



Monitoreo satelital de cantidad y calidad de biomasa disponible en sistemas ganaderos pastoriles de ALC [ATN/RF-19787-RG]

Producto I: Protocolo de muestreo según tipo de recurso forrajero

Martín Durante, Fernando Lattanzi, Liliana Atencio, Jose Pablo Jimenez y Mariano Oyarzabal

2023

Ministry for Primary Industries
Manatū Ahu Matua





Códigos JEL: Q16

ISBN:

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Martín Durante, Fernando Lattanzi, Liliana Atencio, José Pablo Jiménez y Mariano Oyarzábal

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial- SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

FONTAGRO

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org

www.fontagro.org



Tabla de Contenidos

AbstractError! Bookmark not defined.

Resumen EJECUTIVO77

Palabras Clave:77

Introducción8Error! Bookmark not defined.

Objetivos9

Resultados1010

1 – Pautas para el muestreo a campo..... 11

1.1 – Recursos forrajeros elegibles 12

1.2 – Elección de los sitios para los muestreos de cantidad y calidad de biomasa a campo**Error! Bookmark not defined.**12

1.3 – Muestreos de biomasa, calidad y variables auxiliares 14

2 –Error! Bookmark not defined.

campo 19

2.1 – Página web para la planificación y monitoreo de los muestreos a campo**Error! Bookmark not defined.**19

2.2 – Aplicación para caracterizar heterogeneidad a escala de paisaje 19

2.3 – Phenophoto 20

2.4 – App para registro de la información 20

Conclusiones y recomendaciones 21

Referencias Bibliográficas2222

Anexo 12424

Instituciones participantes 25



INDICE CUADROS

Tabla 1. Altura de corte por recurso forrajero **Error! Bookmark not defined.**4

Caja 1. Capturas de pantalla de la App para clasificar ambientes **Error! Bookmark not defined.**20

INDICE DE GRAFICOS

Figura 1 **Error! Bookmark not defined.** **Error! Bookmark not defined.**

Figura 2. Árbol de decisiones a distintos niveles para definir los muestreos de forraje11

Figura 3. Ortomosaico elaborado a partir de imágenes de DRONE.....13

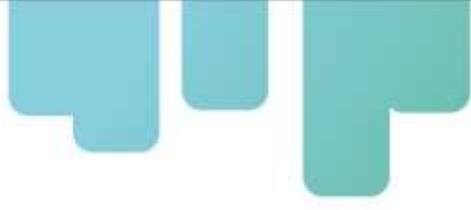
Figura 4. Esquema de distribución de los muestreos a campo.....15

Figura 5. Fotos de recursos con doble estructura.....16

Figura 6. Barreno para tomar muestras de suelo 0-10cm.17

Figura 7. Fotos a escala de paisaje y de parche18

Figura 8. Capturas de pantalla de la App para registrar los datos de campo.....21



RESUMEN

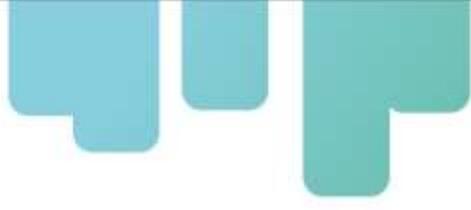
La ganadería pastoril aporta el 46% del PBI y es clave para la seguridad alimentaria y social de ALC. Actualmente, los sistemas pastoriles de producción bovina enfrentan el desafío de incrementar su rentabilidad disminuyendo su impacto ambiental ya que altos costos y una creciente preocupación por su contribución al calentamiento global amenazan su desarrollo. Conocer la cantidad y calidad de la biomasa forrajera disponible es clave para tomar decisiones de manejo que mejoren la eficiencia productiva y rentabilidad de estos sistemas pecuarios, a la vez que permite monitorear, reportar y verificar el efecto de estrategias de mitigación de emisiones de GEI. Sin embargo, recorridas frecuentes a campo que cubran todo un predio son costosas y muchas veces impracticables. En los últimos cinco años ha aumentado enormemente la disponibilidad de datos satelitales a escala espacial y temporal compatible con decisiones semanales de manejo de potreros individuales, y comienzan a aparecer modelos de predicción de la cantidad y calidad de la biomasa basados en sensores remotos. Para que esta tecnología redunde en mejoras productivas es necesario contar con modelos confiables, validados localmente, y mecanismos que hagan disponible la información a distintos usuarios. El objetivo principal del proyecto es bajar el costo de estimar en tiempo real y con precisión adecuada cantidad y calidad de biomasa disponible en sistemas ganaderos pastoriles a través de una herramienta satelital. Para ello se propone i) generar y calibrar modelos de predicción en tiempo real de cantidad y calidad de biomasa disponible a partir de sensores remotos para recursos forrajeros de relevancia en 4 países de ALC con climas templados, subtropicales y tropicales, semi-áridos y húmedos, ii) validar los modelos generados en unidades demostrativas y predios comerciales y iii) gestionar el conocimiento generado, capacitando tanto a técnicos y productores como a responsables de los inventarios nacionales de GEI de manera de asegurar la transferencia de la tecnología. Se conformará una plataforma integrada por los institutos nacionales de investigación e innovación agropecuaria y otros actores del sector que, gracias a su presencia regional y a las actividades de extensión, transferencia y desarrollo de tecnología que realizan, será clave para lograr el objetivo y llegar a todos los beneficiarios: productores familiares y empresariales, asesores ganaderos, desarrolladores de softwares y funcionarios públicos.

ABSTRACT

Pastoral livestock contributes 46% of GDP and is key to LAC's food and social security. Currently, pastoral systems for bovine production face the challenge of increasing their profitability by reducing their environmental impact, since high costs and a growing concern about their contribution to global warming threaten their development. Knowing the quantity and quality of available biomass is key to making management decisions that improve the productive efficiency and profitability of these livestock systems, while allowing monitoring, reporting and



verifying the effect of GHG emission mitigation strategies. However, frequent field measurements that cover an entire property are expensive and often impractical. In the last five years, the availability of satellite data on a spatial and temporal scale compatible with weekly management decisions of individual paddocks has advanced enormously, and prediction models of the quantity and quality of biomass based on remote sensors are beginning to appear. For this technology to result in productive improvements, it is necessary to have reliable, locally validated models and mechanisms that make the information available to different users. The main objective of the project is to lower the cost of estimating in real time and with adequate precision the quantity and quality of biomass available in pastoral livestock systems through a satellite tool. For this, it is proposed to i) generate and calibrate prediction models in real time of the quantity and quality of available biomass from remote sensors for relevant forage resources in 4 LAC countries with temperate, subtropical and tropical, semi-arid and humid climates, ii) validate the models generated in demonstration units and commercial farms and iii) manage the knowledge generated, training both technicians and producers as those responsible for national GHG inventories in order to ensure technology transfer. A platform will be formed made up of national agricultural research and innovation institutes and other actors in the sector that, thanks to their regional presence and the extension, transfer and technology development activities they carry out, will be key to achieving the objective and reaching everyone the beneficiaries: family and business producers, livestock advisers, software developers and public officials.



