

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**ESTIMACIÓN DE BIOMASA DISPONIBLE MEDIANTE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES ADQUIRIDAS CON UN DRON**

por

Nicolás Agustín CARABALLO BARBOZA

Ana Cecilia SEVERI SILVA

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

MONTEVIDEO

URUGUAY

2024

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. Msc. Gastón Ortega

Ing. PhD. Gastón Notte

Tribunal:

Ing. Agr. Msc. Gastón Ortega

Ing. PhD. Gastón Notte

Ing. Agr. Candela Villanueva

Fecha:

5 de setiembre de 2024

Estudiante:

Nicolás Agustín Caraballo Barboza

Ana Cecilia Severi Silva

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a nuestros tutores, el Ing. Agr. MSc. Gastón Ortega y el Dr. Ing. Gastón Notte, por brindarnos la oportunidad, el apoyo y puntos de vista para que este trabajo pudiera salir adelante.

Queremos agradecer en especial a nuestras familias quienes han sido de gran apoyo durante la elaboración de este proyecto y durante todos los años de estudio. También agradecer a nuestros amigos y todas las personas que de alguna u otra manera colaboraron para que este trabajo se realice.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE FIGURAS	6
RESUMEN	7
SUMMARY	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. HIPÓTESIS	10
1.2. OBJETIVO GENERAL	10
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. INTRODUCCIÓN DE LAS PASTURAS COMO RECURSOS FORRAJEROS EN LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN	11
2.2. GESTIÓN DE LA PASTURA	11
2.3. HERRAMIENTAS DE MONITOREO PARA DETERMINACIÓN DE BIOMASA	13
2.3.1. Método directo o destructivo	13
2.3.1.1 Corte y pesada de forraje en fresco	13
2.3.2 Métodos indirectos o no destructivos	13
2.3.2.1. Estimación visual	14
2.3.2.2. Regla graduada	14
2.3.2.3. Plato de levante	15
2.3.2.4. C-Dax	15
2.3.2.5. Imágenes Satelitales	16
2.3.2.6. Introducción de los drones en sistemas pastoriles	17
2.3.2.7. Imágenes multiespectrales de biomasa con drones	17
2.4 ANTECEDENTES EN EL USO DE DRONES PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA	19
2.4.1 A nivel internacional	19
2.4.2 A nivel nacional	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1. MATERIALES	22
3.1.1. Pastura	22

3.1.2. Dron.....	22
3.1.3 Herramienta para procesar imágenes en computadora.....	23
3.2 METODOLOGÍA.....	23
3.2.1 Lugar y periodo experimental	23
3.2.2 Diseño de los experimentos.....	24
3.2.3 Programación de vuelo	25
3.2.4 Muestreos de biomasa para la calibración	26
3.2.5 Generación del NDVI.....	27
3.2.6 Análisis de datos.....	27
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1 CALIBRACIÓN DEL DRON	28
4.1.1. Relación biomasa disponible (KgMS/ha) y NDVI.....	28
4.1.2. Altura de la pastura (cm) y NDVI.....	31
4.2. ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD EN “VUELOS AP”	33
4.3. COMPARACIÓN FRENTE A OTROS MÉTODOS	35
5. CONCLUSIONES	37
6. BIBLIOGRAFÍA	38
7. ANEXOS.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Dinámica de crecimiento de pasturas</i>	12
Figura 2. <i>Imágenes Infrarrojo (NIR), Rojo (R), RGB y NDVI ilustrativas del “ensayo rojo”</i>	19
Figura 3. <i>Dron DJI Phantom 4 Multiespectral utilizado</i>	23
Figura 4. <i>Ubicación del área de trabajo</i>	24
Figura 5. <i>Diseño del área de los ensayos de calibración del dron</i>	25
Figura 6. <i>Secuencia de muestreo de biomasa</i>	26
Figura 7. <i>Relación Biomasa disponible (KgMS/ha) y NDVI con los días de crecimiento</i>	28
Figura 8. <i>Relación NDVI promedio y días de crecimiento</i>	30
Figura 9. <i>Relación Biomasa disponible (KgMS/ha) y Altura (cm)</i>	31
Figura 10. <i>Relación NDVI y Altura (cm) con 7, 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento</i>	32
Figura 11. <i>Imágenes NDVI de “vuelos AP”</i>	33
Figura 12. <i>Evolución del Stock de Biomasa disponible (KgMS/ha) del AP tomado con dron</i>	34
Figura 13. <i>Evolución del Stock de Biomasa disponible (KgMS/ha) del AP, tomado con dron y C-Dax</i>	35

RESUMEN

En Uruguay, las pasturas son esenciales para la ganadería y lechería, permitiendo una producción competitiva y diferenciada. Sin embargo, el monitoreo de las pasturas no es una práctica común en los establecimientos, ya que requiere de una metodología para gestionar y mejorar la eficiencia del sistema a través de la toma de decisiones. Normalmente esto se realiza a partir de métodos directos e indirectos, los cuales requieren de mayor dedicación y mayores costos. El objetivo de este trabajo es estimar la biomasa disponible mediante el uso de imágenes multiespectrales adquiridas con un dron. Posteriormente lograr su aplicación para la toma de decisiones a través del monitoreo de variables de estado (Stock), en el área de pastoreo de dos sistemas intensivos de producción de leche de base pastoril, para la estación de invierno. El trabajo se llevó a cabo en el Centro Regional Sur (CRS) de la Facultad de Agronomía (FAgro) en el año 2023 en los meses entre junio y septiembre. Se utilizó un dron DJI Phantom 4 Multiespectral en una pastura de segundo año de base de Dactylis mezcla con Alfalfa. El trabajo consistió en dos experimentos denominados “calibración del dron” y “vuelos AP”. En el primero, se realizaron vuelos semanales durante 3 meses en dos parcelas de ensayo de 6x4m, en las cuales cada semana se realizaron 22 cortes de 50x30cm en los que se determinó la biomasa dentro de los cuadrantes (KgMS/ha), altura (cm) y NDVI, generando así datos de 7, 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento. Los datos fueron analizados mediante un modelo de regresión polinomial de grado 2 correlacionando las variables biomasa disponible y altura, con el NDVI para determinar su bondad de ajuste mediante el coeficiente de regresión. La relación entre NDVI y biomasa disponible (KgMS/ha) mostró una correlación de 0,41 (R^2), aunque con variaciones en las diferentes etapas de crecimiento. Por otro lado, la relación entre NDVI y altura presenta un R^2 de 0,29. En cuanto al experimento “vuelos AP”, mediante el modelo proveniente del primer experimento se realizaron vuelos del Área de Pastoreo (AP) del CRS, con el propósito de estimar el stock de forraje y compararlo con otro método (C-Dax). Los vuelos fueron efectuados con solapamientos del 20%. Los valores de stock promedio en el AP fueron de 669 a 831 KgMS/ha y una diferencia con los valores estimados con el C-Dax de +/-1700 KgMS/ha a lo largo del periodo de estudio. En conclusión, para este trabajo, y a partir de los experimentos realizados, el dron reflejó datos de correlación media para una pastura de Dactylis y Alfalfa en condiciones de invierno, pero proporciona una primera aproximación a lo que podría ser un avance tecnológico importante y el primer antecedente en cuanto a estimación de biomasa con esta metodología en el AP.

Palabras clave: dron, NDVI, biomasa disponible, altura de forraje

SUMMARY

In Uruguay, pastures are essential for livestock and dairy farming, allowing for competitive and differentiated production. However, pasture monitoring is not a common practice in establishments, as it requires a methodology to manage and improve the efficiency of the system through decision-making. Normally, this is done using direct and indirect methods, which require greater dedication and higher costs. The objective of this work is to estimate the available biomass using multispectral images acquired with a drone. Subsequently, achieve its application for decision-making through the monitoring of state variables (Stock), in the grazing area of two intensive pastoral-based milk production systems, for the winter season. The work was carried out at the Southern Regional Center (CRS) of the Faculty of Agronomy (FAGro) in 2023 in the months between June and September. A DJI Phantom 4 Multispectral drone was used in a second-year *Dactylis* pasture mixed with Alfalfa. The work consisted of two experiments called “drone calibration” and “AP flights”. In the first, weekly flights were carried out for 3 months in two 6x4m test plots, in which 22 50x30cm cuts were made each week in which the biomass within the quadrants (KgMS/ha), height (cm) and NDVI were determined, thus generating data for 7, 14, 21, 28 and 35 days of growth. The data were analyzed using a 2nd degree polynomial regression model correlating the variables available biomass and height with the NDVI to determine its goodness of fit using the regression coefficient. The correlation between NDVI and available biomass (kgDM/ha) showed a correlation of 0.41 (R^2), although with variations in the different growth stages. On the other hand, the correlation between NDVI and height presents an R^2 of 0.29. Regarding the “AP flights” experiment, using the model from the first experiment, flights were made in the CRS Grazing Area (AP) with the purpose of estimating the forage stock and comparing it with another method (C-Dax). The flights were made with overlaps of 20%. The average stock values in the AP were 669 to 831 KgDM/ha and a difference with the values estimated with the C-Dax of +/-1700 KgDM/ha throughout the study period. In conclusion, for this work, and based on the experiments carried out, the drone reflected average correlation data for a *Dactylis* and Alfalfa pasture in winter conditions, but it provides a first approximation to what could be an important technological advance and the first precedent in terms of biomass estimation with this methodology in the AP.

Keywords: drone, NDVI, available biomass, forage height

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay la superficie dedicada a la ganadería totaliza un 13,4 millones de hectáreas, donde la producción lechera ocupa un 5% de este territorio. A su vez, la lechería representa un 9% del PBI agropecuario y alcanza una producción total de 2200 millones de litros anuales, donde el 70 % de esta producción es exportada, posicionando a Uruguay como el séptimo país exportador mundial de leche (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2011).

Durante las últimas tres décadas, se ha observado una marcada disminución tanto en el número de productores como en la superficie destinada a la producción lechera. Sin embargo, se ha registrado un notable aumento en la producción de leche. Este declive ha coincidido con un incremento en la escala de los tambos, medido en términos de la cantidad de vacas en proceso de ordeño, lo que ha resultado en aumentos en la productividad, expresada en litros por hectárea. Esta intensificación de la producción de leche en Uruguay se ha basado en un incremento significativo en el uso de concentrados y reservas de forraje (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2020) mientras que la cosecha directa de forraje por parte de los animales continúa siendo la principal fuente de alimento (Chilibroste et al., 2012, como se cita en Zanoniani y Lattanzi, 2017).

El forraje de pastoreo directo es el componente de la dieta de menor costo por kilo de materia seca. En este sentido, altos niveles de producción y aprovechamiento de forraje por hectárea permiten aumentar la carga y producción de leche por hectárea manteniendo al forraje como componente principal en la dieta de los animales (al menos el 33% de la dieta), que se traduce en una baja dependencia del uso de suplementos externos (Fariña, 2016). Esto remarca la importancia de realizar un uso adecuado del recurso forrajero, por lo que la planificación en el corto y largo plazo es fundamental. Esta realidad se puede extrapolar a toda la ganadería uruguaya donde la producción animal es más extensiva, desarrollándose mayoritariamente sobre una base pastoril (Montossi et al., 2013).

Actualmente, las herramientas utilizadas para estimar la biomasa disponible son regla, plato de levante, estimación visual o C-Dax, los cuales requieren de tiempo y mano de obra, factores que muchas veces son limitantes en los establecimientos. Por estas razones, diferentes instituciones se han empeñado en generar avances tecnológicos, que permitan contar con métodos para estimar la disponibilidad de forraje no solo a nivel de potrero, sino que integrándose al área de pastoreo (AP) (Pravia et al., 2013).

En los últimos años se han incorporado tecnologías asociadas al uso de imágenes satelitales, que permiten el monitoreo de pasturas y cultivos con mayor nivel de detalle e implementando menores costos (Sciaretta, 2012). A su vez, también se ha prestado mayor interés al uso de drones ya que permite la programación automática de vuelos, cuentan con sensores y cámaras de alta definición para la generación de mapas

de forma frecuente y generan la posibilidad de volar según las necesidades del operario. Uno de los objetivos de estas nuevas tecnologías es lograr una reducción en el tiempo al momento del monitoreo, evitando el traslado del operario hasta el área de interés y la obtención de una gran cantidad de información espacial que posibilita un análisis con mayor grado de detalle (Michez et al., 2019).

1.1. HIPÓTESIS

- Es posible a partir de imágenes multiespectrales obtenidas con dron generar índices de vegetación que permitan estimar variables de estado en las pasturas como la biomasa disponible, la altura y utilizar su información para la toma de decisiones estratégicas a nivel predial.

1.2. OBJETIVO GENERAL

- Estimar la biomasa disponible mediante la construcción de un índice espectral (NDVI) de imágenes provenientes de un dron, con vuelos a 60 metros de altura en la estación de invierno en una pastura de *Dactylis* en mezcla con Alfalfa y comparar su uso con otro método indirecto (C-Dax) en el área de toma de decisiones de dos sistemas pastoriles intensivos de producción de leche.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calibración de un dron Phantom 4 Multiespectral, para estimar biomasa en una pastura a partir de imágenes multiespectrales, durante el invierno a una altura de 60m.
- Relacionar el valor de NDVI de las imágenes procesadas con el método destructivo de corte y pesaje.
- Relacionar el valor de NDVI con las alturas obtenidas mediante el método de la regla graduada.
- Estudiar cómo cambia el valor de NDVI a medida que incrementa los días post pastoreo.
- A partir del modelo obtenido en la calibración, generar mapas de NDVI del área específica de pastoreo para estimación de biomasa disponible en el área de pastoreo (stock de forraje) y su comparación con estimaciones obtenidas con otro método indirecto (C-Dax).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUCCIÓN DE LAS PASTURAS COMO RECURSOS FORRAJEROS EN LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN.

Las pasturas cumplen diversas funciones dentro de los sistemas agrícolas-lecheros, entre ellos reconstruir las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como obtener una producción de forraje estable en el tiempo, tanto en calidad como cantidad (Perrachon, 2013).

