

Parámetros productivos de un sistema de praderas: Uso de sensores remotos

Javier Orozco Ortiz y Leidy Yamile Cacia Méndez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Zootecnista

Director

Leonardo Avendaño Vásquez

PhD Acuicultura

Codirector(a)

Sandra Milena Díaz López

MSc en Manejo, Uso y Conservación de Bosques

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Málaga

2022

Dedicatoria

Dedico mi tesis primeramente a **DIOS** por concederme una vez más cumplir este sueño, por darme su bendición, fortaleza y sabiduría en los momentos más difíciles durante esta trayectoria, no solo por la universidad sino hasta el momento. Por regalarme salud y vida para continuar escalando y afrontando las situaciones que se presentan.

A mis padres **Marleny Ortiz Castañeda** y **Luis Antonio Orozco** por estar presentes brindándome apoyo y por inculcar en mí principios y valores humanos en beneficio personal y profesional. Igualmente, a mis hermanos **Luis Alberto Orozco** y **Suleima Orozco**, a mi sobrina **Eveling Luciana** por retroceder el tiempo y regalarme tanta felicidad.

A demás familiares y amigos (compañeros) por brindarme confianza y apoyo durante mi formación no solo académica, sino personal.

“ Con aprecio, Javier Orozco ”

Dedico este trabajo primero a Dios quien ha forjado mi camino y me ha permitido llegar a este momento de mi formación profesional, a mi familia que me vio crecer y que desde la distancia me ha brindado su apoyo moral, afecto y su legado de amor por el campo, a mis padres Néstor y Alcira por su trabajo, sacrificio y sus enseñanzas de vida, a mis hermanos Fanny, Ahiruvy y Alner por estar siempre presentes en cada una de las etapas de mi vida, por su enorme apoyo y cariño, a mis hermosos sobrinos, verlos crecer me llena de alegría y nostalgia, a mi compañero sentimental Favio por todo el apoyo y amor que me ha brindado en estos años, a todas las personas que me tendieron su mano y a quienes me han llevado en sus oraciones, y finalmente a aquellos amigos y compañeros que conocí en el transcurso de esta bonita profesión.

Leidy Cacia Méndez.

*“Mas tú, Jehová,
eres escudo alrededor de mí;
Mi gloria,
y el que levanta mi cabeza.”
Salmo 3:3(NTV)*

Agradecimientos

A DIOS primeramente por darnos la oportunidad de cumplir esta meta, por estar ahí siempre de manera incondicional, en momentos de debilidad y fortaleza.

A la Universidad Industrial de Santander nuestra alma mater por las enseñanzas éticas y morales y el conocimiento brindado para nuestra formación profesional

A la Vicerrectoría académica por su contribución económica brindada por medio de la convocatoria Grada-TIC 2021, la cual fue de gran ayuda para la ejecución de este proyecto de grado y el permitirnos divulgar nuestros conocimientos en el uso de herramientas TIC en nuestro campo profesional a otros estudiantes y demás personas.

A nuestros directores Sandra Milena Diaz López y Leonardo Avendaño por el gran apoyo, orientaciones y acompañamiento en la ejecución de este proyecto.

A todas las personas involucradas en este proyecto por las ayudas brindadas y el apoyo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2.1 Marco referencial.....	16
2.1.1. Marco histórico	16
2.1.2 Marco teórico	17
2.1.2.1 Objetivos de desarrollo sostenible	17
2.1.2.2 Ganadería sostenible	18
2.1.2.3 Producción de ganado	18
2.1.2.4 Principios de radiación electromagnética y sensores remotos.....	18
2.1.2.5 Aplicaciones de la teledetección en la agricultura.....	19
2.1.2.6 Comportamiento espectral de la vegetación	20
2.1.2.7 Índices de vegetación (VI).....	21
2.1.3 Marco legal	22
2.1.3.1 Normatividad civil	22
2.1.3.1.1 Resolución 04201 de 2018.....	22
2.1.3.1.2 Resolución 7285 de 2012.....	22
2.1.3.1.3 Ley 1454 de 2011.....	22
2.1.3.2 Normatividad agropecuaria.....	22

2.1.3.2.1 Ley 1876 del 29 de diciembre de 2017	22
2.1.3.2.2 Decreto 1946 de 30 de agosto de 1989	23
2.1.3.2.3 Resolución 2341 de 2007	23
2.1.4 Marco conceptual	23
2.1.4.1 Sensor remoto	23
2.1.4.3 Biomasa	24
2.1.4.4 Cobertura del suelo	24
2.1.4.5 Fenología	24
2.1.4.6 Escala	24
2.1.4.7 Banda	24
2.1.4.8 Mapas topográficos	25
2.1.4.9 Coordenada geográfica	25
2.1.4.10 Georreferenciación	25
2.1.4.11 Nube de puntos densa	25
2.1.4.12 Ortomosaico, ortomapa	25
3. Metodología	26
3.1 Tipo de estudio	26
3.2 Zona de estudio	26
3.3 Materiales y métodos	27
3.3.1 Adecuación del terreno	27
3.3.2 Medición de parcelas	27
3.3.3 Distribución de tratamientos	27

3.3.4 Fertilización	28
3.3.5 Materiales.....	28
3.3.5.1 Dron utilizado	28
3.3.5.2 Cámara espectral.....	28
3.3.6 Evaluación de variables	28
3.3.7 Análisis estadístico.....	30
3.3.7.1 Modelo estadístico	30
3.3.7.2 Aplicación de correlación Pearson.....	30
4. Resultados	31
5. Discusión.....	37
5. Conclusiones	39
6. Recomendaciones	41
Referencias Bibliográficas	42
Apéndices.....	50

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>variables evaluadas con su respectiva metodología.</i>	29
Tabla 2. <i>Variabes biomasa fresca, Clg, NDVI y PSRI, evaluada en los tratamientos T1 y T2 para la primera temporada o día 20 (12-sep-2021).</i>	31
Tabla 3 <i>Variabes biomasa fresca, Clg, NDVI y PSRI, evaluada en los tratamientos T1 y T2 para la segunda temporada o día 28 (10-oct-2021).</i>	33
Tabla 4 <i>Correlación de Pearson aplicada a las variables en estudio para la primera temporada (12-septiembre-2021)</i>	35
Tabla 5 <i>Correlación de Pearson aplicada a las variables en estudio para la segunda temporada (10-octubre-2021)</i>	36

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de distribución del área de estudio de las cuarenta parcelas ubicado en la vereda Loma del Negro, municipio de Enciso, Santander, Colombia. Elaborado con QGIS 3.16.	26
Figura 2. Variables NDVI, Clg y PSRI, evaluadas en los tratamientos T1 y T2 para el día 20. ..	32
Figura 3. Grafica para la variable producción de biomasa para ambas temporadas, evaluada en T1 y T2.	34
Figura 4 Variables NDVI, Clg y PSRI, evaluadas en los tratamientos T1 y T2 día 48 del estudio.	34

Lista de Apéndices

Apéndice A Elaboración y distribución de parcelas	50
Apéndice B Vuelo primera temporada (12-septiembre-2021).....	50
Apéndice D Índice de Vegetación de diferencia normalizada (NDVI) primera temporada.....	51
Apéndice E Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) segunda temporada	52
Apéndice F Índice reflectante de planta senescente (PSRI) primera temporada	52
Apéndice G Índice reflectante de planta senescente (PSRI).....	52
Apéndice H Índice verde de clorofila (Clg) 12-sep-2021	53
Apéndice I Índice verde de clorofila (Clg)	53
Apéndice J Resultados análisis de suelo	54

Resumen

Título: Parámetros productivos de un sistema de praderas: Uso de sensores remotos*

Autor: Javier Orozco Ortiz, Leidy Yamile Cagua Méndez**

Palabras Clave: Dron, sensores remotos, fertilización, forraje, praderas.

Descripción:

El uso de drones en la ganadería tiene el potencial de promover un manejo más dinámico y eficiente de los rumiantes en los potreros optimizando y facilitando los procesos de evaluación y toma de decisiones en los sistemas de producción animal. El objetivo de este trabajo fue evaluar la productividad de praderas fertilizadas; a través de índices de vegetación y producción de biomasa. Se hizo un diseño completamente al azar de 40 parcelas (2 x 2 metros), manejando 4 réplicas en cada una (1m²), se asignaron 20 parcelas para el T1 parcela sin fertilización y T2 parcela con fertilización, se tomaron imágenes en dos temporadas de corte de dichas parcelas en el día 20 y día 48 del estudio, usando la cámara espectral Parrot Sequoia con el dron Dj Mavic PRO. Se evaluó el Índice verde de clorofila(Clg), Índice de vegetación de diferencia normalizada(NDVI), Índice reflectante de planta senescente (PSRI) y Biomasa fresca. Los datos se sometieron a un ANOVA, comparados mediante la prueba Duncan con $P < 0,05$ y aplicando la correlación de Pearson a las variables. Para NDVI, Clg y biomasa presentaron diferencias significativas entre tratamientos para la primera y segunda temporada; sin embargo, la variable PSRI no fue estadísticamente diferente entre T1 y T2 en la primera toma, no obstante, para la segunda temporada mostró significancia entre tratamientos, además se evidenciaron correlaciones directas entre las variables biomasa respecto a NDVI y Clg para ambas temporadas, mientras que para el índice PSRI presentó una correlación inversa. Finalmente se concluye que esta tecnología permite un mayor número de observaciones y mejor estimación de la disponibilidad y cobertura de la pastura a nivel del potrero, siendo el NDVI el que mejor estima la productividad de praderas al correlacionarse altamente con la Biomasa fresca tomada en campo.

* Trabajo de grado

** Instituto de proyección regional y a distancia IPRED, programa de zootecnia. Director: Leonardo Avendaño Vásquez, PhD en acuicultura. Codirector: Sandra Milena Díaz López, MSc en Manejo, Uso y Conservación de Bosques.

Abstract

Title: Productive parameters of a grassland system: use of remote sensing*

Author(s): Javier Orozco Ortiz, Leidy Yamile Cacua Méndez**

Key Words: Drone, remote sensing, fertilization, forage, meadows.