RESUMEN EJECUTIVO

La eficiencia y rentabilidad de sistemas pastoriles de producción bovina depende en gran medida de tomar a tiempo decisiones acertadas de manejo del pastoreo, tanto a corto (diario, semanal) como a mediano plazo (mensual, trimestral). A su vez, la calidad de la dieta es uno de los principales determinantes de las emisiones de GEI por rumiantes. Por esto, conocer la cantidad y calidad de la biomasa forrajera disponible en todo el predio y de manera frecuente es esencial. En los últimos cinco años, se ha avanzado enormemente tanto en disponer de datos satelitales a resoluciones espaciales y temporales detalladas, como en desarrollar modelos estadísticos (i.e. machine learning). Sin embargo, el ajuste de modelos de predicción robustos basados en datos satelitales requiere de datos tomados a campo (verdad terrestre) de manera estandarizada sobre una amplia variedad de condiciones y no se cuenta con dichos datos. Es decir, que la gran posibilidad que existe actualmente para generar modelos de predicción de cantidad y calidad de forraje basados en datos satelitales se ve limitada por la falta de bases de datos de campo con una resolución compatible con los datos satelitales y con una cobertura suficientemente amplia como para generar modelos extrapolables en tiempo y espacio. El objetivo general del primer componente de este proyecto FONTAGRO es contar con datos de cantidad y calidad de forraje tomados a campo con una resolución compatible con datos satelitales ($\sim 400\text{m}^2$) para los principales recursos forrajeros naturales e implantados de distintas regiones de los cuatro países participantes. Para ello, este primer producto plantea un protocolo común de medición de datos de verdad terrestre compatible con datos satelitales. Durante los primeros tres meses de ejecución del proyecto se realizaron reuniones entre los líderes técnicos y pruebas a campo a partir de las cuales se generaron como resultados las pautas para los muestreos a campo y herramientas digitales para registrar y sistematizar los datos: una app para seleccionar el sitio de muestreo, una app para registrar los datos y una página para visualizar los metadatos. En conclusión, consideramos que el uso del protocolo común presentado en este informe en una gran diversidad de sitios durante el transcurso del proyecto permitirá tener una idea más acabada de los alcances y limitaciones de los modelos basados en datos satelitales. A su vez, la base de datos a generar será un bien que permitirá evaluar modelos mejoradores que surjan en el futuro.

PALABRAS CLAVE:

Biomasa forrajera, Calidad forrajera, Muestreo a campo, Estimación Satelital

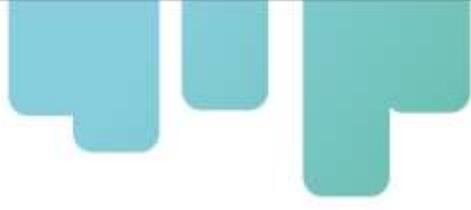


INTRODUCCIÓN

La cantidad y calidad de la biomasa varía fuertemente en el tiempo y el espacio. Además de determinantes climáticos y edáficos, el pastoreo genera cambios drásticos de muy corto plazo. Por eso es necesario contar con estimaciones frecuentes de toda la plataforma de pastoreo, es decir, el área del predio disponible para ser utilizada por animales. En situaciones experimentales, con alto grado de control, esto se lleva a cabo mediante mediciones directas que involucran cosecha de muestras de forraje, secado y pesado, seguido de molido y análisis de laboratorio varios para obtener parámetros de calidad nutricional (proteína, FDA, FDN, digestibilidad). En predios grandes, esta aproximación es poco práctica por la demanda de tiempo y los costos. Por esto, se han desarrollado métodos para estimar la cantidad de biomasa indirectamente, siendo el más común estimar visualmente o medir altura (con reglas, rising plates, C-Dax, o drones) y usar calibraciones biomasa-altura sitio-específicas, cuyo costo ronda los 40 USD/ha/año (Ortega et al. 2023). Para determinar la calidad nutricional del forraje, la obtención manual de muestras a campo y su posterior envío a laboratorio sigue siendo la forma tradicional de trabajo, aunque existen equipos portátiles cuyo uso no es aún generalizado, como el NIRS 10 (Bell et al. 2018). Estos métodos indirectos reducen tiempo y costos, pero, fuera de algunos sistemas lecheros intensivos, siguen sin ser masivamente adoptados (Schellber et al. 2018).

Un método indirecto de estimación de cantidad y composición química de biomasa que es inherentemente rápido y con posibilidad de abarcar gran superficie a un costo 5 a 9 veces inferior al de los métodos tradicionales (Ortega et al. 2023) es el uso de sensores remotos montados en plataformas satelitales. Múltiples trabajos basados en sensores ópticos, y más recientemente en sensores microondas, reportan estimaciones de biomasa en distintos recursos forrajeros (Raab et al. 2020, De Rosa et al. 2021, Chen et al. 2021, Punalekar et al. 2018). El grado de certidumbre es dispar, tendiendo a moderado en las mejores situaciones (ej. pasturas con alta homogeneidad espacial). Además del relativamente pobre desempeño en situaciones de alta cantidad de biomasa, o en presencia de biomasa senescente, la principal limitación que han encontrado estos modelos es que requieren repetidas re-calibraciones locales para mantener su calidad de estimación.

El escenario metodológico ha mejorado sustancialmente en los últimos años. La primera razón es que aumentó notablemente la disponibilidad de datos satelitales libres a escala detallada. Por ejemplo, la misión SENTINEL, operativa desde 2016, ofrece datos ópticos y microondas con 10 metros de resolución espacial y frecuencia temporal de 5 días. Esta resolución temporal y espacial es compatible con las unidades de manejo de los ensayos que se realizan en los campos experimentales y de los sistemas productivos reales. Una consecuencia inmediata de esta similitud es que se amplía la posibilidad de contar con datos para calibrar y validar modelos de predicción. La segunda razón es que ha habido un gran avance en el conocimiento aplicado en áreas de estadística relacionadas con implementaciones computacionales más simples, robustas y potentes de algoritmos de machine learning. Finalmente, el desarrollo de modelos



ecofisiológicos ha continuado refinándose y simplificándose para ser implementados con resolución predial. Las herramientas disponibles hoy permiten, entonces, ser más ambiciosos en los objetivos.