En la mayoría de los sistemas ganaderos lecheros, la alimentación del ganado constituye la mayor parte de los costos variables. Por ende, el objetivo principal en estos sistemas de producción animal basados en el pastoreo es maximizar la cantidad de forraje local que se convierte en producto animal, ya sea carne o leche (Insua et al., 2019). Conseguir niveles elevados de consumo de forraje es esencial para las explotaciones lecheras en Uruguay, y esto se alcanza a través de la producción y la utilización eficiente de forraje. De acuerdo con Durán (2004), un sistema pastoril eficiente es aquel que logra una producción significativa de forraje y una eficiencia destacada en la cosecha del mismo. Una manera de aumentar esta eficiencia es mediante la incorporación de mezclas forrajeras. Estas consisten en una población creada artificialmente que incluye varias especies con distintas características morfofisiológicas. Las gramíneas aportan productividad sostenida por varios años, adaptación a una alta gama de suelos, facilidad de mantenimiento de las poblaciones, utilización del nitrógeno simbiótico, estabilidad en la pastura, baja sensibilidad al pastoreo y corte, mayor tolerancia a enfermedades y plagas, y menor vulnerabilidad ante presencia de malezas (Carámbula, 2010a). Las leguminosas por su parte, aportan nitrógeno a las gramíneas, poseen alto valor nutritivo que permite complementar la dieta animal, son portadoras de fertilidad en suelos naturalmente pobres o degradados por un mal manejo (Carámbula, 2010b).

En Uruguay, es común el uso de mezclas forrajeras de alfalfa (*Medicago sativa*) con dactylis (*Dactylis glomerata*). La alfalfa ha mostrado ser alta en proteína cruda y proteína de rápida degradación, lo que potencialmente mejora la calidad del forraje en las mezclas y el rendimiento animal posterior (Xue et al., 2019). Estudios de estos autores indican que esta combinación mejora la degradación ruminal y la eficiencia de fermentación, obteniendo mejores resultados en mezclas con una proporción de 50:50 entre estos componentes. La selección de especies forrajeras es crucial, ya que no solo afecta la cantidad total de producción, sino también su distribución a lo largo del año. En el caso de los sistemas agrícolas de Uruguay, donde el otoño y el invierno son períodos más desafiantes, es fundamental incluir mezclas que generen más producción durante estas estaciones (Zanoniani & Lattanzi, 2017).

2.2. GESTIÓN DE LA PASTURA

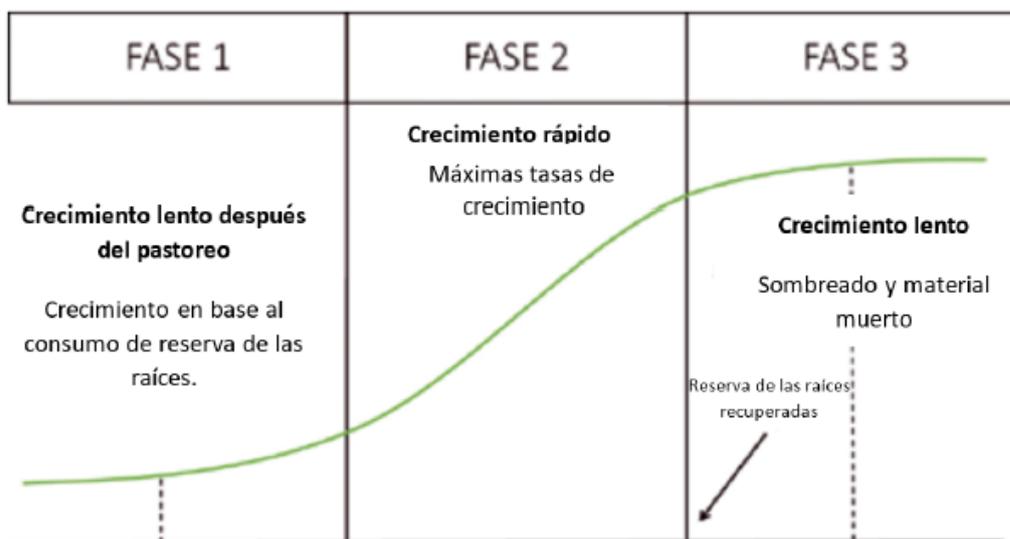
Con el fin de asegurar que la cosecha de forraje sea lo más eficiente posible y poder mantener la producción animal y vegetal estable, se debe tener en cuenta la tasa

de crecimiento de la pastura. Dicho parámetro permite observar de forma dinámica cómo se comporta la pastura a lo largo de los años (Quinodoz, 2004). Monitorear con regularidad la cantidad de forraje disponible es una manera de planificar las rotaciones de pastoreo y distribuirlo según las necesidades de los animales. El manejo del pastoreo debe ser visto como un conjunto de decisiones dinámicas que consideren la variación en el crecimiento de la pastura, tanto en tiempo como en espacio (Insua et al., 2019).

A su vez, según Lombardo (2022), el manejo eficiente de las pasturas comprende un equilibrio efectivo entre las tres variables que definen la productividad: crecimiento de pasto, consumo de pasto y producción animal. Para esto el autor detalló la dinámica de crecimiento de las pasturas, basándose en una mezcla de Festuca, Trébol Blanco y Lotus, la cual también se aplica al funcionamiento general de las distintas especies frente al pastoreo. Se describieron 3 fases de crecimiento. La primera se da una vez pastoreado donde el crecimiento es lento y se observa una removilización de reservas para el reinicio del mismo. Una fase 2, donde el crecimiento se da a tasas máximas. En este punto ya logra el correcto funcionamiento del aparato fotosintético. Por último la fase 3, que comienza una vez se hayan recuperado las reservas de las raíces. El crecimiento cesa o se hace más lento, dado que existen efectos de sombreado por competencia entre plantas y se nota la presencia de material muerto (Figura 1).

Figura 1

Dinámica de crecimiento de pasturas



Nota. Adaptado de Demanet, Universidad de La Frontera, Chile, como se cita en Lombardo (2022).

Teniendo en cuenta este proceso, un manejo del pastoreo eficiente no solo implica producir más pasto, sino también requiere de una alta utilización del mismo. Esto permite realizar un balance entre la oferta y la demanda de forraje (Irigoyen, 2009), y así lograr una medida de ajuste en base a la escasez o excedentes de forraje

disponible. Para esto, es necesario contar con mediciones de disponibilidad y así evaluar las distintas estrategias de manejo de pasturas y animales (Mannetje, 2000).

2.3. HERRAMIENTAS DE MONITOREO PARA DETERMINACIÓN DE BIOMASA

Optimizar la gestión del recurso forrajero se revela como un elemento fundamental para potenciar la competitividad en el sector ganadero y lechero de nuestro país, que mayoritariamente se desarrolla en entornos pastoriles. No obstante, los resultados de una encuesta tecnológica llevada a cabo entre productores del GIPROCAR II indican que solo un 42% de los productores evalúa la disponibilidad de forraje por unidad de superficie. Se destaca que la medida más utilizada es la estimación visual (62%) (Montossi et al., 2013).

Existen distintos métodos para la estimación de la cantidad de forraje por unidad de superficie, los cuales se pueden clasificar en métodos directos o indirectos (Montossi et al., 2013). En términos generales, el método directo resulta altamente beneficioso en trabajos de investigación, ya que facilita la comparación precisa de la cantidad real de materia seca con métodos indirectos o no destructivos. Al lograr una alta correlación entre ambos métodos, se viabiliza la utilización exclusiva de los métodos de estimación indirecta, los cuales son de aplicación más sencilla (Canseco et al., 2007).

2.3.1. Método directo o destructivo

2.3.1.1 Corte y pesada de forraje en fresco

Las evaluaciones se llevan a cabo dentro de un marco, de tamaño conocido y de marco razonable, como por ejemplo 0,25 metros cuadrados. Esto no solo ayuda a mantener la precisión de la muestra, sino que también facilita el cálculo de la cantidad de forraje por hectárea. El procedimiento consiste en cortar el forraje al ras del suelo, abarcando distintos lugares que representen la variabilidad de la vegetación existente en el potrero. Se recolecta el forraje cortado en bolsas, identificando cada muestra, se registra el peso verde y se deja secar las muestras durante 48 horas para así obtener el porcentaje de materia seca. Los mismos autores mencionan que la determinación de la disponibilidad de forraje a través del método de corte destaca por su precisión y objetividad. Sin embargo, su principal inconveniente radica en la necesidad de una mayor inversión de tiempo para poder capturar la heterogeneidad que se da en el potrero por una limitante del tamaño de la muestra, lo cual hace poco práctico obtener un gran número de muestras para aumentar su precisión y escapa de los objetivos de los productores (Canseco et al., 2007).

2.3.2 Métodos indirectos o no destructivos

Los métodos de muestreo indirectos o no destructivos se apoyan en evaluaciones visuales y en la medición de la altura y/o densidad del forraje. A pesar de que el término "no destructivo" sugiere que la pastura no experimenta cortes, en

realidad, estas técnicas exigen la realización de un corte inicial (o cada determinado tiempo) con el fin de obtener ecuaciones de regresión ajustadas para calibrarlas de manera constante. Estas metodologías presentan la ventaja de ser económicas, fáciles y rápidas desde el punto de vista de la practicidad de los operarios ya que no es necesario el corte, recolección, y pesaje de muestras. Pero como desventaja presentan menos precisión que el corte, a su vez requieren de capacitación del personal que llevará a cabo estas técnicas y demandan calibración proveniente del método directo, frente a las distintas situaciones cambiantes (Montossi et al., 2013). Las técnicas regla graduada, plato medidor y medidor de capacitancia tienen un error de estimación que varió desde 26% a 33%. La calibración de estas herramientas debe ser realizada con cierta frecuencia ya que la precisión de las estimaciones puede verse afectada por muchos factores tales como la densidad y el estado de crecimiento de plantas, la estación, la composición de especies de la pradera y la gestión (Sanderson et al., 2001). A continuación, se presenta una breve descripción de cada método.

2.3.2.1. Estimación visual

Esta metodología requiere de un entrenamiento previo del observador con algún otro método directo dado que se debe tener en cuenta varios atributos de la pastura que determinan la estimación de biomasa (Sciaretta, 2012). Estos atributos son: altura, cobertura, densidad, composición botánica, relación tallo-hoja, estrés, ataque de plagas o adversidades, etc. A su vez son sensibles a las variaciones entre los observadores al momento de la estimación de biomasa disponible (Tucker 1980, como se cita en Montossi et al., 2013). En la medida que el observador carezca de experiencia, las estimaciones tenderán a variar, obteniendo resultados subestimados o sobreestimados comparado con lo que realmente se encuentra disponible, repercutiendo en errores en la toma de decisiones que desencadenan problemas en la expresión del potencial animal y de las pasturas, por lo que es fundamental el adecuado entrenamiento del personal. De todos modos, este método no requiere de ningún equipo especial para su aplicación, lo que lo hace el más utilizado (Fernández, 2004).

2.3.2.2. Regla graduada

La medición de la altura del forraje se lleva a cabo combinada mediante una escala o regla graduada. Debido a la estrecha conexión entre la altura (cm) y la disponibilidad de biomasa (KgMS/ha), se han creado varias ecuaciones que incorporan ambas variables. Estas ecuaciones se determinan a través de una regresión lineal entre la biomasa estimada mediante el método de corte del forraje y el promedio de las mediciones de altura de la pastura tomadas dentro de cada área rectangular (Montossi et al., 2013). Una de las ventajas de este método, es su utilización en una amplia gama de situaciones. Es decir, es posible utilizarlo en diferentes sistemas pastoriles, orientación productiva, estación del año, comunidades vegetales y diferentes especies de animales. Una correcta estimación de la altura de la pastura requiere de 20 a 40 mediciones por potrero, lo que depende, entre otros, de: a) tamaño del potrero, b) heterogeneidad de la pastura, c) topografía del terreno, d) tipo de suelo, e) estación del año, que influye sobre

la relación verde/seco y proporciones de tallo/hoja de las pasturas y f) experiencia del medidor (Montossi et al., 2013).

2.3.2.3. Plato de levante

También llamado Pasturómetro por Sciaretta (2012), o Rising Plate Meter (RPM) por Montossi et al. (2013). Se basa en la determinación del volumen de producción mediante atributos de la pastura tales como su altura y densidad. Mediante el uso de un disco metálico calibrado que ejerce presión sobre la pastura y dado el desplazamiento que dependerá de la resistencia a la presión que ejerce la pastura se registra el dato numérico en una escala graduada. Si bien es una metodología de gran practicidad tiene como limitante que en caso de ser pasturas con diversidad de especies (polifíticas) o campo natural, se dificulta saber el aporte de cada especie al rendimiento total, por lo que al igual que todos los métodos indirectos requiere constante calibración. Montossi et al. (2013) lo describen como un bastón de metal, con un disco o placa móvil que se mueve sobre un eje central. Al igual que los demás métodos se debe calibrar para cada situación forrajera. Este es un método utilizado originalmente en Nueva Zelanda, donde las ecuaciones originales no se ajustan a las condiciones de las pasturas en Uruguay, dado por su heterogeneidad y el efecto marcado de las estaciones y la variabilidad climática en relación a las pasturas neozelandesas. Por esta razón, se establece la necesidad de generar ecuaciones que se ajusten a las condiciones reales de las pasturas en Uruguay (Montossi et al., 2013).

Desde el punto de vista de la aplicación comercial del RPM, el ideal sería disponer de una ecuación universal de predicción de la estimación de la disponibilidad de forraje que contempla todas las situaciones de tipos de pasturas, estaciones del año, etc. Se reconoce que existen factores que están incidiendo en el grado de precisión de las ecuaciones (estimada por el coeficiente de determinación; R^2), fundamentalmente, el tipo de pastura y en algunos casos específicos la estación del año (Montossi et al., 2013). Una de las ventajas a destacar de esta metodología, es la baja variación de los resultados entre operarios que realicen las mediciones dentro del potrero, a su vez aumentando el número de medidas para tener una mejor descripción de la heterogeneidad dentro del mismo potrero. Como limitante al igual que la regla graduada, es la complejidad y esfuerzo necesario para cubrir áreas extensas (Ortega, 2019).