Description:

The use of drones in livestock has the potential to promote more dynamic and efficient management of ruminants in paddocks, optimizing and facilitating evaluation and decision-making processes in animal production systems. The objective of this work was to evaluate the productivity of fertilized meadows; through vegetation indices and biomass production. A completely random design of 40 plots (2 x 2 meters) was made, handling 4 replicates in each (1m²), 20 plots were assigned for the T1 plot without fertilization and T2 plot with fertilization, images were taken in two seasons of cut of these plots on day 20 and day 48 of the study, using the Parrot Sequoia spectral camera with the DJ Mavic PRO drone. The Green Chlorophyll Index (Clg), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Senescent Plant Reflective Index (PSRI), and Fresh Biomass were evaluated. The data were submitted to an ANOVA, compared using the Duncan test with $P < 0.05$ and applying Pearson's correlation to the variables. For NDVI, Clg and biomass presented significant differences between treatments for the first and second seasons; however, the PSRI variable was not statistically different between T1 and T2 in the first intake, however, for the second season it showed significance between treatments, in addition, direct correlations were evidenced between the biomass variables concerning NDVI and Clg for both seasons, while that for the PSRI index presented an inverse correlation. Finally, it is concluded that this technology allows a greater number of observations and a better estimation of the availability and coverage of the pasture at the paddock level, with the NDVI being the one that best estimates the productivity of the pastures since it is highly correlated with the fresh Biomass taken in the field.

* Degree work

** Instituto of Regional Projection and Distance Education IPRED, Animal Science Program. Director: Leonardo Avendaño Vásquez, PhD aquaculture. Codirector: Sandra Milena Díaz López, MSc Management, use and conservation of forests.

Introducción

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR, 2020), la producción de carne de origen vacuno, en el año 2020, fue de 605.815 toneladas, mientras que la producción de leche fue de 7.393 millones de litros en ese mismo año; no obstante, existen otros indicadores que sugieren que se deben idear estrategias que permitan una optimización a lo largo de la cadena productiva, por ejemplo: que aún se continúa manejando un promedio nacional de 0,6 animales por hectárea, con una producción promedio en el sector lácteo de 4 litros/día y ganancia de peso inferiores a los 300gr/día, en lo que compete a la producción de carne (Fedegán., 2019).

Lo anterior pone en consideración, que para que se lleve a cabo una mejora en los sistemas ganaderos, se debe recurrir al uso de herramientas tecnológicas, que van de la mano para un mejor manejo y generar así un equilibrio en la producción, esto con la finalidad de aumentar la competitividad con los lineamientos que exigen los mercados. Lo anterior, en tanto que esta dinámica incide en el mejoramiento de la producción que busca optimizar estos estándares y lograr una mayor rentabilidad, así como asegurar el producto en el mercado.

Colombia es un país reconocido por la cantidad de recursos naturales que posee, sin embargo, no se realiza un aprovechamiento sostenible de estos, debido a la cultura tradicional que se lleva en el sector agropecuario. En el caso de la ganadería, uno de los problemas del no aprovechamiento de los recursos, es el sobrepastoreo de los animales debido al uso desmedido del manejo que se lleva en las praderas, generando como consecuencia que el forraje presente bajo valor nutricional, además de la baja cantidad producida en el potrero, esto implica que cada vez debe ser más grande el espacio para lograr alimentar a un animal. De este modo se afecta

directamente el suelo, debido al constante pisoteo de los animales, pues no es posible una recuperación en los pastizales entre rotaciones. Por otro lado, estos factores además de limitar la producción de leche o carne, también favorece la sustitución de los pastos por malezas como los matorrales espinosos, que no tienen la capacidad para retener de manera adecuada la fina capa de tierra fértil, lo que da paso a la erosión (Muñoz, 2005).

Según la FAO (2017), la ganadería mundial es responsable de dos terceras partes de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), esto en zonas donde se tienen los animales extensivamente, dichas emisiones fluctúan de acuerdo con su alimentación y uso de praderas; la reconversión hacia un sistema rotacional optimizando los recursos, busca tener más animales en menos espacio, con una alimentación adecuada, de acuerdo con sus requerimientos y promoviendo la disminución de la huella de carbono de la ganadería. La eficiencia y rentabilidad del sistema productivo depende en gran medida de la habilidad de cada productor para administrar adecuadamente sus praderas, esto incluye una adecuación de las pasturas desde análisis del suelo, la aplicación de fertilizantes, bien sea de origen biológico o sintético, planes de rotación y carga animal; además de procesos innovadores que no se tienen en cuenta por la mayoría de productores de la región, mediante la aplicación de tecnologías que optimicen todo este tipo de prácticas generando un impacto en el manejo de sus animales; teniendo así una mejor retribución económica, que se ve reflejado en sustentabilidad alimentaria y calidad de vida (López et al., 2017).

El sobrepastoreo y el mal manejo de los animales inciden frecuentemente en la degradación del suelo, causando graves consecuencias tanto en desarrollo y rebrote de las praderas (Carvalho et al., 2008) además de ser una de las principales causas de tener un menor número de animales por unidad de área. Por otro lado, los rumiantes son convertidores eficientes de pastos en energía y

proteínas, que están en la dieta ingerida por el hombre y la producción de alimentos a base de pastos y forrajes, considerando que el cambio climático continúa fluctuando (O'Mara, 2012) y mientras la población va en aumento, se hace necesario la aplicación de estas nuevas tecnologías que favorezcan el desarrollo y aplicación en la ganadería sostenible, aumentando la productividad, el uso de imágenes multiespectrales ha venido tomando auge en la medición de la producción de forrajes y pasturas, no obstante, este tipo de tecnología es desconocida para un gran número de productores ganaderos en la provincia de García Rovira. Las imágenes multiespectrales pueden obtenerse a partir de imágenes capturadas desde un dron, también conocido como vehículo aéreo no tripulado (VANT)(Schirrmann et al., 2017) , bajo unos sistemas basados en luz estructurada, proveniente de esas imágenes, se han creado modelos muy cercanos a la realidad que permiten el estudio detallado del cultivo (Andújar et al., 2017); sin embargo, por el alto costo de esa tecnología y poco conocimiento para el análisis e interpretación de las imágenes, es poco implementada. El uso de drones en la ganadería tiene el potencial de promover un manejo más dinámico y eficiente de los rumiantes en los potreros, hallando fácilmente la disponibilidad de forraje de acuerdo con la cantidad de animales y el tiempo de rotaciones, es así como con el desarrollo de los drones y la tecnología de la información se optimizan y facilitan estos procesos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la productividad de las praderas fertilizadas a través de índices de vegetación.

1.2 Objetivos Específicos

Comparar la eficiencia y precisión en el cálculo de la producción de biomasa en pastos, mediante imágenes de sensores remotos y el método tradicional de aforos.

Interpretar el comportamiento espectral de los forrajes y parámetros productivos tomados a partir de los índices de vegetación.

2 Marco referencial.

2.1 Marco histórico

Parody y Zapata (2018), efectuaron una revisión para conocer cuántos de los principales cultivos agrícolas en Colombia utilizan los sensores remotos como herramienta tecnológica de teledetección, en lo que se conoce como agricultura de precisión para el manejo eficiente de los suelos. Para esto fueron consultadas las informaciones publicadas en bases de datos nacionales e internacionales, repositorios digitales de universidades del país y entidades públicas y privadas. Posteriormente, las referencias encontradas se agruparon teniendo en cuenta el uso de imágenes satelitales, imágenes aéreas e imágenes de alta resolución provenientes de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTS). A partir de la información obtenida, se deduce que en Colombia las imágenes obtenidas a partir de VANTS han sido utilizadas para el seguimiento, monitoreo e identificación de enfermedades, principalmente en cultivos de caña de azúcar, palma de aceite, papa, entre otros. Mientras que las imágenes satelitales fueron usadas para determinar el estado fenológico y ambiental de cultivos que ocupan grandes extensiones de tierra.

En el estudio realizado por (Hoyos et al., 2019) se evaluó la posibilidad de diagnosticar el estado sanitario del pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), empleando sensores multiespectrales por medio del dron y captando las reflectancias de las longitudes de onda rojos, verde, azul, rojo al borde e infrarrojo cercano en 109 unidades de experimentales en 10 potreros, ubicados en ganaderías del departamento de Antioquia donde fueron relacionados con niveles de daño foliar a causa de plagas mediante la clasificación foliar detectadas en campo; sin embargo,

los índices de vegetación no tuvieron efecto significativo en el diagnóstico fitosanitario del pasto, por ende se procedió a una evaluación usando modelos lineales y se concluyó que el análisis de la reflectancia en función del grado de daño causado por insectos en el pasto kikuyo permite diferenciar el estado fitosanitario de este, principalmente por la reducción en la actividad fotosintética atribuida a la acción de los insectos de hábitos chupador, lo que conlleva a un aumento de la reflectancia en las regiones del espectro visible principalmente en las regiones de rojo.

En el artículo de Ponce et al., (2020) se presenta una revisión sistemática de la literatura referente al uso de los vehículos aéreos no tripulados en aplicaciones relacionadas con la detección de vegetación y el inventario de plantas. Así mismo, se realiza un análisis de las principales técnicas computacionales y estadísticas utilizadas para el procesamiento de las imágenes tomadas desde vehículos aéreos no tripulados. Concluyen, principalmente, que la mayoría de los estudios se centran en la vigilancia de los cultivos. En la revisión sistemática se destaca que se realizaron esfuerzos para calcular parámetros como los índices de vegetación, rendimiento de los cultivos, la biomasa de las plantas, el estrés hídrico, entre otras.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Objetivos de desarrollo sostenible

Según la comisión económica para América latina y el Caribe -CEPAL (CEPAL, 2018) la desigualdad social, destrucción ambiental y bajo crecimiento económico, han contribuido a la creación de estrategias o políticas que maximicen la transformación de los procesos productivos, hacia un desarrollo mejor organizado y sostenible a largo plazo.

2.2.2 Ganadería sostenible

La ganadería sostenible es aquella que produce carne y leche de calidad para consumo humano dentro de un marco de eficiencia productiva y rentabilidad, con un uso adecuado de los recursos naturales, con conservación del medio ambiente, contribución al combate contra el cambio climático, y con respeto por los animales y por las personas y comunidades que participan en ella.(Zapata y Silva, 2020)

2.2.3 Producción de ganado

La cadena de producción de ganado encierra una serie de escalones que integran el uso de mano de obra, la cual es un potencial para la generación de empleo y da pie a que los profesionales del sector pecuario conformen un punto clave debido al impacto que tienen en la búsqueda de aplicar nuevas técnicas y tecnologías que mejoren los ámbitos de alimentación, genética, sanidad, manejo, entre otras actividades que integran la actividad ganadera (Murgueitio y Calle, 1998).

(Cáceres et al., 2016) los sensores remotos en la producción ganadera se han convertido en una herramienta de importancia mediante la estimación de parámetros fisiológicos y crecimiento de pasturas en el monitoreo de áreas productivas.