Sin embargo, la gran posibilidad que existe actualmente para generar modelos de predicción de cantidad y calidad de forraje a partir de datos satelitales se ve limitada por la falta de bases de datos de campo con una resolución y cobertura compatible con la de los datos satelitales suficientemente amplias como para generar modelos extrapolables en tiempo y espacio. Es decir, modelos capaces de predecir con precisión adecuada en un rango amplio de momentos y lugares. Lograr modelos de predicción robustos requiere, por un lado, coleccionar datos de verdad terrestre sobre una amplia gama de ambientes (edáficos, climáticos, topográficos), representativos a resolución satelital, además de incluir las etapas fenológicas y la variación en arquitectura de las plantas bajo manejo del pastoreo (Kearney et al. 2022). Es importante resaltar, que los datos de verdad terrestre se deben tomar con criterios unificados.

OBJETIVOS

El objetivo general es contar con datos de cantidad y calidad de forraje tomados a campo (verdad terrestre) para los principales recursos forrajeros naturales e implantados en distintas regiones de los cuatro países participantes, con una resolución y cobertura compatible a la de los datos satelitales ($\sim 400\text{m}^2$). Para ello, se planteó este primer producto con el objetivo específico de **generar un protocolo común de medición de datos de verdad terrestre compatibles con datos satelitales**. El uso de un protocolo común en una gran diversidad de sitios durante el transcurso del proyecto permitirá tener una idea más acabada de los alcances y limitaciones de los modelos basados en datos satelitales. A su vez, la base de datos sistematizada generada será un permitirá evaluar posibles modelos mejoradores que surjan en el futuro.

RESULTADOS

Durante los primeros meses del proyecto se avanzó en la definición de criterios para los muestreos a campo. En primer lugar, hubo una puesta en común sobre los principales recursos forrajeros de los distintos países participantes y las capacidades de cada institución. Para ello se llevaron a cabo varias reuniones virtuales entre los líderes técnicos de las cinco instituciones participantes del proyecto (Figura 1). En segundo lugar, se definieron una serie de pautas para el muestreo a campo. En tercer lugar, se evaluaron métodos indirectos para la estimación de biomasa y se desarrollaron herramientas digitales tanto para la caracterización de la heterogeneidad de la vegetación, como para el seguimiento y la sistematización de los muestreos a campo. A continuación, se resumen las pautas para el muestreo a campo (Sección 1) y las herramientas digitales desarrolladas (Sección 2).



Figura 1: Taller sobre recursos forrajeros realizado el 27/9/23

1- Pautas para el muestreo a campo

Las pautas para el muestreo a campo se basan en una serie de decisiones a distintos niveles (Figura 2). A nivel más grueso (regional), se definen los recursos forrajeros elegibles según la relevancia para los sistemas ganaderos. A nivel intermedio (sitio), el tamaño del potrero o potreros donde se medirá, la accesibilidad y la heterogeneidad del paisaje definen la estrategia de muestreo. Por último, a nivel fino (punto) la variabilidad de la estructura de la vegetación entre parches define el número de repeticiones a tomar.

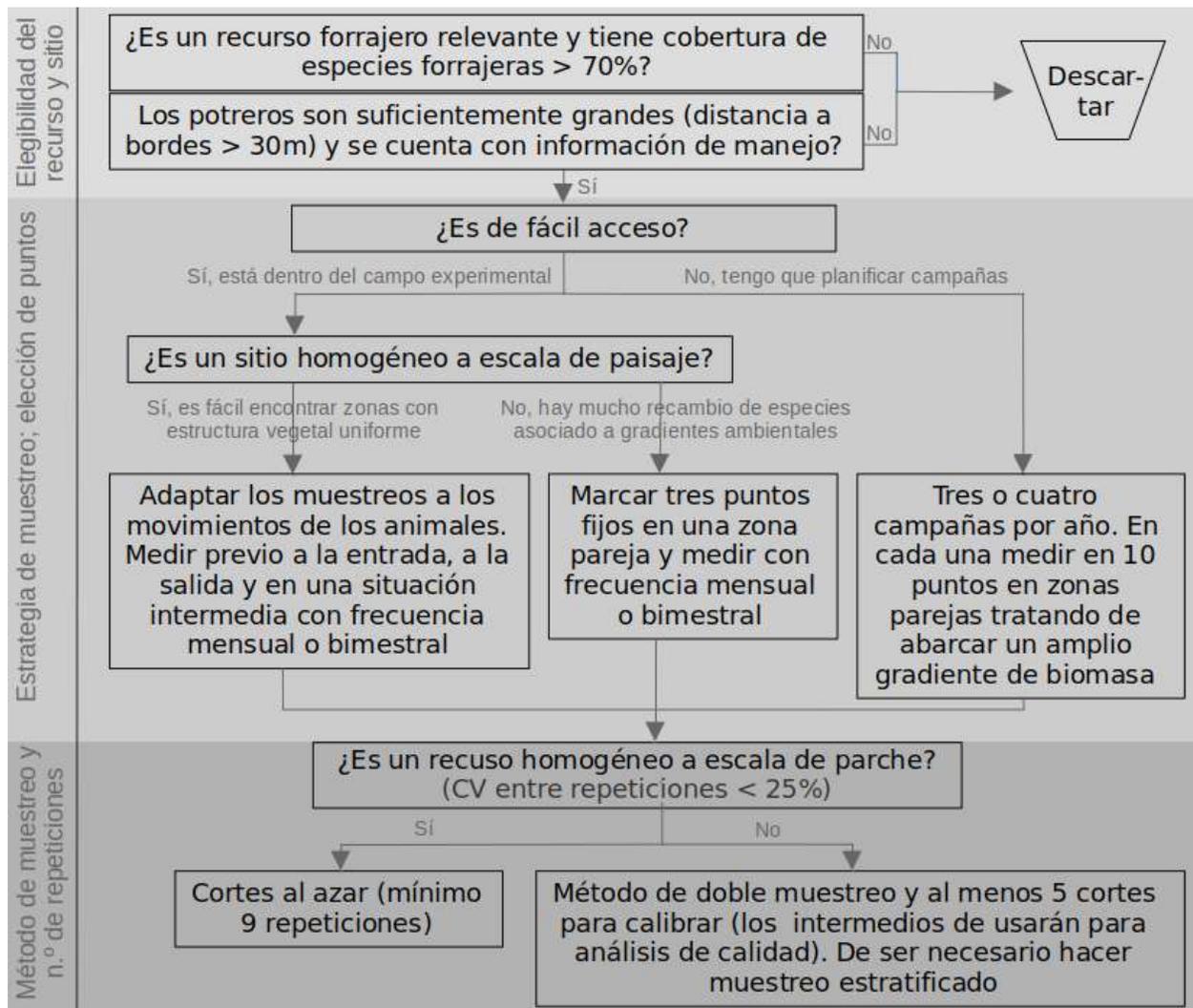


Figura 2: Árbol de decisiones a distintos niveles para definir los muestreos de forraje