2.3.2.4. C-Dax

En otras regiones del mundo se han desarrollado y calibrado sensores luminosos que permiten su uso a nivel de áreas de pastoreo como lo es el método C-Dax® (Waller, 2020). El C-Dax es un dispositivo electrónico que se acopla a un cuatriciclo o pequeño tractor para ser remolcado a velocidades de hasta 20km/h por toda el área que se desee medir. Está equipado con 18 haces de luz espaciados a 20 mm, toma 200 medidas de altura por segundo y luego son promediadas para que el software interno las traduzca en un valor de biomasa (kg MS/ha) a través de una ecuación

calibrada. El pasturómetro tiene forma de arco donde el forraje pasa por el medio y a ambos lados tiene sensores que miden la altura. A partir de esta altura y con una ecuación previamente calibrada se determina el forraje disponible en kilos de materia seca por hectárea (C-Dax, s.f.), permitiendo obtener resultados repetibles, recolectar datos de manera rápida y un fácil manejo de la información (Murphy et al., 2021). Un estudio en Suiza demostró que el tiempo de medición puede reducirse hasta $\frac{1}{6}$ comparado con el uso del Plato de levante (Schori, 2015). Una limitante de este método es la alta inversión inicial, ya que es necesario un vehículo para remolcar el dispositivo (López & Sosa, 2019).

2.3.2.5. Imágenes Satelitales

La evaluación de nuevas tecnologías como lo es la información geográfica satelital para estimar la cobertura de forraje en tiempo real en extensas áreas a bajo costo, ha sido objeto de estudio en el último tiempo. Gracias al análisis de estas imágenes y al procesamiento de un extenso conjunto de datos, es factible obtener información sobre la producción promedio de pastizales y sus rangos de variación. Los avances significativos en informática han propiciado mejoras sustanciales en los métodos de estimación. Actualmente, se emplean imágenes satelitales de alta definición, que ofrecen una mayor resolución y calidad visual, y se obtienen con una frecuencia más elevada, lo que facilita un monitoreo más detallado y oportuno de la producción forrajera (Sciaretta, 2012).

La resolución de las imágenes satelitales dependerá de la frecuencia en que ésta pasa por el mismo punto y del tamaño del píxel. Hoy en día se trabaja con imágenes que ofrecen una resolución espacial de hasta 5 m, permitiendo una mejor calidad de imagen (Di Leo, 2015). Estas, detectan variaciones de la reflectancia en la superficie del suelo en correspondencia con la intensidad de radiación que emiten las especies vegetales dentro de ciertos rangos del espectro electromagnético. Los satélites están conformados por sensores que son capaces de captar la longitud de onda que emiten las superficies (Sciaretta, 2012). Las distintas bandas del espectro electromagnético se utilizan para predecir los parámetros biofísicos de la vegetación, construyendo el “índice verde” o NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) (Ferwerda, 2005). A su vez, presentan la ventaja que permite evaluar la producción de biomasa en áreas extensas. La gran desventaja a la hora de obtener las imágenes de mayor definición es el alto costo, por lo que los sensores más utilizados presentan resoluciones espaciales de 5 ha, dificultando su medición en áreas de menor tamaño como es el caso de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Hoy día es posible contar con mejores resoluciones espaciales de estos sensores tal es el caso de Sentinel-2 (100 m²) que presenta una frecuencia de registros de 5 a 10 días. Sin embargo, este aspecto incrementa la probabilidad de pérdida de los mismos por interferencia de nubes (Ortega, 2019), lo cual expone al método como una de las limitantes que presenta.

2.3.2.6. Introducción de los drones en sistemas pastoriles

El desarrollo en tecnología de sensores ha lanzado recientemente al mercado nuevos sensores remotos multiespectrales (rojo, infrarrojo, verde, azul, RGB) capaces de ser acoplados a drones con el potencial de generar mapas de índices vegetales que puedan ser interpretados como indicadores del estado de las pasturas, llámese biomasa, calidad nutritiva, condición nutricional, hídrica o cualquier otra propiedad tisular de las plantas (Insua & Utsumi, 2016). De esta manera las cámaras multiespectrales a bordo de drones pueden medir la energía reflejada por la cobertura vegetal en numerosas bandas del espectro de la luz ultravioleta a partir de las cuales se calculan diferentes índices espectrales que permiten la estimación de la producción de forraje (Insua et al., 2019).

Con la obtención de imágenes a través del dron es posible la generación de modelos digitales de terreno (MDT) y modelos digitales de elevación (DEM), para analizar y cuantificar información de áreas extensas en estudio de una manera más precisa, con posibilidades de adaptarlo no solo a cultivos extensivos, sino también para control de ganado, relevamiento de montes y pasturas. A su vez, una característica relevante, es que las imágenes generadas con drones brindan mayor resolución en comparación a las imágenes generadas a través del uso de satélites, y de esta manera un nivel de detalle mayor en la información. Esto se debe a que los vuelos con drones se realizan a alturas menores que los satélites, logrando una mejor resolución espacial y calidad de imagen con mayor información. Los modelos digitales pueden abordar objetivamente la complejidad de las mezclas forrajeras y ayudar a optimizar los insumos, lo que conduce a una mejor distribución o reducción de fertilizantes, pesticidas o semillas, por ejemplo, mediante fertilización específica variable del sitio y renovación de mezclas de pastos (Rueda-Ayala et al., 2019). A su vez, se ha aplicado esta tecnología en pastoreo en investigación, incluido el monitoreo de biomasa y la detección de especies determinadas (Michez et al., 2019).

El uso de imágenes provenientes de drones puede ser una solución para proporcionar mayor frecuencia, mayor resolución espacial e información sobre la productividad de la biomasa de una pastura. La pastura debe ser consumida por los animales cuando presenta una estructura específica definida principalmente por la altura y la densidad. La información sobre la altura de la pastura es muy importante para que los agricultores maximicen la tasa de consumo de animales. Sin embargo, estas mediciones todavía se toman utilizando instrumentos de baja frecuencia y que consumen mucho tiempo como el caso de la regla graduada (Michez et al., 2019).

2.3.2.7. Imágenes multiespectrales de biomasa con drones

Gracias al avance de la tecnología, los drones pueden transportar cámaras multiespectrales, logrando así registrar, bandas del espectro visible (RGB) (380nm - 780nm), otras bandas de gran utilidad en el estudio de las cubiertas vegetales, como es el infrarrojo cercano (NIR) (780nm–900 nm aprox.). Esta banda resulta de gran utilidad en el mapeo de terrenos agrícolas y el monitoreo de la vegetación (Sinde et al., 2020).

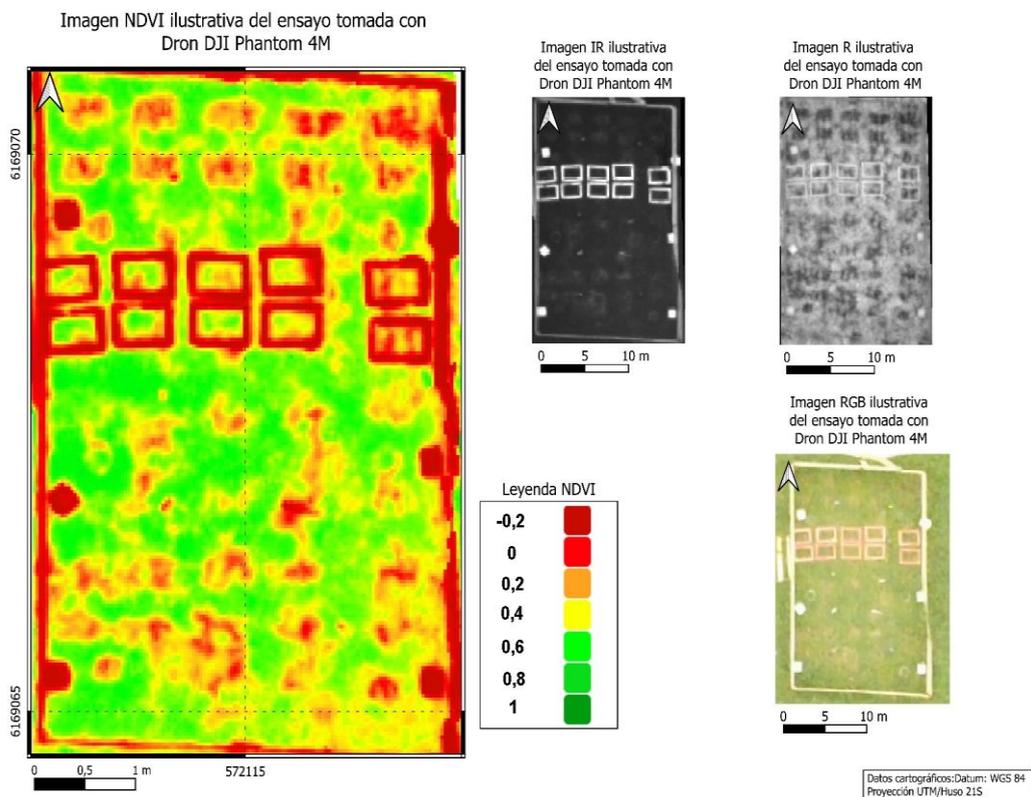
Los Índices Verdes son medidas cuantitativas basadas en los niveles de reflectancia obtenidos por un sensor y corresponden a combinaciones algebraicas de varias bandas espectrales, las cuales resaltan las propiedades específicas de la vegetación como son la biomasa, la radiación absorbida y el contenido de clorofila (Giraldo et al., 2023). Uno de los más conocidos y utilizados en el ámbito agrícola, es el NDVI [$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$]. Tiene la ventaja de que solo varía de -1 a +1. Suelos cubiertos por un tapiz verde obtienen valores positivos, y superficies de suelo desnudo o material muerto o senescente obtienen valores negativos o en torno a -0,1 a 0,1 (Figura 2) (Marchesi & Castillo, 2016).

Estas características hacen posible que el NDVI sea utilizado como predictor de biomasa y de productividad primaria neta (Ferwerda, 2005). Un alto NDVI significa una mayor absorción de radiación solar y una mayor producción forrajera (Sciaretta, 2012). Por esta razón Ferwerda (2005), usando sensores multiespectrales, cuestiona el uso del NDVI para bajas densidades de vegetación y/o de alto contenido de clorofila, como las praderas.

Estudios previos han intentado predecir la biomasa de parcelas de forraje probando su relación con las imágenes multiespectrales de capturadas con drones, donde los niveles de correlación obtenidos son muy variables y oscilaron entre 0,23 y 0,8 en pasturas gramíneas como Festuca y Raigrás (Insua et al., 2019). La aplicación de estos métodos predictivos tiene ciertas limitaciones, relacionadas con la compleja cadena de procesamiento y la integración de varias variables ambientales, que no se toman en cuenta o no están disponibles (por ejemplo, datos meteorológicos, características del suelo, topografía) (Théau et al., 2021).

Figura 2

Imágenes Infrarrojo (NIR), Rojo (R), RGB y NDVI ilustrativas del “ensayo rojo”



2.4 ANTECEDENTES EN EL USO DE DRONES PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA

2.4.1 A nivel internacional

Según Insua y Utsumi (2016) el uso del NDVI registrado con drones mostró estimaciones de la disponibilidad de forraje del tambo altamente comparables con los estimados mediante métodos convencionales (regla graduada y C-Dax) para un tambo robótico en Estados Unidos con base de raigrás y festuca. Los resultados fueron consistentes en que el NDVI estuvo muy relacionado a los KgMS/ha de la pastura ($R^2 = 80\%$, $n = 72$). Durante el monitoreo, el uso del NDVI medido con el dron mostró estimaciones entre potreros similares a las estimadas con los otros dos métodos convencionales (1975, 2061 y 1960 KgMS/ha para dron, regla y C-Dax, respectivamente). La diferencia promedio entre el dron y los métodos convencionales fueron menores a 310 KgMS/ha, y solo el 11% de los datos mostró una diferencia de ± 500 KgMS/ha, de los cuales la mayoría pertenecía a situaciones con mayores porciones de material senescente.

Basándose en estos autores, Mattera et al. (2023) investigaron la estimación de la producción de forraje de festuca alta bajo diferentes condiciones de fertilización

nitrogenada, utilizando drones equipados con cámaras multiespectrales. Se realizaron vuelos sobre parcelas con variación en la fertilización nitrogenada y se capturaron imágenes espectrales utilizando un dron equipado con la cámara Parrot Sequoia. Los autores encontraron que la relación entre el NDVI y la producción de forraje mostró un ajuste superior en el rebrote de primavera ($R^2=0.86$) en comparación con los rebrotes de otoño ($R^2=0.38$) e invierno ($R^2=0.39$). También se observó que la respuesta del NDVI tiende a saturar en valores elevados (>3500 KgMS/ha), lo que significa que no refleja adecuadamente producciones de forraje muy altas, coincidiendo con investigaciones previas. Esto sugiere que, aunque el NDVI es útil para estimar la producción de forraje, puede tener limitaciones en la detección de altos niveles de producción.

Por otra parte, en la localidad de Balcarce, en una pastura de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*), se delimitaron parcelas experimentales de 1,5 x 5 m donde se aplicaron cuatro niveles de N (0, 50, 100, 200 kg N ha⁻¹). A los 67 días de iniciado el rebrote se midió remotamente con un dron (80m de altura, 75% superposición) el NDVI de cada parcela experimental. El vuelo se realizó con un Drone DJI Phantom 4 equipado con sensores multiespectrales. En agropiro el NDVI se asoció de manera directa y significativa con la biomasa aérea acumulada en el rebrote de primavera ($R^2 = 76\%$). Esto sugiere que la estimación de biomasa aérea acumulada a través de una única curva de calibración de NDVI sería un método aceptable para el monitoreo de pasturas de agropiro, creciendo en suelos con diferente fertilidad, y/o diferente fertilización nitrogenada (Cicore et al., 2021).

2.4.2 A nivel nacional

En cuanto a nivel nacional, son escasos los trabajos relacionados a la estimación de biomasa a través del uso de drones.

