

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**ESTIMACIÓN DE BIOMASA DE FESTUCA MEDIANTE EL USO
DE DRONE MULTIESPECTRAL**

por

Iñaki ARTOLA GUYNOT DE BOISMENU

Juan Manuel PÉREZ DEL CASTILLO LÓPEZ

**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: -----
Ing. Agr. Msc. Gastón Ortega

Ing. Msc. Gastón Notte

Tribunal: -----
Ing. Agr. Juan Ramón Insúa

Ing. Agr. Msc. Gastón Ortega

Ing. Msc. Gastón Notte

Fecha: 25 de abril de 2024

Estudiantes: -----
Iñaki Artola

Juan Manuel Pérez del Castillo

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradecer a nuestros tutores, el Ing. Agr. MSc. Gastón Ortega y el Ing. MSc. Gastón Notte, por la oportunidad, el apoyo y compartir ideas y puntos de vista para que este trabajo pudiera salir adelante.

También agradecer a Lucia Puppo quien nos permitió llevar adelante el trabajo sobre su experimento con riego.

A todas las personas que de alguna u otra manera participaron en la realización de este trabajo y un especial agradecimiento a nuestras familias y amigos por el apoyo durante la elaboración de este proyecto y durante todos los años de estudio.

Tabla de contenido

| | |
|---|-----------|
| PÁGINA DE APROBACIÓN..... | 2 |
| AGRADECIMIENTOS | 3 |
| LISTA DE CUADROS Y 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. Caracterización climática y de producción de pasturas en Uruguay..... | 11 |
| 2.1.1. Gestión de la pastura..... | 12 |
| 2.1.2. Festuca arundinacea..... | 13 |
| 2.1.3. Presupuestación forrajera..... | 14 |
| 2.2. Herramientas para medir la oferta de forraje | 14 |
| 2.2.1. Métodos directos | 15 |
| 2.2.2. Métodos indirectos | 15 |
| 2.3. Antecedentes del uso de drones y satélites para estimar biomasa | 22 |
| 2.3.1. A nivel internacional | 22 |
| 2.3.2. A nivel nacional..... | 24 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 26 |
| 3.1. Condiciones experimentales | 26 |
| 3.1.1. Lugar y fecha del experimento..... | 26 |
| 3.1.2. Registros meteorológicos previos y durante el periodo de estudio | 26 |
| 3.1.3. Materiales..... | 28 |
| 3.1.4. Drone | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1.5. RTK | 29 |
| 3.1.6. Pastura..... | 29 |
| 3.2. Metodología experimental..... | 30 |
| 3.2.1. Planificación de vuelo del dron..... | 32 |
| 3.2.2. Análisis estadístico | 33 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 35 |
| 4.1. Relación biomasa (KgMS/ha) y NDVI | 35 |
| 4.2. Altura en cm y su relación con el NDVI | 40 |
| 4.3. Mapa de la distribución de la biomasa | 43 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 45 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 47 |
| 7. ANEXO | 54 |

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. <i>Dinámica del crecimiento de pasturas sometidas a pastoreo.</i> | 12 |
| Figura 2. <i>Ubicación del CRS, donde fue llevado a cabo el experimento.</i> | 26 |
| Figura 3. <i>Registro histórico de temperaturas y registro para el ejercicio 2022-2023 (INIA Las Brujas).</i> | 27 |
| Figura 4. <i>Registro histórico de precipitaciones (INIA Las Brujas) y registro para el ejercicio 2022-2023 (CRS).</i> | 28 |
| Figura 5. <i>Imagen del drone DJI Phantom 4 multiespectral utilizado.</i> | 29 |
| Figura 6. <i>Imagen aérea tomada con el drone del experimento y distribución de sus tratamientos.</i> | 30 |
| Figura 7. <i>Rectángulo utilizado para la identificación de los distintos puntos de muestreo.</i> | 31 |
| Figura 8. <i>Imagen aérea del experimento en donde se pueden observar los rectángulos.</i> | 32 |
| Figura 9. <i>Trayectoria del vuelo del drone a diferentes alturas (20, 60 y 100 metros) para el área de muestreo.</i> | 33 |
| Figura 10. <i>Relación biomasa (KgMS/ha) y NDVI, con datos certeros en azul y anómalos marcados en rojo.</i> | 35 |
| Figura 11. <i>Relación días de crecimiento y NDVI promedio.</i> | 37 |
| Figura 12. <i>Relación días de crecimiento, NDVI promedio y fases de crecimiento de la pastura.</i> | 38 |
| Figura 13. <i>Relación KgMS/ha, NDVI y días de crecimiento.</i> | 39 |
| Figura 14. <i>Relación entre altura y NDVI.</i> | 40 |
| Figura 15. <i>Relación NDVI y altura.</i> | 41 |
| Figura 16. <i>Representación ráster de la superficie fotografiada.</i> | 42 |
| Figura 17. <i>Mapa de distribución de la biomasa del área en estudio.</i> | 44 |
| | |
| Cuadro 1. <i>Producción anual de Festuca (tt MS/ha).</i> | 13 |
| Cuadro 2. <i>Distribución estacional de la producción y tasas de crecimiento estacional (%).</i> | 14 |

RESUMEN

En Uruguay en la ganadería y en la lechería se utilizan las pasturas como principal fuente de alimento, lo que permite obtener una producción de bajo costo y un producto diferencial. El monitoreo sistemático de las pasturas establece un desafío en la gestión y la búsqueda de eficiencia del sistema. Existen diversos métodos para llevar adelante este monitoreo, desde métodos directos, indirectos y hasta las nuevas tecnologías como pueden ser los drones, y a partir del cual surge la pregunta si es posible llevar adelante estas mediciones con el uso de los mismos, lo que permitirán una descripción del espacio detallada y de fácil implementación. En este trabajo se propone como objetivo principal, la cuantificación de biomasa y altura de la pastura a partir de imágenes obtenidas por un drone multi espectral y la generación del NDVI. Las mediciones se realizaron en el otoño del año 2023 sobre una festuca de tercer año con riego ubicado en la zona de Progreso-Canelones en el Centro Regional Sur (CRS) perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, Uruguay.

Se realizaron vuelos semanales durante el otoño para la obtención de las imágenes y el posterior procesamiento de las mismas para la generación del modelo NDVI. Para calibrar el drone se realizó un doble muestreo en donde a su vez de tomar imágenes con el drone se cortó muestras en cuadrantes de (0.51 X 0.31m) y se midió altura con regla dentro de los mismos. De esta manera cada medición de un cuadrante cuenta con un valor de disponibilidad en KgMS/ha y altura (cm) que posteriormente se le adjudica 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 $R^2= 0,76$. Por otro lado, por medio de las imágenes se generó un DEM (en español modelo de elevación digital), a partir del cual se intentó determinar la altura de la pastura, no pudiendo llegar a resultados certeros, por lo que es un factor a seguir estudiando y trabajando. A partir del modelo NDVI y biomasa también se pudo generar mapas de distribución de la misma. De esta manera en este trabajo se logró a partir del drone generar nuevas herramientas para realizar estimaciones de las variables de estado de un sistema pastoril, aportando elementos para la gestión y facilitando la toma de decisiones.

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

SUMMARY

In Uruguay, both cattle raising and dairy farming use pastures as the main source of food, allowing for low-cost production and a differential product. Systematic monitoring of the availability and growth of pastures establishes a challenge in management and the search for system efficiency. There are various methods to carry out this monitoring, from direct to indirect methods and even new technologies such as drones, and from which the question arises if it is possible to carry out these measurements with the use of them, which will allow a detailed description of the space and an easy implementation. In this work, the main objective is the quantification of biomass and height of the pasture from images obtained by a multi-spectral drone and the generation of the NDVI. The measurements were carried out in the autumn of 2023 on a third-year fescue with irrigation located in the Progreso-Canelones area in the Centro Regional Sur (CRS) belonging to the Faculty of Agronomy of the University of the Republic, Uruguay.

Weekly flights were carried out during the autumn to obtain the images and their subsequent processing for the generation of the NDVI model. To calibrate the drone, a double sampling was carried out where, in addition of taking images with the drone, samples were cut from quadrants of (0.51 X 0.31m) and height was measured with a ruler. In this way, each measurement of a quadrant has a KgMS/ha and height value and then the corresponding NDVI value is assign. The correlation between NDVI and real biomass (KgDM/ha) was $R^2=0.74$, and for NDVI and height (measured with a ruler) $R^2= 0.76$. On the other hand, a DEM (digital elevation model) was generated through the images, from which an attempt was made to determine the height of the pasture, but could not reach accurate results, so it is a factor to continue studying and working. From the NDVI and biomass model it was also possible to generate biomass distribution maps. In this way, in this work, using the drone, it was possible to begin generating new tools that allow us to make estimates of the state variables of a pastoral system, in order to facilitate decisions when taking measures of management.

Keywords: drone, biomass estimation, pasture height, NDVI

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay, tanto la ganadería como la lechería utilizan las pasturas como principal fuente de alimento. En la lechería la cosecha directa de pasto representa entre el 48 % y 54 % de la dieta de los animales en el año (Aguerre et al., 2017). Esto representa una ventaja comparativa para producir carne y leche en base al uso de forrajes: se pueden producir grandes cantidades de pasto por hectárea y las vacas pueden pastorear todo el año (Tuñon et al., 2018). Al utilizar las pasturas como principal fuente de alimento, permite a los sistemas pecuarios uruguayos obtener una producción a bajo costo (Chilibroste et al., 2011) y que esta sea competitiva en un mercado global cada vez más exigente.

El resultado productivo y económico de los sistemas lecheros va a estar fuertemente determinado por el manejo realizado sobre el recurso forrajero. Es por esto que cobra vital importancia la estimación de biomasa de las pasturas para poder realizar una buena planificación del pastoreo y así hacer un uso eficiente del forraje.

Los métodos más utilizados para la estimación de la cantidad de forraje (por unidad de superficie) se pueden clasificar en métodos directos o indirectos, que varían según costo, escala de medición y facilidad (Montossi et al., 2013). Gracias al avance de la tecnología, hoy podemos realizar estimaciones indirectas de forma fácil y rápida a través de imágenes obtenidas mediante satélites o el uso del dron, permitiendo obtener una rápida estimación de la pastura.

En este trabajo, a partir del uso del dron apuntamos a buscar una alternativa que complemente a los métodos tradicionales de medición y que permita estimar la biomasa disponible de forma rápida y sencilla. Y así avanzar en el conocimiento en el uso de esta tecnología que creemos tiene gran potencial sobre todo en lo que refiere a la extensa información que se puede extraer a partir de una imagen y a la simplicidad en cuanto a su operativa.

1.1. Hipótesis

- Es posible la cuantificación de biomasa y altura de la pastura a partir de imágenes obtenidas por un drone multi espectral a través de la generación de mapas de NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada).

1.2. Objetivo general

- Estimación de la biomasa disponible de pradera de festuca a través de índices multiespectrales mediante el uso de imágenes tomadas por el drone, a 60 metros de altura, para la estación de otoño.

1.3. Objetivos específicos

- Calibración del drone Phantom 4 Multiespectral mediante doble muestreo, para estimar biomasa de pradera sembrada de festuca, durante el otoño a una altura de vuelo de 60 metros.

- Generación de un modelo que relacione ndvi y la biomasa (kg MS/ha).

- Estimación de la altura de la pastura en contraste con NDVI.

- Generar mapas de biomasa que permitan observar la distribución espacial de la pastura.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Caracterización climática y de producción de pasturas en Uruguay

El Uruguay está situado entre los 30 y 35 grados de latitud sur, en una zona subtropical templada (Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger, 1971).

La temperatura media anual del Uruguay es de unos 17.7 grados centígrados, variando desde unos 19.8 en la zona noroeste hasta unos 16.6 grados centígrados en la zona sur del país (Castaño et al., 2011).

Los valores medios de precipitación anual sobre el país se sitúan entre 1200 y 1600 milímetros (mm) con los menores valores situados al suroeste y los máximos en el noreste. Podemos decir que el régimen de precipitaciones sobre el Uruguay tiene características marítimas en la región sureste y este, con un máximo de precipitaciones en el invierno. El resto del país es una región de transición entre lluvias de carácter marítimo y las lluvias veraniegas del interior del continente (Castaño et al., 2011).

Entre los factores naturales, el clima y el suelo constituyen la base del ecosistema y afectan en forma notable y decisiva el comportamiento de las pasturas (Carámbula, 1991).