1.1- Recursos forrajeros elegibles

Serán elegidos los recursos más relevantes de los sistemas ganaderos extensivos de las distintas regiones ganaderas. Se excluirán aquellos recursos que tengan una cobertura de especies no forrajeras superior al 30% ya que interfiere en la señal que reciben los satélites. Se incluirán tanto pastizales naturales (o con especies naturalizadas), como recursos implantados (anuales y perennes).

1.2- Elección de los sitios para los muestreos de cantidad y calidad de la biomasa a campo

1.2.1- Estrategia de medición según disponibilidad de recursos (humanos y materiales), manejo animal y estado de la vegetación

Se priorizará medir dentro de módulos demostrativos o experimentos de pastoreo de las instituciones participantes, donde se cuenta con mejor registro de información y control sobre el manejo. En caso de que haya un recurso forrajero relevante que no esté representado dentro de las estaciones experimentales, será posible medir en campos externos (predios de productores) procurando que sea de fácil acceso y que se cuente con registro de información de manejo.

Para mejorar la correspondencia entre el muestreo a campo y el dato satelital, es preferible que no haya más de dos días de diferencia entre ambos datos. Además, es necesario tener en cuenta que la calidad capturada por sensores ópticos (ej: SENTINEL-2, LANDSAT) se ve afectada por la presencia de nubes, por lo cual, de manera de evitar muestreos innecesarios, se sugiere chequear la disponibilidad de imágenes de buena calidad para los días previos y el pronóstico del tiempo para los días posteriores. Para ello se desarrolló una página web que facilita la visualización del calendario satelital y pronóstico en las localidades que forman parte del proyecto (ver sección 2.1).

Para incluir las diferentes etapas fenológicas de las plantas y variación en la arquitectura bajo el manejo del pastoreo, se recomienda una frecuencia de medición mensual o bimestral en al menos tres puntos por sitio. En caso de que la medición se postergue por más de 90 días debido a la falta de imágenes de buena calidad, se sugiere medir teniendo en cuenta la pasada de SENTINEL-1, que al medir en el rango de las microondas no es afectado por la presencia de nubes. Se recomienda compensar la reducción en la frecuencia de muestreos debido a la presencia de nubes por un incremento en el número de mediciones (intentando abarcar un gradiente de variación de la estructura de la vegetación). De la misma manera, en sitios externos a las estaciones experimentales, pueden planificarse 4 mediciones (campañas) por año, tratando de tomar 10 puntos en cada campaña. De esta manera, todos los sitios tendrán alrededor de 30 datos por año.

En sitios bajo pastoreo rotativo es recomendable adecuar la frecuencia de medición a la rotación de los animales. Se propone medir en parcelas recientemente pastoreadas, próximas a

pastorearse y en una o dos intermedias (de acuerdo con el número de parcelas o potreros). De esta manera se logra abarcar un amplio gradiente de biomasa y estimar el crecimiento de la vegetación.

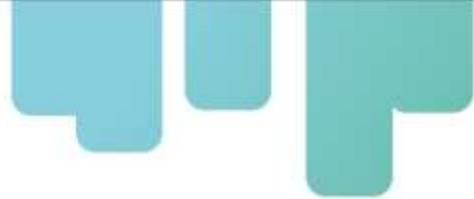
1.2.2- Identificación de zonas homogéneas (puntos a medir) dentro de los sitios

Es importante que cada punto de medición esté circundado por vegetación de características similares (radio >20m) de manera que no haya problema ante eventuales errores de georreferenciación o ruido en las imágenes satelitales. Para eso, se puede utilizar [la app](#) desarrollada en google earth engine (ver sección 2.2). En caso de tratarse de un sitio homogéneo a escala de paisaje es importante medir a más de 30m de los bordes, pero no es necesario marcar puntos fijos en el campo. En cambio, si el sitio es heterogéneo, con gradientes ambientales que generan cambios en la estructura de la vegetación (i.e. recambio de especies o cambios notables en la altura de las plantas), se deben elegir zonas parejas dentro de las cuales se marcarán puntos con una referencia fija en el campo. Esto facilitará volver al mismo lugar en los sucesivos muestreos. Si el punto se monitoreará con DRONE es necesario marcar varias referencias para corregir distintos vuelos (Grüner et al. 2019, Zhang et al. 2022; Figura 3)



Figura 3: Ortomosaico elaborado a partir de imágenes del DRONE Matrice 200V2 tomadas con la cámara Sentera AGX720. Vuelo a 20m de altura y con 80% de superposición entre fotos. Se pueden visualizar las dianas que se colocaron sobre estacas fijas distanciadas a 10m entre sí. Detalle de las dianas: grilla de 2x2 de color blanco y negro intercalados. Cada celda tiene un tamaño de 5x5cm.

1.3- Muestreos de biomasa, calidad y variables auxiliares



1.3.1- Métodos de medición y número de muestras para las estimaciones de cantidad y calidad de biomasa

Para medir la cantidad y calidad de la biomasa, será necesario hacer cortes o evaluaciones. Las mediciones deberán ser comparables entre sitios para los distintos recursos y representativas a resolución compatible con sensores remotos (~400m²).

En primer lugar, es clave que las evaluaciones para determinar la cantidad de forraje (los cortes) se realicen a una misma altura considerando el hábito de crecimiento del recurso forrajero a evaluar (Tabla 1). El criterio principal para definir la altura de corte fue la altura potencialmente consumible por el ganado. Una altura menor llevaría a un mayor error de estimación (debido a contaminación de la muestra por material muerto o mantillo), mientras que una altura mayor generaría una subestimación de la biomasa disponible. Consideramos que este criterio también permite que el material cosechado pueda ser utilizado para los análisis de calidad, excepto para las especies tropicales que se manejan a mayor altura, para las cuales se propuso cortar a dos alturas. En cuanto al método de corte, se propone realizar cortes lineales (1m) en recursos sembrados en surcos (o líneas) y sin vegetación entre estos registrando la distancia entre surcos, mientras que en recursos sin líneas visibles se recomienda usar cuadros de 50x50cm.