En la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC), FAGro, UdelaR, se llevó a cabo un trabajo donde se planteó determinar el potencial de los modelos digitales de vegetación a partir de imágenes tomadas con un dron, para estimar la altura de las pasturas. La evaluación en general consistió en comparar altura de regla (cm) y disponibilidad de biomasa en cada punto de muestreo contra lo estimado por las fotos (Estacas) y los modelos (Mapping 3d). La metodología de Mapping 3d permitió generar estimaciones más exactas a partir de cámaras RGB (R^2 de 0,56) de la altura de las pasturas en comparación con la técnica de las estacas. Los vuelos se realizaron a 20 y 30 metros de altura, sobre dos tratamientos de altura remanente, en dos estaciones (otoño y primavera), sobre una pastura de festuca (*Festuca arundinacea*) cv. Fortuna, de segundo año. A nivel general el mapping 3d sobreestimó la altura de forraje en 0,5 cm con un desvío de 13 % al considerar todas las variables involucradas (Rodríguez & Triñanes, 2018).

Por otro lado, Ribarola y Villanueva (2023) realizaron un trabajo, cuyo objetivo principal fue estimar la altura y biomasa de pasturas sembradas mediante el uso de imágenes tomadas con un dron. Este se llevó a cabo en el Departamento de

Canelones, en el CRS de la FAgro, UdelaR, durante la estación de primavera del año 2021. En este caso utilizaron un Mavic 3 Pro con cámara ultra HD de tipo RGB, sobre una pastura de *Festuca arundinacea*. Los vuelos fueron realizados a alturas de 60 y 100 metros. La metodología se basó en tomar datos de alturas con puntos georreferenciados donde se registraron alturas con regla y RPM y aplicar la clasificación supervisada (CS) sobre los ortomosaicos generados con las imágenes tomadas con el dron. En cuanto a los resultados obtenidos, la relación existente entre la biomasa (KgMS/ha) o con la CS utilizando la regla o RPM y ajustando por el porcentaje de suelo desnudo (SD), en comparación a la biomasa obtenida utilizando 75 medidas de altura de la pastura con regla o RPM, lograron ajustes de $R^2=0,84$ y $0,92$ con regla y de $R^2=0,57$ y $0,46$ con RPM, para alturas de vuelo de 60 y 100 m respectivamente (Ribarola & Villanueva, 2023).

Por último, durante la estación de otoño, Artola y Pérez Del Castillo (2024), en el CRS de la FAgro, realizaron vuelos semanales sobre una pastura de *Festuca arundinacea* bajo riego. Las imágenes obtenidas con el dron fueron posteriormente procesadas en Agisoft Metashape Professional para la generación del modelo NDVI. Para calibrar el dron se realizó un doble muestreo en donde a la vez de tomar imágenes con el dron se cortó muestras en cuadrantes de (0.51 X 0.31m) y se midió altura con regla dentro de los mismos. De esta manera logrando medir disponibilidad de biomasa en KgMS/ha y altura (cm) que posteriormente se le adjudicó su valor correspondiente de NDVI. La correlación entre NDVI y la biomasa real (KgMS/ha) fue de $R^2=0,74$, y para NDVI y altura (medida con regla) de $R^2= 0,76$. A su vez se obtuvo un modelo para generar relaciones entre el NDVI y la tasa de crecimiento ($R^2=0,70$) y generar mapas de distribución de la biomasa.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Teniendo en cuenta el objetivo principal del presente trabajo, donde se plantea lograr la estimación de biomasa disponible a partir de la construcción de un NDVI mediante imágenes multiespectrales obtenidas con un dron, se decidió realizar dos experimentos. El primero dentro de un área de ensayo conocida denominado como “calibración del dron” y el segundo sobre el AP del CRS, FAgro denominado “vuelos AP”. A continuación, se procederá a nombrar los materiales involucrados y la metodología seleccionada para lograr cumplir con los objetivos.

3.1. MATERIALES

Para poder llevar adelante los experimentos fue necesario contar con los siguientes materiales: dron, regla para tomar medidas de altura de la pastura, 12 rectángulos de madera (50 x 30 cm) para identificar las muestras, tijera de esquilador, bolsas, bandejas aluminio en las que se depositó cada muestra para su posterior pesada en la balanza, estufa para el secado de estas mismas, computadora para registro de datos y herramienta para procesar las imágenes.

3.1.1. Pastura

El experimento “calibración del dron” fue realizado sobre una pradera de segundo año sembrada en abril del 2022, con una densidad de 10 kg/ha en *Medicago sativa* cultivar Chaná, 12 kg/ha de *Dactylis glomerata* cultivar AURUS y 2 kg/ha de *Trifolium repens* cultivar zapicán. Durante el otoño del 2023 recibieron fertilizante a una dosis de 60 kg/ha de fertilizante 7-40-40-0-5S. Luego, en mayo se suministró el herbicida Flumet 12 SC a una dosis de 0,35 l/ha. Una vez comenzado el experimento el potrero fue fertilizado durante los meses de junio y julio con 75 kg/ha de UREA y durante el mes de Agosto con 100 kg/ha, donde no se aplicó dentro del área de estudio. Por otro lado, “vuelos sobre AP” cuenta con diversas pasturas.

3.1.2. Dron

Se trabajó con un dron DJI Phantom 4 Multispectral (Figura 3). Se compone de una cámara especializada para capturar imágenes multiespectrales con 6 bandas de color, borde rojo (RE): 730nm \pm 16nm, Infrarrojo cercano (NIR): 840nm \pm 26nm, Verde (G): 560nm \pm 16nm, Luz visible (RGB), Rojo(R): 650nm \pm 16nm y Azul (B): 450nm \pm 16nm. De las cuales solo NIR y R son las utilizadas para obtener imágenes NDVI. La capacidad de la batería es alta (5870 mAh, 15.2 V), puede soportar un máximo de 30 minutos de tiempo de vuelo, dependiendo de diferentes factores como velocidad, clima ventoso, temperatura, tiempo de carga, etc.

Figura 3

Dron DJI Phantom 4 Multispectral utilizado



Nota. Tomado de DJI (s.f.).

3.1.3 Herramienta para procesar imágenes en computadora

Una vez obtenidas las imágenes de las bandas Rojo e Infrarrojo de cada vuelo se importaron a una computadora. A partir del procesamiento de dichas imágenes, se obtiene un ortomosaico. El mismo es el producto de imágenes fotogramétricamente organizado como mosaico a partir de una colección de imágenes. Para la obtención del ortomosaico fue necesario realizar una serie de pasos, que consistieron en: orientar fotos, crear nube de puntos, crear malla, crear textura, crear modelo teselado, crear modelo de elevación digital (DEM), crear ortomosaico.

3.2 METODOLOGÍA

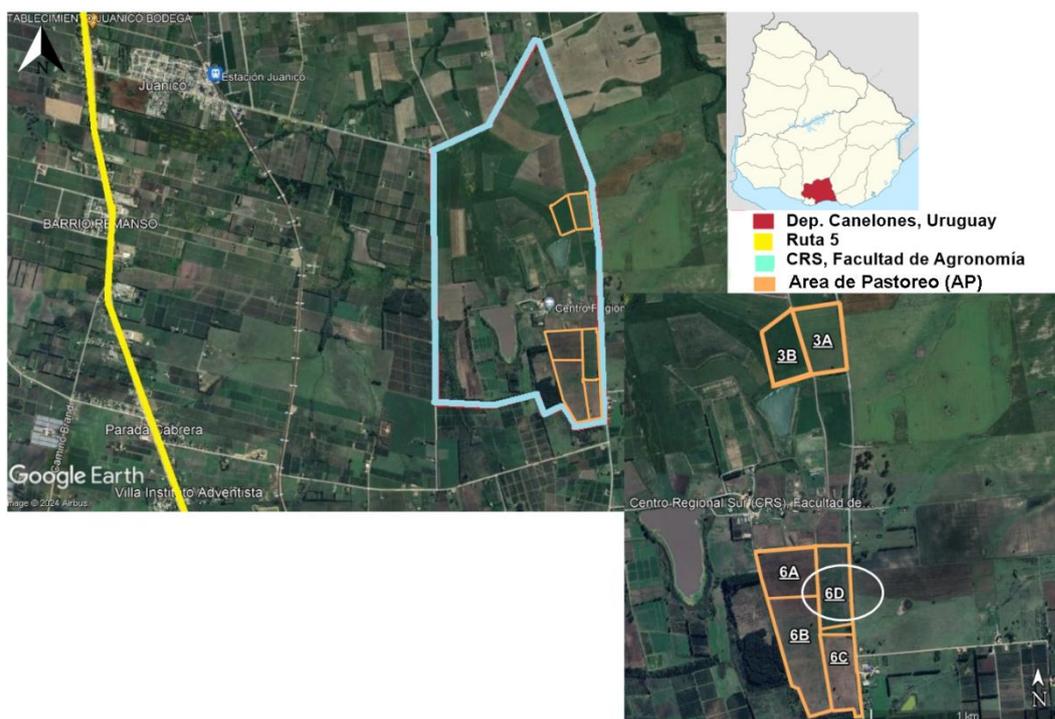
La metodología seleccionada consistió en realizar un diseño para cada experimento, sobre los cuales se programó los vuelos correspondientes a cada superficie en estudio. Una vez obtenido el vuelo sobre el experimento “calibración del dron” se realizó el muestreo de biomasa. Posteriormente, se procesaron las imágenes tanto del experimento “calibración del dron” como de “vuelos AP” para generar el NDVI y lograr un análisis en conjunto de los parámetros de interés. Próximamente se pasa a detallar la ubicación y cada uno de estos pasos.

3.2.1 Lugar y periodo experimental

Los experimentos se llevaron a cabo en el CRS, FAgro (Progreso, Canelones, Uruguay) (Latitud 34°37'17.40"S Longitud 56°12'38.21"O) (Figura 4).

Figura 4

Ubicación del área de trabajo



Nota. Figuras aéreas elaboradas con base en Google Earth (2024).

Este trabajo fue realizado en el período del 12 de junio al 12 de septiembre de 2023, contemplando la estación de invierno. Los muestreos de biomasa y los vuelos de “calibración del dron” se realizaron los lunes de cada semana, con intenciones de darle descanso a la pastura entre cortes teniendo en cuenta que en la estación de invierno las tasas de crecimiento son bajas en comparación al resto de las estaciones del año. En cuanto a “vuelos AP”, se realizaron los lunes y/o martes de cada semana.

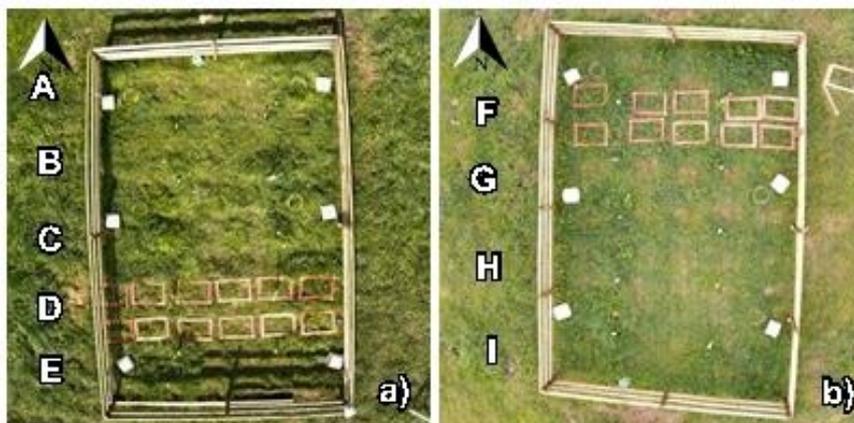
3.2.2 Diseño de los experimentos

El experimento “calibración del dron” se realizó sobre el potrero 6D (Figura 4), donde si bien era una pradera mezcla, la dominancia de *Dactylis* era notoria, se asumió una proporción de 80% del área en estudio. Se seleccionaron al azar dos áreas de 6x4 m cada una, las cuales se identificaban como “ensayo rojo” y “ensayo verde”, de manera de contemplar un mayor número de repeticiones en las muestras. Al comienzo del experimento se cortó la pastura (en los módulos de 6x4m) para poder llevar un control detallado de los días de crecimiento, asumiendo así homogeneidad de la pastura dentro del ensayo. Luego, se delimitaron en el ensayo verde 5 franjas y se nombraron cada una con una letra de la “A” a la “E”, completando de esta manera un “ciclo”, como se observa en la Figura 5a. Semanalmente se seleccionó una franja, dentro de la cual se tomaron 12 submuestras, utilizando cuadrados de 30x50 cm. Simultáneamente, en el ensayo rojo se delimitaron 4 franjas nombradas con las letras de la “F” a la “I” (un

“ciclo”), en las cuales se tomaron 10 submuestras semanales (Figura 5b), obteniendo así 22 submuestras semanales y 246 submuestras totales en los meses de trabajo.

Figura 5

Diseño del área de los ensayos de calibración del dron



Nota. Figura 5a: Ensayo Verde, Figura 5b: Ensayo Rojo

En cuanto al experimento “vuelos AP”, una vez por semana se realizaron 5 vuelos en el área de pastoreo del CRS. El área total es de 42,4 ha, separados en 6 potreros (Figura 4), los cuales son 6A (9,2 ha), 6B (9,8 ha), 6C (5,6 ha), 6D (6,6 ha), 3A (6,6 ha) y por último 3B (4 ha). A su vez, el área de cada potrero estaba dividido equitativamente en dos: “rojo” con una carga 3,0 VO/ha y “verde” con una carga de 1,8 VO/ha.

3.2.3 Programación de vuelo

Para la programación de los vuelos del experimento “calibración del dron” se utilizó la aplicación GSP (DJI Ground Station Pro) en la cual se delimitó un vuelo para el “ensayo verde” y otro para el “ensayo rojo”. Los mismos fueron a una altura de 60 m, con un 70% de solapamiento frontal, un 70% de solapamiento lateral y un ángulo de 90°. Para la determinación del solapamiento y la altura se tuvo en cuenta la bibliografía citada, dado que en gran parte de los casos se recomendaban solapamientos mayores al 60% y alturas de 60m a 100m. En cada vuelo se registraron 18 puntos en los que el dron tomaba una fotografía en 3 bandas distintas, RGB (espectro visible), Rojo (R) e Infrarrojo cercano (NIR), almacenando un total de 54 fotos por vuelo.

