

Estimación de la producción de biomasa en un pastizal halófilo mediante imágenes RGB obtenidas con dron

Estimation of biomass production in a halophytic grassland using RGB images obtained with a drone

Estimativa da produção de biomassa em uma pastagem halófitas usando imagens RGB obtidas com um drone

DOI: 10.34188/bjaerv9n1-041

Submitted: Dec 2nd, 2025

Approved: Dec 25th, 2025

María Esther Ríos-Vega

Doctora en Ciencias en Sustentabilidad de los Recursos Agropecuarios
Graduada por la Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango,
FAZ-UJED

Profesora Investigadora de Tiempo Completo FAZ-UJED

Correo electrónico: esther.rios@ujed.mx

<https://orcid.org/0000-0002-7527-9806>

Ulises Noel Gutiérrez-Guzmán*

Doctor en Ciencias Agropecuarias y Forestales
Graduado por la Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango,
FAZ-UJED

Profesor Investigador de Tiempo Completo FAZ-UJED

Correo electrónico: ulises.gutierrez@ujed.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6409-1947>

Apolinar González-Mancilla

Doctor en Ciencias en Edafología
Graduado por el Colegio de Postgraduados Campus-Montecillo, Estado de México, México
Profesor Investigador de Tiempo Completo FAZ-UJED

Correo electrónico: apolinar.gonzalez@ujed.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1066-1916>

Amaury Esquivel-Romo

Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria
Graduado por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, UAAAN-UI
Profesor Investigador HSM en la FAZ-UJED

Correo electrónico: amauryer@ujed.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4284-0668>

Jorge Arturo Bustamante-Andrade

Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria
Graduado por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, UAAAN-UI
Profesor Investigador HSM en la FAZ-UJED

Correo electrónico: jorge.bustamante@ujed.mx

<https://orcid.org/0000-0003-1642-3916>

Luis Jesús Barrera-Flores

Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria
Graduado por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, UAAAN-UI
Profesor Investigador HSM en la FAZ-UJED
Correo electrónico: luis.barrera@ujed.mx
<https://orcid.org/0000-0003-1962-7797>

José Ángel Maraña-Santacruz

Doctor en Ciencias Agropecuarias y Forestales
Graduado por la Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango,
FAZ-UJED
Correo electrónico: joseangel.marana@ujed.mx
<https://orcid.org/0000-0003-1813-0965>

RESUMEN

El uso de los sensores remotos basado en drones nos permite obtener imágenes con rapidez y de buena calidad para llevar a cabo un monitoreo de la vegetación en los agostaderos de una manera más rápida, efectiva y con menor esfuerzo que los métodos tradicionales. El objetivo de este trabajo fue determinar la relación entre la producción de biomasa y la cobertura vegetal estimada en fotografías digitales haciendo uso de un vehículo aéreo no tripulado (Dron). Se estableció un sitio de muestreo en un pastizal halófilo ubicado en el Municipio de Tlahualilo, Durango en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biosfera de Mapimí, cuya vegetación está dominada por zacate toboso (*Hilaria mutica*). Se establecieron tres parcelas de 28 has cada una donde se trazaron ocho transectos con cinco puntos de muestreo cada uno, en cada punto se tomó una fotografía digital para determinar la cobertura vegetal y se relacionó con la producción de biomasa cosechada en cada punto de muestreo. El estudio se realizó en los años 2019 y 2022. La cobertura vegetal promedio por año fue de 27.80 y 34.22 %, mientras que la biomasa promedio fue de 158.69 y 211.20 g/m². Para determinar el grado de asociación entre las variables medidas se realizó un análisis de regresión simple encontrando el modelo $Y = 10.77 + 5.321 X_1$; y para el año 2022 $Y = 61.22 + 4.382 X_1$. La R^2 fue de 86.9 y 80.9 % respectivamente. El uso de estas nuevas tecnologías nos permite realizar monitoreo de la vegetación en menos tiempo y de una manera más fácil que con los métodos tradicionales para elaborar planes de uso y manejo adecuado de estas áreas de pastizal.

Palabras clave: cobertura vegetal, regresión lineal, Cobcal, validación.

ABSTRACT

The use of drone-based remote sensing allows us to quickly obtain high-quality images for monitoring vegetation in rangelands more rapidly, effectively, and with less effort than traditional methods. The aim of this study was to find the relationship between biomass production and vegetation cover estimated from digital photographs using an unmanned aerial vehicle (drone). A sampling site was proved in a halophytic grassland found in the Municipality of Tlahualilo, Durango, within the buffer zone of the Mapimí Biosphere Reserve, where the vegetation is dominated by tobosa grass (*Hilaria mutica*). Three plots of 28 hectares were established, among which eight transects were laid out, each with five sampling points. At each point, a digital photograph was taken to find vegetation cover and correlate it with the biomass production harvested at that sampling point. The study was conducted in 2019 and 2022. The average vegetation cover per year was 27.80% and 34.22%, while the average biomass was 158.69 and 211.20 g/m². To determine the degree of association between the measured variables, a simple regression analysis was performed, yielding the model $Y = 10.77 + 5.321 X_1$; and for 2022, $Y = 61.22 + 4.382 X_1$. The R^2 values were 86.9% and 80.9%, respectively. The use of these recent technologies allows us to

monitor vegetation in less time and in an easier way than with traditional methods to develop plans for the proper use and management of these grassland areas.

Keywords: vegetation cover, linear regression, Cobcal, validation.