Según Olmos (1997), en cuanto a la curva de crecimiento de las pasturas, se puede decir que al comienzo de la primavera hay buena disponibilidad de agua en el suelo y la temperatura está en aumento, se evidencian las máximas tasas de crecimiento (segunda mitad de agosto y setiembre), sin considerar la encañazón que sucede más tarde al semillar las especies. Luego en el verano, con una mayor demanda atmosférica de agua (al incrementarse la evaporación potencial) y con la misma o menor precipitación, se produce una restricción hídrica para las plantas y por lo tanto su crecimiento es menor en los brunosoles; en los suelos de textura arenosa en cambio, debido a una mayor disponibilidad de agua (horizonte B arcilloso), el crecimiento es mayor. Más tarde en otoño comienza a recomponerse un mejor balance hídrico. Algunas plantas pueden llegar a florecer y comienza a descender la temperatura incrementando el riesgo de heladas, las cuales detienen

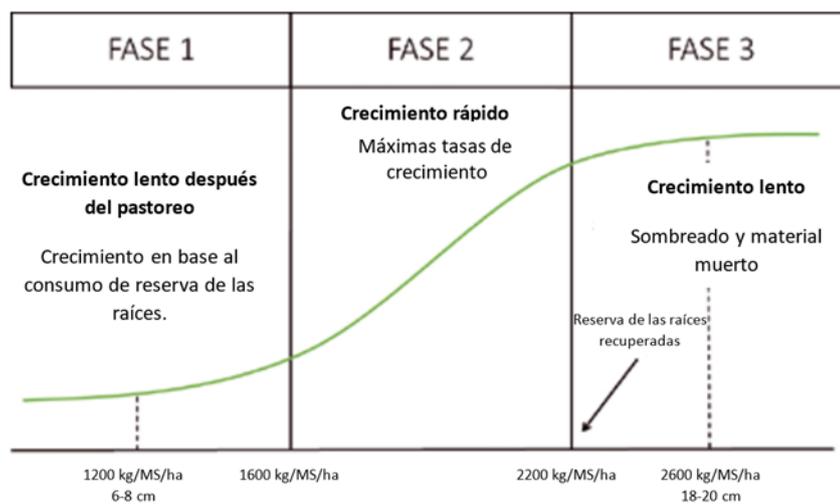
marcadamente el crecimiento. Por último en invierno en general el suelo se encuentra húmedo pero la temperatura media es muy baja y las heladas son frecuentes. En cambio las especies invernales no son frecuentes, por lo tanto la producción de forraje descende abruptamente (Olmos, 1997).

2.1.1. Gestión de la pastura

De manera general Lombardo (2022) describió el crecimiento de la pastura en tres diferentes fases (Figura 1). Fase 1 en donde se da un crecimiento lento después del pastoreo, y el rebrote se da en base al consumo de reservas de las raíces, fase 2 en donde encontramos las máximas tasas de crecimiento y fase 3 en donde el crecimiento vuelve a ser lento debido al sombreado y acumulación de material senescente.

Figura 1

Dinámica del crecimiento de pasturas sometidas a pastoreo.



Para Lombardo (2022) la pastura tiene la capacidad de crecer a altas tasas cuando está entre 7 y 20 cm aproximadamente, lo que corresponde a 1.200 y 2.600 kg de MS/ha, aproximadamente. Por lo tanto, todo el tiempo que la pastura no se encuentra dentro de este rango es pérdida de potencial de crecimiento; creciendo lento o a tasas bajas. Para lograr manejar la pastura dentro de estos parámetros es importante ajustar la demanda animal con la del crecimiento del pasto. Este ajuste se puede lograr por dos vías, ajustando la demanda (en ese caso van a variar los objetivos productivos) o ajustando la oferta de forraje (fundamentalmente

planificando cierres para reserva). Si se logra este ajuste, permitirá en principio, no anticipar ni retrasar entradas, logrando que la pastura esté el mayor tiempo posible en un adecuado potencial de crecimiento (Lombardo, 2022).

2.1.2. Festuca arundinacea

Gramínea de hábito de vida perenne, ciclo de producción invernal y con hábito de crecimiento cespitoso a rizomatoso. Se adapta a un amplio rango de suelos, aunque prospera mejor en suelos medios a pesados, tolerando suelos ácidos y alcalinos (Carámbula, 2007). Presenta crecimiento durante todo el año, no presenta latencia estival. Es una especie de buena producción otoñal, con un rebrote rápido de fines de invierno y una floración temprana (septiembre-octubre) (García, 2003). A continuación, en los cuadros 1 y 2 se pueden observar las producciones de la festuca por año, la distribución estacional de las mismas y las tasas de crecimiento.

Cuadro 1

Producción anual de Festuca (tt MS/ha)

| Edad | Producción (tt MS/ha/año) |
|--------------------------|------------------------------|
| 1 | 9.3 |
| 2 | 17.9 |
| 3 | 10.5 |
| 4 | 11.7 |
| Promedio (4 años) | 13.4 |

Nota. Adaptado de Ayala (2018).

Cuadro 2

Distribución estacional de la producción y tasas de crecimiento estacional (%)

| | Otoño | Invierno | Primavera | Verano |
|---------------------------------|-------|----------|-----------|--------|
| Distribución estacional (%) | 3 | 24 | 34 | 19 |
| Tasa de crecimiento (Kg/ha/día) | 6 | 38 | 52 | 30 |

Nota. Adaptado de Ayala (2018).

2.1.3. Presupuestación forrajera

Según Galli (2004) cuando en un establecimiento ganadero o lechero apunta hacia altas producciones por hectárea es necesario llevar adelante pastoreos que respeten la adaptación morfofisiológica de la especie para asegurar producción y persistencia, conjuntamente con niveles de fertilización correctos. Acompañado a esa sería de factores una presupuestación forrajera es clave para conjugar la adaptación morfofisiológica de la especie con los objetivos productivos de los animales. La misma permite tomar decisiones a corto plazo ejemplo para modificar la oferta forrajera a la demanda y a largo plazo para poder ajustar o simular escenarios hacia adelante y así realizar un uso eficiente del recurso forrajero (Galli, 2004). La metodología de la presupuestación forrajera consiste en realizar un balance entre la oferta y la demanda de forraje (Irigoyen, 2009). De esta manera poder ajustar medidas en base a una faltante o exceso de pasto.

2.2. Herramientas para medir la oferta de forraje

Medir la oferta de forraje es muy importante para poder realizar una correcta presupuestación forrajera en el corto plazo y así una posterior planificación del manejo general del sistema. Conocer la oferta de alimento a través de mediciones realizadas en un establecimiento es un buen aporte para una correcta gestión del sistema. Montossi et al. (2013) explican que a través del proyecto GIPROCAR II se obtuvo información a partir de encuestar más de 30 establecimientos, concluyendo que sólo el 42% de los productores conocían algún método de medición de la pastura. Cuando se les consultó por los métodos que

utilizaban, la mayoría (63%) declaró que estimaba de forma visual (Pravia et al., 2013). A partir de estos resultados se abre una gran puerta para mejorar la medición y la estimación de forraje y con ello la gestión del sistema.

Los métodos para medir la pastura se los pueden clasificar en dos: Directos e Indirectos.

2.2.1. Métodos directos

Los métodos directos implican el corte y pesado para conocer los kg de forraje que hay por unidad de área. Fernández (2004) considera que los métodos directos son los más precisos. La desventaja de estos métodos es que requieren gran cantidad de muestras, mucho tiempo de procesamiento, y es demandante en tiempo y mano de obra (Fernández, 2004). La muestra deberá ser representativa de la pastura a evaluar, está sujeta al error de muestreo el cual podemos regular a través del tamaño de las muestras y la cantidad de las mismas (Cangiano, 1996). Los métodos de muestreo pueden ser al azar (muestras aleatorias de la parcela), estratificado (división de la parcela en subparcelas) o sistémico (tomar muestras a intervalos regulares) (Cangiano, 1996; Huss et al., 1996; Moliterno, 1986). Estos métodos generalmente son utilizados para calibrar los métodos indirectos gracias a su alta precisión en la unidad de toma de medida donde casi siempre es un cuadrante de tamaño menor al metro cuadrado (Fernández, 2004).

2.2.2. Métodos indirectos

Por su parte, los métodos indirectos consisten en no cortar la pastura por lo que no se destruyen las muestras para estimar la disponibilidad de forraje (Fernández, 2004). Sin embargo, así como lo explica Cangiano (1996), estos métodos deben calibrarse antes de utilizarlos, por lo que se debe de tomar algún método de medición de alta precisión como los directos para poder correlacionar con el indirecto que se quiera calibrar. Este consiste en realizar dos muestras, una por corte que es el dato preciso de los kg de forraje “reales” que hay por hectárea y otro por el método indirecto que vayamos a calibrar. A partir de los pares de datos se realiza una regresión lineal de la cual vamos a poder después realizar muestreos indirectos y poder conocer los kg de pasto por hectárea (Cangiano, 1996).

2.2.2.1. Estimación visual

Algunos autores como Cangiano (1996) y Fernández (2004) explican que la estimación visual consiste en realizar una evaluación visual en la que se toma en cuenta varios aspectos de la pastura, que consiste en más que una simple mirada. Entre estos aspectos podemos mencionar densidad, cobertura, contenido de materia seca, relación hoja/tallo, composición botánica entre otras cosas. Es un método que se realiza rápidamente y sin instrumentos especiales. Requiere de entrenamiento y calibración con otro método, es fácil sobreestimar o subestimar tanto altura como densidad y debe de ser confrontada regularmente con mediciones (Cangiano, 1996; Fernández, 2004).

2.2.2.2. Estimación de biomasa a través de altura con regla

Según Montossi et al. (2013) este es uno de los más empleados dentro de los métodos indirectos. La altura se mide con una regla y dado que existe una relación lineal entre la altura y la disponibilidad de la pastura, se han desarrollado una serie de ecuaciones que integran estas dos variables. Dichas ecuaciones se calculan realizando una regresión lineal entre la fitomasa estimada por el método de corte del forraje y el promedio de mediciones de la altura dentro de cada rectángulo de corte (Montossi et al., 2013). Este autor también indica que es un método influenciado por la acción del operador, y en áreas de monitoreo grandes (mayor a 100 has) comienza a presentar limitaciones en su implementación.

2.2.2.3. Pasturómetros

Otra alternativa para medir la altura es a través de un pasturómetro (tal es el caso del C-Dax). El sensor C-Dax® desarrollado en Nueva Zelanda, ha sido adoptado ampliamente en ese país (Eastwood & Dela Rue, 2017). Cuenta con 18 emisores de rayos infrarrojos y sus respectivos receptores, dispuestos de forma vertical sobre el suelo y distanciados 2,5 cm. Al ser arrastrado por un vehículo registra la altura máxima interceptada por los rayos sobre un ancho de pasada de 30 cm. Realiza 200 lecturas de altura por segundo y la velocidad recomendada de uso es hasta los 20 km/h. Las ventajas de este sensor son la rapidez con que obtiene mediciones y genera el registro de altura promedio, la representatividad espacial de

las mediciones, por su alta frecuencia, y el hecho de que las estimaciones no son afectadas por el usuario ni comprende un esfuerzo físico por parte del mismo (Lyons, 2007).

El pasturómetro C-Dax puede ser utilizado para la predicción de biomasa disponible de pastura a través de mediciones de altura sobre plataformas de pastoreo con diferentes tipos de pasturas, como es el caso de tambos pastoriles de Uruguay. En las calibraciones realizadas se alcanzó un error medio absoluto de 468 kg MS/ha, similar a los estudios reportados en otros países, trabajando solo con pasturas de raigrás perenne (Waller, 2020)

2.2.2.4. Disco medidor o “Rising Plate Meter”

El Rising Plate Meter (RPM) es un instrumento que integra la altura del forraje y la densidad del mismo. Consiste en un disco rígido de 0,3 a 0,8 metros de diámetro, con un orificio central que aloja una varilla marcada en incrementos a lo largo de su longitud. Un mango fijado al centro del disco, alrededor de la varilla central, permite que el disco se deslice perpendicularmente a lo largo de la varilla de acuerdo a la altura y densidad de la pastura mientras que la varilla central permanece en contacto con la tierra (Montossi et al., 2013).

Este método también debe de ser calibrado, una vez obtenida la ecuación de regresión, la medición a campo con el RPM permite conocer una estimación del forraje disponible.