Al momento de programar cada vuelo del experimento “vuelos AP”, se tomó una altura de 60 m, un solapamiento frontal y lateral de 20% y un ángulo de 90°. Para solucionar una limitante como la baja autonomía de las baterías se optó por utilizar un solapamiento de 20% para “vuelos AP”, también a modo de prueba por la escasa información existente sobre vuelos con este parámetro. Teniendo en cuenta el área de cada potrero, se optó por realizar 5 vuelos, los potreros 6A, 6B, 6C y 6D, se volaron individualmente, mientras que el 3A y 3B se volaron en conjunto. En cada potrero se

recolectaron aproximadamente 200 fotos (RGB, R, NIR), siendo un total aproximado de 1.000 fotos para toda el área.

3.2.4 Muestreos de biomasa para la calibración

Una vez finalizado los vuelos del experimento “calibración del dron”, se midió con una regla la altura al contacto con el forraje y se realizó un promedio de 5 puntos al azar dentro de cada cuadrado. Luego, se cortó la biomasa existente dentro del cuadrado (Figura 6a) y se embolsó cada una por separado con su respectiva letra y número. Cada submuestra fue colocada en una bandeja para obtener su peso en base fresca (BF) (Figura 6b) y posteriormente fue colocada durante 72hs en la estufa para su secado (Figura 6c). Pasado este tiempo, se volvieron a pesar las mismas para determinar su peso en base seca (BS). De ese procedimiento se obtuvo el contenido de materia seca (MS) del forraje de cada submuestra que se asoció al contenido de biomasa en KgMS/ha.

Figura 6

Secuencia de muestreo de biomasa



Nota. Figura 6a: Corte, Figura 6b: Pesaje, Figura 6c: Secado.

3.2.5 Generación del NDVI

Una vez obtenidos los ortomosaicos de ambos experimentos se procedió a ingresar la fórmula de NDVI en la calculadora ráster (detallada en el punto 2.3.2.7) y así obtener los valores de NDVI de cada área de interés. Luego, para “calibración del dron” se delimitó el área dentro de cada cuadrado y para “vuelos AP” se delimitó un área del tamaño de cada potrero. Se generó un mapa de prescripción que permitió obtener el valor de NDVI promedio de cada área tanto para cada cuadrante de 50x30cm, como para los distintos potreros. En cada semana para el experimento “calibración del dron” se obtuvieron 22 datos que se relacionaron con su respectivos NDVI, biomasa disponible (KgMS/ha), altura y días de crecimiento. Mientras que para “vuelos AP” se obtuvieron resultados de NDVI de rojo y verde, de cada potrero y del área de pastoreo. A la hora del procesamiento de imágenes, el experimento “vuelos AP” demandó mucho más tiempo que el experimento “calibración del dron”. Todos los datos fueron registrados y analizados en una planilla Excel durante todo el período de evaluación del experimento.

3.2.6 Análisis de datos

Para el análisis de NDVI, tanto para biomasa, altura y días de crecimiento se utilizó el modelo polinomial de segundo grado, $y = ax^2 + bx + c$ (“a” determina la concavidad de la parábola, “b” determina la ubicación del eje de simetría de la parábola y “c” controla la altura de la parábola) ya que las variables como la biomasa son a menudo no lineales y se saturan en valores altos, lo que afecta el potencial predictivo de los modelos lineales (Prabhakara et al., 2015). Además, para poder comparar la precisión del modelo se calculó y se comparó su error medio absoluto (EMA) con el EMA de modelo mencionado por Insua et al. (2019), para las mismas variables. Por otro lado, para relacionar la altura y biomasa se utilizó un modelo lineal simple (Montossi et al., 2013) $y = ax + b$ (donde “a” indica la pendiente y “b” determina la ordenada en el origen).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CALIBRACIÓN DEL DRON

En primer lugar se observó que, del total de datos recabados, los valores de NDVI se encontraron entre -0,079 y 0,656. Basándose en la bibliografía (Marchesi & Castillo, 2016) que afirma que valores negativos indican la ausencia de vegetación, se decidió aplicar un factor de corrección de +0,08, estableciendo así como valor más bajo 0,001 y aumentando el máximo a 0,713.

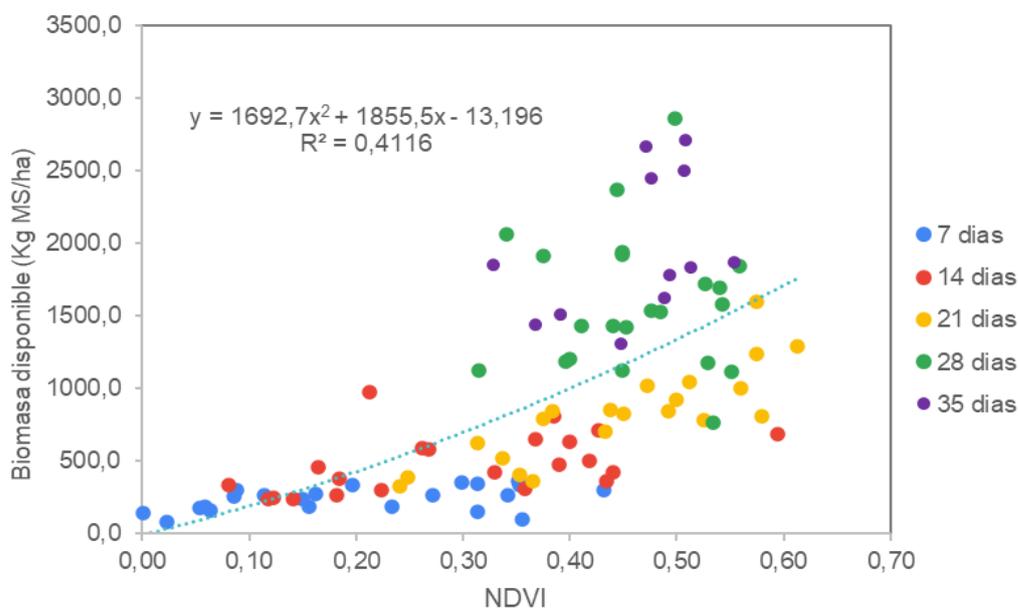
A la hora de analizar los datos, se tomaron solamente 100 de los 246 datos totales correspondientes a un ciclo de cada ensayo (40 datos del ensayo rojo y 60 datos del ensayo verde). De esta manera se logró tener la misma cantidad de datos para cada día de crecimiento (o franja), y así lograr resultados comparables. Con esta reducción de datos, el valor mínimo de NDVI se mantuvo igual, mientras que el máximo pasó a ser de 0,613.

4.1.1. Relación biomasa disponible (KgMS/ha) y NDVI

La Figura 7 presenta la relación entre NDVI y biomasa disponible. Los datos corresponden a los 7, 14, 21, 28 y 35 días de realizado el primer corte respectivamente. Está explicada por una regresión polinómica de segundo grado, con un ajuste entre sus variables de R^2 de 0,41, valor que se asemeja al obtenido por Mattera et al. (2023) en la estación de invierno ($R^2= 0,38$).

Figura 7

Relación Biomasa disponible (KgMS/ha) y NDVI con los días de crecimiento



Se observa una tendencia positiva entre el NDVI y la biomasa disponible, esto significa que a medida que el NDVI aumenta, la biomasa disponible también aumenta.

A su vez, se puede ver como existe un comportamiento diferencial entre los distintos días de crecimiento, por este motivo se decidió analizar por un lado el comportamiento hasta los 14 días, por otro a los 21 y por último a los 28 y 35.

En los días de crecimiento 7 y 14, se puede ver una alta variación en el NDVI abarcando valores de 0,00 a 0,45. Esta misma variación no es acompañada por la disponibilidad de biomasa, ya que la misma se acota a menos de 1000 KgMS/ha. Es posible que al encontrarse en las primeras etapas de rebrote, la pastura no contenga alto porcentaje de materia seca pero sí material verde que absorbe radiación solar, generando que los valores de NDVI sean altos (Sciaretta, 2012). Se puede observar un $R^2= 0,28$ para el total de datos del ensayo rojo y verde (Anexo A). Si discriminamos por ensayo, los valores de R^2 se modifican a 0,37 y 0,53 respectivamente. Cabe destacar que las muestras de los distintos ensayos fueron tomadas en fechas diferentes, cuando se realizaron los vuelos del ensayo rojo se registró la presencia de rocío sobre la superficie de la pastura que pudo haber influido en una sobre estimación del valor debido a la presencia de humedad en la superficie objetivo (Kim et al., 2012).

Por otro lado, a los 21 días de crecimiento se puede observar que la variación de NDVI si es acompañada con la variación de disponibilidad (Anexo B), con un $R^2= 0,71$. Esto sugiere que el NDVI es un buen indicador del rendimiento de la biomasa en las etapas intermedias del ciclo de crecimiento de la pastura, ya que expresa una buena relación con los volúmenes totales de biomasa.

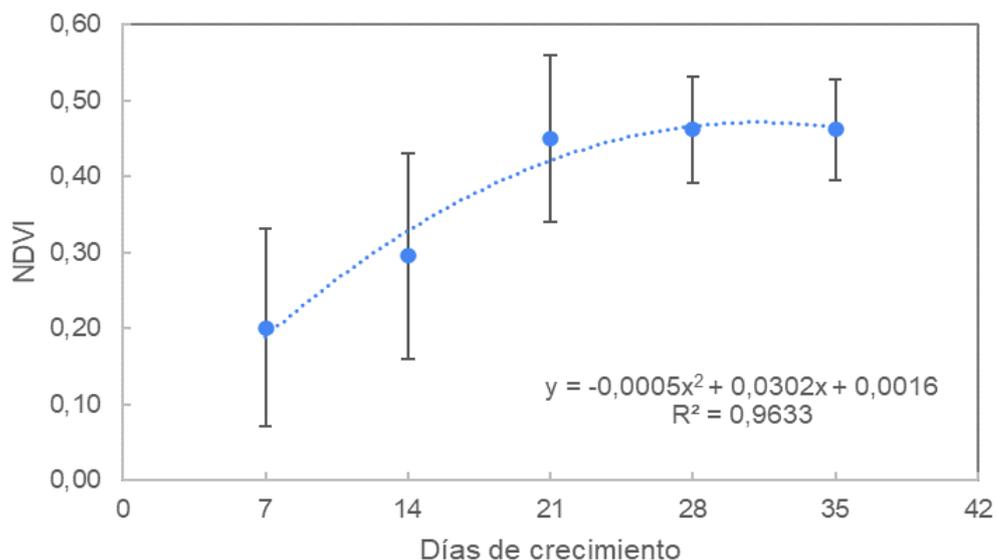
Comparando los datos entre 28 y 35 días de crecimiento, se observa lo contrario a lo mencionado para 7 y 14 días. Los valores de NDVI se acotan entre 0,30 y 0,55 mientras que la biomasa muestra una gran variación, donde el valor mínimo es de 750 KgMS/ha y el máximo de 2900 KgMS/ha, notándose una gran dispersión entre datos, lo que lleva a un $R^2= 0,11$ (Anexo C). Esta situación se asemeja a la planteada por Artola y Pérez del Castillo (2024), donde para un promedio de +/- 30 días de crecimiento el R^2 fue el mismo. La gran dispersión de los datos puede estar explicada por la diferencia entre plantas y el número de plantas presentes dentro de cada cuadrante. A su vez, en esta etapa de crecimiento, donde el estado fenológico se diferencia por contener un mayor porcentaje de materia seca en comparación a las etapas iniciales, además, se observa la presencia de material muerto en la parte baja. Debido a esto el valor de biomasa disponible aumenta, pero no el NDVI, asimilándose con lo mencionado por Lauric et al. (2020), donde el NDVI no se relaciona directamente con la totalidad del volumen de biomasa. Por otra parte, Insua y Utsumi (2016) afirman que en ocasiones donde los volúmenes de biomasa son altos, la herramienta se ve limitada, generando una saturación del NDVI.

Otro aspecto que se tuvo en cuenta, es el cálculo del EMA, el cual fue de 408 KgMS/ha, tomando en cuenta los datos reales (observados) y los predichos a partir del modelo obtenido (estimados). Este valor representa la magnitud promedio de los errores entre las predicciones y las mediciones reales tomadas en el campo. Para evaluar si este nivel de error es aceptable, es posible compararlo con otros modelos similares, como es

en el caso de Insua et al. (2019), donde $y = 69,63e^{4,61x}$. Para los mismos valores de NDVI este modelo refleja un EMA de 500 KgMS/ha, el cual se aproxima al valor obtenido con el modelo calibrado en este trabajo. Aunque este valor indica un cierto grado de error en las predicciones, también ofrece una base para identificar áreas de mejora y optimización del modelo.

Figura 8

Relación NDVI promedio y días de crecimiento



En la Figura 8 se puede ver la tendencia al aumento entre los días de crecimiento y el NDVI promedio. Se observa que el R^2 es de 0,96 lo que indica que la ecuación explica un 96% de la variación entre el NDVI y los días de crecimiento. Como se menciona en Giraldo et al. (2023), esto puede atribuirse a un aumento de la reflectancia sobre el tapiz verde en el suelo, y menos cantidad de suelo desnudo, lo que podría indicarse como un aumento en la cantidad de vegetación, o biomasa disponible (KgMS/ha).

Se debe tener en cuenta la variabilidad que presentan los puntos en relación al NDVI, cuando la pastura es más joven el crecimiento de la misma tiene mayor irregularidad entre plantas, a medida que transcurren los días el tapiz se vuelve más homogéneo, lo cual se atribuye a una menor dispersión de puntos (Sinde et al., 2020).