2.2.4 Principios de radiación electromagnética y sensores remotos.

La radiación electromagnética, que llega a la superficie de la tierra, se puede reflejar, transmitir y absorber. Esto ocurre para cualquier material dado en donde la cantidad de radiación solar que refleja se absorbe o transmite, lo cual varía con la longitud de onda. Esta importante propiedad de la materia permite identificar diferentes sustancias o características y separarlas por sus firmas espectrales (curvas espectrales)(Weng, 2010).

Según Chuvieco, (1990), se destacan, desde el punto de vista de la geomática, una serie de bandas espectrales que son las más usadas y su denominación y amplitud varían según distintos autores. El espectro visible (0,4 a 0,7 μm) se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (0,4 a 0,5 μm); verde (0,5 a 0,6 μm) y rojo (0,6 a 0,7 μm), debido a los colores elementales asociados a esas longitudes de onda.

El infrarrojo próximo (0,7 a 1,3 μm) a veces se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

El infrarrojo medio (1,3 a 8 μm) es donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre; el infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm), el que incluye la porción emisiva del espectro terrestre y las microondas (a partir de 1 mm) son de gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

2.2.5 Aplicaciones de la teledetección en la agricultura

El uso de los vehículos aéreos no tripulados o UAV es un avance reciente y su implementación en la productividad de cultivos agrícolas, mediante cámaras multiespectrales que son usadas en plataformas aéreas de bajo costo, permiten obtener espectrometría en campo y de este modo analizar a través de los índices de vegetación y otros parámetros, como el índice de área foliar, pigmentos o el estado hídrico que permiten elaborar modelos de producción. El desarrollar una herramienta capaz de estimar con un alto grado de precisión la producción agrícola permitirá

un mejor manejo de la información tanto en la estimación de la producción acumulada, como la capacidad de predicción de la producción (García y Porras, 2013)

2.2.6 Comportamiento espectral de la vegetación

El patrón de respuesta o comportamiento espectral es la medida de la reflectancia del objeto a lo largo del espectro electromagnético. (Sá et al., 1999).

El comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a 0,55 μm). Por el contrario, en el infrarrojo cercano se presenta una elevada reflectividad y se va disminuyendo paulatinamente hacia el infrarrojo medio. Estas características espectrales se relacionan, primordialmente, con la acción de pigmentos fotosintéticos y del agua que almacenan las hojas (Chuvieco, 1990)

Sá et al., (1999) citan a varios autores para explicar una curva patrón de la respuesta espectral de una hoja vegetal. En la región azul (450 nm) y en la región del rojo (650 nm) se observa un pico debido a la presencia de pigmentos en el interior del cloroplasto, como: clorofila, xantofila, carotenos y otros. La absorción de la energía solar que ocurre en estas longitudes de onda depende principalmente de la concentración de la clorofila. En la región denominada infrarrojo cercano (700 a 1300 nm), la vegetación verde y sana se caracteriza por la alta reflectancia (45 a 50%), causada por la difusión resultante de los índices de refracción del líquido intracelular y de los espacios intercelulares del mesófilo.

Guzmán et al., (2015) concluye que, al incidir la radiación, en una capa de hojas, se refleja un 50% y transmite el restante. Si esa porción transmitida se encuentra con otra capa de hojas, el proceso anterior se repetirá y así sucesivamente.

Meer et, al (como se citó en Torres, 2009) exponen que la respuesta espectral de la vegetación está influida por la presencia del agua, en las longitudes de onda del infrarrojo medio (1300 a 2600 nm). La región del espectro visible en la vegetación se caracteriza por baja reflectancia y transmitancia, dada la fuerte absorción por los pigmentos foliares. Por ejemplo, los pigmentos de clorofila absorben la luz violeta-azul y roja por la fotosíntesis. La luz verde es reflejada para la fotosíntesis, razón por la cual muchas de las plantas aparecen verdes. El espectro de reflectancia de la vegetación verde muestra picos de absorción de alrededor de 420 nm (violeta), 490 nm (azul) y 660 nm (rojo). Estos son causados por una fuerte absorción de la clorofila.

2.2.7 Índices de vegetación (VI)

Un índice de vegetación se puede definir como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos, la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas (Gilabert et al., 1997). Los índices de vegetación más usados y derivables de un sector multiespectral tribanda son el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI), y el Índice de Vegetación Ajustado del Suelo (SAVI), que examinan el vigor de la vegetación para cada cultivo. Los VI representan un recurso rápido, confiable y rentable en la evaluación de cultivos para la agricultura de precisión (Candiago et al., 2015). De estos el más conocido y usado es el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada). Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta (Kharuf et al., 2018)

2.3 Marco legal

2.3.1 Normatividad civil

2.3.1.1 Resolución 04201 de 2018. Por la cual incorporan a la norma RAC 91 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia unas disposiciones sobre operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS y se numeran como apéndice 13, y se adoptan otras disposiciones (Ministerio de transporte, Resolución 04201, 2018).

2.3.1.2 Resolución 7285 de 2012. Por la cual se adoptan unas normas de aeronavegabilidad y operaciones en aviación agrícola art 3., trabajos aéreos especiales: son actividades aéreas civiles desarrolladas por personas jurídicas, con fines de lucro, distintas al transporte público aéreo, tales como aviación agrícola, aerofotografía, aerofotogrametría, geología, sismográfica, publicidad y similares. (Aeronáutica civil, Resolución 7285, 2012).

2.3.1.3 Ley 1454 de 2011. Por la cual el congreso de Colombia dicta normas orgánicas sobre el ordenamiento territorial, uso de suelo y modificación de otras disposiciones; estableciendo así una organización administrativa del territorio, mediante directrices de entes territoriales, promoviendo la descentralización y aprovechamiento del territorio (Congreso de Colombia, Ley 1454, 2011).

2.3.2 Normatividad agropecuaria

2.3.2.1 Ley 1876 del 29 de diciembre de 2017. Por medio de la cual se crea el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria y se dictan otras disposiciones. (Congreso de Colombia, Ley 1876, 2017).

2.3.2.2 Decreto 1946 de 30 de agosto de 1989. Por el cual se crea y organiza el Sistema Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria y se reglamentan los Decretos Ley 077 de 1987 y 501 de 1989, en relación con la prestación del servicio de asistencia técnica directa a los productores rurales (Presidencia de la Republica de Colombia, Decreto 1946, 1989)

2.1.3.2.3 Resolución 2341 de 2007. Por la cual se reglamentan las condiciones sanitarias y de inocuidad en la producción primaria de ganado bovino y bufalino destinado al sacrificio para consumo humano.(Gerente general del Instituto Colombiano Agropecuario ICA, Resolución 2341, 2017)

2.4 Marco conceptual

2.4.1 Sensor remoto.

El censado remoto o teledetección es un sistema que permite la captura y procesamiento de información de un objeto sin entrar en contacto con él; esto gracias a que utiliza sensores ubicados en plataformas espaciales, aviones, dirigibles, vehículos aéreos no tripulados, entre otros. Los sensores remotos obtienen imágenes de la superficie de la tierra, a partir del reflejo de los objetos sometidos a diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, teniendo en cuenta que el porcentaje de reflectancia varía en función de las propiedades físicas y químicas del objeto (Zuleta, 2018).

La teledetección suministra información periódica y actualizada del territorio a partir de la medición de la intensidad de diferentes longitudes de onda de energía electromagnética que se reflejan de la superficie terrestre. La intensidad con la que energía electromagnética es reflejada varía de acuerdo con la naturaleza física y propiedades ópticas de la superficie sobre la cual la energía incide (García y Porras, 2013).

2.4.2 Biomasa

La biomasa es la cantidad total de materia viviente que se encuentra en un área determinada o en uno de sus niveles tróficos, y se expresa en gramos de carbono, o en calorías, por unidad de superficie (Martínez y Leyva, 2014).

2.4.3 Cobertura del suelo

Por cobertura del suelo se entiende el tipo de ocupación que existe en él, ya sea vegetación natural, cultivos agrícolas o espacios urbanos. Este tipo de cartografía resulta básica en la planificación del territorio, ya que resulta preciso conocer la dedicación actual del terreno para proponer cualquier mejora (Chuvienco, 1990).

2.4.4 Fenología

La fenología es el estudio de los fenómenos periódicos que presentan los organismos vivos y su reacción con el proceso meteorológico.(Soto et al., 2009)

2.4.5 Escala

La relación existente entre las distancias medidas en un plano o mapa y las correspondientes en la realidad se denomina escala. Por tanto, la escala es una proporción entre dos magnitudes lineales, independientemente del sistema de unidades de longitud que se utilice (Instituto Geográfico Nacional de España, 2014).

2.4.6 Banda

Cada una de las partes en las que se divide el espectro electromagnético a efectos de captar la radiación por los sensores. Los datos de radiación (valores numéricos) captados para cada banda definida se suelen organizar como archivos ráster (Moreno, 2008)

2.4.7 Mapas topográficos

Un mapa topográfico o de propósito general es el que representa gráficamente los principales elementos que conforman la superficie terrestre, como vías de comunicación, entidades de población, hidrografía, relieve, con una precisión adecuada a la escala (Instituto Geográfico Nacional de España, 2014).

2.4.8 Coordenada geográfica

Valor medido sobre la superficie terrestre que sirve para determinar sobre ella la posición de cualquier punto y, en consecuencia, la que tiene respecto a cualquier otro lugar. Para determinar esos valores se utilizan líneas imaginarias, perpendiculares entre sí, denominadas paralelos y meridianos, cuya intersección define la posición del punto en el sistema de coordenadas (López, 2015).

2.4.9 Georreferenciación

Operación de obtener y asignar coordenadas geográficas a una información (normalmente una capa) que carece de ella. Suele aplicarse para situar imágenes de la Tierra o eventos asociados a direcciones postales (Moreno, 2008).

2.4.10 Nube de puntos densa

Modelo de nube de puntos detallado que se deriva del set de imágenes y la nube dispersa en el proceso fotogramétrico (Rímolo et al., 2021).

2.4.11 Ortomosaico, ortomapa

Mosaico de imágenes aéreas combinadas y corregidas como una proyección plana con calidad cartográfica (Rímolo et al., 2021).

