroeste argentino*.

Masera, O. *et al.* (1999). Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS. GIRA. Mundi-Prensa e Instituto de Ecología-UNAM. México.

Martínez Vega, J., Martín, M. P., Díaz Montejó, J. M., López Vizoso, J. M., & Muñoz Recio, F. J. (2010). Guía didáctica de teledetección y medio ambiente.

Mejía, F. (2012). Introducción al análisis económico: Costo efectividad y costo beneficio.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG); Instituto de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2013). *Manual para la Interpretación de Imágenes de Sensores Remotos de las Principales Coberturas y Usos de la Tierra de Costa Rica*.

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2019). *Informe I semestre 2019*.

- Montero, S. (2017) *Consumo y calidad nutricional de la dieta ofrecida al hato caprino de la finca experimental santa lucia.*
- Mora, J.; Castañeda, R. & Piñeros, R. (2014) *Paisajes, pasturas y pastos. Métodos para determinar cantidad y calidad.* Recuperado de
- Morales González, J. (2002). *Industrialización del heno de calidad de pasto transvala (Digitaria decumbens Sten) bajo riego* (No. AV/0666). Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Guanacaste (Costa Rica). Estación Experimental Enrique Jiménez Núñez.
- Morales, J., Acuña, V., & Cruz, A. (2003). Industrialización del heno de calidad en sistemas bajo riego en Costa Rica. MAG.
- Morales, J. Acuña, V., (2009). Validación de la respuesta del pasto transvala (DIGITARIA ERIANTHA) en producción y calidad de heno bajo riego. *Alcances Tecnológicos. Número 1.* Pag.18-36.
- Morales, J., & Acuña, V. (2009). Validación de la respuesta del pasto transvala (DIGITARIA ERIANTHA) en producción y calidad de heno bajo riego. *Alcances tecnológicos, 7(1), 19- 36*
- Morales, J. Cruz, A., Acuña, V., Lobo, M., Hidalgo, C., Sandoval, B., Dávila, M. (2001). La industrialización del heno de calidad de pasto transvala (*Digitaria decumbens Stent.*) bajo condiciones de riego.

- Morales, J. Cruz, A., Acuña, V., Lobo, M., Hidalgo, C., Dávila, M. (2002). *Industrialización del heno de calidad de pasto transvala (Digitaria decumbens Stent.) bajo riego.*
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de teledetección: Índices de vegetación.*
- Murrieta Ronquillo, K. E. (2023). Inteligencia artificial en el agro para mejorar la productividad sustentable agropecuaria del Ecuador (Bachelor's thesis, BABAHOYO). Componente práctico del Examen de carácter Complexivo Universidad Técnica de Babahoyo.
- Murillo, J. (2011). Métodos de investigación de enfoque experimental. *Recuperado el, 2.*
- Naranjo Raigoza, K. (2018). *Análisis del NDVI óptimo para mejorar el rendimiento de la palma de aceite africana.*
- NV5 Geospatial. (2023). Dry or Senescent Carbon.
- Ñaupas, H. M. (2013). Metodología de la investigación científica y elaboración de tesis. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Ordóñez, J. L. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Manual formativo de ACTA, (62), 17-31.*
- Obando, C. y Solano, L. (2022). *Evaluación de la bacteria Azospirillum brasilense en la absorción de nitrógeno en pasto transvala (Digitaria decumbens stent)*

bajo riego, en Cañas, Guanacaste. Tesis para optar por el grado de Licenciatura de la Universidad Técnica Nacional de Costa Rica.

Padilla, G. (2017). *Estimación de la productividad primaria neta aérea (ppna) del forraje de pastos para los sistemas de producción ganadera mediante sensores remotos.*

Palma M y Sánchez O. (2001). *Agrostología.* San José, Costa Rica. Editorial UNED. 176 p.

Perez, C; Muñoz, A. (2006). *Teledetección: Nociones y aplicaciones.* Salamanca, España: Universidad de Salamanca.

Piscoya Perez, L. R. (2019). *Índice de vegetación de diferencia normalizada (Ndvi) en el distrito de Puquina, Moquegua.*

Posada-Asprilla, W.; Medina-Sierra, M.; Cerón-Muñoz, M. 2019. *Estimación de la calidad y cantidad de pasto kikuyo. [Cenchrus clandestinum (Hochst. ex Chiov.) Morrone] usando imágenes multiespectrales.* Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 22(1): e1195.

Procomer, (1 de marzo, 2021). *La agricultura de precisión permite tener mayor control en los cultivos.* [La agricultura de precisión permite tener mayor control en los cultivos - Procomer Costa Rica](#)

Quesada, J. (2018). *Estudio técnico y de costos para la producción de heno en Bagatzí, Bagaces, Guanacaste versus el precio de mercado del mismo en la Zona Norte de Costa Rica.* Trabajo final de investigación para optar al grado

y título de Maestría Profesional en Gerencia Agroempresarial de la Universidad de Costa Rica.

Rambauth, G. E. (2022). Agricultura de Precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola. *Computer and Electronic Sciences: Theory and Applications*, 3(1), 34–38.