RESUMO

O uso de sensoriamento remoto por drones permite obter rapidamente imagens de alta qualidade para o monitoramento da vegetação em pastagens de forma mais ágil, eficaz e com menor esforço do que os métodos tradicionais. O objetivo deste estudo foi determinar a relação entre a produção de biomassa e a cobertura vegetal estimada a partir de fotografias digitais obtidas por meio de um veículo aéreo não tripulado (drone). Uma área de amostragem foi estabelecida em uma pastagem halófitas localizada no município de Tlahualilo, Durango, dentro da zona de amortecimento da Reserva da Biosfera Mapimí, onde a vegetação é dominada pelo capim-tobosa (*Hilaria mutica*). Foram estabelecidas três parcelas de 28 hectares cada, dentro das quais foram demarcadas oito transectos, cada um com cinco pontos de amostragem. Em cada ponto, foi tirada uma fotografia digital para determinar a cobertura vegetal e correlacioná-la com a produção de biomassa colhida naquele ponto de amostragem. O estudo foi conduzido em 2019 e 2022. A cobertura vegetal média por ano foi de 27,80% e 34,22%, enquanto a biomassa média foi de 158,69 e 211,20 g/m². Para determinar o grau de associação entre as variáveis medidas, foi realizada uma análise de regressão simples, resultando no modelo $Y = 10,77 + 5,321 X_1$; e para 2022, $Y = 61,22 + 4,382 X_1$. Os valores de R^2 foram de 86,9% e 80,9%, respectivamente. A utilização dessas novas tecnologias permite monitorar a vegetação em menos tempo e de forma mais fácil do que com os métodos tradicionais, para desenvolver planos para o uso e manejo adequados dessas áreas de pastagem.

Palavras-chave: cobertura vegetal, regressão linear, Cobcal, validação.

1 INTRODUCCIÓN

En México los pastizales ocupan el 6.1% del territorio nacional, se encuentran muy extendidos en el norte del país y cubren amplias zonas en los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y Jalisco (CONABIO, 2019). En las últimas décadas, la combinación de cambio climático, aumento de la población y las actividades ganaderas intensificadas, ha producido una degradación generalizada de los pastizales (Tenorio *et al.*, 2025), esta se manifiesta en la disminución de la cubierta vegetal, la reducción de la biomasa, la invasión por especies exóticas leñosas y la degradación del suelo, entre otros problemas ecológicos (Zhu *et al.*, 2022; Blumetto, 2024; Jiang *et al.*, 2024).

Estos problemas se asocian a la falta de conocimiento de los ganaderos sobre la productividad de estas áreas, así como de los límites para su aprovechamiento (Nana *et al.*, 2023). En un agostadero el comportamiento intra e interanual de la biomasa es una variable muy importante, sobre todo en las zonas áridas donde el alimento puede ser escaso por periodos de tiempo prolongados y donde el comportamiento atípico de las lluvias dificulta realizar los ajustes de carga en los momentos adecuados (Leeuw *et al.*, 2019).

Debido a esta problemática, la tecnología de teledetección ofrece ventajas como ciclos de

actualización cortos, adquisición rápida de datos y amplia cobertura de observación, lo que proporciona un sólido soporte técnico para la evaluación a gran escala, rápida y precisa de las condiciones de los pastizales (Ayvazyán *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024). Esto pueden tener un rol decisivo en el desarrollo de soluciones de monitoreo que faciliten la toma de decisiones en el manejo del hato, como el ajuste de carga y la suplementación (Hernández *et al.*, 2019).

Para la producción sostenible y la máxima utilización de especies de forrajes y pastizales, es muy importante emplear tecnologías de precisión en el monitoreo del rendimiento de biomasa (Beukes *et al.*, 2019). La cobertura vegetal se define como la relación entre el área de proyección vertical por vegetación y la unidad de área del suelo, es un indicador central de la condición del ecosistema (Hu *et al.*, 2024). Sin embargo, la cobertura de los pastizales es altamente heterogénea, con vegetación y parches de suelo desnudo que forman un mosaico complejo, dicha heterogeneidad a escala fina puede ser menor que los tamaños de píxel de las imágenes adquiridas a través del monitoreo satelital y que comúnmente son utilizados para determinar las condiciones de la vegetación (Li *et al.*, 2026).

La aparición de vehículos aéreos no tripulados (VANT) ofrece una solución transformadora para el monitoreo aéreo que permite la recopilación rápida y no invasiva de datos en pastizales extensivos (Wang *et al.*, 2019). El uso de la sensoria remota basada en drones, nos permite obtener imágenes con rapidez y de buena calidad para llevar a cabo un monitoreo de la vegetación en los agostaderos de una manera más rápida, efectiva y con menor esfuerzo que los métodos tradicionales (Cabada *et al.*, 2019). La aplicación de la agricultura digital en el manejo de forrajes y pastizales depende en gran medida de los sistemas de monitoreo y el procedimiento involucrado (Kiniry *et al.*, 2018). Además de esto, las tecnologías de monitoreo no solo deben ser de bajo costo sino también estar equipadas con un procedimiento de instalación fácil (De Moraes *et al.*, 2022).

Los estudios de campo son el método principal para monitorear los pastizales (Gcayi *et al.*, 2024), aunque los datos son muy precisos, requieren tiempo, mano de obra y una cobertura espacial limitada (Hua *et al.*, 2023). Los métodos se agrupan en directos e indirectos (De Moraes *et al.*, 2022). Los métodos directos consisten principalmente en la cosecha manual o mecánica y la estimación visual (Godínez-Álvarez *et al.*, 2009), las mediciones realizadas con estos sistemas podrían mejorarse comparándolas con un método indirecto (Murphy *et al.*, 2021). Dichos métodos indirectos se basan en procedimientos de calibración como regresiones lineales o múltiples con una variable de fácil medición (Cho *et al.*, 2019).

Con base en los planteamientos expuestos en el presente estudio, los objetivos principales fueron (1) explorar la variación temporal de la biomasa y la cobertura vegetal durante dos años en un sitio de pastizal halófilo mediante un VANT; (2) estimar la correlación y obtener un modelo de