2.2.2.5. Sensores satelitales

La teledetección es una técnica eficiente para obtener información sobre objetos, áreas o fenómenos como: vegetación, zonas urbanas y rurales, tierra agrícola y recursos hídricos sin entrar en contacto físico con éstos (Karaburun, 2010). Desde que empezaron a utilizarse las herramientas de agricultura de precisión, las imágenes satelitales tomaron protagonismo para encontrarle un uso agronómico a dicha información. Al principio se usaban aquellas imágenes que no tenían un costo tan elevado (Landsat 7 o Landsat 5), la información relevada era muy útil, pero la frecuencia de pasaje y la captura de imágenes se hacía cada 8 días

y muchas veces el factor climático no permitía buenas tomas para definir manejos en los cultivos aumentando la misma (Martínez & Reyes, 2020).

Avances recientes en desarrollar nuevos sensores con resolución espacial y temporal más alta han provisto oportunidades sin precedentes para mapear biomasa en granjas lecheras. La agencia europea del espacio ha lanzado el Sentinel-2A en 2015 y el 2B en 2017, que son complementarios con Landsat. Estos satélites Sentinel operan simultáneamente y tienen sensores multispectrales a bordo ofreciendo un avance significativo: imágenes con 13 bandas espectrales a través de 290 km² en múltiples resoluciones. Proporcionan una cobertura global descargable gratuitamente, de la superficie de la tierra cada 10 días con un satélite o 5 con los dos satélites. Dada su buena combinación de resolución espacial y frecuencia temporal, se considera que las imágenes Sentinel-2A tienen un gran potencial para mejorar la evaluación y el seguimiento de la biomasa de las pasturas y se han convertido en una de las fuentes de detección remota más populares en este campo de investigación. Las altas resoluciones espacio-temporales de las imágenes Sentinel-2A son un activo importante a la hora de monitorear la biomasa de pasturas en regiones agrícolas (Chen et al., 2021).

2.2.2.6. Uso de drones

Dada la problemática de conseguir las imágenes en el momento oportuno y no depender de la frecuencia de pasajes de los satélites es que surgieron algunas empresas que comenzaron a sacar fotografías aéreas desde aviones tripulados y entregando la información ya procesada para poder realizar el análisis agronómico correspondiente. Esta actividad fue desarrollada y dio buenos resultados agronómicos, pero en algunos casos el factor costo y logística para sacar las fotografías en vuelos programados era una limitante que aún se incrementaba cuando se quería hacer un seguimiento de los cultivos haciendo varios relevamientos en su ciclo. Posteriormente surgieron las plataformas no tripuladas UAV o también equipamientos que hoy conocemos como drones (Martínez & Reyes, 2020).

Los drones o vehículos aéreos no tripulados son la combinación de los avances tecnológicos de la aeronáutica y la robótica, incorporados y acondicionados

con GPS, sensores infrarrojos, cámaras alta definición (Agudelo et al., 2015). La palabra dron significa zángano, refiriéndose a la abeja macho de una colmena, sin embargo, cabe mencionar que existen varios términos para referirse a este robot aéreo, anteriormente se le conocían como ROA que significa aeronave pilotada remotamente o en la actualidad mencionados como UAV vehículo aéreo no tripulado y UAS refiriéndose a sistema aéreo no tripulado (Díaz Cantos, 2015).

En el mercado internacional hay diversos tipos de drones para la agricultura. Los más utilizados en este campo son el multirrotor-cuadróptero (tiempo de vuelo de 30 minutos y cobertura por vuelo de 65 ha) y el de ala fija (tiempo de vuelo de 30 a 90 minutos y cobertura por vuelo de 120 a 3.800 ha) (Pino, 2019).

La teledetección, a través de UAV es una técnica emergente que puede tener múltiples aplicaciones en el sector agrícola. Específicamente, las imágenes tomadas por plataformas de teledetección de baja altitud, o pequeños sistemas aéreos no tripulados, son una alternativa potencial dado su bajo costo de operación (en comparación con otras plataformas de teledetección), por su alta resolución espacial temporal (ideal para la identificación dentro de la variación de campo), flexibilidad de despliegue, capacidad de cubrir grandes áreas y permiten utilizar sensores o dispositivos que no son efectivos en otras plataformas de teledetección (versatilidad) ya que permiten operar cerca de los cultivos. Los UAV tienen el potencial de superar aquellas limitaciones que poseen las plataformas satelitales tales como, los problemas de cobertura de nubes, permitir la adquisición de datos oportunos y flexible con una participación laboral limitada, lo que podría ayudar a adoptar métodos de estimación de biomasa más objetivos dentro del sector (Rowbottom, 2015).

Algunas de las aplicaciones de los drones fueron descritas por Edwin Pino en 2019, utilizando drones es posible realizar las siguientes acciones: (a) Conteo de plantas y supervisión de su crecimiento. Realizar esta labor con imágenes aéreas, facilita y agiliza enormemente la tarea y se logra mayor exactitud. (b) Medición de clorofila. Permite verificar el nivel nutricional de las plantas. (c) Evaluación del estrés hídrico. Usando una cámara térmica es posible detectar si existen zonas que por su situación, su composición, etc., pueden necesitar mayor o menor cantidad de

agua. (d) Detectar el estado sanitario de un cultivo. Permite verificar si la plantación ha sido afectada por alguna plaga y si es necesaria la aplicación de fertilizadores o tratamientos sanitarios total o diferenciado. (e) Fenología. Con la recopilación de datos y su estudio a lo largo del tiempo puede contribuir a mejorar la productividad de los cultivos y así establecer el potencial productivo. (f) Peritaje de cultivos ante un siniestro. Mediante el análisis de imágenes multiespectrales (Pino, 2019).

Por otro lado, los drones también presentan ciertas desventajas, entre ellas un alto costo de inversión inicial, el requerimiento de personal calificado para su uso y procesamiento de datos (Tito, 2020), otra desventaja es el gran consumo de energía que necesitan para mantener el vuelo y su autonomía que suele estar entre los 15 y los 30 minutos (Pino, 2019).

2.2.2.7. Índices espectrales para la estimación de biomasa

Las plantas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa, la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. Las células vegetales han evolucionado para dispersar la radiación solar en la región espectral del infrarrojo cercano, la cual lleva aproximadamente la mitad del total de la energía solar, debido a que el nivel de energía por fotón en ese dominio de longitud de onda mayor a los 700, no es suficiente para sintetizar las moléculas orgánicas: una fuerte absorción en este punto solo causaría un sobrecalentamiento de la planta que dañaría los tejidos (Mayorga et al., 2019).

Ali (2014) y De la Casa (2007), como se cita en Sinde et al. (2020), indicaron que, gracias al avance tecnológico, los drones pueden transportar cámaras multiespectrales con las que se pueden registrar, además de los canales del espectro visible (380 nm - 780 nm), otros canales de gran utilidad en el estudio de las cubiertas vegetales, como es el infrarrojo cercano (NIR). Esta banda NIR (780 nm – 900 nm aprox.) resulta de gran utilidad en el mapeo de terrenos agrícolas y el monitoreo del estado de la vegetación, estrés hídrico, rendimiento óptimo de cultivos, detección temprana de enfermedades y plagas, entre otros usos.

Existe una variedad de índices de vegetación, que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la misma. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de

las bandas del espectro rojo e infrarrojo. Este índice mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres (Mayorga et al., 2019).

El uso de imágenes multiespectrales en la evaluación de pasturas se ha convertido en una herramienta práctica para la gestión de los sistemas pastoriles a nivel predial, ya que estas permiten construir índices de vegetación (IV) los cuales se relacionan con diferentes características productivas y fisiológicas de las plantas (Díaz Giraldo et al., 2023). Aplicado a las comunidades de plantas, el índice determina valores de intensidad del verdor de la zona, y da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie y su estado de salud o vigor vegetativo (Mayorga et al., 2019).

Específicamente el Índice Verde conocido como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), es un parámetro que se ha relacionado con el estatus nitrogenado, contenido de clorofila, biomasa verde y rendimiento en pasturas y cultivos (Cao et al., 2016). Se calcula como la relación entre las radiaciones del Infrarrojo cercano (NIR) y del Rojo (R), normalizadas: $(NIR-R)/(NIR+R)$. Debido a su normalización, los rangos de medición del NDVI se encuentran entre -1 y 1, siendo los valores más altos (0,7-0,8) indicadores de plantas en las mejores condiciones. Los suelos descubiertos generan valores positivos bajos (0,1 a 0,2), y el agua libre valores que van desde -0,1 hasta 0,1 ó 0,2 (Marchesi & Castillo, 2016).

Estos índices presentan como limitantes que el uso de diferentes cámaras proporciona distintos valores para el mismo campo y tiempo de vuelo, lo que podría inducir a error al usuario (Pino, 2019).

Estudios recientes han intentado predecir la biomasa de forraje midiendo la relación entre imágenes multiespectrales de UAV y biomasa. Los niveles de correlación obtenidos fueron altamente variables, entre 0,01 y 0,93 (Théau et al., 2021). A pesar de que algunos de estos estudios obtuvieron buenos resultados predictivos, su aplicación en el contexto de la operación tiene ciertas limitaciones relacionadas a la complejidad del procesamiento y la integración de varias variables ambientales que pueden no estar disponibles (ej. información meteorológica, características suelo, topografía) (Théau et al., 2021).

En un estudio realizado por la Sociedad Americana de Ingeniería Agronómica y Biológica (Kim et al., 2012), se comparó la respuesta del NDVI ante diferentes condiciones tanto de planta como atmosféricas. Dentro de los resultados a destacar, se evidenció que no hubo diferencias significativas en los valores de NDVI frente a cambios en el ángulo cenital solar, comparando entre 0° a 60°, tomando en cuenta únicamente el factor ángulo solar. Sin embargo, tomando en cuenta la intensidad de la radiación solar que llega al cultivo, se evidenció que la respuesta del NDVI a la misma estaba inversamente correlacionada. Cuando la intensidad de la luz solar es máxima (al medio día), aumenta la energía reflejada tanto en la longitud de onda NIR como en R, disminuyendo así el valor de NDVI (Kim et al., 2012), lo cual fue también observado por Suárez et al. (2008).

Por último, pero no menos importante, la respuesta del NDVI frente a la humedad de la superficie de las hojas fue directamente proporcional, observándose incrementos de 41% en mediciones realizadas inmediatamente después de una lluvia (Kim et al., 2012)

2.3. Antecedentes del uso de drones y satélites para estimar biomasa

2.3.1. A nivel internacional

Se han realizado numerosos trabajos con el uso de drones y satélites con el objetivo de estimar biomasa, esta práctica ha ido en aumento a lo largo de los años. A continuación, se presentan algunos de los estudios realizados.

En los años 2018 y 2019 en la región semiárida del sudoeste bonaerense (Argentina) sobre pasturas de agropiro, pasto llorón y mijo perenne, recursos forrajeros de valor en la región. Se generaron curvas de NVDI mensual de las tres pasturas y se observaron dos picos marcados en ambos años, uno menor en otoño y otro mayor en primavera, similar al comportamiento de la curva de precipitaciones históricas. En otoño, los índices más elevados, se presentaron en mayo, para ambos años, oscilando entre 0,38 a 0,48 y de 0,38 para 2018 y 2019 respectivamente. A su vez también se estimó la relación NVDI y producción de forraje (kg MS ha⁻¹) para cada pastura. El agropiro presentó un rendimiento de 373 Kg ha⁻¹ y un NVDI 0,328, el Mijo perenne de 716 Kg ha⁻¹ y NVDI 0,370 y el Pasto llorón un

rendimiento de 1597 Kg ha⁻¹ y un NVDI de 0,285. De lo anterior se expresó que el índice verde no tendría una relación directa con el volumen total, debido al estado fenológico de las especies al momento de la toma de datos (corte primaveral, especies en estado reproductivo). Analizando los datos se evidencia que para agropiro, el volumen fue escaso y estaría más relacionado a la falta de precipitaciones teniendo en cuenta que es una especie templada C3. Los autores concluyeron que los valores de NDVI reflejaron la curva de crecimiento observada empíricamente de las pasturas perennes en la zona, aunque no lograron diferenciar el comportamiento fenológico habitual de cada una de las tres pasturas, teniendo en cuenta que tienen crecimientos cronológicos diferentes ya que son C3 y C4. También que la curva de NVDI acompaña las oscilaciones de los registros de precipitaciones, tanto para un año normal y uno seco. El valor NVDI no resultó un buen indicador para representar el volumen de la producción de materia seca evaluada in situ. Y que el NVDI representa una herramienta complementaria de interés a la hora del trabajo empírico de campo, pero no resultó suficientemente representativa como herramienta única en este trabajo (Lauric et al., 2020).