Tabla 1: Altura de corte por recurso forrajero.

Tipo de recurso	Especies	Método de corte	Altura de corte (cm)
Verdeo de invierno	Raigras, Avena	línea 100cm	5
Verdeo de verano	Sorgo, Maíz	línea 100cm	10
Pasturas perennes templadas	Alfalfa, Gramíneas + Leguminosas	cuadro 50x50	5
Pasturas tropicales	Chloris gayana, Digitaria eriantha, Eragrostis curvula, Panicum coloratum, Pennisetum ciliare	cuadro 50x50	10
	Megathysus maximus, Urochloa brizantha	cuadro 50x50	20 y 10
Pastizales templados	intermata (ej: Axonopus, Paspalum)	cuadro 50x50	2
	mata (ej: Andropogon, Schizachirium)	cuadro 50x50	10

En segundo lugar, el número de muestras (repeticiones) necesarias para alcanzar una estimación de la biomasa con una exactitud dada depende de su variabilidad. A mayor variabilidad, mayor es el número de repeticiones que se requiere para obtener una estimación con una exactitud dada y por ende, mayor el tiempo de muestreo. Una buena forma de aumentar el número de muestras en un menor tiempo es mediante métodos de doble muestreo (ej.: altura, botanal, pasturómetro, phenophoto [ver sección 2.3]). Como regla general, en sitios con menor variabilidad entre repeticiones (coeficiente de variación < 25%) se propone realizar 9 cortes aleatorios. Por el contrario, en sitios con mayor variabilidad, se contempla usar un método de doble muestreo en transectos fijos para aumentar el número de repeticiones y disminuir la variabilidad espacial (5

cortes para calibrar y al menos 20 para estimar, ejemplo Figura 4).

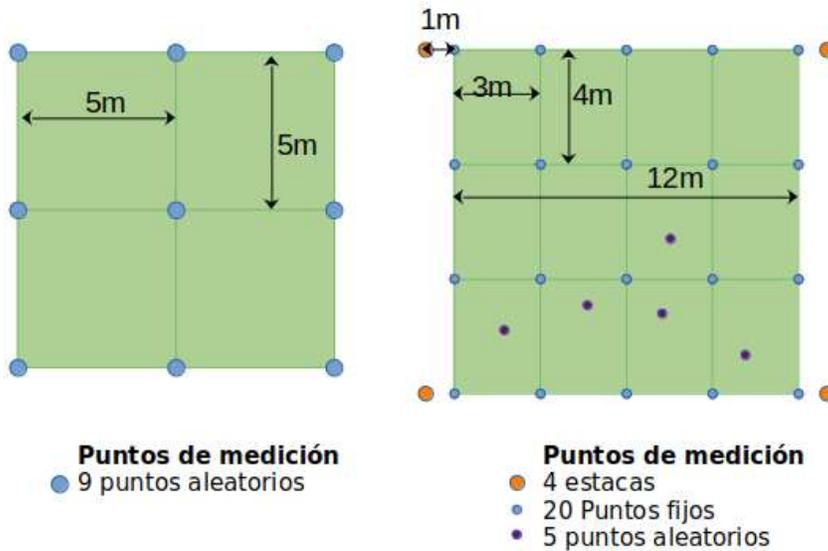


Figura 4: Esquema de distribución de los muestreos a campo. Izquierda: 9 repeticiones tomadas en torno al punto de muestreo. Derecha: puntos fijos de muestreo delimitados con 4 estacas de que permiten marcar transectos fijos para los muestreos no destructivos

1.3.2- Necesidad de realizar muestreo estratificado según fisonomía de la vegetación

Se hará muestreo estratificado si dentro de una misma zona hay especies con fisonomía diferente, que no puedan medirse con una misma metodología. En general, esta situación ocurre cuando hay doble estructura. Es decir, cuando hay especies de porte alto, que pueden ser forrajeras o no, en una matriz de pastos bajos. Si la doble estructura está dada por especies herbáceas puede no ser necesario hacer muestreo estratificado (sólo aumentar el número de repeticiones ya que la variabilidad será alta), mientras que, si se trata de especies leñosas, probablemente el método de cortes en cuadros no sea el más adecuado, por lo que sí será necesario un muestreo estratificado (Figura 5). En estos casos, el muestreo del estrato bajo se aplicará con la frecuencia y métodos de muestreo definidos anteriormente (secciones 1.2 y 1.3.1), mientras que la biomasa del estrato alto se estimará bimestralmente. Para ello se utilizarán cuatro transectos fijos de 12m (Figura 4). Se medirán altura, diámetro menor y diámetro mayor de cada individuo de la especie de porte alto que se cruce con el transecto. Luego, para calcular la proporción de cobertura de doble estrato, se sumará el área de los individuos medidos y se dividirá por el largo del transecto multiplicado por el diámetro promedio de los individuos medidos. Además, fuera del transecto, semestralmente, se cortarán cinco individuos siguiendo un gradiente de tamaño de manera de ajustar una relación alométrica con el volumen ($\text{altura} \cdot \pi \cdot r^2$). De esta manera, se contará con estimaciones de biomasa y cobertura de ambos estratos. Para estimar la biomasa total, se sumará la biomasa de cada estrato ponderada por la cobertura. En sitios piloto se utilizarán drones para estimar volumen de especies de porte alto como forma de simplificar los muestreos semestrales

(Figura 3).



Figura 5: Fotos de recursos con doble estructura. En A y C, la doble estructura está dada por una especie herbácea (*Andropogon lateralis*) y no sería necesario un muestreo estratificado. En cambio, en B y D, la especie leñosa (*Eupatorium buniifolium*) sí requeriría un muestreo estratificado.

1.3.3- Variables auxiliares

Además de la cantidad de biomasa y la calidad nutricional de forraje, se registrarán variables auxiliares con distinta frecuencia.

- Latitud y Longitud

Es fundamental contar con la ubicación espacial de manera de poder relacionar la verdad terrestre con datos satelitales. En puntos fijos sólo será necesario medir la ubicación espacial una vez, pero si no hay puntos fijos marcados, se medirá cada fecha. Una precisión de ~4m (un GPS común o un celular) es adecuada

- Especies

Previo a realizar cada corte de forraje se estimará visualmente la contribución a la biomasa de las especies más abundantes. Se comenzará desde la especie de mayor contribución hasta alcanzar el 80%. Una forma simple de registrar esta variable es mediante códigos que hacen referencia a las especies, asumiendo que cada nombre anotado contribuye de igual manera a la biomasa total. Por ejemplo, si usamos FESARU y MEDSAT para representar a *Festuca*

arundinácea y *Medicago sativa* (alfalfa), la forma de representar áreas ocupadas sólo por festuca, con partes iguales de ambas especies, o dos tercios de festuca y un tercio de alfalfa serían: FESARU, FESARU MEDSAT y FESARU FESARU MEDSAT, respectivamente.