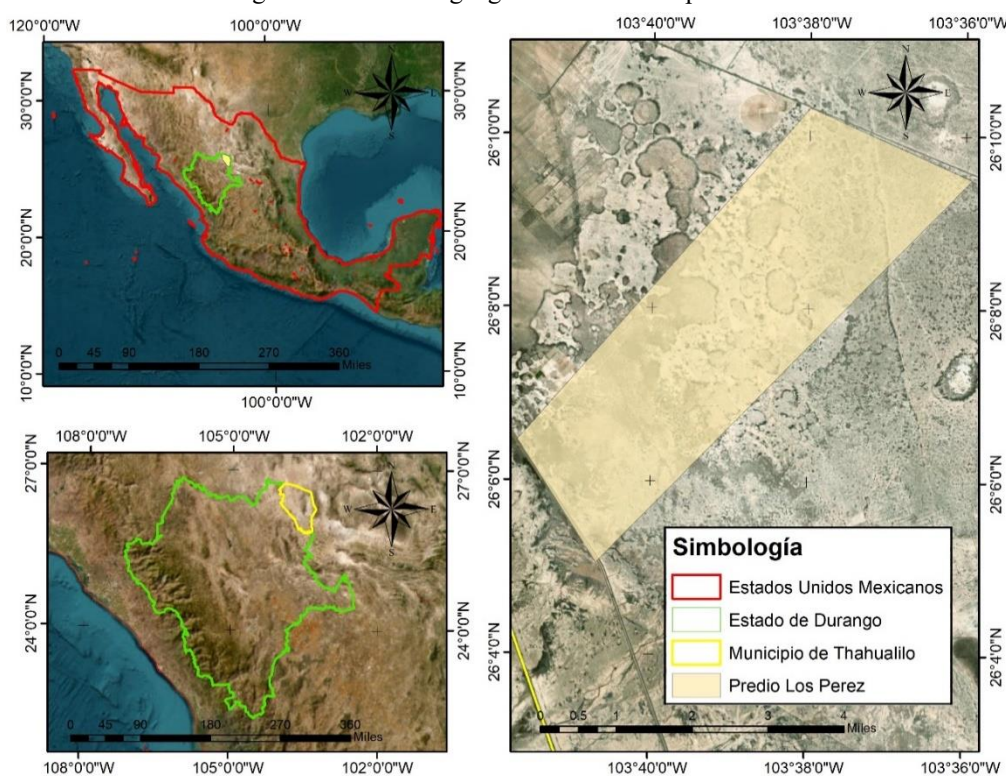
predicción de la biomasa del pastizal y la cobertura vegetal estimada de fotografías digitales.

2 METODOLOGÍA

2.1 LOCALIZACIÓN

El presente estudio se realizó en el predio ganadero Los Pérez, municipio de Tlahualilo, Durango, ubicado al noreste del estado en la zona de amortiguamiento de la Reserva de la Biósfera de Mapimí, en las coordenadas 26° 06' 12" de latitud norte y 103° 26' 26" longitud oeste, a una altura de 1,095 metros sobre el nivel del mar (Figura 1).

Figura 1. Ubicación geográfica del sitio experimental.



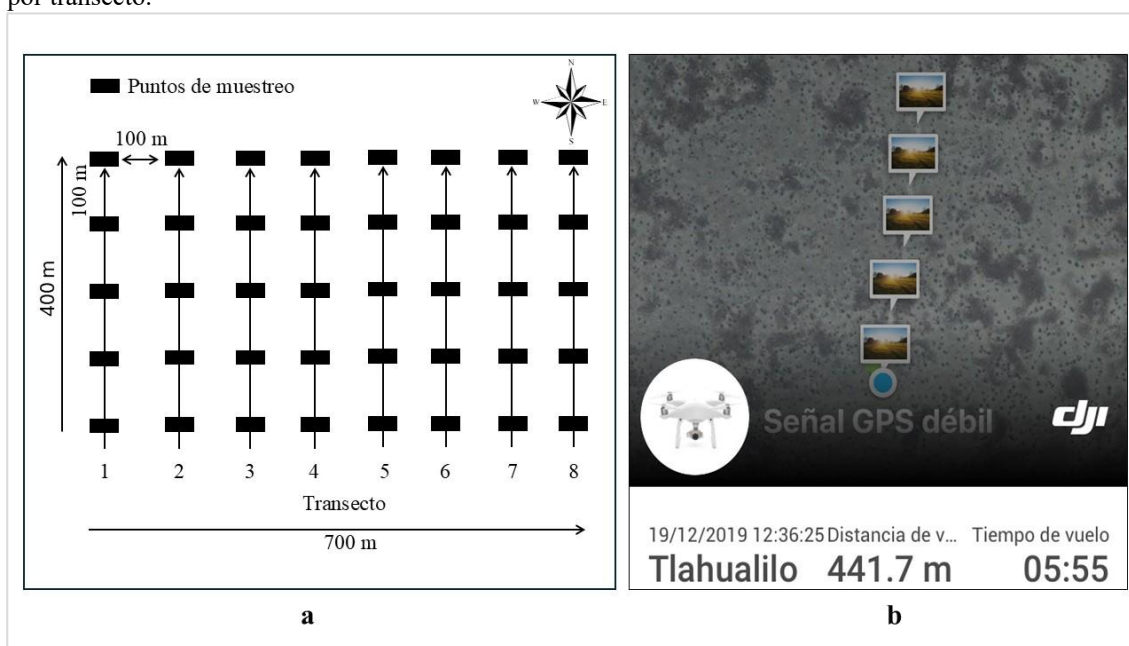
Fuente: Elaboración propia con datos de la CONABIO (2026).

El clima característico de este lugar es muy seco o estepario. La temperatura media anual es de 21°C y la precipitación media anual es de 211 milímetros. Existen dos periodos con relación a la precipitación pluvial, un periodo de bajas precipitaciones entre los meses de enero a junio y el periodo de lluvias entre los meses de junio a diciembre. La vegetación nativa del área de estudio está clasificada como pastizal halófilo dominado principalmente por pasto toboso (*Hilaria mutica*) en el estrato herbáceo y mezquite (*Prosopis laevigata*) en menor proporción en el estrato arbustivo.

2.2 UNIDADES DE MUESTREO

Se establecieron tres sitios de muestreo de aproximadamente 28 hectáreas cada uno, separado a una distancia entre ellos de 200 m distribuidos de norte a sur dentro del predio ganadero. Para la adquisición de los datos se planteó un muestreo sistemático, dentro de cada sitio se trazaron ocho transectos de 400 m de longitud cada uno, cada transecto contó con cinco puntos de muestreo. La distancia entre cada transecto fue de 100 m y la distancia entre cada punto de muestreo también fue de 100 m. Para cubrir de manera ordenada los puntos de muestreo, se diseñó un plan de vuelo por transecto (Figura 2).

Figura 2. a) representación esquemática del sitio de muestreo con $n=40$ puntos de muestreo de biomasa; b) plan de vuelo por transecto.

