

**“Estimación de la variación espacio-temporal de la biomasa de pasturas a
través de la integración de drones con modelos de simulación”**

Ing. Agr. Celina María Laplacette

Director: Dr. Juan R. Insúa

Co-director: Dr. Germán D. Berone

RESUMEN

Una estimación oportuna y con alta exactitud de la biomasa forrajera es un componente clave para la toma de decisiones en sistemas ganaderos pastoriles. El empleo de sensores remotos montados en drones sería una alternativa para caracterizar la biomasa y el estado nitrogenado de la pastura de manera rápida y no destructiva. El objetivo de este trabajo fue desarrollar una metodología que integre datos espectrales obtenidos mediante un sensor multiespectral comercial montado en un dron con un modelo de simulación de paso diario para estimar con elevada exactitud la biomasa aérea en pasturas. Los objetivos específicos fueron: (1) calibrar un sensor montado en un dron para estimar biomasa utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y evaluar el efecto de especies, estaciones del año y estado nitrogenado (INN) sobre dicha relación; (2) desarrollar y comparar modelos de regresión lineal y Random Forest para estimar parámetros nutricionales de la pastura; (3) evaluar el desempeño del dron para la estimación de biomasa a escala de potrero utilizando el pasturómetro como método indirecto de referencia y compararlo con otros métodos indirectos; y (4) analizar la integración dron-modelo de simulación en pastoreo rotativo para reducir vuelos y asegurar un monitoreo semanal de biomasa. Para los objetivos 1 y 2 se realizaron dos experimentos con 30 y 72 parcelas (6 m²) de agropiro alargado y festuca alta, respectivamente, utilizando seis dosis de N (0, 50, 100, 200, 400 y 600 kg N ha⁻¹) en Balcarce, Argentina, durante 2021-2023. Se realizaron dos fechas de muestreo por estación (otoño y primavera) durante dos años consecutivos. En cada fecha se efectuaron vuelos con dron, mediciones de altura y altura comprimida, y muestreos destructivos para determinar biomasa, %N, N acumulado (Nup) e INN. Se ajustaron modelos exponenciales de biomasa en función del NDVI, obteniéndose un R² promedio de 0,83 ± 0,04 y un MAE de 160 ± 55 kg MS ha⁻¹. El efecto del NDVI sobre la biomasa difirió ($p \leq 0,05$) entre especies, estaciones del año y estadios de rebrote, pero no estuvo influenciado por el estado nitrogenado ($p > 0,05$). Para la estimación de los parámetros nutricionales de la pastura (%N, Nup e INN), los modelos lineales y Random

Forest mostraron poder predictivo similar. El desempeño predictivo fue moderado para %N (MAE_{cv} promedio = 0,35 %; R^2_{cv} promedio = 0,49) e INN (MAE_{cv} promedio = 0,11; R^2_{cv} promedio = 0,53) y alto para Nup (MAE_{cv} promedio = 10,13 kg N ha⁻¹; R^2_{cv} promedio = 0,78), siendo este último el parámetro mejor estimado. NDVI, NDRE y biomasa se identificaron como los predictores más relevantes, y los modelos lineales que incorporaron variables categóricas e interacciones resultaron competitivos frente a Random Forest. Para los objetivos 3 y 4 se utilizó una pastura de 16 ha de agropiro alargado subdividida en 10 potreros bajo pastoreo rotativo durante la primavera de 2021. Se compararon mediciones con pasturómetro, regla, sensor proximal y dron durante ocho semanas consecutivas, utilizando el pasturómetro como método indirecto de referencia. Para la integración dron-modelo de simulación se empleó el modelo McCall, considerando horizontes de simulación de 1, 2 y 3 semanas desde la fecha inicial de vuelo. Bajo condiciones reales, las estimaciones de biomasa obtenidas con el dron no difirieron significativamente del método indirecto de referencia y mostraron una concordancia moderada ($MAE = 470$ kg ha⁻¹; $E\% = 18$ %; $R^2 = 0,59$). La recalibración semanal mediante doble muestreo mejoró la exactitud, aunque implicó alta carga operativa. La integración dron-modelo de simulación demostró ser una alternativa viable ($MAE = 385$ kg MS ha⁻¹; $R^2 = 0,78$) para reducir la frecuencia de vuelos y mediciones, aunque requiere asegurar una adecuada calibración tanto del sensor como del modelo y una correcta representación del efecto del pastoreo.

Palabras clave: monitoreo de pasturas, biomasa, estado nitrogenado, dron, modelo de simulación