Por otro lado, Insua et al. (2019) realizaron vuelos con un Microdrone md4-1000 equipado con cámaras multiespectrales (Micasence), sobre dos tipos de pasturas consociadas, de base raigrás y base festuca. Los valores de NDVI fueron convertidos a kg MS/ha de pastura disponible a partir del algoritmo desarrollado durante la calibración con corte directo de parcelas geo-referenciadas. El NDVI estuvo muy relacionado a la biomasa de la pastura ($R^2 = 0.8$, $n = 72$). Durante el mes de monitoreo, el uso del NDVI medido con el dron no solo arrojó 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), sino que -adicionalmente- permitió registrar con muy alta resolución (6 cm), la variabilidad espacial dentro de cada potrero. Las diferencias promedio entre las estimaciones con el dron y los dos métodos convencionales fueron menores a 310 kg MS/ha. Este trabajo concluye que los drones presentan un gran potencial para el monitoreo de pasturas en sistemas rotativos bien manejados. En comparación con métodos convencionales, esta tecnología permitió mayor número de observaciones y -consecuentemente- una mejor estimación de la disponibilidad y cobertura de la pastura a nivel de potrero. Un aspecto muy importante con el uso de drones en

pasturas es que no se esperan variaciones entre operarios, debido al automatismo al momento de volar y tomar la información. La variación espacial es la información adicional que ofrece esta nueva tecnología, que sumado a la gran resolución utilizada, lograría contar con mayor grado de información al momento de tomar una decisión. Así mismo, las variaciones espaciales de las pasturas dentro de cada potrero pueden ofrecer información muy útil acerca del comportamiento de pastoreo de los animales y de su impacto en la vegetación. Es importante tener en cuenta que, como sucede con el C-Dax o el uso de regla, el NDVI no se correlaciona tan bien con altas acumulaciones de biomasa. Debido a esto, no recomiendan el uso de esta tecnología para manejos de pastoreos con estadios fenológicos avanzados, con más de ~3500 kg MS/ha (Insua & Utsumi, 2017).

2.3.2. A nivel nacional

A nivel nacional son escasos los trabajos realizados con el uso de drones para estimar biomasa. En 2018, Rodríguez Bianco y Triñanes Morixe propusieron una primera aproximación a la estimación de altura de las pasturas a partir de un UAV, integrando dos áreas de conocimiento, ingeniería en computación y agronomía. El objetivo principal fue determinar el potencial de los modelos digitales de vegetación obtenidos a partir de imágenes capturadas por un UAV, como medio para estimar la altura de las pasturas con precisión. Las evaluaciones se llevaron a cabo en La Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, Uruguay.

El ajuste metodológico, consistió en evaluar dos metodologías propuestas para estimar la altura de la pastura, denominadas Estacas y Mapping 3d; así como también evaluar la performance del UAV, permitiendo realizar una primera aproximación a la generación de los modelos digitales, el procesamiento y análisis de datos. El Mapping 3d a partir de cámara RGB R^2 de 0,56, resultó ser la metodología con la cual se obtuvieron mejores resultados, por eso se decidió profundizar en dicha técnica en la etapa denominada experimento central. A nivel general el mapping 3d sobreestimó la altura de forraje en 0,5 cm en relación a la altura real con un desvío de 13 % al considerar todas las variables involucradas. El error de posicionamiento de captura de imagen es la variable explicativa de mayor

importancia para obtención de buenos resultados. La velocidad del viento es la variable que más afecta al resultado, y al permitir mayor error en el posicionamiento surgen otras variables, (radiación, versión de los modelos y tratamientos) (Rodríguez Bianco & Triñanes Morixe, 2018).

Por otro lado, en 2023, Ribarola Márquez y Villanueva realizaron un trabajo cuyo objetivo fue evaluar la medición de altura y estimación de biomasa de pasturas sembradas mediante el análisis de imágenes tomadas por drones. Las evaluaciones se realizaron sobre una pastura de festuca de segundo año que se encontraba en el Centro Regional Sur (CRS) perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, Uruguay. Se realizó un análisis de imágenes obtenidas por los drones, se utilizó el dron DJI Mavic 2 Pro, el cual cuenta con una cámara UHD (ultra HD 5472 x 3648) con cámara RGB. Y se realizaron vuelos a 60 y 100 metros de altura para la creación de ortomosaicos. La metodología se basó en tomar alturas de biomasa con regla y RPM en pocos puntos georeferenciados a campo y aplicar una clasificación supervisada (CS) sobre el ortomosaico generado. En cuanto a la relación existente entre la biomasa (kgMS/ha) obtenida 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. Este trabajo también permitió poner en consideración una serie de ventajas y desventajas que implican la utilización de los drones en la actualidad, a partir de lo observado en el desarrollo de la actividad (Ribarola Márquez & Villanueva, 2023).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

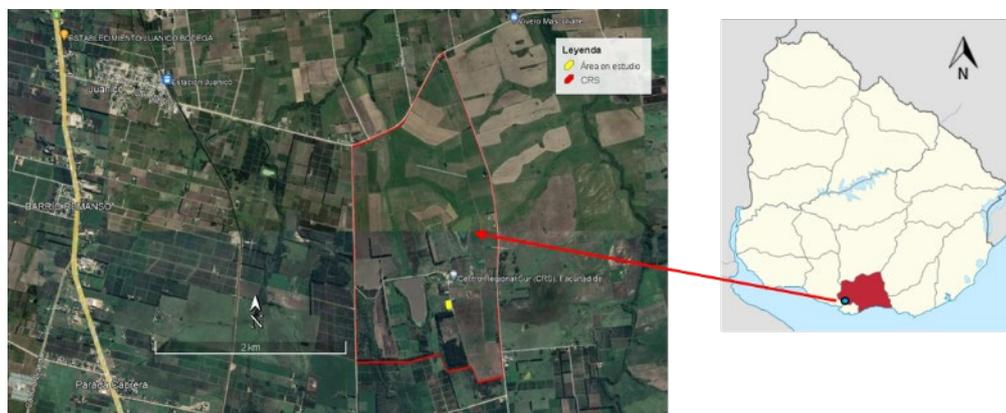
3.1. Condiciones experimentales

3.1.1. Lugar y fecha del experimento

El experimento fue llevado a cabo en el Centro Regional Sur (CRS), Facultad de Agronomía, UdelaR, ubicado en Progreso, Canelones, Uruguay (latitud 34°36 '57.33 "S longitud 56°13' 3.50"O). El periodo del experimento comprendió del 10 de abril al 20 de junio del año 2023.

Figura 2

Ubicación del CRS, donde fue llevado a cabo el experimento



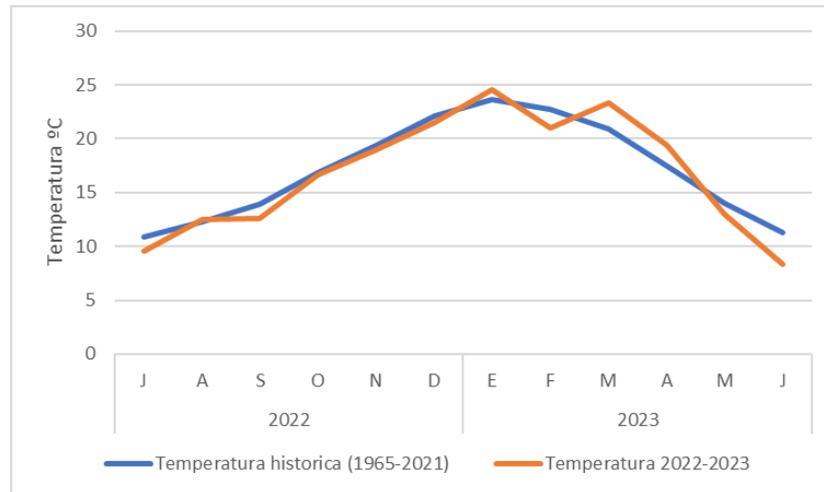
Nota. Tomado de Google (2023). SRC EPSG:32721 - WGS 84 / UTM zone 21S - Proyectado.

3.1.2. Registros meteorológicos previos y durante el periodo de estudio

Como se puede observar en la Figura 3, las temperaturas del 2022-2023 no presentaron mayores diferencias con las históricas.

Figura 3

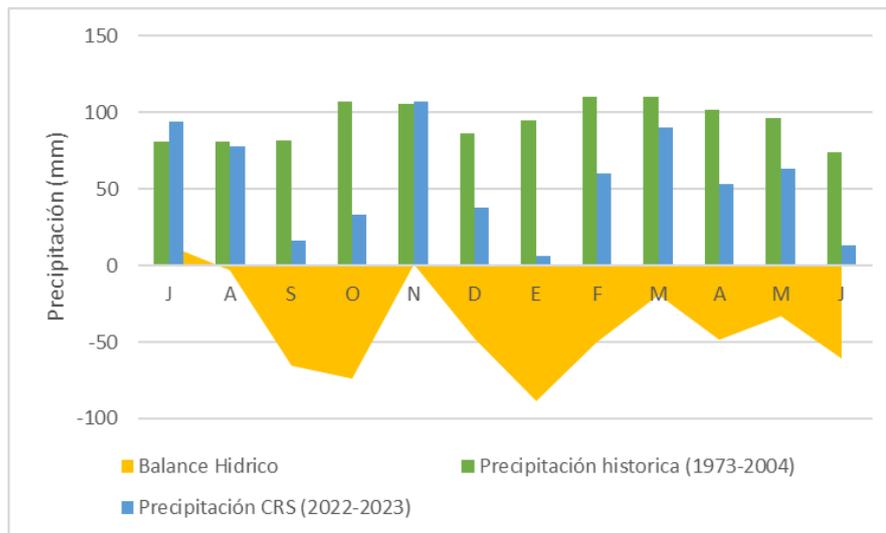
Registro histórico de temperaturas y registro para el ejercicio 2022-2023 (INIA Las Brujas)



En cuanto a las precipitaciones estas estuvieron por debajo del promedio histórico (Figura 3), considerando los meses previos al estudio desde septiembre 2022 a marzo del 2023 en todos los meses a excepción de noviembre las precipitaciones se presentaron por debajo del promedio histórico. Y en los meses de estudio (abril, mayo, junio) las precipitaciones también se encontraron por debajo de lo esperado, totalizando un total de 130 mm acumulados para los tres meses. Considerando todo el periodo julio 2022-junio 2023, llovió solo 653 mm el 58% de los 1130 mm esperados.

Figura 4

Registro histórico de precipitaciones (INIA Las Brujas) y registro para el ejercicio 2022-2023 (CRS)



Dado que el Centro Regional Sur sólo toma datos de precipitación, otros datos como la precipitación histórica, temperatura histórica y temperatura de los años 2022 y 2023 se tomaron de la estación meteorológica de INIA Las Brujas, localidad más cercana al CRS.

3.1.3. Materiales

Para poder llevar adelante el experimento, fue necesario contar con los siguientes implementos: dron, RTK, tablet, regla, rectángulos de madera (50 x 30 cm), tijera de esquilador, bolsas nylon, bandejas aluminio, balanza, estufa para el secado de las muestras y computadora.

3.1.4. Drone

El dron utilizado fue el DJI Phantom 4 multispectral (Figura 5), el cual cuenta con una cámara con 6 lentes diferentes, compuestos por luz visible (RGB), rojo (R), rojo lejano (RE), infrarrojo cercano (NIR), verde (G) y azul (B). Esta cámara multispectral permite posteriormente la generación del NDVI a partir de las imágenes R y NIR.

Figura 5

Imagen del drone DJI Phantom 4 multiespectral utilizado



3.1.5. RTK

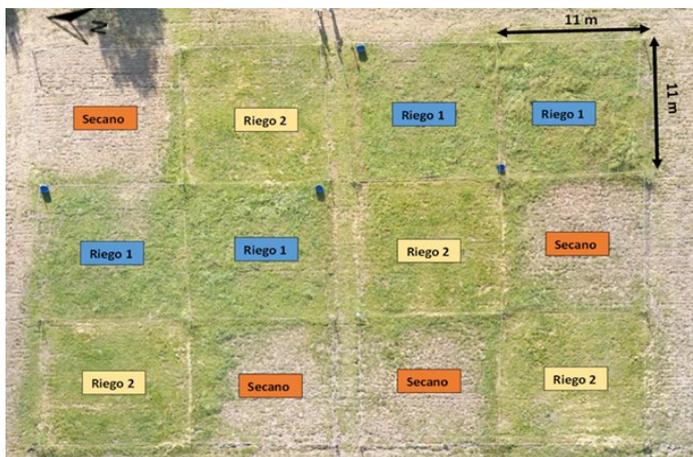
Se utilizó la estación móvil GNSS de alta precisión D-RTK 2, esta es un receptor de alta precisión capaz de recibir señal de cuatro sistemas de navegación por satélite globales diferentes: GPS, BeiDou, GLONASS y Galileo. La estación móvil D-RTK 2 se puede utilizar como una estación base móvil RTK para lograr la precisión de posicionamiento centimétrico de una aeronave equipada con un sistema de posicionamiento DJI RTK, en este caso el DJI Phantom 4 multiespectral mencionado anteriormente. Este fue utilizado con el objetivo de aumentar la precisión para así poder identificar diferencias de altura y crecimiento entre las distintas medidas.