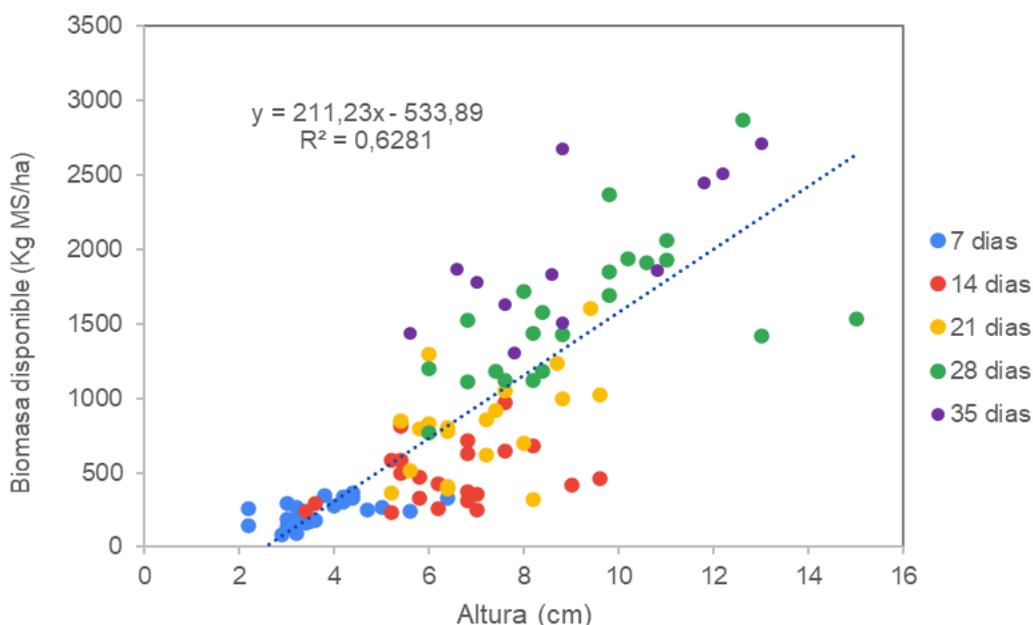
Las barras de error entre los valores desde el día 14 al 35 están superpuestas, por lo que no podemos afirmar con certeza la diferencia de valores de NDVI a medida que aumenta los días luego del pastoreo. Esto genera incertidumbre al momento de determinar un valor de NDVI y relacionarlo con un día específico de crecimiento.

4.1.2. Altura de la pastura (cm) y NDVI

La relación existente entre la altura en cm determinada dentro de los cuadrantes con la biomasa disponible se muestra en la Figura 9 y la de la altura de regla con el NDVI en la Figura 10.

Figura 9

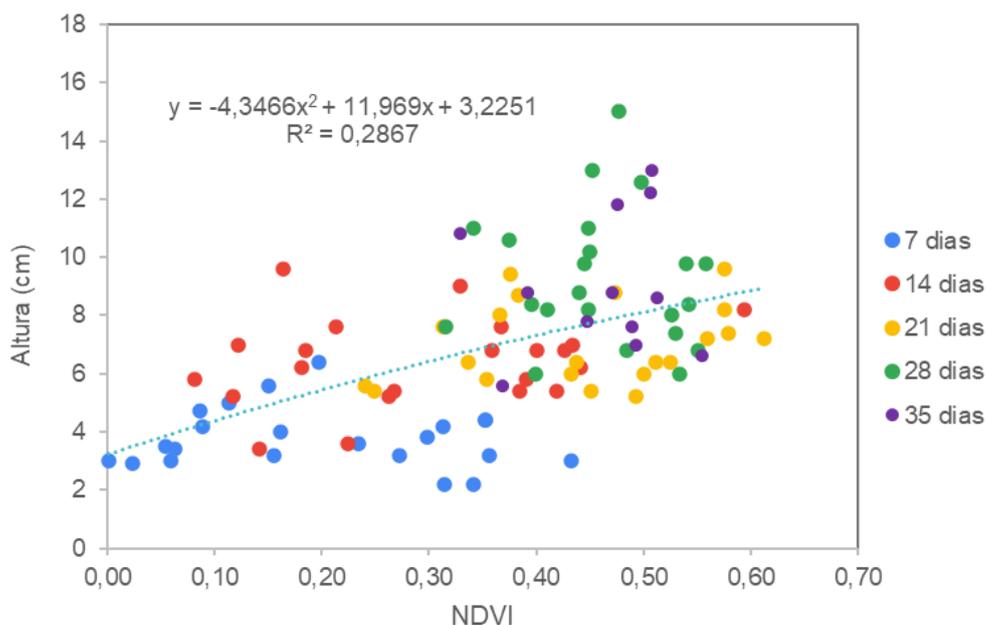
Relación Biomasa disponible (KgMS/ha) y Altura (cm)



En la Figura 9 se puede observar una tendencia ascendente, lo cual confirma la relación positiva entre altura y la biomasa disponible como se menciona en Montossi et al. (2013). Aquellos puntos que se encuentran más hacia la derecha de la gráfica representan los mayores días de crecimiento de la pastura. A diferencia de lo establecido por Perrachon (2009), el cual indica que 1 cm de altura corresponde a 100 KgMS/ha, la pendiente de la gráfica nos permite determinar que 1 cm de altura corresponde a 211 KgMS/ha. Se podría decir que la diferencia entre lo teórico y lo observado se debe a factores como especies de la mezcla, época del año trabajadas y densidad. A su vez, el resultado en biomasa es explicado por la altura de regla en un 63%.

Figura 10

Relación NDVI y Altura (cm) con 7, 14, 21, 28 y 35 días de crecimiento



En la Figura 10 se presenta la relación entre el NDVI y la altura (cm). Se observa que existe una gran dispersión espacial de los puntos de los distintos días de crecimiento, sumado a que no hay una clara relación en el aumento de la altura y el NDVI en simultáneo. A su vez, esto se puede ver reflejado por el R^2 de 0,29.

En ambas figuras se puede observar como las alturas de los disponibles son bajas, teniendo en cuenta que a los 35 días se esperaba una altura adecuada para el ingreso de los animales al potrero, correspondientes a 15-20 cm. Por razones metodológicas los cortes se realizaron a nivel de suelo, esto atribuye a que el área foliar remanente sea menor o nula, disminuyendo el número de macollos. Por lo tanto, la disponibilidad de reservas para la refoliación es limitada, en comparación con la simulación de pastoreo tradicional, con remanentes de 5-7 cm aproximadamente (Saldanha et al., 2010). Esto podría llegar a explicar por qué las relaciones encontradas con la altura y biomasa disponible del forraje o NDVI son bajas.

Cabe recordar que si bien es una pastura mezcla, se encontraba dominada por *Dactylis glomerata*, por lo que los manejos se plantean a partir del comportamiento del mismo. Generalmente en sistemas pastoriles de Uruguay, para esta especie se trabaja con alturas de ingreso de 15-20 cm de altura y remanentes de 5-7 cm a la salida de los animales. Según García (1995), con manejos frecuentes (15 pastoreos anuales), las alturas recomendadas pre y post pastoreo, para *Dactylis* son de 10-12 cm y 4-5 cm respectivamente y no habría diferencias significativas en la performance animal.

Si relacionamos estos datos con la ecuación de la Figura 9 y tomamos como referencia las alturas mencionadas por García (1995), obtenemos valores de 400-500

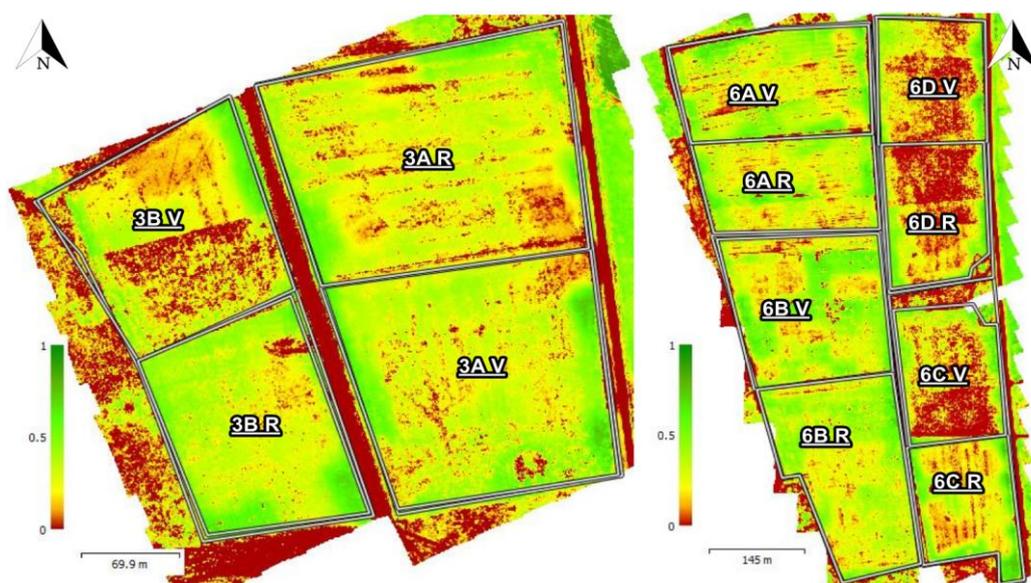
KgMS/ha, para la salida y 1600-2000 KgMS/ha de entrada. Llevando estos valores a la ecuación obtenida en la Figura 7, obtenemos los rangos de NDVI correspondientes a cada valor de biomasa, siendo los mismos 0,20-0,25 para salida y 0,57-0,68 para entrada. Este indicador podría estar introduciendo una nueva manera de visualizar rangos de entrada y salida al pastoreo que se basen en el número de un índice espectral y no en biomasa o número de hojas.

4.2. ESTIMACIÓN DE DISPONIBILIDAD EN “VUELOS AP”

Al momento de realizar los vuelos a nivel del área de pastoreo se plantearon diferentes dificultades, como primera y principal la autonomía de las baterías. Por esta razón se diseñaron vuelos de 15-20 min que cubrían la superficie de cada portero, con un 20% de solapamiento entre fotos. Gracias a un menor solapamiento, se logró cubrir el área de cada potrero en un menor tiempo y utilizando la totalidad de la batería. Además, en cada vuelo el dron realiza paradas en las que toma las fotografías y para esto debe estabilizarse en el aire, factor que se ve dificultado con el viento, consumiendo así más batería. En la figura 11 se puede observar imágenes del NDVI del área de pastoreo con los parámetros tomados para el experimento “vuelos AP”.

Figura 11

Imágenes NDVI de “vuelos AP”



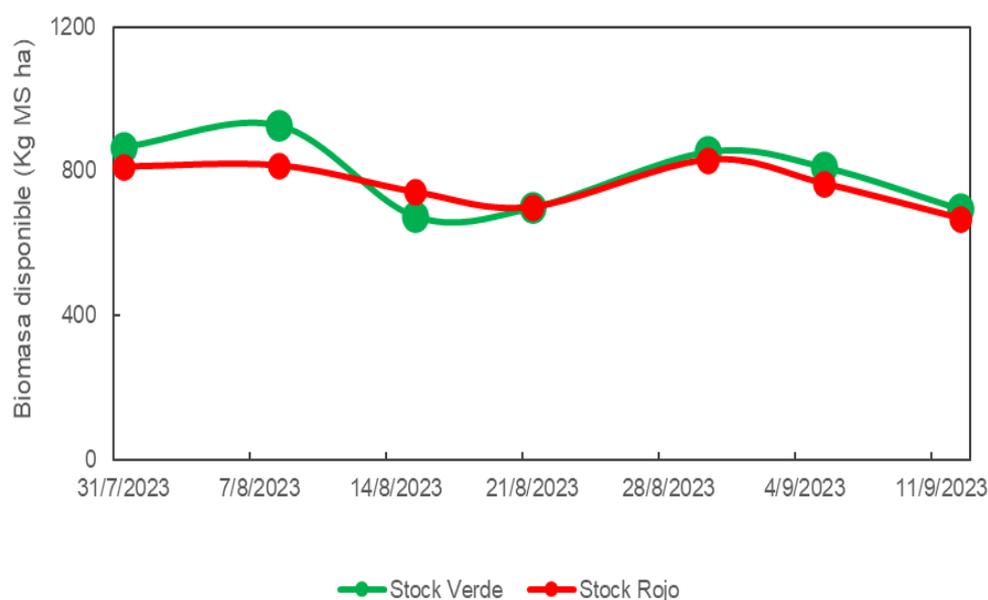
Nota. Imágenes NDVI procesadas. R (Rojo)-V (Verde), del área de pastoreo del CRS, FAgro.

En la Figura 12 se observa la evolución de la biomasa disponible (KgMS/ha) en el AP a partir de monitoreos realizados con el dron. Esto se llevó a cabo basándose en el modelo obtenido en la calibración ($y = 1692,7 * x^2 + 1855 * x - 13,196$) y el NDVI de los vuelos realizados. Estos valores de NDVI para “Stock Verde” oscilaron de 0,29 a 0,38 correspondiendo a biomásas de 694 a 927 KgMS/ha, y para “Stock Rojo” de 0,29 a 0,35 correspondiendo a biomásas de 669 a 831 KgMS/ha.

Al comparar los valores de NDVI y biomasa disponible estimados en el experimento “calibración del dron” se puede ver que son mucho menores a los esperados, en comparación con la situación de la pastura en ese momento (Anexo D), y las mediciones obtenidas mediante el uso del C-Dax. Esta diferencia se atribuye a que “vuelos AP” fueron realizados con solapamientos de 20% para permitir una mejor autonomía de las baterías. Sin embargo, según Romanos et al. (2018), es recomendable utilizar un solapamiento mínimo frontal de 75% y un solapamiento lateral de 60%. Afirman que vuelos con solapamientos bajos podrían resultar en mapas distorsionados.

