

Use of unmanned aerial vehicles for estimating carbon storage in subtropical shrubland aboveground biomass

Uso de vehículos aéreos no tripulados para la estimación de almacén de carbono en biomasa aérea de matorral subtropical

Masuly G. Vega-Puga¹; José R. Romo-León^{1*}; Alejandro E. Castellanos¹; Reyna A. Castillo-Gómez¹; Jaime Garatuza-Payán²

¹Universidad de Sonora, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Bulevar Luis Encinas y Rosales s/n, col. Centro. C. P. 83000. Hermosillo, Sonora, México.

²Instituto Tecnológico de Sonora, Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente. Calle 5 de febrero 818 sur, col. Centro. C. P. 85000. Ciudad Obregón, Sonora, México.

*Corresponding author: jose.romo@unison.mx; tel.: +52 662 259 2169 ext. 1735.

Abstract

Introduction: Carbon storage studies in arid and semi-arid zones are limited. The use of UAVs (unmanned aerial vehicles) has made it easier to monitor areas of interest, which is difficult with more costly techniques.

Objective: The aim of this study is to develop predictive models, using aerial images, to estimate aboveground carbon biomass (ABCS) in subtropical shrub species of Sonora.

Materials and methods: ABCS of tree species (>2 m in height) was estimated using field-collected metrics and allometric equations. Remote vegetation metrics (camera mounted on UAV) were obtained using both manual methods (digitization) and automated methods (ForestTools algorithm). Non-parametric tests (Wilcoxon) were conducted to determine differences between field metrics and aerial image metrics. These were used to construct predictive models of individual-level ABCS.

Results and discussion: The Wilcoxon test indicated that the maximum crown height estimated in the field and with both approaches is similar ($P > 0.05$), while crown area and crown volume *in situ* showed no significant differences ($P > 0.05$) with the manual approach but shows significant differences with the automated approach ($P < 0.05$). The predictive models of aboveground carbon biomass (ABCS) with remote approaches were statistically significant ($P < 0.001$). This suggests that carbon estimation using images can explain the variability of the reference method at the individual level.

Conclusion: Aerial imagery is a viable and practical tool for estimating ABCS of trees and shrubs in arid/semiarid communities.

Keywords: ForestTools algorithm; manual digitizing; allometric equations; aerial imagery; arid zones.

Resumen

Introducción: Los estudios de almacenamiento de carbono en zonas áridas y semiáridas son escasos. El uso de VANT (vehículos aéreos no tripulados) ha facilitado el monitoreo de zonas de interés, lo cual es difícil con técnicas que implican un costo mayor.

Objetivo: Desarrollar modelos predictivos, mediante el uso de imágenes aéreas, para la estimación de almacén de carbono en biomasa aérea (ACBA) en especies de matorral subtropical de Sonora.

Materiales y métodos: Se estimó el ACBA de especies leñosas (>2 m de altura) con métricas recabadas en campo y ecuaciones alométricas. Las métricas de vegetación remotas (cámara montada en VANT) se obtuvieron acorde con los métodos manual (digitalización) y automatizado (algoritmo ForestTools). Se hicieron pruebas no paramétricas (Wilcoxon) para determinar diferencias entre las métricas de campo y de imágenes aéreas. Estas se utilizaron para la construcción de modelos predictivos del ACBA a nivel individuo.

Resultados y discusión: La prueba de Wilcoxon indicó que la altura máxima de copa estimada en campo y con ambas aproximaciones es similar ($P > 0.05$), mientras que el área de copa y volumen de copa *in situ* no presentan diferencia significativa ($P > 0.05$) con la aproximación manual, pero sí con la automatizada ($P < 0.05$). Los modelos predictivos de ACBA con aproximaciones remotas fueron estadísticamente significativos ($P < 0.001$). Esto sugiere que la estimación de carbono con imágenes es capaz de explicar la variabilidad del método de referencia a nivel individuo.

Conclusión: Las imágenes aéreas constituyen una herramienta viable y práctica para la estimación de ACBA de árboles y arbustos en comunidades áridas/semiáridas.

Palabras clave: algoritmo ForestTools; digitalización manual; ecuaciones alométricas; imágenes aéreas; zonas áridas.

Please cite this article as follows (APA 7): Vega-Puga, M. G., Romo-León, J. R., Castellanos, A. E., Castillo-Gómez, R. A., & Garatuza-Payán, J. (2024). Use of unmanned aerial vehicles for estimating carbon storage in subtropical shrubland aboveground biomass. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 30(2). <https://doi.org/10.544/r.rchscfa.2023.06.043>

Received: June 21, 2023 / Accepted: April 7, 2024



<https://revistas.chapingo.mx/forestales>

Introduction

Continuous and extensive monitoring of vegetation is necessary for the understanding of essential ecosystem processes such as carbon storage that has implications for natural resource availability and climate regulation (George & Schillebeeckx, 2018; Mclaughlin et al., 2017). Understanding the aboveground biomass carbon (ABCS) storage is fundamental, not only because it represents about 30 % of the total carbon in terrestrial ecosystems, but also because the ability of communities to exchange and store this element depends on this reservoir (Kumar & Mutanga, 2017). Tree species, possess the greatest capacity for carbon storage within communities, attributed to amount of biomass contained in their structures (Bradley et al., 2006; Montaña et al., 2016). Thus, studying aboveground carbon biomass (ABCS) in tree species is key to improving our understanding of the carbon storage process in ecosystems.