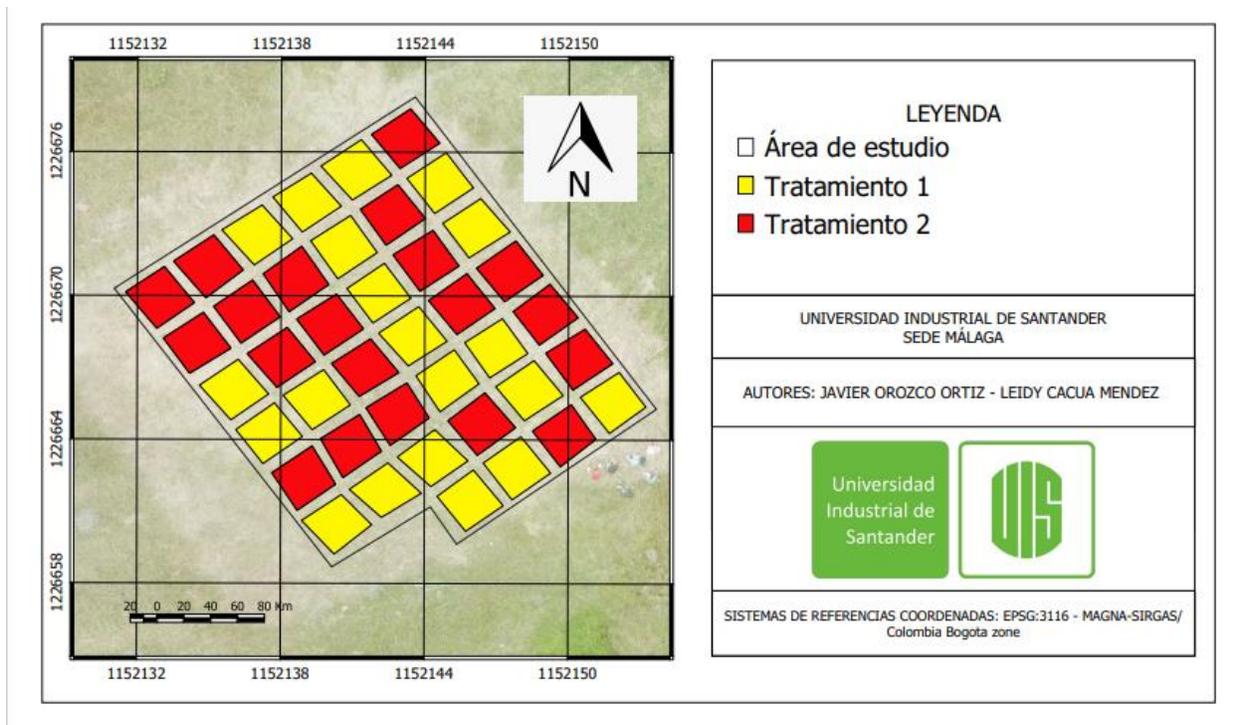
3. Metodología

3.1 Tipo de estudio

El estudio realizado fue de tipo investigativo, el cual tuvo como principal objetivo evaluar la productividad de las praderas fertilizadas a través de índices de vegetación.

3.2 Zona de estudio

Figura 1. Mapa de distribución del área de estudio de las cuarenta parcelas ubicado en la vereda Loma del Negro, municipio de Enciso, Santander, Colombia. Elaborado con QGIS 3.16.



La investigación se realizó en el municipio de Enciso en la vereda Loma del negro localizada a $6^{\circ}38'52.36''$ latitud norte y $72^{\circ}41'59.93''$ longitud oeste, cuenta con un clima templado de temperatura promedio de $21,4^{\circ}$ C a una altitud de 1527 m.s.n.m. La zona de estudio

cuenta con área de 575 mt², en la cual se observa que predominan especies forrajeras como pasto estrella (*Cynodon Nlenfluensis*), y en menor proporción jaragua (*Hyparrhenia rufa*) y brachiaria (*Bracharia decumbens*). En la figura 1 se muestra el mapa de distribución de la zona de estudio.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Adecuación del terreno

Una vez ubicado el potrero, se hizo medición y alistamiento del terreno mediante retiro de material vegetal leñoso y algunas rocas para facilitar el paso de la guadaña por esta área, una vez podada se procedió a retirar todo el forraje cortado, así como la instalación de una cerca perimetral para evitar el ingreso de animales o personas a la zona de estudio.

3.3.2 Medición de parcelas

Se hizo medición de cada parcela de 2 x 2 metros, colocación de estacas y cintas delimitando cada una, con separación por todos los lados de 50 cm (efecto de borde) entre parcelas, que no generaran inconvenientes al momento de aplicar la fertilización, además de facilitar la toma de datos y diferenciación entre las mismas.

3.3.3 Distribución de tratamientos

Se realizaron 40 parcelas (unidades experimentales), donde se asignaron 20 parcelas para cada tratamiento asignados aleatoriamente de la siguiente manera: T1: Parcela sin fertilización T2: parcela con fertilización. El experimento tuvo una duración de 48 días, distribuidos en dos temporadas de corte la primera o día 20 (12-sep-2021) y la segunda o día 48 (10-oct-2021) para la recolección de los datos.

3.3.4 Fertilización

Se calcularon las cantidades mediante un análisis de suelos previo del terreno, organizando el plan de fertilización a aplicar en el T2 de acuerdo con los requerimientos del forraje usando una mezcla orgánica 20 % (compost de caprinaza) y sintética 80% (Urea 46%, DAP, KCl y MgSO₄). La fertilización fue realizada al día 3 del corte, con el propósito de que hubiera mayor retención (inicio de crecimiento o desarrollo de la pradera) y eficiencia de esta, sumado a las condiciones de topográficas del terreno, evitando la caída del fertilizante en los tratamientos no fertilizados.

3.3.5 Materiales

3.3.5.1 Dron utilizado. El tipo de dron usado para el presente estudio es el Dji Mavic Pro, cuenta con cámara estabilizada, modos de vuelo inteligente y sistema anticolidión, captura videos de 4k y fotos de 12 megapíxeles, alcanza una velocidad máxima de vuelo de 65 km/h y un tiempo máximo de vuelo de 27 minutos. (*Mavic PRO Manual de Usuario V1.2*, 2017)

3.5.2 Cámara espectral. La cámara multispectral empleada fue la cámara Parrot sequoia, la Parrot Sequoia mide la cantidad de luz que absorben y reflejan las plantas con sus dos sensores. El sensor multispectral captura instantáneas en RGB (Red, Green, Blue) y mide la luz reflejada en cuatro bandas de frecuencia: rojo y verde y dos bandas de infrarrojos invisibles al ojo humano; además de un sensor solar situado en la parte superior, registra la intensidad de la luz ambiente en estas cuatro bandas, realizando una calibración radiométrica para garantizar la coherencia de las mediciones (*Cámara Multispectral Parrot Sequoia. Tienda de Drones En Madrid*, n.d.).

3.3.6 Evaluación de variables

Para el cálculo de las variables, fueron empeladas las metodologías según Haydock y Shaw (1975) y Rouse et al., (1978), las cuales se describen en la tabla 1.

Tabla 1. variables evaluadas con su respectiva metodología.

Variable	Método
Biomasa gr/ m ²	Según la metodología aplicada por Haydock y Shaw (1975) se efectuó la medición de la cantidad de forraje por unidad de área (kg/Ha, gr/m ² , etc.), mediante un cuadro en PVC de 1 x 1m sobre cada parcela, realizando pesaje del material vegetal. Para el experimento se aplicó tanto en T1 como en T2, cuantificando las cantidades de 4 réplicas por cada parcela, luego de realizar el vuelo con el dron.
Índices de vegetación	<p>Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI): según el método empleado por Rouse et al., (1978) brinda una estimación de la cantidad y desarrollo de la vegetación, realizando correlación con la toma de biomasa disponible en el aforo; para el cálculo es necesario aplicar la siguiente fórmula: $(NIR-Red) / (NIR+RED)$.</p> <p>Índice verde de clorofila (Cig): La evaluación se realizó al día 20 y 48 respectivamente, según la metodología de Gitelson et al., (2003) usando el mosaico, obtenido de la multiespectral y aplicando la siguiente ecuación: $(NIR/G)-1$</p> <p>Índice reflectante de planta senescente (PSRI): La metodología empleada por (Peñuelas et al., 1993), indica la toma del índice desde la multiespectral usando la siguiente formula $(R-G)/NIR$, para determinar el valor en rango, estimando el grado de senescencia del forraje.</p>

Para la determinación de los anteriores índices, en la investigación se usaron las imágenes tomadas desde la cámara multiespectral realizando mosaicos y adecuación en Pix 4D y QGIS, posterior se exportaron y se hizo la tabulación para el procesamiento de estos.

3.3.7 Análisis estadístico

Con el propósito de evaluar la productividad de las praderas bajo dos tipos de fertilización, se cuantificaron las variables biomasa fresca y índices de vegetación (Clg, PSRI, NDVI), aplicando un modelo estadístico completamente al azar (DCA) de Padrón, (1996) descrito a continuación:

3.3.7.1 Modelo estadístico

$$Y_{ij} = \mu + t_i + \epsilon_{ij}$$

Y_{ij} = observación de la variable respuesta a la aplicación de cada tratamiento

$$i = 1, \dots, t;$$

$$t = 2 \text{ Tratamientos}$$

$$j = 1, \dots, n;$$

$$n = 80 \text{ repeticiones}$$

Donde:

μ = Media poblacional

t_i = efecto del i-ésimo tratamiento

ϵ_{ij} = Error experimental

Los datos fueron analizados en ANOVA ($p > 0,05$) aplicando el software InfoStat versión 2020 y usando la prueba de comparación Duncan para separar los tratamientos de la media poblacional.

3.3.7.2 Aplicación de correlación Pearson. Con el propósito de comparar la biomasa tomada en campo mediante aforos y las imágenes multiespectrales tomadas desde el dron se realiza una correlación entre la variable biomasa y los índices de vegetación, determinando la incidencia o no de estos sobre las cantidades recolectadas en el aforo.

4. Resultados

Para el caso de los índices de vegetación, se considera que: los valores para NDVI van desde -1 a 1, donde valores (< 0) no presentan vegetación, (0,01 – 0,2) la vegetación es baja (0,2 – 0,4) vegetaciones medias y ($> 0,5$) vegetaciones densas o altas. Para el verde de clorofila (Clg) los rangos fluctúan desde valores negativos menores que cero (< 0) o suelos desnudos, rangos cercados a cero (0), son praderas recién establecidas o con poco forraje; mientras que, a mayor cantidad de forraje, mayor será el valor obtenido en el índice de forma positiva ($> 0,5$). Finalmente, para el índice reflectante de planta senescente (PSRI) mientras más alejados de cero (< 0) o valores negativos habrá menor cantidad de material senescente (material seco lignificado o maduro), en contraste si existen valores positivos (> 0), mayor será la cantidad de material senescente, maduro o amarillo en el forraje.