- Humedad de suelo

Se tomará una muestra de suelo con un barreno hasta una profundidad de 10 cm (Figura 6) para calcular humedad gravimétrica. Se tomarán ocho repeticiones alrededor de cada punto y se colocarán en una misma bolsa (muestra compuesta). El peso fresco se determinará en el lugar o al llegar al laboratorio. Luego, se colocará en estufa hasta peso constante para calcular de humedad (masa agua/masa suelo seco). Podrán utilizarse sensores de humedad si están calibrados.



Figura 6: Barreno para tomar muestras de suelo 0-10cm.

- Movimientos de los animales

Se registrarán las fechas de entrada y salida de los animales en las parcelas donde se mida. Además, de ser posible, se registrará número y peso promedio de los animales.

- Fotos

Se tomarán fotos de paisaje en sentido N, S, E y O con el fin de tener una visión general del potrero en cada fecha de corte. Además, se tomarán fotos previamente a cada corte de forraje para tener un registro de la cobertura. Si la altura de la vegetación es inferior a los 60cm la foto deberá ser de arriba hacia abajo (a la altura del hombro), en caso contrario, será de abajo hacia arriba, con el celular al ras del suelo (Figura 7).

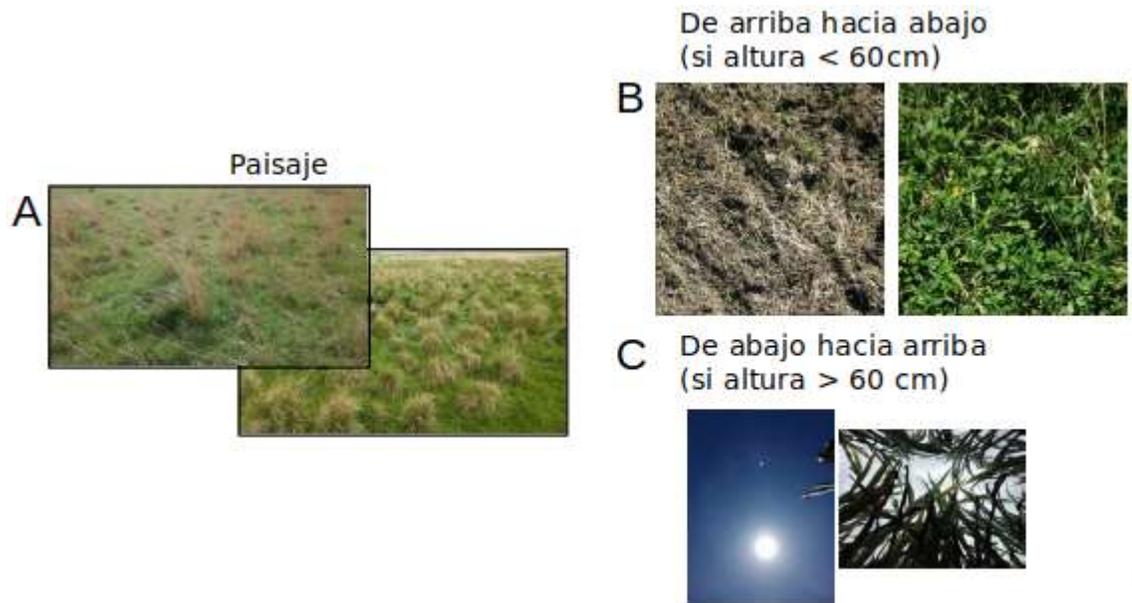
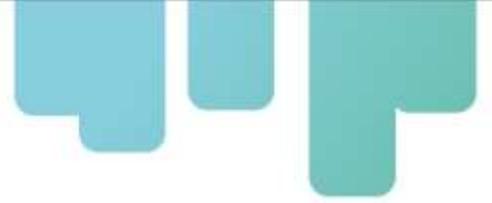


Figura 7:
Fotos a

escala de paisaje (A) y a escala de parche: desde arriba (B) y desde abajo (C)



2- Herramientas digitales desarrolladas para facilitar los muestreos a campo

Se creó una cuenta de correo electrónico del proyecto (fontagrobiomasa@gmail.com) con el propósito de concentrar toda la información. La cuenta será utilizada a lo largo del proyecto para almacenar la información geográfica (shapes de localidades) y acceder a información satelital mediante la plataforma Google Earth Engine. También, se usará Google Drive para almacenar y compartir los datos de campo registrados. Además, la dirección de correo se utilizó para crear cuentas en otras plataformas (como github y AppSheet) que se utilizaron para desarrollar las herramientas digitales mencionadas en las próximas secciones. Todas las herramientas utilizadas son libres y, además de simplificar los registros y sistematizar la información, permiten ampliar la red de muestreo con otros proyectos de investigación que sigan los mismos objetivos.