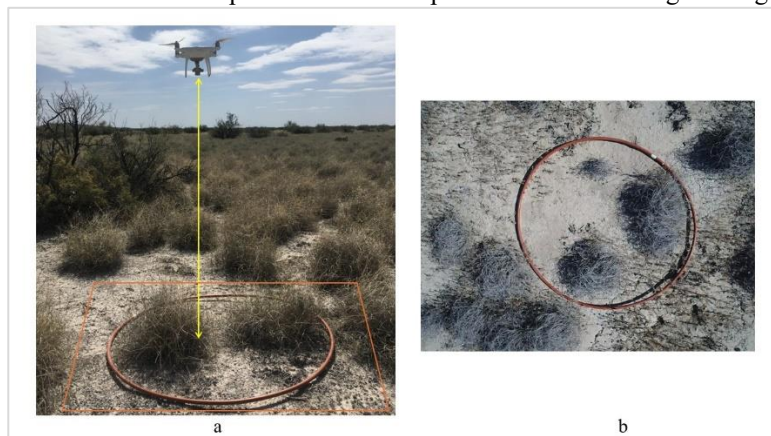


Fuente: Elaboración propia (2026).

2.3 MEDICIÓN DE VARIABLES

La unidad de muestro consistió en un aro de 1.6 m de diámetro (área de unidad de muestreo = 2.01 m^2) construido con manguera de poliuretano de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro color naranja. Sobre éstos se posicionó el dron (Marca DJI Phantom 4 Advanced con una cámara integrada con sensor de 20 megapíxeles) la cámara fue enfocada hacia el suelo de manera vertical a una altura que cubriera completamente la superficie de muestreo; esta se alcanzó a los 2.5 metros aproximadamente, hecho esto, se tomó la fotografía digital de manera consecutiva en los cinco puntos por transecto en un solo vuelo, posteriormente se repitió el procedimiento para los demás transectos (Figura 3).

Figura 3. a) posicionamiento del dron sobre punto de muestreo para la toma de la fotografía digital; b) imagen de salida.



Fuente: Elaboración propia (2026).

Una vez tomada la fotografía digital de cada punto de muestreo, se procedió a cosechar la biomasa aérea herbácea contenida dentro de la unidad experimental a 1 cm por encima del suelo, además, se tomaron las coordenadas geográficas de cada punto con un GPS (Modelo GARMIN 64s) y se registraron en un formato de campo. La biomasa se guardó en bolsas de papel Kraft las cuales fueron identificadas con el número de transecto, número de punto y fecha. Posteriormente, las muestras fueron puestas a secar hasta peso constante en la Facultad de Agricultura y Zootecnia. Finalmente, la producción de biomasa se expresó como rendimiento en gramos por metro cuadrado (g/m^2).

Para determinar el porcentaje de cobertura vegetal en las imágenes captadas por el dron, éstas fueron recuperadas de la memoria, posteriormente se procedió a analizarlas en el programa Cobcal (versión 2.1.0.63) (Ferrari *et al.*, 2009) como se muestra en las Figura 4.

Figura 4. Procesamiento de las imágenes digitales en el programa Cobcal (Versión 2.1.0.63) para determinar el porcentaje de cobertura vegetal.



CobCal v2.1.0.63

Fuente: Elaboración propia (2026)

Las mediciones de campo se realizaron en los meses de noviembre y diciembre del año 2019, y en los meses de octubre y noviembre del año 2022, estos meses corresponden al final de la atapa de crecimiento de la biomasa.

2.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis de la información obtenida se utilizó el programa estadístico Minitab 18. Se realizaron pruebas de rutina para corroborar la distribución normal a la variable de rendimiento, Se empleó el procedimiento análisis de regresión lineal simple, ajustándose en el siguiente modelo: $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1$. La variable independiente fue la cobertura vegetal y la variable dependiente el rendimiento. Se hicieron pruebas estadísticas para comprobar la validez de los modelos, así como para los coeficientes a un nivel de significancia de $P < 0.05$.

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Los datos obtenidos con las variables de estudio fueron sometidos a un análisis de estadística básica, los resultados encontrados se muestran en el Cuadro 1. La cobertura vegetal para los dos años de estudio fue diferente, sin embargo, los valores indican una mayor proporción de suelo desnudo. Esto se considera como normal sobre todo en pastizales de zonas áridas y semiáridas. Según Li *et al.* (2026) la cobertura de los pastizales es altamente heterogénea, con vegetación y parches de suelo desnudo que forman un mosaico complejo.

Cuadro 1. Estadística descriptiva de las variables evaluadas en los dos años de estudio.

Variable	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Sesgo	Curtosis
Cobertura vegetal (%) ₂₀₁₉	120	27.80	15.02	2.53	58.05	-0.08	-1.09
Cobertura vegetal (%) ₂₀₂₂	120	34.22	15.62	5.60	73.68	0.32	-0.66
Rendimiento (g/m ²) ₂₀₁₉	125	158.69	85.88	2.99	323.88	-0.10	-1.05
Rendimiento (g/m ²) ₂₀₂₂	120	211.20	76.03	27.86	348.26	-0.15	-0.69

N = Número de observaciones; Fuente: Elaboración propia (2026).

En cuanto al rendimiento de la biomasa también se observaron diferencias entre años del estudio. Fatichi *et al.* (2019) menciona que la productividad más significativa en los ecosistemas terrestres es la vegetación, que toma CO₂ de la atmósfera a través de la fotosíntesis y lo fija en el suelo y las plantas como biomasa, la cual varía en función de la composición florística y la estructura de la vegetación y, al igual que la mayoría de los procesos ecosistémicos, está ligada a la disponibilidad de agua. En este sentido, Choat *et al.* (2018) menciona que la sequía es uno de los factores de estrés más frecuentes que afectan las funciones del ecosistema vegetal. En la región de

estudio se han presentado de manera recurrente periodos de sequía prolongados que han afectado la productividad de forraje y por ende la productividad ganadera que depende directamente de esta fuente de alimentación.