3.1.6. Pastura

Se trabajó sobre un experimento existente de festuca con riego. Como se puede ver en la Figura 6, el experimento consistía en diferentes tratamientos (secano y dos formas de riego diferentes). En total el experimento contaba con 12 parcelas de 121 m² cada una, siendo 4 de secano y 8 con riego. Se utilizó al principio de las determinaciones la totalidad de las parcelas pero dado que en las de secano la pastura se encontraba senescente debido al déficit hídrico, se continuó tomando las medidas en las 8 parcelas que fueron regadas, de manera de poder obtener datos de mayor relevancia.

Figura 6

Imagen aérea tomada con el drone del experimento y distribución de sus tratamientos



Las parcelas fueron sembradas el 2/8/2020, por lo que se trabajó sobre una pradera de tres años de vida. La misma fue sembrada con una densidad de 20 kg/ha de festuca Aurora y se realizó una fertilización inicial de 150 kg/ha de fosfato diamónico (18-46-0). Posteriormente estas parcelas se pastorearon al estado de 2,5 hojas, post pastoreo se realizaron dos acciones, un emparejamiento con rotativa (remanente 5 cm) y finalmente fertilizaciones de 70 kg/ha de urea. A su vez en los otoños se realizó un análisis de suelo y re-fertilización de fósforo hasta el nivel crítico.

3.2. Metodología experimental

La calibración del drone consistió en un sistema de doble muestreo, éste fue desarrollado por Haydock y Shaw (1975), que es comúnmente utilizado por los investigadores para aumentar la precisión de las estimaciones y reducir al mínimo la cantidad de trabajo (Sanderson et al., 2001). Este método requiere de un muestreo destructivo en primera instancia para desarrollar una relación predictiva con algún método indirecto. Una vez que se ha establecido una ecuación de asociación entre la disponibilidad de materia seca de determinada pastura y su medida indirecta, prácticamente no es necesario realizar el muestreo por corte, únicamente en el caso de validaciones o re-calibraciones del método que se está utilizando (Ganguli et al., 2000).

Para calibrar el dron se realizaron vuelos semanales y posteriormente a cada vuelo el corte de las muestras dentro de los rectángulos de madera utilizados. Estos rectángulos como se ve en la Figura 7, tienen su borde cubierto de cinta roja, para facilitar la posterior identificación en las imágenes tomadas por el dron, y así referenciar correctamente el valor de ndvi con el peso obtenido de la muestra.

Figura 7

Rectángulo utilizado para la identificación de los distintos puntos de muestreo



El procedimiento realizado en cada medición fue el siguiente: dados los momentos de corte de las parcelas (estado fenológico 2.5 hojas), al momento de realizar la medición se conocía los días de crecimiento que presentaba la pastura. Los diferentes tratamientos de riego presentaban distintos días de crecimiento por lo que se procedía a elegir en donde medir de manera de ir obteniendo datos con la mayor variabilidad posible. Luego de esto definidas las parcelas (las 4 del mismo tratamiento y por lo tanto días de crecimiento) en donde se realizaban las mediciones de esa semana se procedió a colocar de manera aleatoria los rectángulos de madera, colocando 3 por parcela, como se puede observar en la Figura 8. Debido a que solo se contó con 6 rectángulos las mediciones se realizaron en dos etapas distintas repitiendo el procedimiento. De esta manera se recabaron datos con distinto tiempo de acumulación de biomasa, desde el inicio de crecimiento post corte hasta aproximadamente los 45 días posteriores.

Figura 8

Imagen aérea del experimento en donde se pueden observar los rectángulos



Luego de colocados de manera al azar los 6 rectángulos, se procede a encender el dron, conectarlo al RTK y realizar el vuelo. A continuación de terminado el vuelo se realizó la medida con regla, tomando 7 medidas por rectángulo al contacto de la vegetación, y finalmente el corte de las 6 muestras. Estas fueron pesadas y colocadas en la estufa por un lapso de 48 horas. De esta manera se obtuvo el peso seco y se determinó el contenido materia seca de cada muestra, para luego a través del área del rectángulo realizar la estimación de la biomasa disponible dentro del cuadrante en Kg MS/ha.

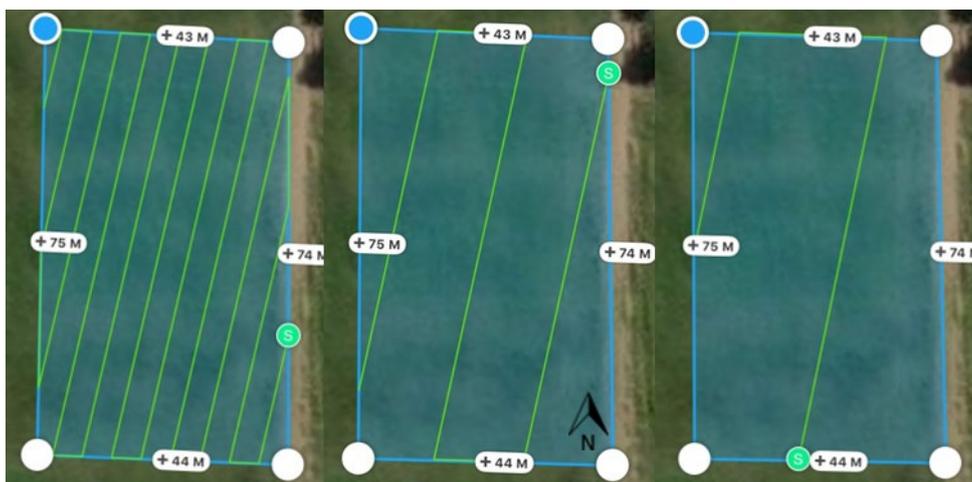
3.2.1. Planificación de vuelo del dron

Se realizó una medida semanal, en dos vuelos distintos efectuados de manera continua ya que solo se contaba con 6 rectángulos y según lo determinado se debía obtener 12 datos por semana. El vuelo fue programado a través de la aplicación DJI GS PRO, las imágenes se tomaron con un ángulo de 90° y con 70 % de solapamiento frontal y 70 % de solapamiento lateral, de manera de que se logre generar un mosaico continuo (ortomosaico). Las imágenes se tomaban tanto en luz visible (rgb) como en rojo (R) en infrarrojo cercano (NIR). A continuación en la Figura 9 se puede observar las distintas rutas de vuelo para las diferentes alturas, siendo la superficie de estudio de 0,3 hectáreas al volar a 20 metros de altura se toman 171 imágenes para poder cubrir el área, a 60 metros 22 imágenes y a 100 metros con 8 imágenes basta para cubrir el área. Se decidió trabajar con una altura de 60 metros ya que como se mencionó anteriormente vuelos más bajos sacan una

mayor cantidad de fotos por lo que se vuelven archivos más pesados y el procesamiento de los datos se hace lento, a su vez a 60 metros de altura nos permite una definición con píxeles de 9,6 cm², aspecto que en vuelos de mayor altura se va perdiendo.

Figura 9

Trayectoria del vuelo del dron a diferentes alturas (20, 60 y 100 metros) para el área de muestreo



Posteriormente al vuelo las imágenes fueron procesadas en el programa Agisoft MetaShape Professional (Agisoft LLC, 2023), de manera de obtener los ortomosaicos. Dicho procesamiento incluyó orientar las fotos, crear una nube de puntos densa, una malla, crear un modelo con textura, crear un modelo de teselas a partir de la nube de puntos, y el modelo de elevación digital. Finalmente este ortomosaico fue procesado mediante la calculadora raster, en donde se utilizó la función $NDVI = (NIR-R) / (NIR+R)$ para sí obtener un valor del índice para cada píxel del ortomosaico. Para finalizar se halló el NDVI promedio dentro de cada rectángulo de 0.51X0.31 m, de esta manera, cada semana se obtuvieron 12 valores, con su correspondiente valor de NDVI, Kg/(MS/ha), altura y tasa de crecimiento. Este procedimiento fue realizado semanalmente a lo largo del periodo de estudio.

3.2.2. Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se realizaron modelos de regresión polinómicos $y = ax^2+bx+c$ (“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) y modelos de regresión lineal simple $y = ax + b$ (donde “a” indica la pendiente y “b” determina la ordenada en el origen). En cuanto a los modelos polinómicos se relacionó el NDVI tanto con el valor de biomasa, como con los días de crecimiento, la altura y finalmente con la tasa de crecimiento. Por otro lado se realizó una asociación entre la biomasa y la altura (cm) y la misma se analizó a través de un modelo lineal simple.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

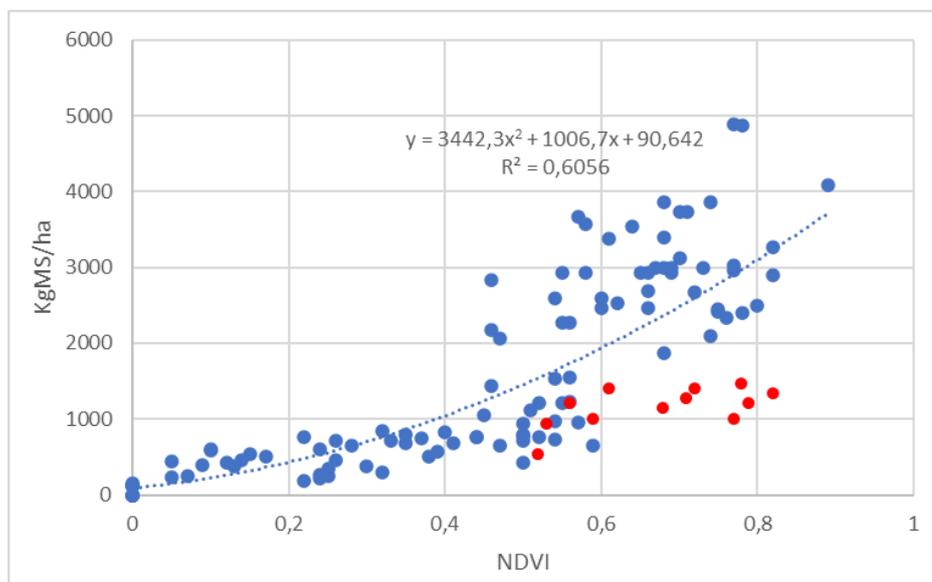
En cuanto al NDVI los valores hallados se encontraron comprendidos en el rango de -0,29 a +0,69. Teniendo en cuenta la bibliografía revisada y lo observado en el campo se decidió incorporar un factor de corrección de +0,2 a los valores de NDVI, y aquellos que aún agregando el factor de corrección continuaban siendo negativos se les decidió establecer el valor de NDVI de cero, esto debido a que corresponden a suelo desnudo y como se da a conocer por Marchesi y Castillo (2016) el suelo desnudo corresponde a un valor de índice verde muy cercano al cero. A su vez con esta corrección los valores superiores se encuentran en el entorno de NDVI de 0,8, concordando con lo descrito por los autores ya mencionados, ya que esos datos fueron tomados en momentos en donde la pastura presentaba alto vigor, altura y verdor.

4.1. Relación biomasa (KgMS/ha) y NDVI

En la Figura 10 se presentan la totalidad de los datos, cuya relación entre la biomasa disponible (KgMS/ha) y el NDVI es explicada por una regresión polinómica de grado 2 de $R^2=0,6056$.

Figura 10

Relación biomasa (KgMS/ha) y NDVI, con datos certeros en azul y anómalos marcados en rojo



Como se puede observar en la Figura 10, se identificaron 12 datos anómalos (color rojo), estos se caracterizan por un alto valor de NDVI y bajos valores de KgMS/ha. Dichos datos fueron tomados el mismo día y en diferentes condiciones atmosféricas al resto, inmediatamente posterior a una precipitación, por lo que la pastura aún se encontraba mojada, es por esto que se decidió eliminarlos para incorporar al análisis datos extraídos en las mismas condiciones. Como expresaron Mayorga et al. (2019), el NDVI está directamente relacionado a la radiación y el tipo de longitudes de onda que son absorbidas y reflejadas por las pasturas, por lo tanto la llovizna hace que refleje más la luz sobre las hojas generando que se sobreestime los valores de NDVI obtenidos. Esta situación fue descrita por Kim et al. (2012), en donde establecieron que la respuesta del NDVI fue altamente proporcional a la humedad de la superficie y se ilustró con un aumento instantáneo (hasta un 41%) en la respuesta del NDVI debido a la lluvia durante el experimento. Este resultado hace suponer que en nuestras condiciones existió una respuesta del NDVI a superficies húmedas.