Luego de realizar un ANOVA para todos los tratamientos y al presentar diferencias significativas, posteriormente se realizó una prueba de Duncan que mostró diferencias respecto a la Biomasa y a los índices Clg y NDVI, no obstante, para el caso del PSRI la diferencia no es contrastante; sin embargo, se procedió a tabular los datos en tablas resúmenes y correlaciones que se muestran a continuación:

Tabla 2. Variables biomasa fresca, Clg, NDVI y PSRI, evaluada en los tratamientos T1 y T2 para la primera temporada o día 20 (12-sep-2021).

Tratamiento/ variable	Media			
	Biomasa gr/m ²	NDVI	Clg	PSRI

T1	155,32	b	0,34	b	0,26	b	-0,33	a
T2	280,60	a	0,41	a	0,41	a	-0,31	a
CV	36,45		19,95		43,24		23,99	
p-valor	0,0001		0,0001		0,0001		0,1560	

Nota: Tabla resumen de ANOVA, Clg = Índice verde de clorofila, NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada, PSRI = Índice reflectante de planta senescente.

$P > 0,05$ = no existen diferencias estadísticas.

$P < 0,05$ = existen diferencias estadísticas.

CV = coeficiente variación

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Con respecto a la variable biomasa fresca existen diferencias significativas luego de aplicar la prueba Duncan teniendo un valor de significancia de ($p < 0,05$) se evidencia diferencia al comparar la media entre T1 (sin fertilización) y T2 (con fertilización), siendo este último el de mayor producción de biomasa con relación a T1 (véase figura 3). Para las variables Clg y NDVI se observan también diferencias entre T1 y T2 con rangos de medias para Clg de 0,26 y 0,41, y para NDVI valores de 0,34 y 0,41, para T1 y T2 respectivamente (véase figura 2), presentando variaciones en los índices de reflectancia sometidos a cada tratamiento del experimento; no obstante, la variable PSRI no difiere significativamente entre T2 y T1 teniendo un valor de significancia ($p > 0,05$).

Figura 2. Variables NDVI, Clg y PSRI, evaluadas en los tratamientos T1 y T2 para el día 20.

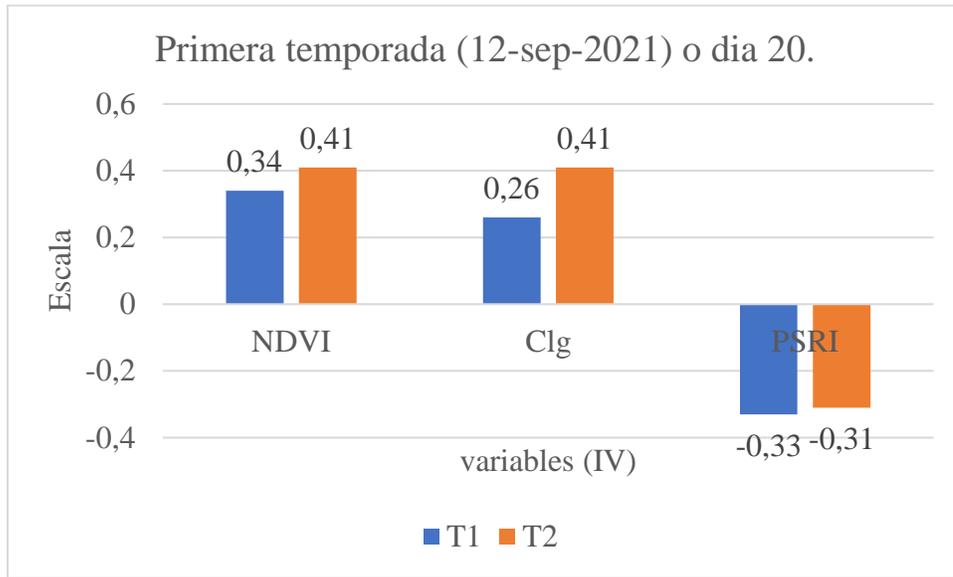


Tabla 3 Variables biomasa fresca, Clg, NDVI y PSRI, evaluada en los tratamientos T1 y T2 para la segunda temporada o día 28 (10-oct-2021).

Tratamiento/ variable	Media							
	Biomasa gr/m2		NDVI		Clg		PSRI	
T1	261,1	b	0,29	b	0,38	b	0,57	a
T2	673,2	a	0,46	a	0,76	a	0,37	b
CV	37,86		15,66		29,74		20,35	
p-valor	0,0001		0,0001		0,0001		0,0001	

Nota: Tabla resumen de ANOVA, Clg = Índice verde de clorofila, NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada, PSRI = Índice reflectante de planta senescente.

P >0,05= no existen diferencias estadísticas.

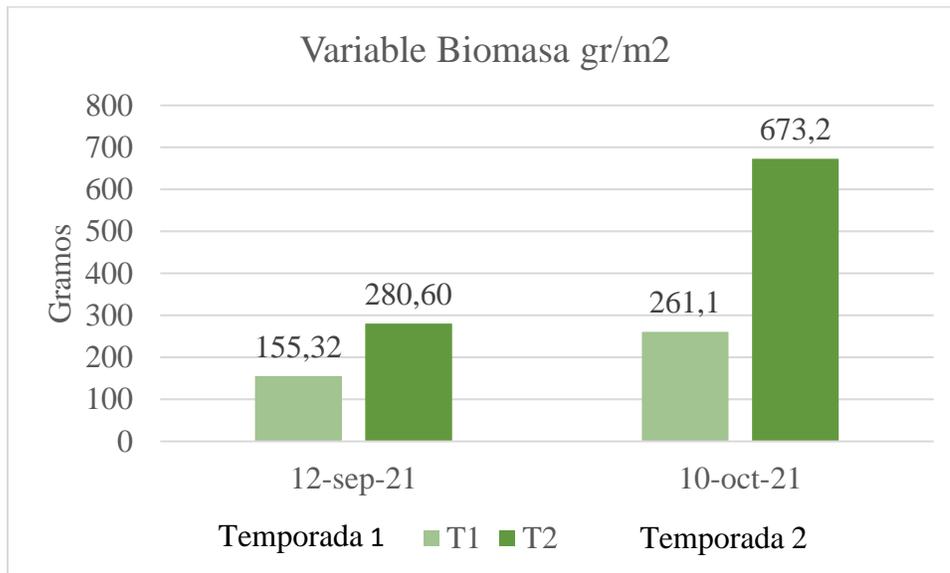
P <0,05= existen diferencias estadísticas.

CV= coeficiente variación

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Para las variables se tomaron los valores de las medias para los tratamientos T1 (sin fertilización) y T2 (con fertilización) con el propósito de observar la diferencia para la segunda toma de datos con un valor de significancia de ($p < 0,05$) y realizando comparaciones aplicando la prueba Duncan arrojó como resultado que para T1 contrastado con T2, se evidencian diferencias significativas para las variables biomasa fresca, siendo T2 significativamente la de mayor producción respecto a T1 (véase figura 3).

Figura 3. Grafica para la variable producción de biomasa para ambas temporadas, evaluada en T1 y T2.



Para la variable NDVI se observaron medias con valores de 0,29 y 0,46, mientras que para Clg medias de 0,38 y 0,76, para T1 y T2 respectivamente, mostrando diferencias estadísticas entre ambos tratamientos. En el caso de PSRI se hallan rangos de 0,37 y 0,57 observando diferencias significativas entre T1 respecto a T2 como se aprecia en la figura a continuación:

Figura 4 Variables NDVI, Clg y PSRI, evaluadas en los tratamientos T1 y T2 día 48 del estudio.

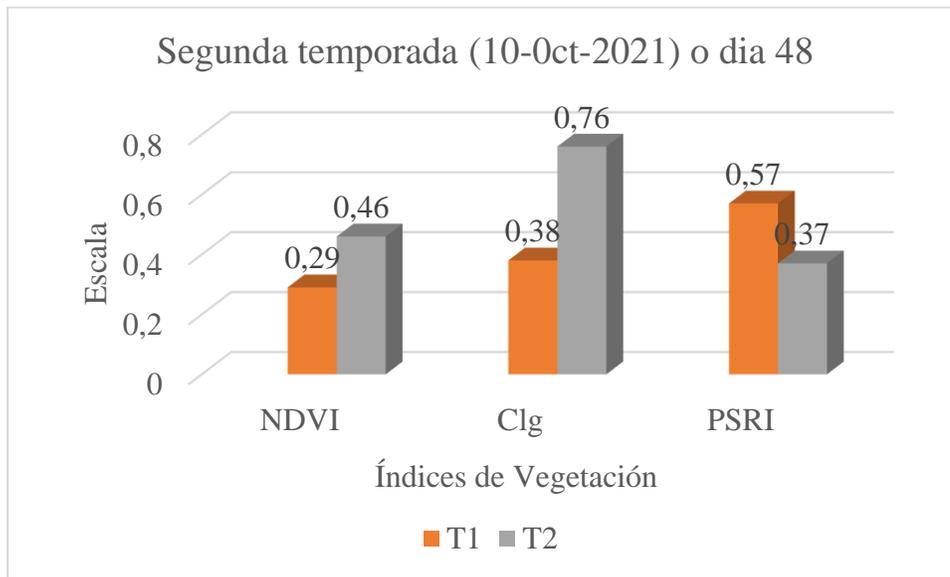


Tabla 4 Correlación de Pearson aplicada a las variables en estudio para la primera temporada (12-septiembre-2021)

	Biomasa	Clg	NDVI	PSRI
Biomasa	1,00	0,00	0,00	0,00
Clg	0,55	1,00	0,00	0,00
NDVI	0,59	0,74	1,00	0,00
PSRI	0,02	0,43	-0,26	1,00

Nota: Clg = Índice verde de clorofila

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada

PSRI = Índice reflectante de planta senescente

Con relación a la metodología expuesta se aprecia una correlación positiva entre los índices de vegetación Clg y NDVI en contraste con la producción de biomasa fresca, lo que infiere que, la variable biomasa se encuentra directamente relacionada con los valores de las variables NDVI y Clg en el forraje, teniendo así respuesta de la relación entre el aforo y la toma de imágenes desde el dron, siendo eficiente este último; no obstante, para el caso de la variable PSRI y Biomasa la

correlación es baja a nula. Sin embargo, al contrastar la variable NDVI y Clg se denota que las variables están directamente relacionadas entre sí de manera positiva, así mismo existe correlación media positiva entre la variable Clg y PSRI, finalmente se logra ver una correlación inversamente proporcional entre la variable NDVI y PSRI, es decir que no existe relación entre uno y otro índice, en consecuencia, a mayor sea el desarrollo (vigorosidad y crecimiento) menor será la madurez (senescencia) de la pradera.