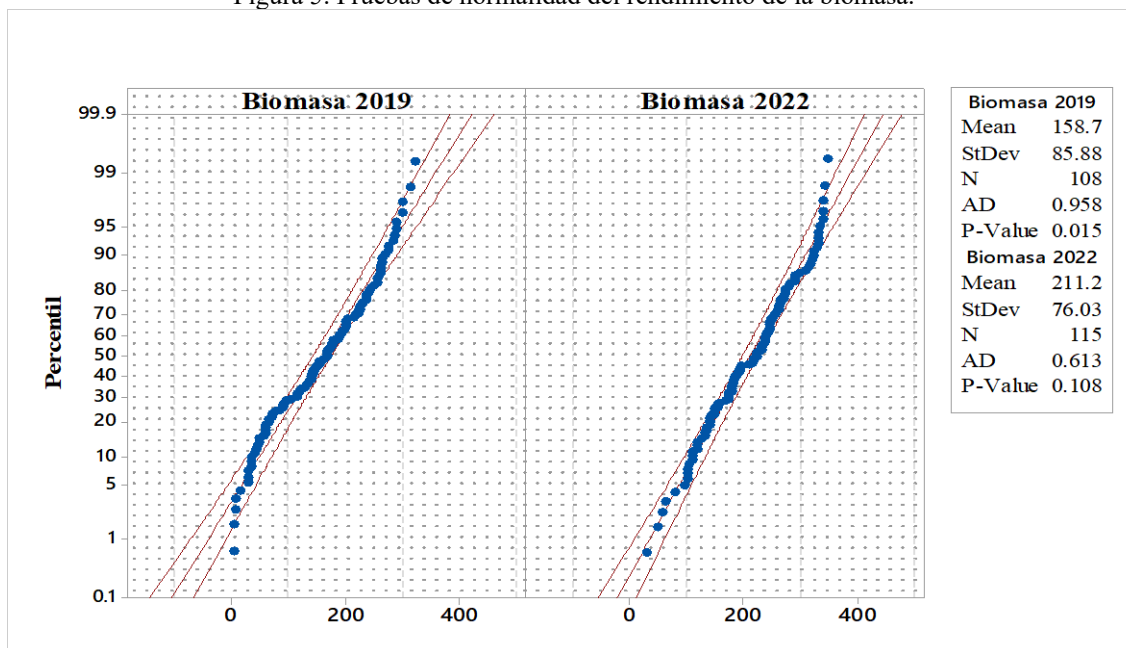
El rendimiento de la biomasa obtenido por año fue de 1.58 y 2.11 Mg/ha respectivamente. Estos valores son muy bajos comparados a los de Briones *et al.* (2018), ellos realizaron un metaanálisis sobre la producción de biomasa de pastizales áridos en México y encontraron en promedio 23.2 Mg/ha (error estándar, e. e. = 4.15 Mg/ha, n = 23 sitios). Dentro de las zonas áridas del estado de Durango, el municipio de Tlahualilo es la parte más seca del estado con apenas 200 a 230 mm de precipitación anual.

Una observación importante en el Cuadro 1, es que el rendimiento vario directamente con relación al porcentaje de cobertura vegetal. A medida que aumenta la cobertura vegetal entre los dos años, el rendimiento también aumenta, mostrando una asociación entre ambas variables.

3.2 GENERACIÓN DE MODELOS DE REGRESIÓN

Para la generación de los modelos de predicción de la biomasa y su validez estadística, se realizaron pruebas de normalidad a la variable rendimiento de la biomasa para los dos años de estudio, los resultados de la prueba Anderson-Darling mostraron que los datos provienen de una población normal (Figura 5).

Figura 5. Pruebas de normalidad del rendimiento de la biomasa.

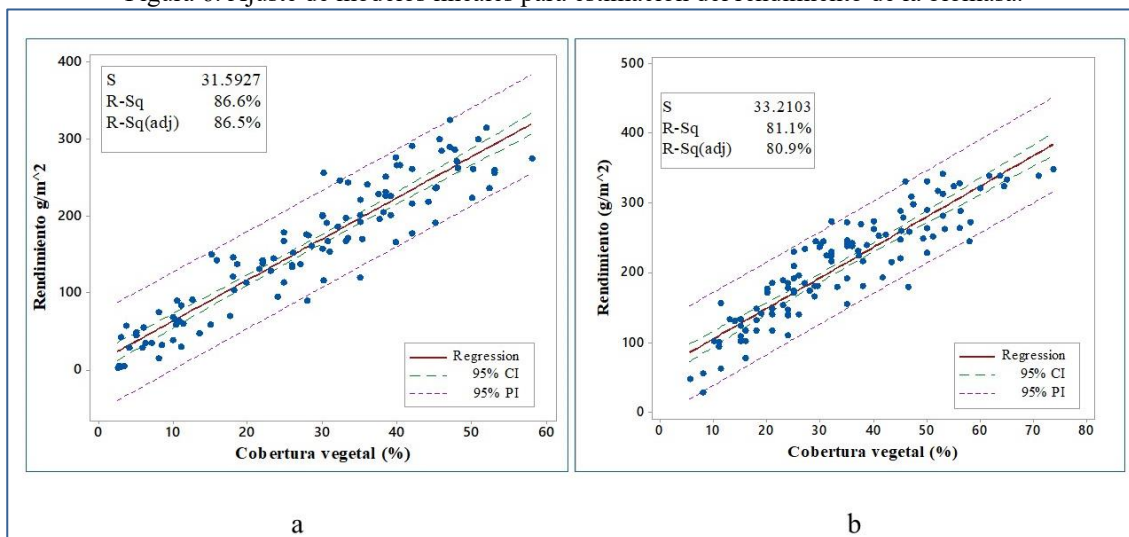


N = número de observaciones: Fuente: Elaboración propia (2026).

Una vez corroborada la distribución normal se realizó el apareamiento de las dos variables de estudio. El modelo generado para el año 2019 fue de forma lineal $Y = 10.77 + 5.321 X_1$; y para

el año 2022 $Y = 61.22 + 4.382 X_1$. Los coeficientes de correlación fueron de 86.9 y 80.9 % respectivamente, mostrando una correlación fuerte (Figura 6).

Figura 6. Ajuste de modelos lineales para estimación del rendimiento de la biomasa.