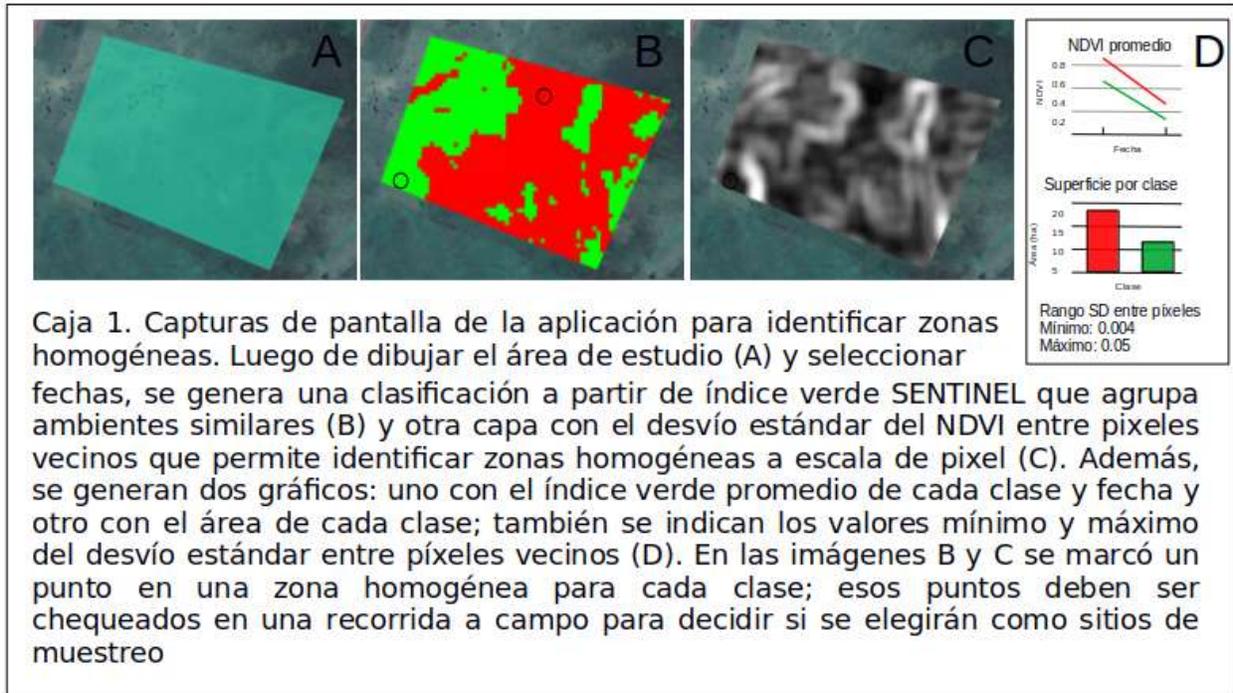
2.1- Página web para la planificación y monitoreo de los muestreos a campo.

Se creó [un repositorio de github](#), que a su vez tiene [una página web](#) con información útil para los muestreos. En el repositorio se podrá acceder a la última versión del protocolo. La página es un archivo .html creado con el paquete flexdashboard de R y alojado en el mismo repositorio. En la página, se podrán visualizar los datos del calendario satelital y pronóstico del tiempo para las localidades en las cuales hay sitios de muestreo. Dichos datos se toman de las páginas spectator.earth y weather.com. Esta información se actualizará diariamente. Además, la página se vinculará con las planillas de datos de campo (ver sección 2.4) y mostrará un resumen de los registros de campo tomados.

2.2- Aplicación para caracterizar heterogeneidad a escala de paisaje

Se adaptó una aplicación para clasificar ambientes a partir del índice verde de imágenes SENTINEL-2 creada con anterioridad (Durante y Jaurena 2022). La [aplicación original](#) se creó en el entorno de desarrollo de Google Earth Engine con la premisa de que fuera simple de usar, para lo cual se diseñó una interfaz amigable. El usuario dibuja un polígono, define unos pocos parámetros (fecha, número y duración de períodos y número previsto de clases de vegetación) y obtiene como resultado un mapa con colores que representan a los ambientes con comportamiento similar (obtenido a partir de una clasificación no supervisada basada en el índice verde de los períodos definidos) y dos gráficos: el índice verde promedio para cada clase y fecha y la superficie de cada clase. La [nueva aplicación](#) (Caja 1), generada a partir de la cuenta de correo del proyecto, incorpora una capa adicional con el desvío estándar del índice verde entre píxeles vecinos que permite identificar zonas parejas dentro de un sitio, para facilitar la elección de puntos de muestreo. Para la generación de la nueva capa, la aplicación incorpora un parámetro que define el tamaño de la ventana móvil (número de píxeles vecinos) para calcular

el desvío estándar.



2.3- Phenophoto

Se desarrolló un método indirecto de estimación de biomasa basado en fotos oblicuas que se denominó “PhenoPhoto” (Durante y Jaurena 2023, Anexo I). El método se evaluó en pastizales naturales de Entre Ríos (Argentina) y Uruguay; se trata de pastizales diversos (~40 especies/m²), fundamentalmente gramíneas C₃ y C₄. Al compararlo con datos de corte, se observó un buen ajuste ($R^2=0.88$, N.º de muestras = 60), con un error ligeramente inferior al de otros métodos de doble muestreo (error relativo 5-15% menor que altura y botanal). Además, del buen ajuste, la trazabilidad del método (queda el registro fotográfico) lo hace particularmente interesante.

2.4- App para registro de la información

De manera de sistematizar la información registrada por los numerosos participantes del proyecto, se generó una aplicación que se puede utilizar desde un teléfono o una computadora. La aplicación se generó en la plataforma sin código AppSheet. La aplicación funciona como una interfaz gráfica amigable que permite cargar y visualizar datos en una hoja de cálculo de google almacenada en la nube de la cuenta de correo del proyecto. El uso de una aplicación ayuda a reducir errores u omisiones a la hora de registrar la información a campo y posteriormente en el laboratorio. Además, simplificará el registro de metadatos (ej. fotos, usuario, etc.). Se generará

una aplicación (con su respectiva planilla) independiente para cada localidad de manera que cada grupo de trabajo visualice solamente sus datos. En ese sentido, el uso de la plataforma sin código fácilmente programable permite realizar cambios en la aplicación según qué datos se registren (ej. según el método de doble muestreo que se use).