Figura 12

Evolución del Stock de Biomasa disponible (KgMS/ha) del AP tomado con dron

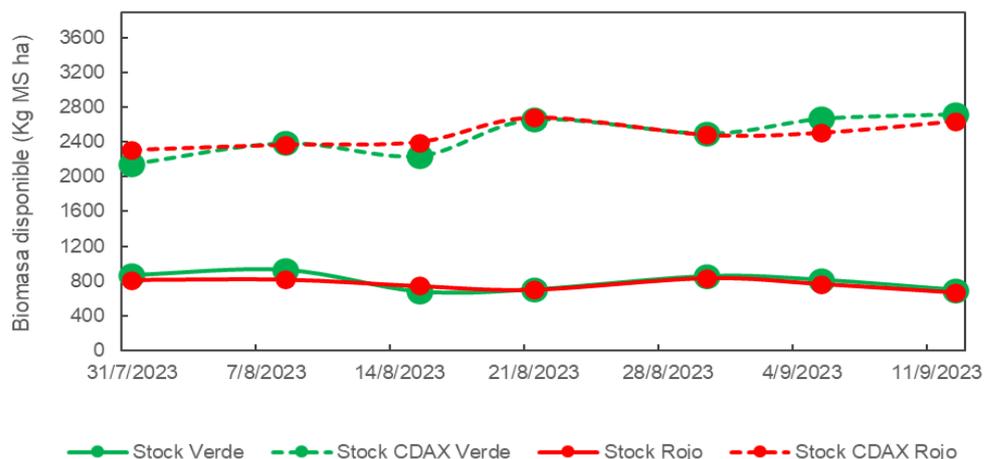


En la Figura 13 se puede observar la evolución del stock de la biomasa disponible en el AP, tomadas con dron y con el C-Dax. El motivo de esta es intentar tener una referencia a la biomasa disponible a partir de otra herramienta (C-Dax), para poner a prueba las diferencias en la estimación de las herramientas al momento del monitoreo. Los datos del C-Dax fueron obtenidos de la base de datos del CRS, FAgro, y forman parte del instrumento por lo cual se toman las decisiones de pastoreo para el ganado de ordeño. Desde el momento que se obtuvieron las estimaciones de biomasa disponible del AP, era de esperarse que se observara una diferencia amplia con lo estimado a partir del C-Dax, ya que los NDVI predichos eran más bajos que los esperados. Se realizaron promedios entre Stock Verde y Stock Rojo, para dron y C-Dax, llegando a un resultado de +/-1700 KgMS/ha de diferencia entre ambas herramientas a lo largo del periodo de estudio. Insua et al. (2019) obtuvieron una diferencia de 350 a 500 KgMS/ha entre la biomasa disponible estimada con dron y C-Dax en primavera-verano, utilizando un solapamiento entre imágenes de 75% y una altura de 100 m, lo que lleva a creer que al momento de los vuelos con un 20% de solapamiento se generó

una distorsión de los mapas generando valores bajos de NDVI, que se reflejaron en la baja biomasa disponible.

Figura 13

Evolución del Stock Biomasa disponible (KgMS/ha) del AP, tomado con dron y C-Dax



A pesar de las diferencias existentes entre ambas herramientas, se puede notar una tendencia similar en cuanto a la estimación de biomasa disponible. Esto lleva a creer que existen posibilidades de poder lograr una calibración en trabajos a futuro que genere estimaciones de biomasa disponible más cercanas a las obtenidas con el C-Dax, aplicando un factor de corrección, por ejemplo. Es importante poder mostrar que quizás el stock este asociado a un valor de disponibilidad expresado en kg MS ha, pero de esta forma podemos incorporar el valor de NDVI donde oscilaría el valor, y asociarlo a una altura y un estado fenológico (Insua et al., 2019). Por otra parte, se debe tener en cuenta que el C-Dax es una herramienta que no discrimina entre material verde (o vivo) y material muerto (o en proceso de senescencia), y determina altura. Mientras que el dron, como se mencionó en los puntos anteriores, solo capta material verde estimando una menor biomasa disponible.

4.3. COMPARACIÓN FRENTE A OTROS MÉTODOS

El uso de drones es una herramienta que aporta otro punto de vista al manejo de sistemas pastoriles en conjunto con las herramientas ya utilizadas (Regla graduada, Estimación visual, Plato de levante o C-Dax). Es una opción que tiene sus ventajas y desventajas frente a las mismas. En primer lugar, como ventaja, se ahorra mano de obra que deba realizar el recorrido de los potreros, ya que el mismo se puede efectuar desde un solo punto sin la necesidad de llegar a pie o en vehículo hasta el potrero, como es el caso de los métodos en su gran mayoría, permitiendo a su vez el ahorro de tiempo y esfuerzo. Esta facilidad también permite aumentar la frecuencia de monitoreo, aspecto clave al momento de la gestión de las pasturas, dado que los drones recopilan datos de manera instantánea, procesando y logrando una entrega de información en tiempo real al técnico, de esta manera logrando así un mejor control del crecimiento de estas. Por

otra parte, al portar una cámara RGB, pueden ser utilizados para otras tareas relevantes en la gestión ganadera, como el control de animales, la delimitación de potreros, evaluación de daños por eventos climáticos y la planificación de obras de infraestructura dentro del establecimiento.

En cuanto a las desventajas, frente al método del plato y la regla, requiere una mayor inversión inicial al momento de adquirir un dron con cámaras multiespectrales. Por otro lado, este aspecto cambia frente al C-Dax, dado que este también requiere de una alta inversión inicial (López & Sosa, 2019). Sin embargo, si se comparan los costos que se tendrán luego, son mayores para el C-Dax dado que este es remolcado por un vehículo motorizado, incluyendo costos de combustible y mantenimiento general (Anexo E). Por otra parte, existen limitantes operativas en el uso de drones, como lo es la autonomía de las baterías, estas tienen una durabilidad aproximada de 20-25 min de vuelo, correspondientes a 10 ha aprox. A su vez, cuanto más extensa sea el área de interés, mayor información será recabada. Esto genera que los tiempos de procesamiento de imágenes aumenten, implicando la necesidad de contar con software o tecnologías de procesamiento más avanzadas, lo que genera que la información no sea instantáneamente brindada al productor.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo permitió una aproximación en el uso de drones con cámaras multiespectrales, para la búsqueda de otra metodología en la estimación de biomasa disponible para los sistemas pastoriles de nuestro país.

Fue posible generar un modelo que relaciona las variables de NDVI y biomasa disponible para una pastura de Dactylis y Alfalfa, en las condiciones de invierno. Si bien esta correlación no refleja datos de con ajustes altos (mayores a 0,7) el grado de ajuste logrado es medio (0,4) lo cual no imposibilita su aplicación considerando otras metodologías empleadas tales como la regla. Sin embargo, el ajuste entre el NDVI y la medición de altura de la cobertura vegetal con regla obtuvo un modelo poco claro con un R^2 de 0,29.

Por otra parte, este trabajo introduce el concepto de establecer criterios en el manejo de las áreas de pastoreo mediante rangos de NDVI donde los valores se identifican con 0,20-0,25 para la salida de animales al pastoreo y 0,57-0,68 para la entrada. Si bien en términos de biomasa, los valores estimados por el dron fueron menores a los estimados por C-Dax, las oscilaciones del stock fueron captadas por ambos métodos de forma similar, lo que establece una herramienta prometedora para el control y la gestión del stock de forraje en áreas de pastoreo.

Si bien el trabajo intentó las potencialidades del uso de drones multiespectrales en la gestión de los recursos forrajeros, cabe destacar que los resultados establecen la necesidad de continuar avanzando en la potencialidad de los drones en el manejo de sistemas de producción.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Artola, I., & Pérez del Castillo, J. M. (2024). *Estimación de biomasa de festuca mediante el uso de drone multispectral* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Correcciones bibliográficas de Trabajos finales de grado. <http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/view/225/160/4726>
- Canseco, C., Demanet, R., Balocchi, O., Parga, J., Anwandter, V., Abarzúa, A., Teuber, N., & Lopetegui, J. (2007). Determinación de la disponibilidad de materia seca de praderas en pastoreo. En N. Teuber, O. Balocchi & J. Parga (Eds), *Manejo del pastoreo* (pp. 23-49). Imprenta América. https://www.researchgate.net/publication/281041644_Determinacion_de_la_disponibilidad_de_materia_seca_de_praderas_en_pastoreo
- Carámbula, M. (2010a). *Pasturas y forrajes: Vol. 1. Potenciales y alternativas para producir forraje*. Hemisferio Sur.
- Carámbula, M. (2010b). *Pasturas y forrajes: Vol. 3. Manejo, persistencia y renovación de pasturas*. Hemisferio Sur.
- C-Dax. (s.f.). *Pasture meter manual lift*. <https://www.C-Dax.com/product/pasture-meter-manual-lift>
- Cicore, P. L., Insua, J. R., Laplacette, C. M., Marino, A., Berone, G. D., & Utsumi, S. (2021). Nuevas tecnologías para estimar forraje que mejoran la eficiencia de uso de las pasturas. *Horizonte A*, 141, 70-74.
- Di Leo, N. C. (2015). *Drones: Nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión*. *Revista Agromensajes*, (41), 7-17. <https://rehip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/0d00425f-05ea-489c-84a6-be4dbcdb7a3d/content>
- DJI. (s.f.). *P4 multispectral*. https://www.dji.com/global/p4-multispectral?site=brandsite&from=insite_search
- Durán, H. (2004). Cambios tecnológicos e intensificación en los sistemas pastoriles de producción de leche en Uruguay. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Eds.), *Resultados experimentales en lechería* (pp. 115-121). <http://inia.uy/en/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219210807181425.pdf#page=117>
- Fariña, S. (2016). Desafíos futuros para los sistemas de producción de leche de Uruguay. En E. Giannechini & V. Elizondo (Eds.), *XLIV Jornadas Uruguayas Buiatría* (pp. 65-69). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15284/1/JB2016-65-69.pdf>

- Fernández, H. (2004). *Estimación de la disponibilidad de pasto*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/41-disponibilidad.pdf
- Ferwerda, J. G. (2005). *Charting the quality of forage: Measuring and mapping the variation of chemical components in foliage with hyperspectral remote sensing* [Disertación doctoral, Wageningen University & Research]. ProQuest Dissertations. <https://www.proquest.com/openview/13acb67dfe00ee770f30ad04221255f1/1?pq-origsite=gscholar&cbl=44156>
- García, J. A. (1995). *Dactylis glomerata L.: INIA LE OBER*. INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2748/1/111219240807155917.pdf>
- Giraldo, R. A. D., De León, M. Á., Rincón, Á., Castillo, O. P. L., Rocha, E. C., & Asprilla, W. P. (2023). Estimación de la disponibilidad de forraje y de parámetros asociados a la calidad nutricional del pasto *Urochloa humidicola* cv Llanero a partir de imágenes multiespectrales. *Revista Forrajes tropicales*, 11(1), 61-74. <https://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/article/download/1202/557/4349>
- Google Earth. (2024). [Centro Regional Sur, Progreso, Uruguay.] Recuperado el 2 de agosto de 2024, de [https://earth.google.com/web/search/Centro+Regional+Sur+\(CRS\),+Facultad+de+Agronom%c3%ada,+Cam.+Folle,+Progreso+Departament+de+Canelones/@-34.6133106,-56.2175821,48.58261771a,680.96504246d,35y,0h,0t,0r/data=Cs4BGqMBEpwBCiUweDk1YTFjYjNiYWY1MWZkMGY6MHg4OTJjZTQzMTkzZjVmOWExGSOINPaATkHAIfXY8brZG0zAKmFDZW50cm8gUmVnaW9uYWwgU3VyIChDUIMpLCBGYWN1bHRhZCBkZSBBZ3Jvbm9tw61hLCBDYW0uIEZvbGxILCBQcm9ncmVzbyBEZXBhcnRhbWVudG8gZGUgQ2FuZWxvbmVzGAIGASImCiQJh7WhiuTxM0ARhbWhiuTxM8AZClk-sXwVQEAhc_MwRsxIUcA6AwoBMA](https://earth.google.com/web/search/Centro+Regional+Sur+(CRS),+Facultad+de+Agronom%c3%ada,+Cam.+Folle,+Progreso+Departament+de+Canelones/@-34.6133106,-56.2175821,48.58261771a,680.96504246d,35y,0h,0t,0r/data=Cs4BGqMBEpwBCiUweDk1YTFjYjNiYWY1MWZkMGY6MHg4OTJjZTQzMTkzZjVmOWExGSOINPaATkHAIfXY8brZG0zAKmFDZW50cm8gUmVnaW9uYWwgU3VyIChDUIMpLCBGYWN1bHRhZCBkZSBBZ3Jvbm9tw61hLCBDYW0uIEZvbGxILCBQcm9ncmVzbyBEZXBhcnRhbWVudG8gZGUgQ2FuZWxvbmVzGAIGASImCiQJh7WhiuTxM0ARhbWhiuTxM8AZClk-sXwVQEAhc_MwRsxIUcA6AwoBMA)
- Insua, J. R., & Utsumi, S. (2016). Nuevas tecnologías para el monitoreo de pasturas. *Revista Vision Rural*, 115, 9-15. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/80888>
- Insua, J. R., Utsumi, S. A., & Basso, B. (2019). Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (UAV) with crop simulation models. *PloS One*, 14(3), Artículo e0212773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212773>
- Irigoyen, A. (2009). Presupuestación forrajera: Parte 1. *Revista del Plan Agropecuario*, (132), 48-53. https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R132/R_132_48.pdf