Tabla 5 *Correlación de Pearson aplicada a las variables en estudio para la segunda temporada (10-octubre-2021)*

	Biomasa	Clg	NDVI	PSRI
Biomasa	1,00	0,00	0,00	0,00
Clg	0,63	1,00	0,00	0,00
NDVI	0,75	0,85	1,00	0,00
PSRI	-0,75	-0,85	-1,00	1,00

Nota: Clg = Índice verde de clorofila

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada

PSRI = Índice reflectante de planta senescente

Las correlaciones se realizaron de la misma forma aplicando la correlación de Pearson a todas las variables, observando correlaciones más altas, en contraste con las de la primera toma, ya que había mayor cantidad de pasto (biomasa) en las parcelas; para el caso de la variable biomasa contrastada con los índices Clg y NDVI, donde continúa la afinidad alta sobre los datos recopilados en el aforo y las multiespectrales, existiendo relación directa entre las variables; simultáneamente las variables NDVI y Clg presentan una relación directamente proporcional entre las mismas, indicando que cuanto más sea la cantidad de forraje mayor será la actividad fotosintética en la

pradera. Por otro lado, existe una correlación negativa inversamente proporcional de la variable PSRI respecto a las demás variables, lo que traduce en que a mayor cantidad de forraje (biomasa), se refleja la energía incidente, producto de la radiación debido a tamaño de la vegetación (NDVI) y, por ende, existe actividad fotosintética (C_{lg}) elevada, mientras la variable PSRI, aparece en bajas producciones de biomasa, suelos pobres de forraje o erosionados.

5. Discusión

Según el estudio realizado por Peñuelas et al., (1993) la fertilización influye significativamente en la producción de biomasa, donde se evaluaron diferentes dosis de fertilizantes sobre un tratamiento testigo, existiendo diferencias en las zonas fertilizadas, igualmente concuerda con el experimento realizado por Velazco et al., (2018), donde se mostraron diferencias significativas en los tratamientos donde se llevó a cabo una fertilización, así como el estudio realizado, donde se hallan medias superiores en el T2 al comparar los valores de T1 en ambas temporadas de corte. Finalmente Villalobos y Arce, (2012) quienes buscaron cuantificar la producción de biomasa y la fenología del pasto estrella usando diferentes metodologías de fertilización orgánica e inorgánica, demostraron también el crecimiento acelerado de la pradera fertilizada, sin embargo, es necesario idear un plan de rotación y manejo, evitando que llegue al estado de senescencia del forraje y disminuya su aprovechamiento y calidad.

Al comparar el estudio con Rodríguez et al., (2016) en el cual evaluaron la variabilidad temporal del NDVI en fincas lecheras en el norte de Antioquia, encontraron valores del NDVI, entre 0,40 y 0,60, concuerda con el resultado obtenido en el estudio para esta variable, en el cual

se observó que el NDVI variaba en rangos entre 0,25 a 0,52, donde el rango más alto se encontraba en las parcelas sometidas al T2, por la abundancia de forraje de las mismas en relación a los rangos inferiores observados para el T1, Pascual, Paz, y Bolaños, (2012) reafirman que diversos estudios del valor del intervalo del NDVI se limita a la cantidad directa de biomasa presente en la pradera, debido al espeso follaje verde, aumentando su intervalo a mayor presencia de vegetación; no obstante para Aguirre y Garbulsky (2018) se continua con el mismo patrón de la cantidad de biomasa relacionada con el NDVI; en consiguiente, este estudio también concuerda que entre los índices de vegetación que mejor estima la cantidad de biomasa es el de diferencia normalizada (NDVI), siendo un indicador de productividad (García y Girimonte, 2020)

De acuerdo con los datos obtenidos se observa una relación directa entre el índice de vegetación NDVI y Clg, según Campo et al., (2002) quien determino las relaciones existentes entre el índice espectral de la vegetación NDVI y la cobertura vegetal, concluyo que el Clg es complemento del primero, pues cuantifica el total de clorofila a través del infrarrojo y la banda verde visible, asociado a la totalidad de la cobertura vegetal, así como la actividad fotosintética debido al contenido de clorofila en la vegetación, asegurando una precisión para el NDVI, para el caso de la investigación se ve como en el T2, se mantienen en las medias más altas existiendo diferencias similares para el NDVI y Clg en contraste con el T1. Según Dedios, (2009), el estado fenológico de la vegetación se ve afectada por la clorosis o algún tipo de enfermedad provocando que las bandas sean más rojas o de menor producción de clorofila, tal cual como se observa en el T1, por la baja disponibilidad de nitrógeno en el suelo (nula fertilización) y forraje provocando una clorosis pronunciada en la vegetación.

En un estudio realizado por (Pascual, Paz, y Bolaño, (2012) que se basaba en mostrar un enfoque genérico de modelación de la relación entre la biomasa y los índices de vegetación, demuestra que para el índice PSRI, el deterioro (envejecimiento o ausencia de forraje) se refleja en la banda Red, en contraste con la investigación se reafirma que la senescencia del follaje cuando se torna amarillento se incrementa el intervalo de este índice, además Villalobos y WingChing, (2019) quien evaluó la respuesta del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) a la remoción de material senescente, corrobora que la degradación de pasturas tiende a asociarse con factores como el tiempo de rotación, enfermedades, factores climáticos, y baja fertilidad de los suelos; también Posada et al., (2019) menciona que el PSRI se relaciona con características fisiológicas, maduración de las praderas y enfermedades, esto contrasta con la nula relación existente entre la cantidad de biomasa con la presencia del índice PSRI, en la primera temporada para el T1 y manteniendo el intervalo en el mismo tratamiento para el segundo corte, correlacionando inversamente los demás índices con el descrito para ambos tratamientos.

5. Conclusiones

Con respecto a la producción de biomasa se puede inferir que el pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) responde de manera eficiente a la fertilización, ya que se observaron medias superiores en el tratamiento donde se aplicaron los fertilizantes (T2) presentando diferencias sobre la producción de biomasa, respecto al T1; esto traduce que para tener mayor cantidad de pastos es necesario realizar un manejo de pradera, donde con base en un análisis de suelos, se formule un plan de fertilización que asegure, que el forraje contenga los nutrientes necesarios para producir

mayor cantidad de alimento en la misma área, logrando así alimentar más animales y contribuyendo en la mejora directa del sistema productivo.

Mediante los resultados obtenidos en el estudio se puede determinar que, el índice diferencia normalizada (NDVI) es el que mejor estima la producción de biomasa en el pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*), verificado así, en la fuerte correlación que presenta el índice respecto a la variable biomasa, independientemente del tratamiento y la temporada de corte del forraje, afirmado también por otros autores como el mejor índice que determina la productividad de un cultivo.

Se obtuvo que a la hora de estudiar la correlación del índice PSRI y biomasa fresca, se infiere que las parcelas sometidas al T1, presentaron mayor intervalo en el índice reflectante de planta senescente, pues la cantidad de biomasa es menor para ambas temporadas, es decir que no presentan relación entre la producción de biomasa y por ende el índice NDVI y Clg presentan la misma correlación de forma inversa negativa.

Esta tecnología permite un mayor número de observaciones y mejor estimación de la disponibilidad y cobertura de la pastura a nivel del potrero, donde se logra una estimación más confiable y así mismo, información útil acerca de las variaciones espaciales de cada potrero además de un comportamiento de la vegetación sometida a pastoreo, agilizando la toma de decisiones en la ganadería de manera oportuna.

6. Recomendaciones

En próximas investigaciones se sugiere la aplicación de algunas pruebas de laboratorio (análisis bromatológicos) con el fin de hacer una comparación con algunos índices que presentan incidencia según otros autores con la composición de la pradera.

Realizar este tipo de estudio durante un tiempo más prolongado, aumentando el periodo de muestreo y considerando aplicar otro tratamiento con una fertilización intermedia, con el fin de aumentar la confiabilidad del experimento.

Considerar la aplicación de esta tecnología para la estimación de la producción de forraje en fincas, que le permitan al productor una rápida toma de decisiones sobre la cantidad de animales que puede alimentar en cada potrero, maximizando el aprovechamiento de este.

Se recomienda que, se realice un plan de fertilización basado en análisis de suelos, para aumentar la productividad de las praderas, con el propósito de mantener más animales en la misma cantidad de terreno, así como un sistema rotacional de praderas.

Referencias Bibliográficas

- Andújar, D., Calle, M., Peña, J., Ribeiro, Á., Fernández, C., y Dorado, J. (2017). Modelización 3D de malas hierbas en cultivos de maíz mediante fotogrametría digital automatizada. *XVI Congreso de La Sociedad Española de Malherbología*, 1–6. <https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/27194/O4.6.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Cámara Multiespectral Parrot Sequoia. Tienda de drones en Madrid.* (n.d.). Retrieved November 3, 2020, from <https://elvuelodeldrone.com/repuestos-y-accesorios/repuestos-parrot/camara-multiespectral-parrot-sequoia/>
- Campo, A., García, R., Marinas, A., y Gartzia, M. (2002). Relaciones entre el índice espectral de vegetación NDVI y la cobertura vegetal en pastos del puerto del pirineo occidental. *Producciones Agroganaderas: Gestión Eficiente y Conservación Del Medio Natural, 1*.
- Candiago, S., Remondino, F., de Giglio, M., Dubbini, M., y Gattelli, M. (2015). Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sensing*, 7(4), 4026–4047. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>
- Carvalho, P. C. de F., Paruelo, J., y Walter, A. (2008). La intensificación productiva en los pastizales del Río de la Plata: tendencias y consecuencias ecosistémicas. . *XXII Reunión Del Grupo Técnico En Forrajeras Del Cono Sur: Grupo Campos*, 29–40. https://www.researchgate.net/profile/Walter-Ayala/publication/266202333_La_intensificacion_productiva_en_los_pastizales_del_Rio_de_la_Plata_Tendencias_y_consecuencias_ecosistemicas/links/5429aa740cf27e39fa8e6604/

La-intensificacion-productiva-en-los-pastizales-del-Rio-de-la-Plata-Tendencias-y-consecuencias-ecosistemicas.pdf

Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. Segunda edición. In (*Fundamentals of remote sensing from space* (Ediciones).