Al observar la Figura 10 se puede identificar en los datos que a bajos valores de disponibilidad hay una posible correlación lineal, por tal motivo se decidió analizar la relación biomasa y NDVI, por un lado tomando los datos inferiores a 1600 KgMS/ha (62 datos), y por otro lado los superiores a ese valor (45 datos).

En cuanto a los datos cuya disponibilidad por hectárea fue inferior a 1600 Kg MS/ha su relación con el NDVI es explicada por una regresión polinómica de segundo grado de $R^2=0,66$ (Anexo A), por lo que podemos decir que existe una buena correlación entre el NDVI y los KgMS/ha. Estos datos que presentan un promedio de 23 días de crecimiento, cabe la particularidad que corresponden a momentos iniciales del rebrote post pasada de la rotativa.

Por otro lado en relación a los datos cuya disponibilidad fue superior a 1600 Kg MS/ha su relación con el NDVI es explicada por una regresión polinómica de segundo grado de $R^2=0,11$ (Anexo B). Estos datos tienen un promedio de 33 días de crecimiento, como estableció Asuaga (2020) la festuca puede sostener en promedio 2,5 hojas vivas por macollo, luego de alcanzar ese número de hojas la hoja más vieja comienza a senescer. Teniendo en cuenta el filocrono de la festuca

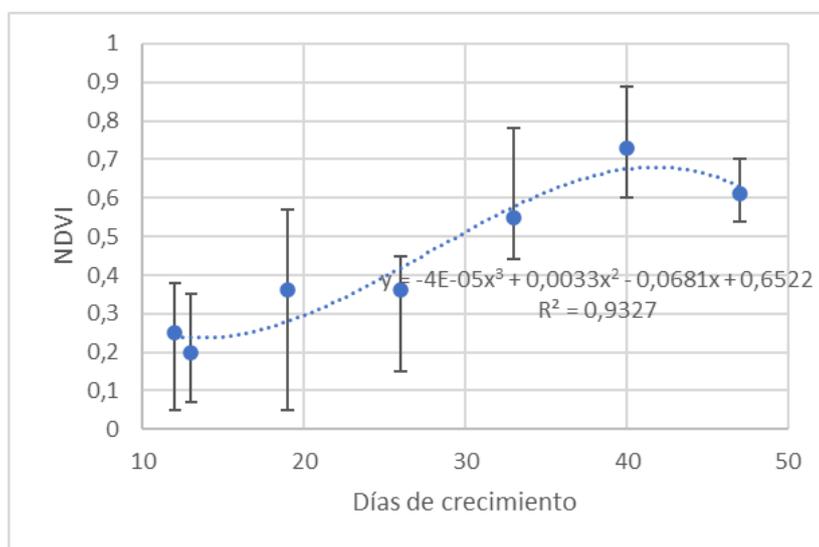
(180-200 grados/día según lo establecido por Berone et al. (2021) y la temperatura promedio durante la realización del experimento (14-15°C) podemos afirmar que a los 33 días de crecimiento la festuca ya se encontraba cerca de alcanzar el estado de 2,5 hojas.

En estos datos el nivel de correlación disminuye en gran medida con respecto a los de menos de 1600 kgMS/ha. Esto puede ser explicado por diferentes factores, entre ellos lo mencionado anteriormente, es decir que la festuca ya alcanzó su máximo número de hojas y está comenzando a senescer. A su vez como expresaron Lauric et al. (2020) el NDVI no tendría una relación directa con el volumen total, debido al estado fenológico de las especies al momento de la toma de datos, si se da el pasaje a la etapa reproductiva, reflejaría un menor valor de NDVI aunque sería mayor el volumen de MS que acumuló. O también en caso de darse el vuelco de la pastura (Anexo C) se estaría subestimando la disponibilidad (KgMS/ha) en relación a los Kg reales, ya que se sigue acumulando materia seca pero el NDVI no acompaña ese aumento.

Esto mencionado anteriormente también puede observarse en la Figura 11, en donde se observa un descenso en el valor de NDVI en los datos con mayor tiempo de rebrote (47 días), pudiendo deberse al vuelco o la senescencia de la pastura.

Figura 11

Relación días de crecimiento y NDVI promedio

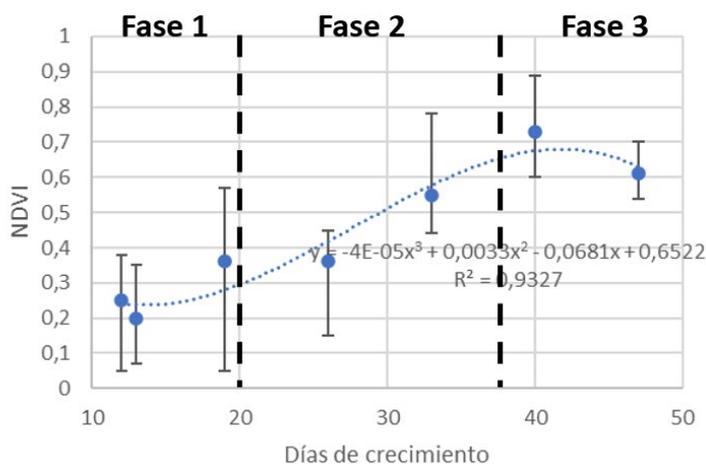


En esta figura se puede observar la relación entre los días de crecimiento y el valor promedio de NDVI con sus correspondientes barras de error. Esta es explicada por una regresión polinómica de grado 2 de $R^2=0,93$. La gráfica comienza con aumentos lentos, posteriormente se da una mayor tasa de aumento del NDVI y finalmente esta llega a un máximo y decrece levemente. Esta curva se asemeja en gran medida a la curva de crecimiento de una pastura, la misma fue descrita por Lombardo (2022) (Figura 1). Sin embargo, cabe resaltar que para cada punto de NDVI del gráfico, se observa una gran dispersión, en los valores de NDVI. Este punto es de suma relevancia dado que al tratarse de un cuadrante de 0.51X0.32m presenta una variabilidad importante independiente de los días de rebrote, lo cual refuerza la idea de calidad de información que brinda la herramienta.

Como explicó Lombardo (2022) el crecimiento de la pastura presenta 3 fases y relacionándolo con esta gráfica podemos detallarlas de la siguiente manera:

Figura 12

Relación días de crecimiento, NDVI promedio y fases de crecimiento de la pastura



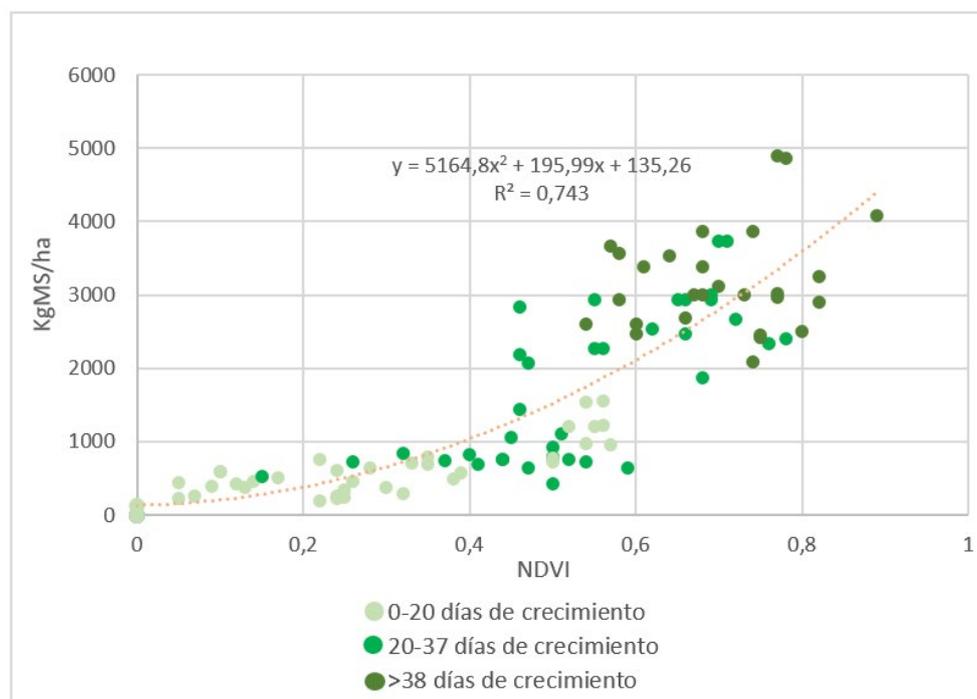
Es decir, fase 1 (día 0-20) en la cual hay un lento crecimiento post pastoreo, en donde se da el consumo de reserva de las raíces para el rebrote, una fase 2 (día 21-37) donde se da las máximas tasas de crecimiento y finalmente fase 3 (día 38 en adelante) donde se da un lento crecimiento por sombreado y acumulación de material muerto. Esto descrito anteriormente (Figura 12) puede ser de ayuda al momento de tomar decisiones respecto al pastoreo, como describió Lombardo

(2022) se debe lograr que la pastura esté el mayor tiempo posible en un adecuado potencial de crecimiento, es decir en la fase 2, donde las tasas de crecimiento son máximas. Así como en la fase 2 encontramos la pastura entre 7 y 20 cm aproximadamente, lo que corresponde a 1.200 y 2.600 kg MS/ha, también podemos relacionarlo con el NDVI. Y mediante el monitoreo del mismo generar una nueva herramienta que ayude a establecer momentos óptimos para definir el pastoreo. Ingresando a la pastura cuando la misma alcanza un NDVI aproximado de 0,65 y saliendo de la misma cuando debido a los efectos del pastoreo el NDVI baja hasta aproximadamente 0,3.

En el siguiente gráfico (Figura 13) se realizó una clasificación de los puntos según los días de crecimiento. Realizamos 3 clasificaciones, una de los primeros 20 días, otra entre el día 20 y el 37 que sería el momento en el que se alcanzan las máximas tasas de crecimiento y por último una con los datos con más de 38 días de crecimiento que es cuando el NDVI se comienza a saturar y tendremos aumentos de la biomasa pero no necesariamente del NDVI.

Figura 13

Relación KgMS/ha, NDVI y días de crecimiento



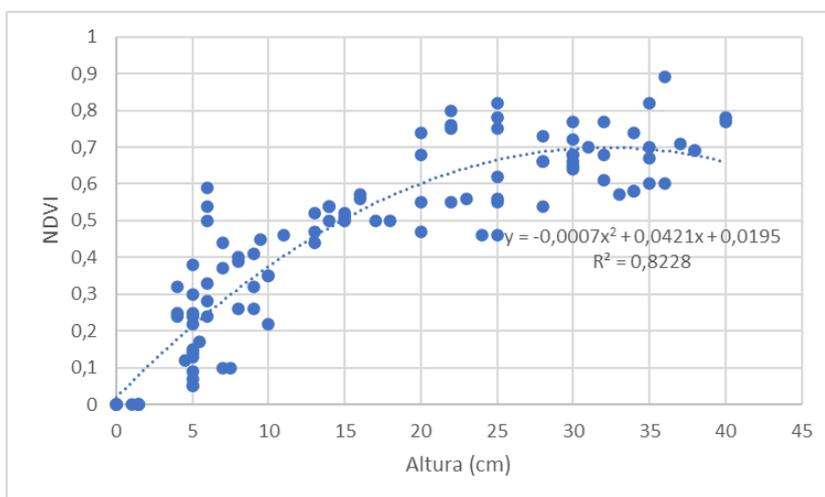
En cuanto al conjunto de los datos luego de eliminados los anómalos su relación con el NDVI es explicada por una regresión polinómica de grado 2 de $R^2=0,74$. En relación a lo descrito en la Figura 12 se debe mantener la pastura entre un NDVI de aproximadamente 0,3-0,65, lo cual interpolando en esta figura corresponde a 660 y 2445 KgMS/ha respectivamente. Esto se asemeja a lo establecido por Lombardo (2022) en donde para mantener la pastura en la fase 2 de crecimiento, recomienda entradas a pastoreo de 2600 KgMS/ha y salidas de 1200 KgMS/ha. De esta manera mediante el monitoreo del NDVI y manteniendo la pastura con valores de NDVI de entre 0,3 y 0,65 estaríamos situados en la fase 2 de crecimiento y así maximizando la producción de forraje. Al observar el gráfico se confirma lo mencionado anteriormente, la mayoría de los puntos comprendidos entre los valores de NDVI de 0,3-0,65 pertenecen a datos recabados entre 20 y 37 días de crecimiento, es decir correspondientes a la fase 2 de crecimiento de la pastura, como se determinó en la Figura 12.