Ramírez, J. L.; Zambrano, D. A.; Campuzano, J.; Verdecia, D. M.; Chacón, E.; Arceo, Y.; Labrada, J.; Uvidia, H. (2017). El clima y su influencia en la producción de los pastos. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 18(6): 1-12.

Ramírez, M. (2004). Indicadores de estado: factores biológicos que limitan la calidad agrícola de los suelos. En: Primer Taller Nacional sobre indicadores de calidad de suelo. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Palmira, Colombia.

Ramón, F. (2020). Inteligencia artificial y agricultura: nuevos retos en el sector agrario. *Campo Jurídico (Online)*. 8(2):123-139.

Restrepo, L. F. (1992). *Rendimiento y calidad del forraje, capacidad de producción de leche y cambios en la composición botánica de una pradera de trasvala (Digitaria Decumbens Stent) bajo pastoreo continuo y rotacional* (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2015).

Rodríguez Belmonte, D. (2017). Desarrollo de un sistema de análisis espectral óptico para medida de componentes ópticos pasivos.

Rodríguez, G. & Triñades, I. (2018) Uso de un UAV para estimar la altura del forraje.

Ruiz-Huanca, P.; Palacios-Vélez, E.; Mejía-Saenz, E.; Exebio-García, A.; Oropeza-Mota, J. L.; Bolaños-González, M. (2005). Estimación temprana del rendimiento de la cebada mediante uso de sensores remotos. *Terra Latinoamericana*, 23(2): 167-174.

Sáenz, V. L. (2002). *Evaluación y caracterización de cuatro inoculantes comerciales de micorrizas en frijol (Phaseolus vulgaris L.), pasto Tanzania (Panicum maximum Jacq) y pasto Transvala (Digitaria decumbens Stent)* (Doctoral dissertation, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2014.).

Sainz R. H. Y Echeverría E. H. (1998). Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. 103(1): 37-44.


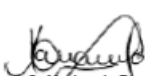

Santos, L. K. C. (2018). El uso de la tecnología en la agricultura. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 2(14), 25-32.

Serrano, L. A. (2023). *Implementación de un sistema de monitoreo para pastoreo de precisión mediante el análisis de suelo y gestión a través de información de sensores remotos para la mejora en la calidad y optimización en la producción de forrajes en finca La Granja ubicada en Pacayas de Alvarado, Cartago*. Informe de Trabajo Final de Graduación, Escuela de Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

- Solano, J. J. B., Salazar, E. P., & Solano, S. B. (2019). *Reconocimiento automático de patrones y características de las imágenes de los cultivos como alternativa para el desarrollo agrícola. Pensamiento Actual, 19(33), 90-105.*
- Solórzano, M. Brenes, M. G. Guillén, G. (2022). *Diseño y valoración de un sistema de automatización de bajo costo mediante internet, para riego de precisión en agricultura protegida en sustrato, para productores de la provincia de Cartago. Informe Final de Proyecto de Extensión, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.*
- Urbano Terrón, P. (1992). *Tratado de fitotecnia general.* Ediciones Mundi-Prensa.
- Urquía-Fernández, N. (2014). La seguridad alimentaria en México. *Salud pública de México, 56(suppl 1), s92-s98.*
- Usha, K., & Singh, B. (2013). Potential applications of remote sensing in horticulture—A review. *Scientia Horticulturae, 153, 71–83.*
- Vargas, Q., & Best, S. (2021). Introducción a la Agricultura de Precisión 4.0 en huertos de arándanos.
- Weatherspark (2020). *El clima Típico de Cualquier Lugar del Mundo*

ANEXO 1

Análisis químico del suelo

 UNIVERSIDAD DE COSTA RICA		CIA Centro de Investigaciones Agronómicas											
CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES REPORTE DE ENSAYO RE-R01 (V3)													
Nº DE REPORTE: 89462 USUARIO: CORPORACION ARROCERA NACIONAL COSTA RICA SUBCLIENTE: REGIONAL CHOROTEGA RESPONSABLE: NIGER PARAJELES SANDOVAL CORREO: lchavarria@conarroz.com, nparajeles@conarroz.com TELÉFONO: 2255-1313, 2671-2136, 8382-7432		ANÁLISIS: QC,CN FECHA RECEPCIÓN: 20/02/2024 EMISIÓN DE REPORTE: 29/02/2024 Nº DE MUESTRAS TOTAL: 2 PÁGINA: 1/2											
PROVINCIA: GUANACASTE CANTÓN: BAGACES CULTIVO: ARROZ													
ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS													
Solución Extractora:		pH	cmol(+)/L				%	mg/L					
KCl-Olsen Modificado		H ₂ O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
ID USUARIO	ID LAB	5,5	0,5	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5
JUAN PABLO VARGAS SALAS - LOTE 283	S-24-01504	5,8	0,12	10,88	4,08	0,24	15,32	0,8	1	3,7	13	153	34
-----ULTIMA LINEA-----													
<p>Los valores debajo de cada elemento corresponden con los Niveles Críticos generales para la solución extractora usada</p> <p>CICE=Capacidad de intercambio de Cationes Efectiva=Acidez+Ca+Mg+K SA=Porcentaje de Saturación de Acidez=(Acidez/CICE)*100</p>													
 B.Q. Mariana Blanco M. N.I. 2468 Gestoría de Calidad							 Ing. Agr. Ma. Fernanda Campos G. N.I. 9447 Gestoría Técnica						
<p>1. Las unidades están expresadas en base seca, en masa/volumen. 2. Procedimiento: pH y CE en agua 10:25; Acidez, Al, Ca y Mg con KCl 1M 1:10; P,K,Zn,Fe,Mn y Cu con Olsen Modificado pH 8,5 (NaHCO₃ 0,5 N, EDTA 0,01M, Superfloc 127) 1:10; B y S con Ca(H₂PO₄)₂·H₂O 0,008M 10:25. Acidez determinada por valoración con NaOH y Al por valoración con HCl; P y S por Colorimetría con el Analizador de Inyección de Flujo (IFA) y el resto de los elementos por Espectrofotometría de Absorción Atómica. C y N totales por combustión seca en Autoanalizador. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensayo con validez legal es el original firmado; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.</p>													