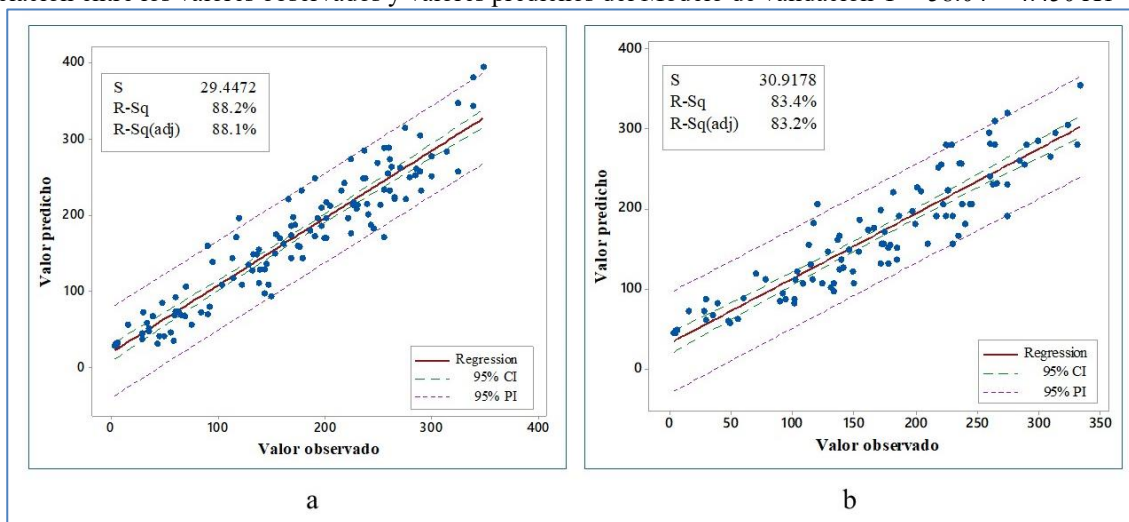


Fuente: Elaboración propia (2026).

Al contrastar estadísticamente los valores predichos de los modelos 2019 y 2022 a un valor de $p \leq 0.05$, estos fueron estadísticamente diferentes, lo que significa que no es factible predecir la biomasa de manera confiable en su variación entre años. Entonces para encontrar un modelo más confiable y robusto a esta variabilidad, se realizó la agrupación del total de datos y se numeraron del 1 al 240, se crearon dos subgrupos, números pares para el primer grupo y números impares para el segundo grupo. El primer grupo se utilizó para generar el Modelo predicción y el segundo grupo para construir el Modelo validación.

El modelo de predicción que mejor se ajustó a los datos fue $Y = 15.38 + 5.144X_1$ con una $R^2 = 88.18$ y la ecuación para el modelo de validación fue $Y = 58.04 + 4.450 X_1$ con $R^2 = 83.20$ (Figura 7). Ambos modelos fueron estadísticamente significativos a un valor de $p = 0.000$ respectivamente para la pendiente e intercepto. Se comprobaron los supuestos de validez de los modelos mediante la prueba Gauss Markov para los residuales cumpliendo con distribución normal, independencia y homocedasticidad a un valor $p = 0.000$.

Figura 7. (a) Relación entre los valores observados y valores predichos del Modelo de predicción $Y = 15.38 + 5.144X_1$. (b) Relación entre los valores observados y valores predichos del Modelo de validación $Y = 58.04 + 4.450 X_1$



Fuente: Elaboración propia (2026).

Nuevamente se contrastaron los valores predichos para ambos modelos con una prueba estadística de t de Student. Los resultados muestran que si es posible predecir los biomás a través del modelo $Y = 15.38 + 5.144X_1$ (Cuadro 3).

Cuadro 2. Comparación de los valores predichos de los modelos de predicción vs modelo de validación mediante la prueba de T Student a valor de $p \leq 0.05$.

Muestra	N	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media	T-Value	P-Value
Valores predichos Modelo Predicción	120	169.38	75.39	7.58	1.80	0.075
Valores predichos Modelo Validación	120	156.14	78.58	7.90		

N = número de observaciones Fuente: Elaboración propia (2026)

En las últimas décadas se han hecho esfuerzos por estimar la producción de biomasa de pastizales de una forma rápida y confiable con la finalidad de hacer gestión sostenible de estos ecosistemas (Butt *et al.*, 2011; Cong *et al.*, 2012; Ali & Kaul, 2025). Las metodologías más generalizadas consideran el uso de sensores remotos, como imágenes satelitales y datos de teledetección, los cuales permiten obtener información precisa y actualizada sobre la cobertura vegetal (Chen *et al.*, 2013; Dusseux *et al.*, 2022). Mediante el análisis de índices de vegetación como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), es posible cuantificar la biomasa de manera eficiente y a gran escala (Dujakovic *et al.*, 2024). Estos métodos facilitan el monitoreo continuo, la detección de áreas degradadas y la planificación de estrategias de conservación (Michez *et al.*, 2019).

Con relación al uso del NDVI, existen diferentes limitaciones como son la saturación del índice en cuando la cobertura vegetal es alta, lo que significa que deja de ser sensible a incrementos adicionales de biomasa (Wang *et al.*, 2025). También presenta limitaciones espectrales al utilizar solo dos bandas espectrales (rojo e infrarrojo cercano), lo que limita su capacidad para discriminar entre diferentes tipos de vegetación o estados fenológicos, algo relevante en pastizales áridos donde la vegetación puede estar seca o en estado de estrés hídrico, lo que reduce la señal en el infrarrojo cercano y puede llevar a subestimar la biomasa presente (Zhu *et al.*, 2024).

Lo mencionado anteriormente, tiene relevancia para el monitoreo de áreas extensas de pastizales a nivel regional, pero ¿qué pasa con la información necesaria a nivel de predios ganaderos que necesitan de estas estimaciones particulares para hacer mejores planes de manejo y utilización? Aquí es donde se justifica el uso de imágenes de alta resolución tomadas desde drones que permitan estimar la cobertura vegetal y validar con información obtenida de campo para mejora la precisión de las estimaciones a través de modelos matemáticos.

Théau *et al.* (2021) realizaron un experimento en el que el objetivo fue probar y comparar tres enfoques basados en imágenes adquiridas por UAV para estimar la biomasa de forraje o la cobertura vegetal en pastizales, Realizaron regresiones lineales entre los valores de biomasa en fresco y seco, encontraron valores similares a los reportados en nuestro estudio, $R^2 = 0.93$ y 0.94 para la biomasa fresca y seca, respectivamente.