Decreto 1946 de 1989 [Presidencia de la Republica de Colombia] Por el cual se crea y organiza el Sistema Nacional del Transferencia de Tecnología Agropecuaria y se reglamentan los Decretos-ley 077 de 1987 y 501 de 1989, en relación con la prestación del servicio de asistencia técnica directa a los productores rurales. Agosto 30 de 1989.

Dedios, J. (2009). Spatial Analysis of phenological behavior of vegetation in the Chira River using high spectral resolution images. *Revista Peruana Geo-Atmosférica RPGA*, 1, 20–34. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/1081/An%C3%A1lisis-espacial-del-comportamiento-fenol%C3%B3gico-de-la-vegetaci%C3%B3n%20en-la-cuenca-del-r%C3%ADo-Chira.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

FAO. (2017). *El trabajo de la FAO sobre cambio climático. Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. <http://www.fao.org/3/a-i8037s.pdf>

Fedegán. (2014). *Foro ganadería regional visión 2014-2018. Bases para el Plan de Acción Meta*.

García, A., y Porras, F. (2013). Potencialidad y nuevas orientaciones en el uso de la teledetección en agricultura y selvicultura. *La Revista Del Ministerio de Medio Ambiente*, 105, 6–15. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4978944>

García, F., y Girimonte, P. (2020). El índice NDVI y la clasificación de áreas sembradas aprendizaje automático . *Revista de Investigación En Modelos Matematicos Aplicados a La*

Gestión y Economía , 1, 39–52. http://www.economicas.uba.ar/institutos_y_centros/revista-modelos-matematicos/

Gilabert, M. A., Gonzalez, J., y García, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección* , 8(1), 1–10. <https://www.researchgate.net/publication/39195330>

Gitelson, A., Gritz, Y., y Merzlyak, M. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiol*, 160, 271–282. <http://www.urbanfischer.de/journals/jpp>

Haydock, K., y Shaw, N. (1975). *The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture*.

<https://pdfs.semanticscholar.org/07b0/c0240b8081e6eb0373e08914b452fd712135.pdf>

Hoyos, E., Posada, W., y Cerón, M. (2019). Fotografía multiespectral para el diagnóstico fitosanitario de pasto kikuyo (*Cechrus clandestinus* (Hochst ex Chiov) Morrone). *Acta Agronómica*, 68, 61–67. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/acag.v68n1.75662>

Instituto Geográfico Nacional de España. (2014). Conceptos cartográficos. *IGN & UPM LatinGEO*, 21.

http://www.ign.es/web/resources/cartografiaEnsenanza/conceptosCarto/descargas/Conceptos_Cartograficos_def.pdf

Kharuf, S., Hernández, L., Orozco, R., Aday, O., y Mora, I. (2018). Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados. *RIELAC*, XXXIX, 79–91.

Ley 1454 de 2011 [Congreso de Colombia]. Por la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y se modifican otras disposiciones. Junio 28 de 2011.

- Ley 1876 de 2017 [Congreso de Colombia]. Por medio de la cual se crea el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria y se dictan otras disposiciones. Diciembre 29 de 2017.
- López, L. (2015). *Diccionario de geografía aplicada y profesional: terminología de análisis, planificación y gestión del territorio*.
- MADR. (2020). *Cifras sectoriales cadena cárnica. Ministerio de agricultura y desarrollo rural (MADR)*.
- Martínez, A., y Leyva, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, 35(1), 11–20.
- Mavic PRO Manual de usuario V1.2. (2017).
https://dl.djicdn.com/downloads/mavic/Mavic+Pro+User+Manual_ES+V1.2+released.pdf
- Moreno, A. (2008). *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS. 2ª.: Geografía física y topografía* (2nd ed.). AlfaOmega Ra-Ma.
[https://es.scribd.com/read/409464683/Sistemas-y-Analisis-de-la-Informacion-Geografica-Manual-de-autoaprendizaje-con-ArcGIS-2ª-Geografia-fisica-y-topografia#](https://es.scribd.com/read/409464683/Sistemas-y-Analisis-de-la-Informacion-Geografica-Manual-de-autoaprendizaje-con-ArcGIS-2a-Geografia-fisica-y-topografia#)
- Muñoz, P. A. C. (2005). Fundamentos de manejo de praderas para mejorar la productividad de la ganadería del trópico colombiano. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 6(2), 5–13.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol6_num2_art:42
- Murgueitio, E., y Calle, Z. (1998). Diversidad biológica en sistemas de ganadería bovina en Colombia. *Conferencia Electrónica de La FAO Sobre “Agroforestería Para La Producción Animal En Latinoamérica” Diversidad Biológica En Sistemas de Ganadería Bovina En Colombia*, 27–46. <https://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/agrofor1/Murguei3.htm>

- O'Mara, F. P. (2012). The role of grasslands in food security and climate change. *Annals of Botany*, 110(6), 1263–1270. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs209>
- Padrón, E. (1996). Diseños experimentales con aplicación a la agricultura y la ganadería. In *sidalc.net* (1st ed.). Trillas. <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=AGRISUM.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000158>
- Parody, A., y Zapata, E. de J. (2018). Agricultura De Precisión En Colombia Utilizando Teledetección De Alta Resolución. *Suelos Ecuatoriales*, 48(1 y 2), 41–49. http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuatoriales/article/view/94
- Pascual, F., Paz, F., y Bolaños, M. (2012). Estimation of Aerial Biomass on Crops Using Remote Sensing. *Terra Latinoamericana*, 30(1), 17–28. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57324651003.pdf>
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Savé, R. (1993). The reflectance at the 950-970nm region as an indicator of plant water status. *Remote Sensing*.
- Ponce, E., Guadalupe, M., Fajardo, D., Acevedo, B., de La Torre, M., Avila, H., y Castro, W. (2020). A systematic review of the literature focused on the use of unmanned aerial vehicles during the vegetation detection process. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, 2020(36). <https://doi.org/10.17013/risti.36.82-101>
- Posada, W., Medina, M., y Cerón, M. (2019). Estimación de la calidad y cantidad de pasto kikuyo (*Cenchrus clandestinum* (Hochst. ex Chiov.) Morrone) usando imágenes multiespectrales. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1195>

- Resolución 04201 de 2018 [Ministerio de transporte]. Por la cual incorporan a la norma RAC 91 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia unas disposiciones sobre operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS entre otras disposiciones. Diciembre 27 de 2018.
- Resolución 7285 de 2012 [Aeronáutica civil]. Por el cual se adoptan unas normas de aeronavegabilidad y operaciones en aviación agrícola. Diciembre 21 de 2012.
- Resolución 2341 [Gerente general de Instituto Colombiano Agropecuario ICA] Por la cual se reglamentan las condiciones sanitarias y de inocuidad en la producción primaria de ganado bovino y bufalino destinado al sacrificio para consumo humano. Agosto 23 de 2007.
- Rímolo, R., Arriola, S., Umaña, A., López, S., Sepúlveda, N., Villalobos, L., Monge, J., y Somarriba, E. (2021). Fotogrametría digital con sistemas aéreos no tripulados. In *CATIE* (1st ed.).
- Rodríguez, H., Bastidas, A., y Restrepo, L. (2016). Aplicación de los sistemas de información geográfica en la evaluación del desarrollo sectorial: análisis de la cadena láctea en Antioquia. Application of GIS in the assessment of sector development: analysis of the dairy chain in Antioquia. *Livestock Research for Rural Development.*, 28. <http://www.lrrd.org/lrrd28/7/rodr28131.html>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., & Schell, J. A. (1978). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, 1*, 48–62.
- Sá, I., Almorox, J. A., y Antonio, R. (1999). Aplicación de sensores remotos en la detección y evaluación de plagas y enfermedades en la vegetación. *Teledetección. Avances y Aplicaciones*, 64–67. <http://dns2.aet.org.es/congresos/viii/alb16.pdf>

- Schirrmann, M., Hamdorf, A., Giebel, A., Gleiniger, F., Pflanz, M., & Dammer, K.-H. (2017). Regression Kriging for Improving Crop Height Models Fusing Ultra-Sonic Sensing with UAV Imagery. *Remote Sensing* 2017, Vol. 9, Page 665, 9(7), 665. <https://doi.org/10.3390/RS9070665>
- Soto, F., Plana, R., y Hernández, N. (2009). Influencia de la temperatura en la duración de las fases fenológicas del trigo harinero (*Triticum aestivum* ssp. *aestivum*) y triticale (X *Triticum secale* Wittmack) y su relación con el rendimiento. *Cultivos Tropicales*, 30(3), 32–36. <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v30n3/ctr140309.pdf>
- Torres, L. A. (2009). *Caracterización de firma espectral a partir de sensores remotos para el manejo de sanidad vegetal en el cultivo de palma de aceite* *Characterization of the Spectral Signature from Remote Sensors for the Management of Plant Health in the Oil Palm Crop* *Intro.* 30(3), 63–79.
- Velazco, L., Calderón, M., y Mendoza, M. (2018). Fertilización nitrogenada y frecuencia de corte sobre producción forrajera del pasto Estrella | Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal. *Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal* , 2(3), 7–15. <http://www.revistaecuadorianadecienciaanimal.com/index.php/RECA/article/view/87>
- Villalobos, L., y Arce, J. (2012). Evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana (*cynodon nlemfuensis*) en la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. I. Disponibilidad de Biomasa y Fenología. *Centro de Investigaciones En Nutrición Animal y Escuela de Zootecnia, Universidad de Costa Rica.* , 37(1), 91–101. www.mag.go.cr/revagr/index.htmlwww.cia.ucr.ac.cr

- Villalobos, L., & WingChing, R. (2019). Mechanical removal of senescent material for pasture recovery. *Agronomy Mesoamerican*, 30(3), 821–840.
<https://doi.org/10.15517/am.v30i3.36625>
- Weng, Q. (2010). *Theories, Methods, and Applications Remote Sensing and GIS Integration*.
- Zapata, A., y Silva, B. (2020). *Sistemas silvopastoriles: aspectos teóricos y prácticos* (CARDER & CIPAV, Eds.; Segunda Edición). CIPAV. <http://cipav.org.co/wp-content/uploads/2020/08/sistemas-silvopastoriles-aspectos-teoricos-y-practicos.pdf>

Apéndices

Apéndice A Elaboración y distribución de parcelas



Nota: en el apéndice A se muestra la poda del área a trabajar, elaboración y la correspondiente distribución de parcelas para cada tratamiento en el inicio del experimento (22-08-21). Imagen tomada con el dron diji mavic PRO.