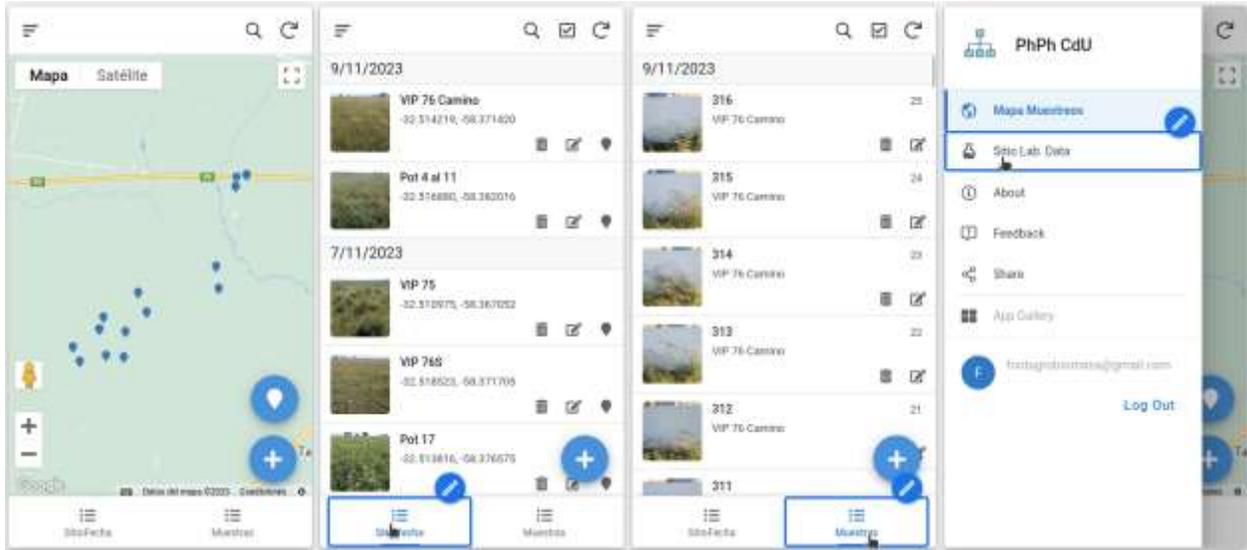


Figura 8: Capturas de pantalla de la App. para registrar los datos a campo. De izquierda a derecha: 1 mapa de puntos de muestreo, 2 visualización y carga de nuevos puntos, 3 visualización y carga de nuevas repeticiones dentro de un punto y 4 carga de datos de un punto luego de procesar las muestras.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se cuenta con un protocolo de muestreo basado en una serie de decisiones a distintas escalas (Figura 2), que permiten unificar los muestreos para cada tipo de recurso forrajero. A su vez, se cuenta con una serie de herramientas digitales para simplificar los muestreos a campo y sistematizar la información. Ambos productos permitirán recopilar una base de datos amplia y robusta durante el transcurso del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bell, M. J., Mereu, L., & Davis, J. (2018). The use of mobile near-infrared spectroscopy for real-time pasture management. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2(76). doi:10.3389/fsufs.2018.00076
- Chen, Y., Guerschman, J., Shendryk, Y., Henry, D., & Harrison, M. T. (2021). Estimating pasture biomass using Sentinel-2 imagery and machine learning. *Remote Sensing*, 13(4), 603.
- De Rosa, D., Basso, B., Fasiolo, M., Friedl, J., Fulkerson, B., Grace, P. R., & Rowlings, D. W. (2021). Predicting pasture biomass using a statistical model and machine learning algorithm implemented with remotely sensed imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105880. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105880>
- Durante, M y Jaurena, M. 2022. Una APP sencilla para la clasificación de ambientes basada en el índice verde. 3º Seminario Internacional “Restauración en el Bioma Pampa”. 28-30 de septiembre. <https://www.researchgate.net/publication/375689889> Una APP sencilla para la clasificación de ambientes basada en el índice verde
- Durante y Jaurena 2023, Phenophoto: un método indirecto rápido y sencillo para estimar biomasa aérea en pastizales. Reunión Anual de Ecología, Bariloche. Octubre de 2023. <https://github.com/martdurante/Phenophoto>
- Grüner, E., Astor, T., & Wachendorf, M. (2019). Biomass Prediction of Heterogeneous Temperate Grasslands Using an SfM Approach Based on UAV Imaging. In *Agronomy* (Vol. 9, Issue 2, p. 54). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020054>
- Kearney, S. P., Porensky, L. M., Augustine, D. J., Gaffney, R., & Derner, J. D. (2022). Monitoring standing herbaceous biomass and thresholds in semiarid rangelands from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery to support within-season adaptive management. In *Remote Sensing of Environment* (Vol. 271, p. 112907). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112907>
- Ortega G, Chilibroste P, Garrido JM, Waller A, Fariña SR, Lattanzi FA (2023). Monitoring herbage mass and pasture growth rate of large grazing areas: a comparison of the correspondence, cost and reliability of indirect methods. *The Journal of Agricultural Science* 1–10. <https://doi.org/10.1017/S0021859623000333>
- Punalekar, S. M., Verhoef, A., Quaife, T. L., Humphries, D., Bermingham, L., & Reynolds, C. K. (2018). Application of Sentinel-2A data for pasture biomass monitoring using a physically based radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 218, 207-220. doi:10.1016/j.rse.2018.09.028?
- Raab, C., Riesch, F., Tonn, B., Barrett, B., Meißner, M., Balkenhol, N., & Isselstein, J. (2020). Target-



oriented habitat and wildlife management: estimating forage quantity and quality of semi-natural grasslands with Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 6(3), 381–398. <https://doi.org/10.1002/rse2.149>

Schellberg, J., Hill, M. J., Gerhards, R., Rothmund, M., & Braun, M. (2008). Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy*, 29(2), 59-71. doi:10.1016/j.eja.2008.05.005

Zhang, K., Okazawa, H., Hayashi, K., Hayashi, T., Fiwa, L., Maskey, S. (2022). Optimization of Ground Control Point Distribution for Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry for Inaccessible Fields. *Sustainability*, 14, 9505. <https://doi.org/10.3390/su14159505>

ANEXO 1



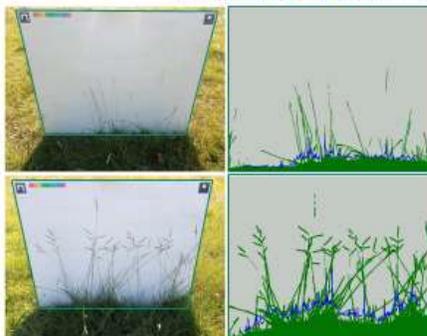
Foto de Cecilia Caruso

1 Se puede obtener mucha información de las fotos...

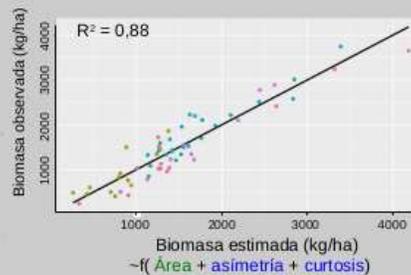
Área, Altura, Colores, Formas



Registro simultáneo de LatLon y datos auxiliares mediante AppSheet



3 Un modelo robusto para estimar biomasa ajustó en cinco sitios de campo natural entrerriano (60 fotos tomadas entre febrero y mayo)



2 ... y más si se toman de manera estandarizada



- Panel blanco de 100 x 80 cm
- Marcadores "aruco" en los bordes
- Foto a 100 cm de distancia y 80 cm de altura
- Corte en franja de 25 x 100 cm

Más info: scopes, resmenes, fotos



4 Más preciso que otros métodos

(n = 20 datos por prueba x 3 observadores)



Autores: Martín Durante, EEA INTA Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.
Martín Jaurena, INIA Tacuarembó, Uruguay.
Agradecemos a quienes ayudaron con los cortes: Saulo Díaz, Mauricio Silveira, Lourdes Suarez y Joaquín Alá.



INSTITUCIONES PARTICIPANTES



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org