Chávez *et al.* (2017) reportaron correlaciones superiores a las de nuestro estudio de $R^2 = 0.98$, utilizó fotografías digitales para la estimación de la cobertura vegetal aérea usando métodos de clasificación supervisada además de muestreos para la estimación de la producción de biomasa de pastizales en seis estados en México. Sin embargo, los datos procesados corresponden a la fase lineal de la etapa de crecimiento vegetativo y nosotros consideramos la disponibilidad de biomasa anual.

Los resultados obtenidos en nuestro trabajo y comparado con estudios similares es muy limitado en cuanto a la metodología empleada, existen trabajos con el uso de fotografías obtenidas por dron y la estimación del dosel o la cobertura vegetal, pero incluyen además el cálculo indirecto de la altura de la vegetación que puede generar geometría 3D según los principios de la fotogrametría (Barnetson *et al.*, 2020).

Dentro de los aportes de nuestro trabajo a la predicción de la producción de biomasa de pastizales, utilizamos un dron comercial asequible que nos genera imágenes digitales con una excelente resolución espacial, para obtener la cobertura vegetal de las imágenes se utilizó un software libre que no es difícil en su manipulación. De esta manera con la metodología simplificada

aquí utilizada consideramos que si es factible realizar inventarios de la biomasa sin la necesidad de hacer inversiones en equipo de medición de alto costo.

4 CONCLUSIÓN

El presente estudio propone un método simple para estimar el rendimiento de la biomasa de pastizales a través de la relación con la cobertura vegetal, se obtuvo un modelo de regresión lineal simple para los dos años de evaluación del estudio.

Se encontró una correlación fuerte entre las dos variables de estudio, demostrando demuestran que la cobertura vegetal derivada de imágenes RGB es un adecuado indicador de fluctuación de la biomasa.

Se probó la calidad del modelo de predicción a través de validación cruzada con la retención del 50 % de los datos. La variación intra anual es una característica inherente a los ecosistemas de pastizal debido a las condiciones climáticas cambiantes, precipitación y uso antrópico, pero con la combinación de los datos de los dos años de estudio se construyó un modelo de predicción más robusto que logro predecir la biomasa estadísticamente igual que el modelo de validación.

Las limitaciones del presente trabajo fueron, por un lado, que el modelo de predicción de la biomasa es solo para un predio ganadero particular muy homogéneo con dominancia de zacate toboso (*Hilaria mutica*) y el tamaño de muestra recabado es poco con relación al tamaño del predio en cuestión.

Para futuras investigaciones en esta línea, se recomienda ampliar el tamaño de muestra y probar la efectividad de los modelos de regresión generados con esta metodología en otros predios ganaderos con condiciones de heterogeneidad: tanto en variabilidad de especies y productividad inter e intra anual de la biomasa.

REFERENCIAS

- ALI, A.; Kaul, H.-P. Monitoring Yield and Quality of Forages and Grassland in the View of Precision Agriculture Applications—A Review. *Remote Sens.* 2025, 17, 279. <https://doi.org/10.3390/rs17020279>
- AYVAZYAN, G.; Muradyan, V.; Medvedev, A.; Khlghatyan, A.; Asmaryan, S. Exploring Multisource Remote Sensing for Assessing and Monitoring the Ecological State of the Mountainous Natural Grasslands in Armenia. *Appl. Sci.* 2024, 14, 10205. DOI: 10.3390/app142210205
- Barnetson, J., Phinn, S. y Scarth, P. (2020). Estimación de la biomasa y la calidad de los pastos vegetales a partir de imágenes de UAV en los pastizales de Queensland. *AgriEngineering*, 2 (4), 523-543. <https://doi.org/10.3390/agriengineering2040035>
- BEUKES, P.C.; McCarthy, S.; Wims, C.M.; Gregorini, P.; Romera, A.J. Regular estimates of herbage mass can improve profitability of pasture-based dairy systems. *Anim. Prod. Sci.* 2019, 59, 359–367. DOI: 10.1071/AN17166
- Blumetto, O. (2024). Manejo de invasiones de especies exóticas en procesos de restauración de Monte Parque en la región sur de Uruguay: Management of exotic species invasions in Monte Parque restoration processes in the southern region of Uruguay. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(1), 764–769. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n1-059>
- BRIONES, o.; Búrquez, A.; Martínez-Yrizar, A.; Pavón, N.; Perroni Y. Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y bosques*, 2018, vol. 24, Suppl., e2401898, Instituto de Ecología A.C. DOI: 10.21829/myb.2018.2401898, <https://www.redalyc.org/journal/617/61766247002/html/>
- BUTT, B. M., Turner, D., Singh, A., Brottem, L. (2011). Use of MODIS NDVI to evaluate changing latitudinal gradients of rangeland phenology in Sudano-Sahelian West Africa. *Remote Sensing of Environment* 115(12):3367–3376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.001>
- CHÁVEZ, C. E., Paz P. F., y Bolaños G. M. A. (2017). Estimation of biomass and aerial cover using radiometry and digital images at the field level in grasslands and shrublands. *Terra Latinoamericana*, 35(3), 247-257. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i3.133>
- CHEN, Z., Shao, Q., Liu, J., Wang, J. (2012). Analysis of net primary productivity of terrestrial vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau, based on MODIS remote sensing data. *Science China Earth Sciences* 55(8):1306–1312. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-012-4389-0>
- CHO, W.; Brorsen, B.W.; Biermacher, J.T.; Rogers, J.K. Rising plate meter calibrations for forage mass of wheat and rye. *Agric. Environ. Lett.* 2019, 4, 180057. DOI: 10.2134/acl2018.11.0057
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Geoportal CONABIO 2026. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Sitio web: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> Fecha de acceso: 12 de diciembre de 2025.
- CONG, N., Piao, S.L., Chen, A.P., Wang, X.H., Lin, S.P., Chen, S.J., Han, G.S., Zhou, X.P, Zhang. (2012). Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: A multiple model analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 165:104–113. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.009>

DE MORAIS, L.F.; Cavalcante, A.C.R.; Aquino, D.D.N.; Candido, M.J.D. Remote sensing applied to grassland ecosystems in regions with climatic vulnerability. *Ed. Cient. Digit.* 2022, 7, 151–164. DOI: 10.37885/221010540