Apéndice B Vuelo primera temporada (12-septiembre-2021)



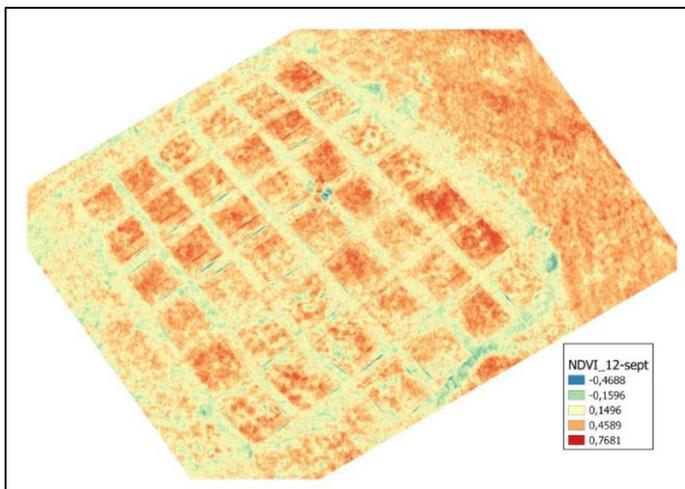
Nota: En el apéndice B se representa la elaboración del mosaico a partir de las imágenes tomadas en la primera temporada (12-09-21) con ayuda del programa Pix4D.

Apéndice C Vuelo segunda temporada (10-octubre-2021)

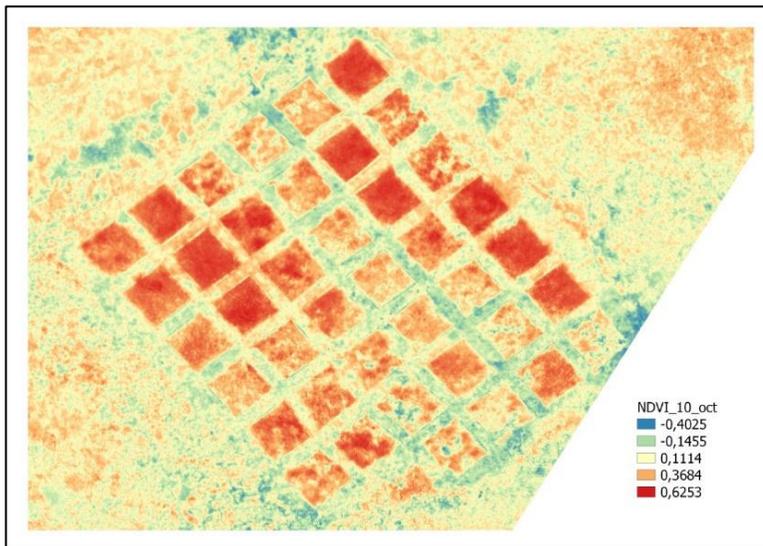


Nota: En el apéndice B se representa el mosaico a partir de las imágenes tomadas en la primera temporada (12-09-21) con ayuda del programa Pix4D.

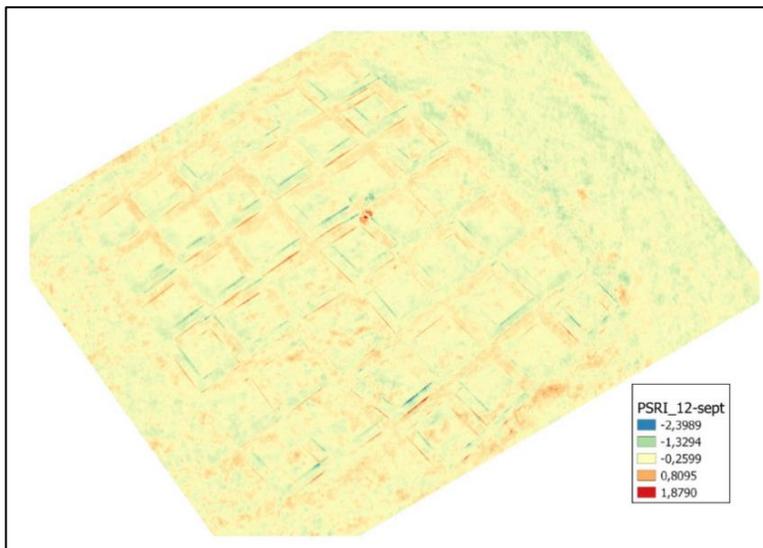
Apéndice C Índice de Vegetación de diferencia normalizada (NDVI) primera temporada



Nota: El apéndice E muestra el NDVI en la primera temporada

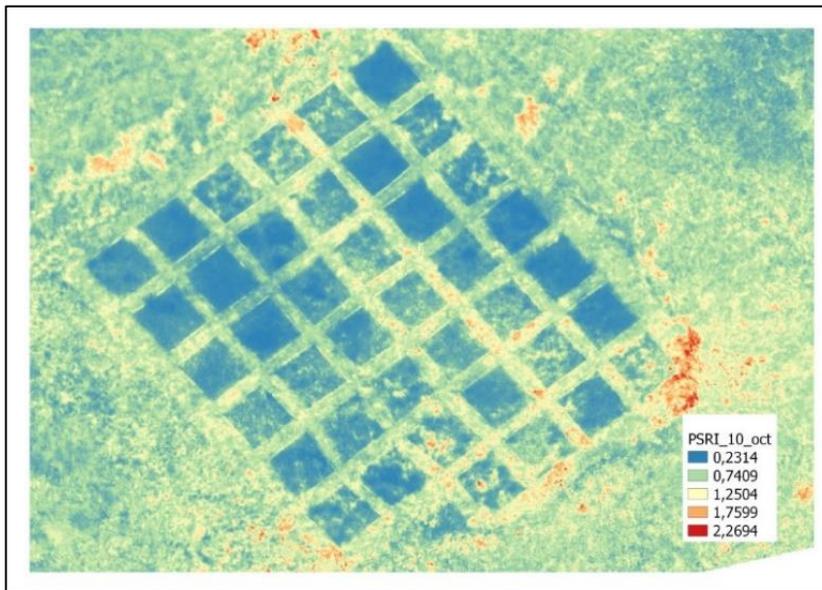
Apéndice D Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) segunda temporada

Nota: El apéndice E muestra el NDVI en la segunda temporada (día 48 de estudio)

Apéndice E Índice reflectante de planta senescente (PSRI) primera temporada

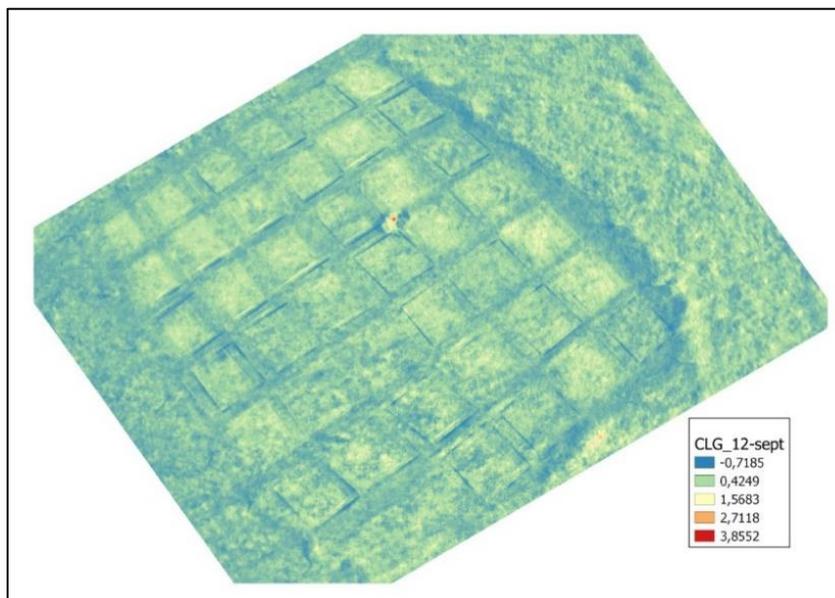
Nota: El apéndice D muestra el PSRI en la primera temporada

Apéndice F Índice reflectante de planta senescente (PSRI)



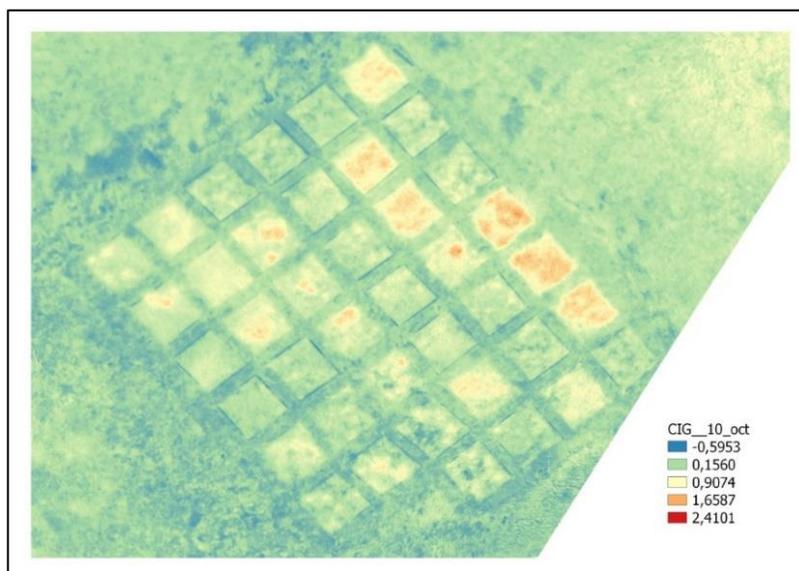
Nota: El apéndice G muestra el PSRI en la segunda temporada

Apéndice G Índice verde de clorofila (Clg) 12-sep-2021



Nota: El apéndice I muestra el Clg en la primera temporada

Apéndice H Índice verde de clorofila (Clg)



Nota: El apéndice E muestra el CIg en la segunda temporada

Apéndice I Resultados análisis de suelo



Resultados de análisis de suelos finca el Mirador - Enciso
Laboratorio de reconversión ganadera
Universidad Industrial de Santander

ANÁLISIS SUELOS	
pH	7,2
MATERIA ORGANICA%	2,57
N %	0,1285
P ppm	8
K meq/100g	0,16
Ca meq/100g	8
Mg meq/100g	0,47
S ppm	2
Cu ppm	3,18
Zn ppm	3,84
Mn ppm	4,89
Fe ppm	159
B ppm	0,3
DA g/cm3	1,3

textura	
51,8	% arena
33,5	% arcilla
14,7	% limo

Nota: El apéndice J muestra los resultados del análisis de suelo, realizado en el laboratorio de reconversión ganadera de la universidad Industrial de Santander – sede Málaga.