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

CIA Centro de
Investigaciones
Agronómicas

CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES
REPORTE DE ENSAYO
RE-R01 (V3)

N° DE REPORTE: **89462**

USUARIO: CORPORACION ARROCERA NACIONAL COSTA RICA
SUBCLIENTE: REGIONAL CHOROTEGA
RESPONSABLE: NIGER PARAJELES SANDOVAL
CORREO: lchavarria@conarroz.com, nparajeles@conarroz.com
TELÉFONO: 2255-1313, 2671-2136, 8382-7432

PROVINCIA: GUANACASTE
CANTÓN: BAGACES

CULTIVO: ARROZ


ANÁLISIS: QC,CN
FECHA RECEPCIÓN: 20/02/2024
EMISIÓN DE REPORTE: 29/02/2024
N° DE MUESTRAS TOTAL: 2
PÁGINA: 2/2

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS

ID USUARIO	ID LAB	mS/cm		%		Relación
		CE	C	N	C/N	
JUAN PABLO VARGAS SALAS - LOTE 283	S-24-01504	0,5	2,63	0,29	9,1	

—ULTIMA LINEA—

OBSERVACIÓN: El % C y N totales se determinaron con el Autoanalizador de C/N por combustión seca. Los valores de % C total correlacionan muy bien (R²0,95) con el % de MO. Si quiere estimar el valor del % MO a partir del dato de % C total determinado con esta metodología, multiplique el % C total por 1,43.


B.Q. Mariana Blanco M.
N.I. 2468
Gestoría de Calidad


Ing. Agr. Ma. Fernanda Campos G.
N.I. 9447
Gestoría Técnica

1. El muestreo es responsabilidad del usuario. 2. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 3. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 4. El Reporte de Ensayo con validez legal es el original firmado; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

ANEXO 2.

Tabla de interpretación de análisis de suelos (Molina y Meléndez 2002).

		Bajo	Medio	Optimo	Alto
PH		< 5	5 – 6	6 – 7	> 7
Ca	Cmol/L	< 4	4 – 6	6 – 15	> 15
Mg	Cmol/L	< 1	1 – 3	3 – 6	> 6
K	Cmol/L	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 0.8	> 0.8
Acidez	Cmol/L		0.3 – 1	< 0.3	> 1
S.A	%		10 – 30	< 10	> 30
P	Mg/L	< 12	12 – 20	20 – 50	> 50
Fe	Mg/L	< 5	5 – 10	10 – 50	> 50
Cu	Mg/L	< 0.5	0.5 – 1	1 – 20	> 20
Zn	Mg/L	< 2	2 – 3	3 – 10	> 10
Mn	Mg/L	< 5	5 – 10	10 – 50	> 50
B	Mg/L	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1	> 1
S	Mg/L	< 12	12 – 20	20 – 50	> 50
M.O	%	< 2	2 – 5	5 – 10	> 10
Relaciones		Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K
<u>Cationicas</u>		2 - 5	5 – 25	2.5 – 15	10 – 40
pH en agua					
<u>Ca, Mg</u> y acidez o Al extraíbles con KCL 1 M.					
P, K, Fe, Cu, Zn y Mn extraíbles con <u>Olsen</u> Modificado.					
B y S extraíbles con Fosfato de Calcio.					
Materia orgánica (MO) con digestión húmeda.					

Nota: Tomado de: Análisis de suelos y su interpretación (p. 5), por Eloy Molina, 2002, INFOAGRO, (<https://www.infoagro.go.cr/Inforegiones/RegionCentralOriental/Documents/Suelos/SUELOS-AMINOGROWanalisisinterpretacion.pdf>)

ANEXO 3.

Cuadro de medición 25cm x 25cm



Anexo 4.

Drone con cámara multiespectral



Anexo 5.

Muestras colocadas en el horno para poder obtener la materia seca



ANEXO 6.

Muestra obtenidas de ensayos



ANEXO 7.

Segadora para la corta homogénea



ANEXO 8.

Equipo de cosecha (embaladora)



ANEXO 9.

Spad instrumento de medición de clorofila