DUJAKOVIC, A.; Watzig, C.; Schaumberger, A.; Klingler, A.; Atzberger, C.; Vuolo, F. Mejora de la detección de cortes de pastizales mediante series temporales de Sentinel-2 mediante la integración de datos meteorológicos y de SAR de Sentinel-1. *SRRN* 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101453>

DUSSEUX, P.; Guyet, T.; Pattier, P.; Barbier, V.; Nicolas, H. Monitoring of grassland productivity using Sentinel-2 remote sensing data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2022, 111, 102843. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102843>

FERRARI, D.M., Pozzolo, O.R. & Ferrari, H.J. (2009). CobCal, software for vegetation cover estimation. National Institute of Agricultural Technology, EEA Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina. https://www.produccion-animal.com.ar/software/02-cobertura_vegetal.pdf

GCAYI, SR; Adelabu, SA; Nduku, L.; Chirima, JG. A bibliometric analysis for remote sensing applications in bush encroachment mapping of grassland and savanna ecosystems. *Applied Geomatics* 16, 881–896 (2024). DOI: 10.1007/s12518-024-00589-0

GODÍNEZ-ALVAREZ, H.; Herrick, J.E.; Mattocks, M.; Toledo, D.; Van Zee, J. Comparison of three vegetation monitoring methods: Their relative utility for ecological assessment and monitoring. *Ecol. Indic.* 2009, 9, 1001–1008. DOI: 10.1016/j.ecolind.2008.11.011

HU, T.; Cao, M.; Zhao, X.; Liu, X.; Liu, Z.; Liu, L.; Huang, Z.; Tao, S.; Tang, Z.; Guo, Y. High-resolution mapping of grassland canopy cover in China through the integration of extensive drone imagery and satellite data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2024, 218, 69–83. DOI: 10.2134/ael2018.11.0057

HUA, R.; Ye, G.; De Giuli, M.; Zhou, R.; Bao, D.; Hua, L.; Niu, Y. Decreased species richness along bare patch gradient in the degradation of Kobresia pasture on the Tibetan Plateau. *Ecol. Indic.* 2023, 157, 111195. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111195

JIANG, A.; Dong, Y.; Asitaiken, J.; Zhou, S.; Nie, T.; Wu, Y.; Liu, Z.; An, S.; Yang, K. Response of soil fungal communities and their co-occurrence patterns to grazing exclusion in different grassland types. *Front. Microbiol.* 2024, 15, 1404633. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1404633

KINIRY, J.R.; Kim, S.; Meki, M.N.; Johnson, M.V.V. Forage Yield Estimation with a Process-Based Simulation Model. In *Forage Groups*; IntechOpen: London, UK, 2018. <https://www.intechopen.com/chapters/62830>

LEEuw, J.d.; Rizayeva, A.; Namazov, E.; Bayramov, E.; Marshall, M.T.; Etzold, J.; Neudert, R. Application of the MODIS MOD 17 Net Primary Production product in grassland carrying capacity assessment. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2019, 78, 66–76. DOI: 10.1016/j.jag.2018.09.014

LI, J., Chen, J., Cheng, X., Yin, J., Cheng, Q., You, H., Han, X., & Li, X. (2026). Multidimensional Validation of FVC Products over Qinghai–Tibetan Plateau Alpine Grasslands: Integrating Spatial

Representativeness Metrics with Machine Learning Optimization. *Remote Sensing*, 18(2), 228. <https://doi.org/10.3390/rs18020228>

LI, M.; Wang, J.; Li, K.; Liu, Y.; Ochir, A.; Davaasuren, D. Assessment of grazing livestock balance on the Eastern Mongolian Plateau based on remote sensing monitoring and grassland carrying capacity evaluation. *Sci. Rep.* 2024, 14, 32151. DOI: 10.1038/s41598-024-84215-4

MICHEZ, A.; Lejeune, P.; Bauwens, S.; Herinaina, A.A.L.; Blaise, Y.; Castro Muñoz, E.; Lebeau, F.; Bindelle, J. Mapping and monitoring of biomass and grazing in pasture with an unmanned aerial system. *Remote Sens.* 2019, 11, 473. <https://doi.org/10.3390/rs11050473>

MURPHY, D.J.; O'Brien, B.; Hennessy, D.; Hurley, M.; Murphy, M.D. Evaluation of the precision of the rising plate meter for measuring compressed sward height on heterogeneous grassland swards. *Precis. Agric.* 2021, 22, 922–946. DOI: 10.1007/s11119-020-09765-9

NANA, Y.; Weiwei, Z.; Wu, B.; Tuvdendorj, B.; Chang, S.; Mishigdorj, O.; Zhang, X. Assessment of the grassland carrying capacity for winter-spring period in Mongolia. *Ecol. Indic.* 2023, 146, 109868. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.109868

Tenorio, D. R., Piña, F. J. G., Ramos, J. M. S., Canales, A. E., Rivera, J. I. R., Salas, L. C. M., & González, R. C. (2025). Efectos del cambio climático en los pastizales de México. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 8(4), e84794. <https://doi.org/10.34188/bjaerv8n4-242>

WANG, D.; Shao, Q.; Yue, H. Surveying wild animals from satellites, manned aircraft and unmanned aerial systems (UASs): A review. *Remote Sens.* 2019, 11, 1308. DOI: 10.3390/rs11111308

WANG, Z.; Wang, J.; Wang, W.; Zhang, C.; Mandakh, U.; Ganbat, D.; Myanganbuu, N. An Explanation of the Differences in Grassland NDVI Change in the Eastern Route of the China–Mongolia–Russia Economic Corridor. *Remote Sens.* 2025, 17, 867. <https://doi.org/10.3390/rs17050867>

ZHU, S.; Chen, X.; Zhang, C.; Fang, X.; Cao, L. Carbon variation of dry grasslands in Central Asia in response to climate controls and grazing appropriation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022, 29, 32205–32219. DOI: 10.1007/s11356-022-18542-2

ZHU, X.; Li, Q.; Guo, C. Evaluation of the monitoring capability of various vegetation indices and mainstream satellite band settings for grassland drought. *Ecological Informatics* Volume 82, September 2024, 102717. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102717>