4.2. Altura en cm y su relación con el NDVI

En referencia a la relación entre el NDVI y la altura de la pastura, por un lado si tomamos la altura como la variable independiente y el NDVI como la dependiente podemos obtener la siguiente figura:

Figura 14

Relación entre altura y NDVI

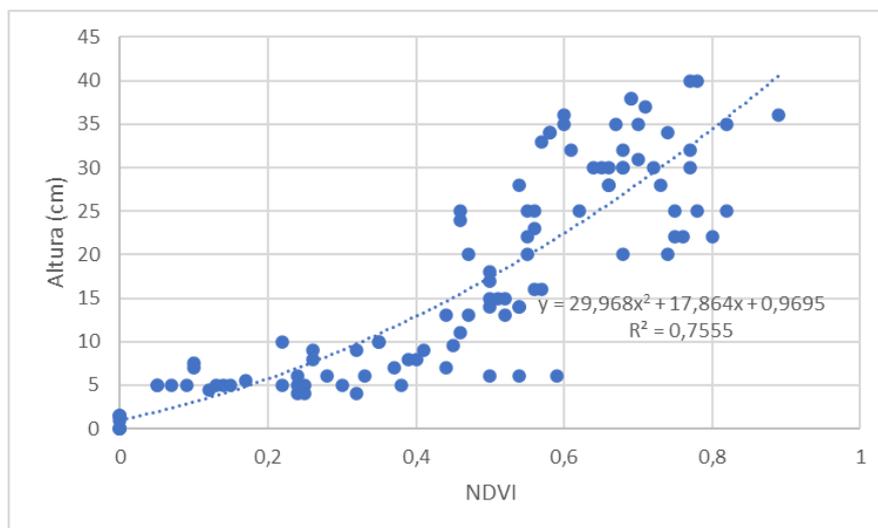


En cuanto a la relación entre la altura y el NDVI (Figura 14), esta es explicada por una regresión polinómica de segundo grado de $R^2=0,82$. Al tomar la altura como la variable independiente la figura nos permite obtener conclusiones e información principalmente que podemos relacionar con la biología de la planta. Se puede observar que existe una saturación del NDVI a partir de los 20 cm de altura del pasto, esto se debe a que aproximadamente a esta altura se alcanzó el máximo crecimiento de la pastura y comienza el proceso de senescencia de las hojas más viejas. Esto apoya el bajo R^2 que presentó la relación KgMS/ha y NDVI de datos con más de 1600 KgMS/ha, que puede ser explicada por esta saturación del NDVI luego de los 20 cm de altura.

Por otro lado, al tomar el NDVI como la variable independiente obtenemos la siguiente figura.

Figura 15

Relación NDVI y altura



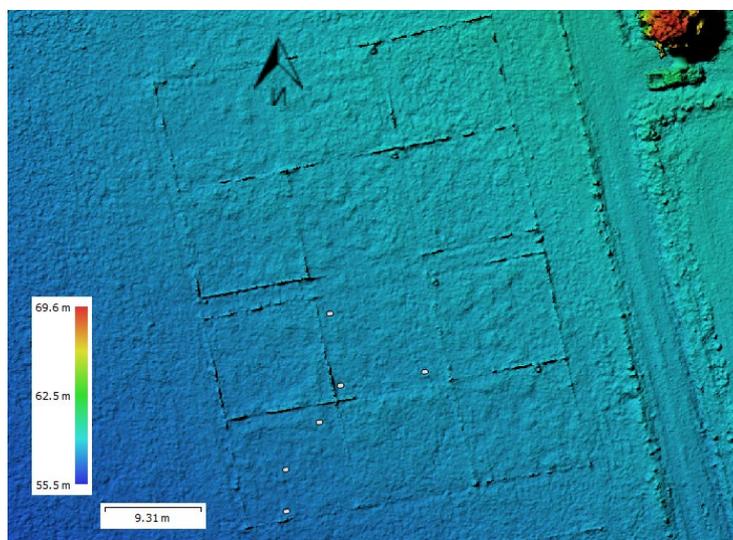
En cuanto a la relación entre el NDVI y la altura (Figura 15), esta es explicada por una regresión polinómica de segundo grado de $R^2=0,76$ de características similares a la relación entre el NDVI y la biomasa en la figura N°13. Este modelo nos permite predecir la altura de la pastura a partir de la obtención del NDVI. En relación a lo mencionado anteriormente si tomamos los valores de referencia de NDVI mínimo y máximo de 0,3 y 0,65 (correspondientes a la fase 2 de crecimiento de la pastura), interpolado en esta gráfica corresponde a alturas de 9

y 25,2 cm. Esto al igual que con los KgMs/ha se asemeja a las alturas establecidas por Lombardo (2022) para mantener la pastura en fase 2 y así lograr las máximas tasas de crecimiento. De esta manera conociendo el valor del NDVI podemos predecir la altura de la pastura y generar una nueva herramienta que nos ayude a realizar un correcto manejo del pastoreo. Esto presenta como limitante que en los cuadrantes no se midieron NDVI superiores a 0,8, por lo que predecir alturas a partir de este modelo con valores de NDVI superiores a estos, podrían llevar a resultados erróneos.

Otra forma de determinar altura de la pastura es mediante la generación de un DEM (en español modelo de elevación digital, Figura 16).

Figura 16

Representación ráster de la superficie fotografiada



Nota. Tomado de Agisoft LLC (2023).

En este modelo cada píxel cuenta con su valor correspondiente de altura sobre el nivel del mar. Este dato por sí solo no brinda ninguna información sobre la pastura, y puede ser útil si se realiza una comparación con otro vuelo, donde se identifica la diferencia de altura entre los vuelos y es posible ver la variación de la altura de la pastura. Esto presenta una complejidad al momento de aplicarlo a campo ya que se requiere más de un vuelo para poder obtener datos y es necesario un sistema de posicionamiento GNSS para tener coordenadas de posicionamiento precisas. Lo que ocurrió en nuestra evaluación es que los resultados los mismos no

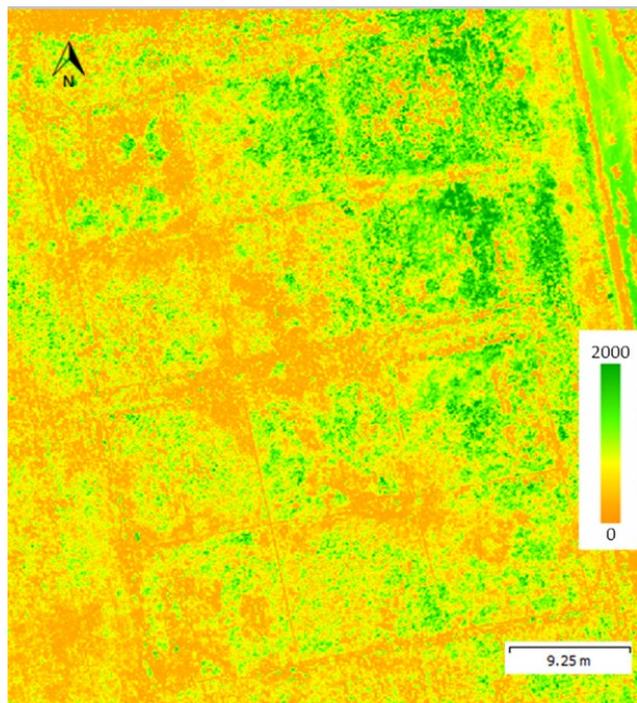
fueron congruentes, ya que se obtuvieron grandes diferencias de altura entre vuelos, que no son explicadas por el crecimiento de la pastura, sino a un error en la toma de datos a pesar de haber contado con un sistema de GNSS. Es por esto que teniendo en cuenta los dos factores mencionados anteriormente, se descartó la obtención de la altura de la pastura mediante el procesamiento de las imágenes tomadas por el dron. La intención de colocarlo en este apartado es que entendemos que en la medida que las restricciones encontradas sean levantadas, pensamos que puede ser una herramienta de mucha utilidad ya que brinda la posibilidad de realizar mapeos de la vegetación por altura con un alto grado de detalle (Batistoti et al., 2019).

4.3. Mapa de la distribución de la biomasa

Luego de obtenida la relación entre NDVI y la biomasa disponible en KgMS/ha (Figura 13), se obtuvo la siguiente ecuación: $(y = 5164,8x^2 + 195,99x + 135,26)$. Con dicha ecuación una vez realizado un vuelo y obtenidos los valores y distribución del NDVI, es posible introducir esta ecuación en el programa Agisoft MetaShape Professional (Agisoft LLC, 2023.), en donde “x” corresponde al NDVI y generar el mapa de distribución de la biomasa como se puede observar en la figura 17.

Figura 17

Mapa de distribución de la biomasa del área en estudio



Nota. Tomado de Agisoft LLC (2023).

La generación de este mapa le otorga al productor la posibilidad de observar la distribución de la disponibilidad en el área en estudio, permitiendo obtener conclusiones y generando una nueva información para la ayuda en la toma de decisiones. Como por ejemplo determinar diferente tamaño de franjas, tiempos de pastoreo según biomasa disponible, realizar fertilizaciones variables, entre otras medidas de manejo. Y vinculándolo con nuevas tecnologías como los alambres móviles y los collares con gps estos mapas aportan información de gran relevancia para su uso.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo permitió una nueva aproximación al uso del drone en busca de mejorar la eficiencia en la medición de las pasturas. Se puso a discusión el uso de imágenes multiespectrales obtenidas por drone como insumo para la generación del modelo NDVI y la estimación de biomasa, que si bien no sustituye a las metodologías ya existentes logra ser un buen complemento.

Se logró con éxito a partir del drone Phantom 4 Multiespectral generar el modelo NDVI y cuantificar la biomasa de una pastura de festuca para la estación de otoño. Por otro lado, en cuanto a la altura, esta no pudo ser estimada a partir de las imágenes del drone y la realización del dem (modelo de elevación digital), ya que no se llegó a resultados certeros. De todas maneras, debido a que la altura también se midió con regla se pudo generar una correlación entre el NDVI y la altura con correlaciones similares a la obtenida para NDVI y biomasa.

En cuanto a la estimación de la biomasa se logró calibrar el drone y luego de procesadas las imágenes generar un modelo que permitió relacionar el NDVI y los KgMS/ha con un R^2 alto de 0,74. Ya que como se mencionó la altura fue medida con regla permitió la creación de un modelo que relacione la misma con el NDVI, de un R^2 de 0,76. De esta manera generando dos modelos que permitan estimar tanto la altura como la biomasa de la pastura a partir de la generación del NDVI. Se comienza a discutir un valor teórico para el manejo de la base forrajera con valores de NDVI de 0,3 y 0,65 los momentos a priori óptimos de salida y entrada del pastoreo, generando así una nueva información para un mejor manejo del mismo.

En cuanto a la generación de mapas de la distribución biomasa es posible generarlo a partir de la ecuación de relación NDVI/(KgMS/ha). Debido a que se trabajó sobre parcelas pequeñas no se profundizó en la realización y utilización de los mismos, pero es una gran herramienta que al obtener imágenes de potreros más grandes nos permiten no solo conocer los KgMS/ha disponibles sino también observar la distribución de la misma, pudiendo así ayudar en la toma de decisiones al momento del manejo (pastoreo, fertilización, etc) sobre todo integrando esta información con otras tecnologías que aporten al pastoreo por ambiente sea el uso de collares, o franjas móviles.