- Kim, Y., Glenn, D. M., Park, J., Ngugi, H. K., & Lehman, B. L. (2012). Characteristics of active spectral sensor for plant sensing. *Transactions of the ASABE*, 55(1), 293-301. <https://doi.org/10.13031/2013.41239>
- Lauric, A., De Leo, G., Torres Carbonell, C., Tizón, R., & Marini, F. (2020). *Evaluación de índices de vegetación por imágenes satelitales para estimar curvas de materia seca en pasturas perennes de la región semiárida del sudeste bonaerense*. INTA. https://www.researchgate.net/publication/341579241_EVALUACION_DE_INDICES_DE_VEGETACION_POR_IMAGENES_SATELITALES_PARA_ESTIMAR_CURVAS_DE_MATERIA_SECA_EN_PASTURAS_PERENNES_DE_LA_REGION_SEMIARIDA_DEL_SUDOESTE_BONAERENSE_ARGENTINA
- Lombardo, S. (2022). ¿Cómo utilizar el 90% del pasto? *Revista del Plan Agropecuario*, (183), 50-52. https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/183_2810.pdf
- López, J., & Sosa, O. (2019). *Uso de herramientas alternativas en el monitoreo del forraje* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29403>
- Mannetje, L. (2000). Measuring biomass of grassland vegetation. En L. Mannetje & R. M. Jones (Eds.), *Field and laboratory methods for grassland and animal* (pp. 151-177). CABI.
- Marchesi, C., & Castillo, J. (2016). Manejo integrado de cultivos: Índice verde (NDVI), indicador del status nitrogenado del cultivo. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Eds.), *Presentación resultados experimentales de arroz zafra 2015-2016* (pp. 21-24). <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5938/1/Arroz-INIA-agosto-2016-web.pdf>
- Mattera, J., Portillo, J. E., Lavarello Herbin, A., Barletta, P. F., & Gallo, S. A. (2023). Estimación de la producción de forraje de festuca alta ante la fertilización nitrogenada mediante dron con cámara multiespectral. *Revista Argentina de Producción Animal*, 43(Supl. 1), 153. https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/16812/INTA_CRBsAsNorte_EEAPergamino_Mattera_Juan_Estimacion_de_la_produccion_de_forraje_de_festuca_alta_PONENCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Michez, A., Lejeune, P., Bauwens, S., Lalaina Herinaina, A., Blaise, Y., Castro Muñoz, E., Lebeau, F., & Bindelle, J. (2019). Mapping and monitoring of biomass and grazing in pasture with an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 11(5), Artículo e473. <https://doi.org/10.3390/rs11050473>

- Montossi, F., Pravia, M. I., Dighiero, A., Porcile, V., Gutiérrez, D., & De Barbieri, I. (2013). *Estimaciones indirectas de la cantidad de forraje para una mejor gestión de nuestras pasturas*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/174-medicion_indirecta_25.pdf
- Murphy, D. J., Murphy, M. D., O'Brien, B., & O'Donovan, M. (2021). Una revisión de tecnologías de precisión para optimizar la medición de pasturas en pastizales irlandeses. *Agriculture, 11*, Artículo e600. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070600>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2011). *Anuario Estadístico Agropecuario 2011*. MGAP. <https://www.mgap.gub.uy/Dieaanterior/Anuario2011/DIEA-Anuario-2011-web.pdf>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2020). *Estadísticas del sector lácteo*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/estadisticas-del-sector-lacteo-2020>
- Ortega, G. (2019). *Aplicación de sistemas de percepción remota para el monitoreo y gestión de recursos forrajeros en sistemas pastoriles de producción* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/29887>
- Perrachon, J. (2009). Manejo del pasto. *Revista del Plan Agropecuario*, (130), 42-45. https://planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R130/R_130_42.pdf
- Perrachon, J. (2013). Instalación de Pasturas Perennes. *Revista del Plan Agropecuario*, (146), 48-53. https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R146/R_146_48.pdf
- Prabhakara, K., Hively, W. D., & McCarty, G. W. (2015). Evaluating the relationship between biomass, percent groundcover and remote sensing indices across six winter cover crop fields in Maryland, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.002>
- Pravia, M. I., Montossi, F., Gutiérrez, D., Ayala, W., Andregnette, B., Invernizzi, G., & Porcile, V. (2013). Estimación de la disponibilidad de pasturas y forrajes en predios de GIPROCAR II: Ajuste del “Rising plate meter” para las condiciones de Uruguay. En F. Montossi (Ed.), *Invernada de precisión: Pasturas, calidad de Carne, genética, gestión empresarial e impacto ambiental (GIPROCAR II)* (pp. 31-67). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7664/1/St-211-2013-p.31-67.pdf>

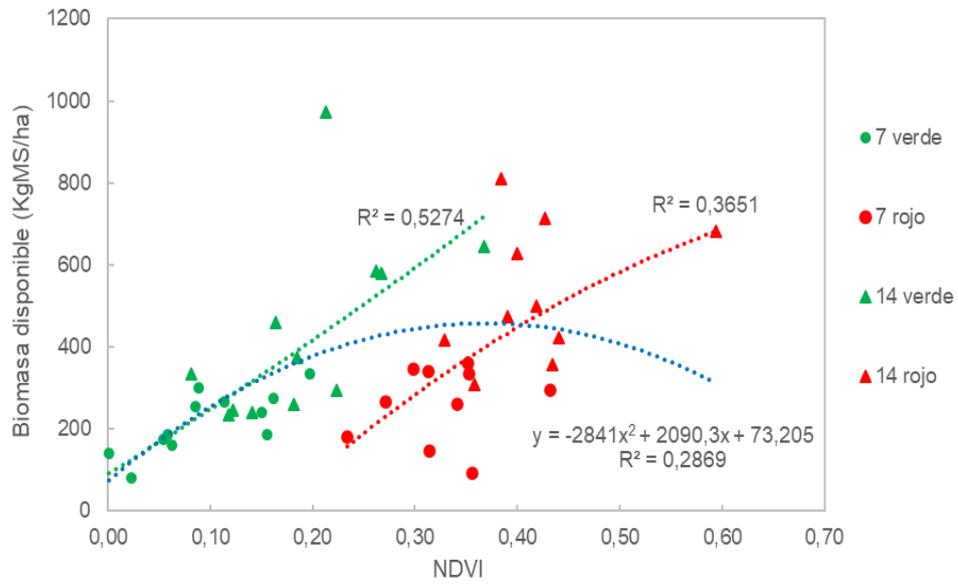
- Quinodoz, J. E. (2004). *Criterios para la presupuestación del pasto*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/15-manejar_recurso_mas_barato.pdf
- Ribarola, J. A., & Villanueva, C. (2023). *Cuantificación de biomasa en pasturas a partir de imágenes tomadas por drones* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/43764/1/RibarolaM%c3%a1rquezJonathan.pdf>
- Rodríguez, G. & Triñanes, I. (2018). *Uso de un UAV para estimar la altura del forraje* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/28827>
- Romanos, P., Lovatto, M., & Rossi, B. D. (2018). Criterios y recomendaciones para selección de software aplicativos para drones. En B. Rossi (Ed.), *Congreso de AgroInformática 2018* (pp. 49-62). SEDICI. https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/70985/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Rueda-Ayala, V. P., Peña, J. M., Höglind, M., Bengochea-Guevara, J. M., & Andújar, D. (2019). Comparing UAV-based technologies and RGB-D reconstruction methods for plant height and biomass monitoring on grass ley. *Sensors*, 19(3), Artículo e535. <https://doi.org/10.3390/s19030535>
- Saldanha, S., Boggiano, P., & Cadenazzi, M. (2010). Intensidad del pastoreo sobre la estructura de una pastura de *Lolium perenne* cv Horizon. *Agrociencia (Uruguay)*, 14(1), 44-54. <https://doi.org/10.31285/AGRO.14.639>
- Sanderson, M. A., Rotz, C. A., Fultz, S. W., & Rayburn, E. B. (2001). Estimating Forage Mass with a Commercial Capacitance Meter, Rising Plate Meter and Pasture Ruler. *Agronomy Journal*, 93(6), 1281-1286. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.1281>
- Schori, F. (2015). Sward surface height estimation with a rising plate meter and the C-Dax Pasture meter. En A. van den Pol-van Dasselaar, H. F. M. Aarts, A. De Vliegheer, A. Elgersma, D. Reheul, J. A. Reijneveld, J. Verloop & A. Hopkins (Eds.), *Grassland and forages in high output dairy farming systems* (pp. 310-312). EGF. https://www.europeangrassland.org/fileadmin/documents/Infos/Printed_Matter/Proceedings/EGF2015.pdf#page=329
- Sciaretta, F., (2012). *Estimaciones forrajeras, claves para un rendimiento óptimo*. *Producción Animal*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/149-ESTIMACIONES_FORRAJERAS.pdf

- Sinde, I., Yáñez, D., Grefa, J., Arza, M., & Gil, M. (2020). Estimación del rendimiento del pasto mediante NDVI calculado a partir de imágenes multiespectrales de vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Revista Geoespacial*, 17(1), 25-38.
- Théau, J., Lauzier-Hudon, É., Aubé, L., & Devillers, N. (2021) Estimation of forage biomass and vegetation cover in grasslands using UAV imagery. *PLoS ONE*, 16(1), Artículo e0245784. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245784>
- Waller, A. (2020). *Análisis de metodología para monitoreo de pasturas en predio comercial* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/32561>
- Xue, Z., Liu, N., Wang, Y., Yang, H., Wei, Y., Moriel, P., Palmer, E., & Zhang, Y. (2019). Combining orchardgrass and alfalfa: Effects of forage ratios on in vitro Rumen degradation and fermentation characteristics of silage compared with hay. *Animals*, 10(1), Artículo e59. <https://doi.org/10.3390/ani10010059>
- Zanoniani, R., & Lattanzi, F. (2017). Rol de las pasturas cultivadas en sistemas de producción basados en campo natural. En W. Ayala, P. Boggiano, & O. Álvarez (Eds.), *XXIV Reunión del Grupo Técnico en Forrajeras del Cono Sur-Grupo Campos* (pp. 24-28). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12171/1/Lattanzi-F.-Grupo-Campo-2017-2.pdf>

7. ANEXOS

Anexo A

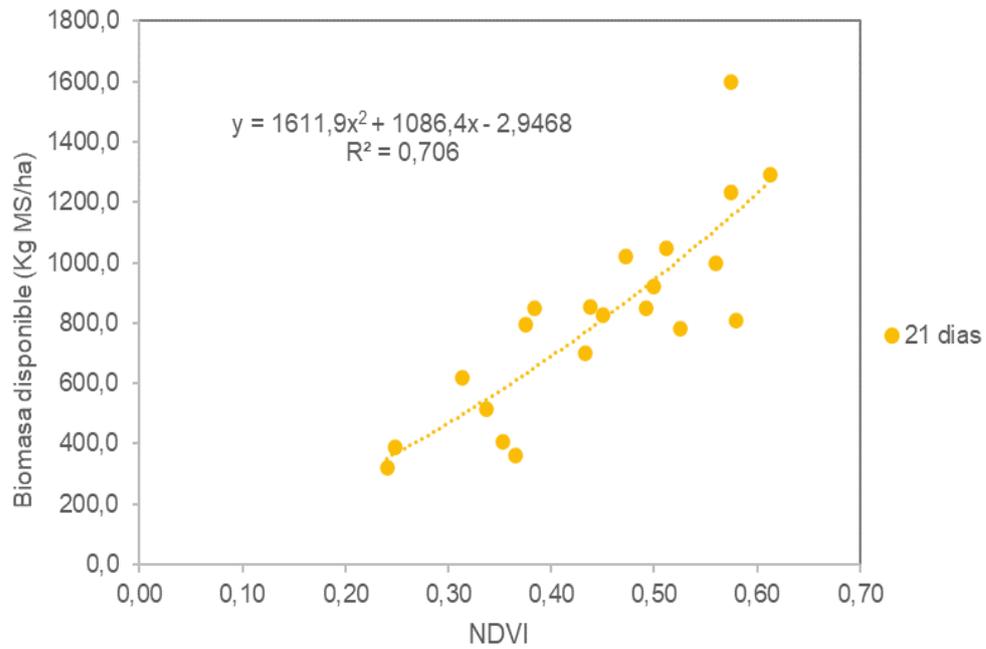
Relacion KgMS/ha y NDVI para según ensayo rojo y verde



Nota. Datos de 7 y 14 días de crecimiento.

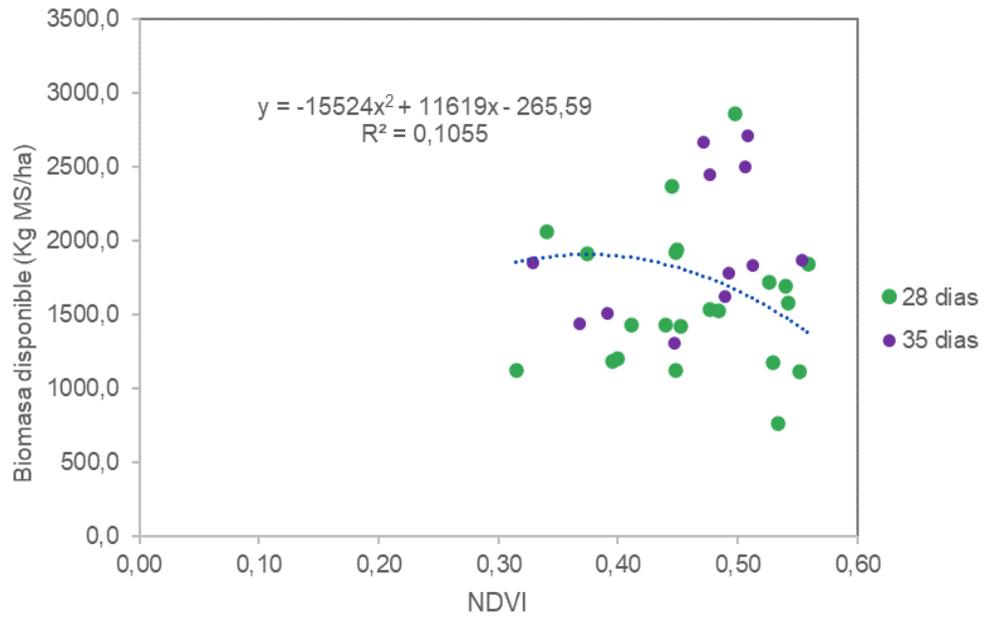
Anexo B

Biomasa disponible (KgMS/ha) y NDVI para 21 días de crecimiento



Anexo C

Biomasa disponible (KgMS/ha) y NDVI para 28 y 35 días de crecimiento



Anexo D

Biomasa disponible en potrero 6C el 21/8/2023



Anexo E*C-Dax remolcado por un tractor*

Nota. Imagen tomada en CRS, FAgro, UdelaR