Several carbon storage studies have been conducted in ecosystems of temperate zones and tropics; however, research in arid and semi-arid areas is limited (Biederman et al., 2018; Briones et al., 2018; Issa et al., 2020; Montaña et al., 2016). This highlights a lack of crucial information, as arid and semi-arid areas cover a significant portion of the Earth's surface (>40 %) and influence interannual variation in the global carbon cycle, a dynamic affected by the continuous and extensive pressure of human activities (Ahlström et al., 2015; Biederman et al., 2018; Poulter et al., 2014). Given these factors, the absence of carbon-related studies in arid areas represent a significant knowledge gap that should be addressed, to achieve a responsible management of ecosystems and the conservation of their processes.

In recent years, the use of remote sensors (e.g., RGB, multispectral, and thermal) mounted on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and photogrammetric techniques for vegetation monitoring have been incorporated (Iglhaut et al., 2019; Kim & Chung, 2021; Sun et al., 2021), increased the capacity to collect information at high spatial and temporal resolution. Studies using sensors mounted on UAVs have helped in the vegetation classification, census, and characterization (Cornejo-Denman et al., 2018; Gallardo-Salazar & Pompa-García et al., 2020; Vivar-Vivar et al., 2021), and more recently, the estimation of aboveground biomass (Holiaka et al., 2021; Navarro et al., 2020). Among the advantages of the continuous use of UAVs in vegetation studies are the accessibility and availability of specialized equipment and software to carry out geospatial routines with high precision (Creasy et al., 2021; Holiaka et al., 2021; Kim & Chung, 2021; Navarro et al., 2020). This facilitates the continuous

Introducción

El monitoreo continuo y extensivo de la vegetación es necesario para la comprensión de procesos ecosistémicos esenciales como el almacenamiento de carbono que tiene implicaciones en la disponibilidad de recursos naturales y en la regulación climática (George & Schillebeeckx, 2018; Mclaughlin et al., 2017). El conocimiento del almacén de carbono en biomasa aérea (ACBA) es fundamental, no solo porque representa alrededor del 30 % del carbono total en los ecosistemas terrestres, sino también porque de este reservorio depende que las comunidades mantengan su habilidad de intercambio y almacenamiento de tal elemento (Kumar & Mutanga, 2017). Particularmente, las especies leñosas representan el componente con mayor capacidad de almacenamiento en las comunidades, debido a la magnitud de su estructura (Bradley et al., 2006; Montaña et al., 2016). De este modo, el estudio de ACBA en especies leñosas es clave para mejorar el entendimiento sobre el proceso de almacenamiento de carbono en los ecosistemas.

Varios trabajos de almacenamiento de carbono se han realizado en ecosistemas de zonas templadas y tropicales; sin embargo, los estudios de zonas áridas y semiáridas son escasos (Biederman et al., 2018; Briones et al., 2018; Issa et al., 2020; Montaña et al., 2016). Lo anterior denota falta de información importante, ya que las zonas áridas y semiáridas ocupan gran extensión de la superficie terrestre (>40 %) e influyen en la variación interanual del ciclo del carbono global, dinámica que se ve afectada por la presión continua y extensiva de las actividades humanas (Ahlström et al., 2015; Biederman et al., 2018; Poulter et al., 2014). Por todo lo mencionado, la falta de estudios relacionados con el carbono en zonas áridas constituye un hueco de información que debe ser atendido para el manejo responsable de los ecosistemas y conservación de sus procesos.

En los últimos años se ha incorporado el uso de sensores remotos (v. g. RGB, multiespectral y térmica) montados en vehículos aéreos no tripulados (VANT) y técnicas fotogramétricas para el monitoreo de vegetación (Iglhaut et al., 2019; Kim & Chung, 2021; Sun et al., 2021), lo cual ha incrementado la capacidad para recabar información con gran resolución espacial y temporal. Los estudios que han utilizado sensores montados en VANT han permitido la clasificación, censo y caracterización de la vegetación (Cornejo-Denman et al., 2018; Gallardo-Salazar & Pompa-García et al., 2020; Vivar-Vivar et al., 2021) y, recientemente, la estimación de biomasa aérea (Holiaka et al., 2021; Navarro et al., 2020). Entre las ventajas que han impulsado el uso continuo de VANT en los estudios de la vegetación se encuentran la accesibilidad y oferta

monitoring of areas of interest, which is challenging with techniques involving higher costs (Briones et al., 2018; Gallardo-Salazar & Pompa-García, 2020; Pordel et al., 2018). As a result, technologies including the use of UAVs for capturing aerial images are increasingly being utilized (Sun et al., 2021). However, to understand the value of these approaches, their systematic evaluation is necessary.