En esta línea y en otras referidas al dron es necesario seguir trabajando para confirmar la aplicabilidad de los modelos generados en situaciones reales de producción (potreros, áreas mayores).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Agisoft LLC. (2023). *Agisoft Metashape Professional* (versión 2.0.2) [Software].
<https://www.agisoft.com/features/professional-edition/>
- Agudelo, P., Muñoz, A., & Bernal, M. (2015, 15-18 de septiembre). *Uso de drones y la tecnología RFID en el laboratorio de logística de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica De Pereira* [Contribución]. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2015, Cartagena.
<https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/1093>
- Aguerre, M., Cajarville, C., La Manna, A., Cavestany, D., Mendoza, A., Mattiauda, D., Carriquiry, M., Repetto, J., Meikle, A., & Chilibroste, P. (2017). *Estrategias de alimentación de vacas lecheras en pastoreo: ¿Qué hemos aprendido de los sistemas comerciales y qué hemos generado desde la investigación en Uruguay?* ANII; Universidad de la República; Conaprole; INIA; CRI.
<http://inia.uy/Publicaciones/Paginas/publicacionAINFO-57907.aspx>
- Asuaga, A. (2020). Hablemos de Festuca: Calidad y cantidad dependen del manejo. *Revista del Plan Agropecuario*, (173), 60-61.
https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/188_2917.pdf
- Ayala, W. (2018). *Experiencias en producción intensiva de carne en base a Festuca* [Contribución]. Pastoreo simple y efectivo: Manejo de la festuca, Colonia Valdense. <https://www.alcico.com.uy/wp-content/uploads/2018/05/W.-Ayala-SOFOVAL-2018-ilovepdf-compressed.pdf>
- Batistoti, J., Marcato, J., Ítavo, L., Matsubara, E., Gomes, E., Oliveira, B., Souza, M., Siqueira, H., Salgado, G., Akiyama, T., Gonçalves, W., Liesenberg, V., Li, J., & Dias, A. (2019). Estimating pasture biomass and canopy height in brazilian savanna using UAV photogrammetry. *Remote Sensing*, 11(20), Artículo e2447. <https://doi.org/10.3390/rs11202447>

- Berone, G., Marino, M., & Recavarren, P. (2021). ¿Cada cuánto damos la vuelta en pastoreos de Festuca? *Visión rural*, 18(137), 24-27.
https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/9704/INTA_CRBsAsSur_EEABalcarce_Berone_GD_Cada_cu%C3%A1nto_vuelta_pastoreos_festucas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cangiano, C. A. (1996). Métodos de medición de fitomasa aérea. En C. Cangiano (Ed.), *Producción animal en pastoreo* (pp. 117-128). INTA.
- Cao, Q., Miao, Y., Shen, J., Yu, W., Yuan, F., Cheng, S., Huang, S., Wang, H., Yang, W., & Liu, F. (2016). Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. *Precision Agriculture*, 17, 136-154.
<https://doi.org/10.1007/s11119-015-9412-y>
- Carámbula, M. (1991). *Aspectos relevantes para la producción forrajera*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2921/1/111219220807114541.pdf>
- Carámbula, M. (2007). *Verdeos de invierno*. Hemisferio Sur.
- Castaño, J., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., Aunchayna, R., & Bidegain, M. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
- Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger. (1971). *Clima y agricultura*. MGA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5960/1/CIAAB-BD-9-1971.pdf>
- Chen, Y., Guerschman, J., Shendryk, Y., Henry, D., & Harrison, M. (2021). Estimating pasture biomass using Sentinel-2 imagery and machine learning. *Remote Sensing*, 13(4), Artículo e2021.
<https://doi.org/10.3390/rs13040603>

- Chilibroste, P., Soca, P., & Mattiauda, D. A. (2011, 8-10 de junio). *Balance entre oferta y demanda de nutrientes en sistemas pastoriles de producción de leche: Potencial de intervención al inicio de la lactancia* [Contribución]. XV Congreso Latinoamericano de Buiatría, Paysandú.
- Díaz Cantos, O. (2015). *Drones y su aplicación en materia de seguridad y salud en el trabajo* [Tesis de maestría, Universidad Miguel Hernández]. RediUMH. <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/2211/1/TFM%20D%C3%ADaz%20Cantos%2C%20%C3%93scar.pdf>
- Díaz Giraldo, R. A., Álvarez de León, M., Rincón-Castillo, Á., Pérez-López, O., Cárdenas-Rocha, E., & Posada-Asprilla, W. (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. *Tropical Grasslands-Forrajeras Tropicales*, 11(1), 61-74. <https://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/article/download/1202/557/4349>
- Eastwood, C., & Dela Rue, B. (2017). Identification of operational performance attributes for pasture measuring devices. *Journal of New Zealand Grasslands*, 79, 211- 222. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2017.79.532>
- Fernández, H. (2004). *Estimación de la disponibilidad de pasto*. INTA. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/41-disponibilidad.pdf
- Galli, J. (2004). *Planificación forrajera*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/86-planificacion_forrajera.pdf
- Ganguli, A. C., Vermeire, L. T., Mitchell, R. B., & Wallace, M. C. (2000). Comparison of four non-destructive techniques for estimating standing crop in shortgrass plains. *Agronomy Journal*, 92(6), 1211-1215. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.9261211x>
- García, J. A. (2003). *Crecimiento y calidad de gramíneas forrajeras en La Estanzuela*. INIA.

- Google. (2023). [Facultad de Agronomía, Centro Regional Sur, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 20 de noviembre de 2023, de <https://www.google.com/maps/@-34.6051501,-56.2402547,6854m/>
- Haydock, K. P., & Shaw, N. H. (1975). A comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 15(76), 663-670. <https://doi.org/10.1071/EA9750663>
- Huss, D., Bernardon, A., Anderson, D., & Brun, J. (1996). *Principios de manejo de praderas naturales*. FAO.
- Insua, J. R., & Utsumi, S. (2017). *Nuevas tecnologías para el monitoreo de pasturas*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/indice_verde/49-drones_en_ganaderia.pdf
- 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
- Karaburun, A. (2010). Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 3(1), 77-85.
- 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, 7 de junio). *Evaluación de índices de vegetación por imágenes satelitales para estimar curvas de materia seca en pasturas perennes de la región semiárida del sudeste bonaerense*. Ruralnet.
<https://ruralnet.com.ar/2020/06/07/evaluacion-de-indices-de-vegetacion-por-imagenes-satelitales-para-estimar-curvas-de-materia-seca-en-pasturas-perennes-de-la-region-semiarida-del-sob/>
- 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
- Lyons, N. (2007). *Calibración de un nuevo método de estimación indirecta de disponibilidad forrajera en pasturas típicas de Australia* [Trabajo final de grado]. Universidad de Buenos Aires.
- 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>
- Martínez, M., & Reyes, E., (2020). *Detección del forraje existente en praderas con imágenes adquiridas por drones* [Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Huejutla]. TecNM.
<https://rinacional.tecnm.mx/jspui/bitstream/TecNM/1133/1/TESIS-Deteccion%20de%20Forrajes%20con%20Drones.pdf>
- Mayorga, D., Pazos, V., & Uvidia, M. (2019). Uso del índice normalizado de vegetación para la elaboración de planos de cultivo. *Opuntia Brava*, 11(2), 261-265.
- Moliterno, E. A. (1986). *Medición de pasturas*. Universidad de la República.

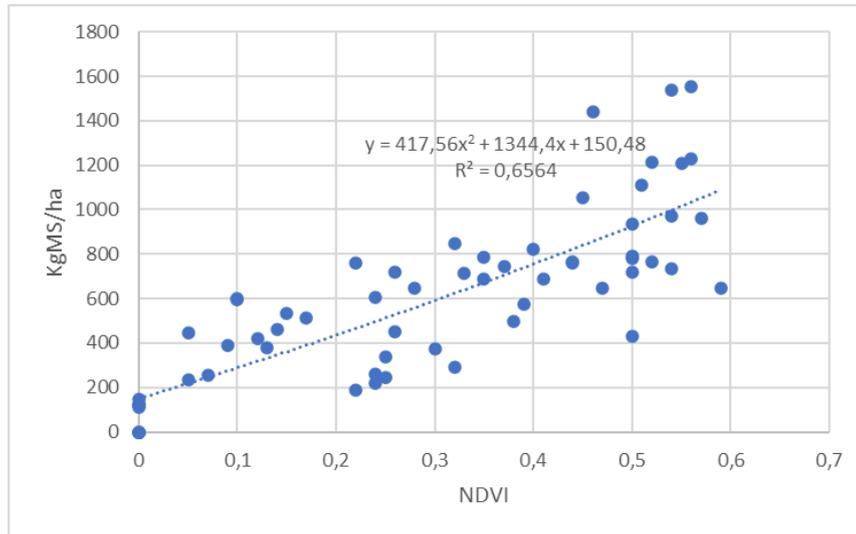
- Montossi, F., Pravia, M. I., Dighiero, A., Porile, V., Gutiérrez, D., & De Barbieri, I. (2013). Estimaciones indirectas de la cantidad de forraje para una mejor gestión de nuestras pasturas. *Revista INIA*, (34), 25-29.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7057/1/revista-INIA-34-p.25-29.pdf>
- Olmos, F. (1997). *Efectos climáticos sobre la productividad de pasturas en la región noreste*. INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2764/1/111219240807160512.pdf>
- Pino, E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: Un futuro de alta tecnología. *Idesia*, 37(1), 75-84.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000402>
- Pravia, M. I., Montossi, F., Gutiérrez, D., Ayala, W., Andregnette, B., Invernizzi, G., & Porile, V. (2013). Estimación de la disponibilidad de pasturas y forrajes en predios de GIPROCAR II: Ajustes 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/2559/1/18429280114125310.pdf>
- Ribarola Márquez, 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.
- Rodríguez Bianco, G., & Triñanes Morixe, I. (2018). *Uso de un UAV para estimar la altura del forraje* [Trabajo final de grado]. Universidad de la República.
- Rowbottom, M. (2015). *Potential of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) and remote sensing to accurately estimate pasture biomass in intensively grazed dairy pastures* [Trabajo final de grado]. University of Western Australia.

- Sanderson, M. A., Rotz, C. A., Fultz, S. W., & Rayburn, E. B. (2001). Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising platometer and pasture ruler. *Agronomy Journal*, 93(6), 1281-1286.
<https://doi.org/10.2134/agronj2001.1281>
- Sinde, I., Yáñez, D., Grefa, J., Arza, M., & Gil, M. (2020). Estimación del rendimiento del pasto mediante ndvi con imágenes multiespectrales de vehículos aéreos no tripulados (uav). *Revista Geoespacial*, 17(1), 25-38.
<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial/article/view/1640/1357>
- Suárez, L., Zarco-Tejada, P. J., Sepulcre-Canto, G., Perez-Priego, O., Miler, J. R., Jimenez-Munoz, J. C., & Sobrino, J. (2008). Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing Environment*, 112(2), 560-575.
- Théau, J., Lauzier-Hudon, E., Aube, 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>
- Tito, B. (2020, 17 de diciembre). *Ventajas y desventajas de Drones en la agricultura*. Ingeniería Ambiental. <https://ingenieriaambiental.net/drones-en-la-agricultura/>
- Tuñon, G., Fariña, S., & Restaino, E. (2018). Las 3 R: Recorrida, rotación y remanente: El problema y la oportunidad. *Revista INIA*, (52), 3-7.
<http://inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/revista-INIA-52.pdf>
- Waller, A. (2020). *Análisis de metodología para el monitoreo de pasturas en predios comerciales* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri.
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/32561/1/WallerAlicia.pdf>

7. ANEXO

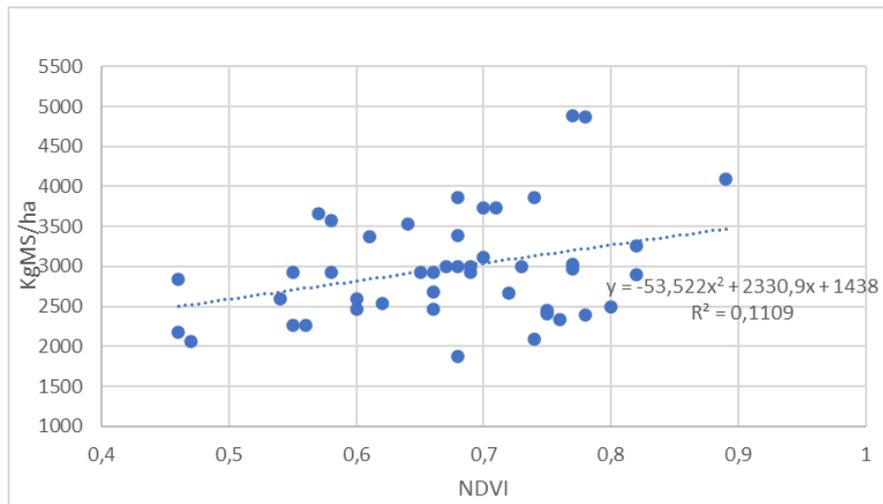
Anexo A

Relación KgMS/ha y NDVI, datos con menos de 1600 KgMS/ha



Anexo B

Relación KgMS/ha y NDVI, datos con más de 1600 KgMS/ha



Anexo C

Imagen de una de las parcelas en donde se puede observar el vuelco de la pastura