The objective of this study was to develop predictive models using high-resolution aerial images, for the estimation of ABCS in tree species of representative communities of subtropical scrub, in the central Sonora. Specifically, morphological metrics obtained with photogrammetric techniques and RGB images were used as explanatory variables in the ABCS models at the individual scale. Specifically, morphological metrics obtained using photogrammetric techniques and RGB images were used as explanatory variables in individual-scale ABCS models.

Materials and Methods

The aboveground carbon biomass of tree species was estimated using morphological metrics collected in the field (direct sampling) and allometric equations. Subsequently, vegetation metrics were obtained through aerial images (remote sampling), according to two methods: manual (digitization) and automatic (algorithm). Finally, using these metrics, predictive models of individual-level ABCS were generated.

Study Area

The study site is located at rancho El Churi, between latitudes 28° 40' and 28° 45' N, and meridians 110° 30' and 110° 35' W, municipality of La Colorada, Sonora (Figure 1). Climatic conditions are semi-arid according to the De Martonne aridity index (Acuña-Acosta et al., 2021). Average annual temperature is 22.8 °C, with maximums around 40 °C and minimums of 5 °C. Mean annual precipitation (476 mm) occurs in summer (July-September) and winter (December-February), with summer events contributing the majority (65 % to 85 %) of the total annual precipitation (Castellanos et al., 2022; Hinojo-Hinojo et al., 2019). The site shows high interannual variability in precipitation events, primarily influenced by the El Niño/Southern Oscillation (ENSO; interannual scale) and Pacific Decadal Oscillation (PDO; decadal scale) phenomena (Arriaga-Ramírez et al., 2010; Choza-Farías et al., 2021).

The dominant vegetation community is subtropical shrubland, and the land use is primarily for livestock grazing. As a result, the forage capacity of the native ecosystem has increased through selective clearing of tree species for the establishment of the exotic buffel

de equipos y programas especializados, para llevar a cabo rutinas geoespaciales con precisión alta (Creasy et al., 2021; Holiaka et al., 2021; Kim & Chung, 2021; Navarro et al., 2020). Esto facilita el monitoreo continuo de zonas de interés, lo cual es difícil con técnicas que implican un costo mayor (Briones et al., 2018; Gallardo-Salazar & Pompa-García, 2020; Pordel et al., 2018). Por lo anterior, las tecnologías que incluyen el uso de VANT para la captura de imágenes aéreas están siendo cada vez más utilizadas (Sun et al., 2021); sin embargo, con el fin de entender el valor de estas aproximaciones es necesaria su evaluación sistemática.

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar modelos predictivos, mediante el uso de imágenes aéreas de alta resolución, para la estimación de ACBA en especies leñosas de comunidades representativas de matorral subtropical en la región central de Sonora. Específicamente, se utilizaron métricas morfológicas obtenidas con técnicas fotogramétricas e imágenes RGB para su uso como variables explicativas en los modelos de ACBA a escala individuo.

Materiales y métodos

Se estimó el ACBA de especies leñosas con métricas morfológicas recabadas en campo (muestreo directo) y ecuaciones alométricas. Posteriormente, se obtuvieron métricas de vegetación a través de las imágenes aéreas (muestreo remoto), acorde con dos métodos manual (digitalización) y automático (algoritmo). Finalmente, utilizando estas métricas, se generaron modelos predictivos de ACBA a nivel individuo.

Sitio de estudio

El sitio de estudio se localiza en el rancho El Churi, entre los paralelos 28° 40' y 28° 45' N y los meridianos 110° 30' y 110° 35' O, en el municipio de La Colorada, Sonora (Figura 1). Las condiciones climáticas son semiáridas de acuerdo con el índice de aridez de De Martonne (Acuña-Acosta et al., 2021). La temperatura promedio anual es 22.8 °C con máximas de alrededor de 40 °C y mínimas de 5 °C. La precipitación media anual (476 mm) está constituida por eventos en verano (julio-septiembre) e invierno (diciembre-febrero), siendo los de verano los que aportan mayor proporción (65 % a 85 %) del total anual (Castellanos et al., 2022; Hinojo-Hinojo et al., 2019). El sitio presenta alta variabilidad interanual en los eventos de precipitación, los cuales obedecen principalmente a los fenómenos de El Niño/Oscilación sureste (ENSO; escala interanual) y Oscilación Decadal del Pacífico (PDO; escala decadal) (Arriaga-Ramírez et al., 2010; Choza-Farías et al., 2021).

La comunidad vegetal dominante es matorral subtropical y el uso de suelo es ganadero. Como

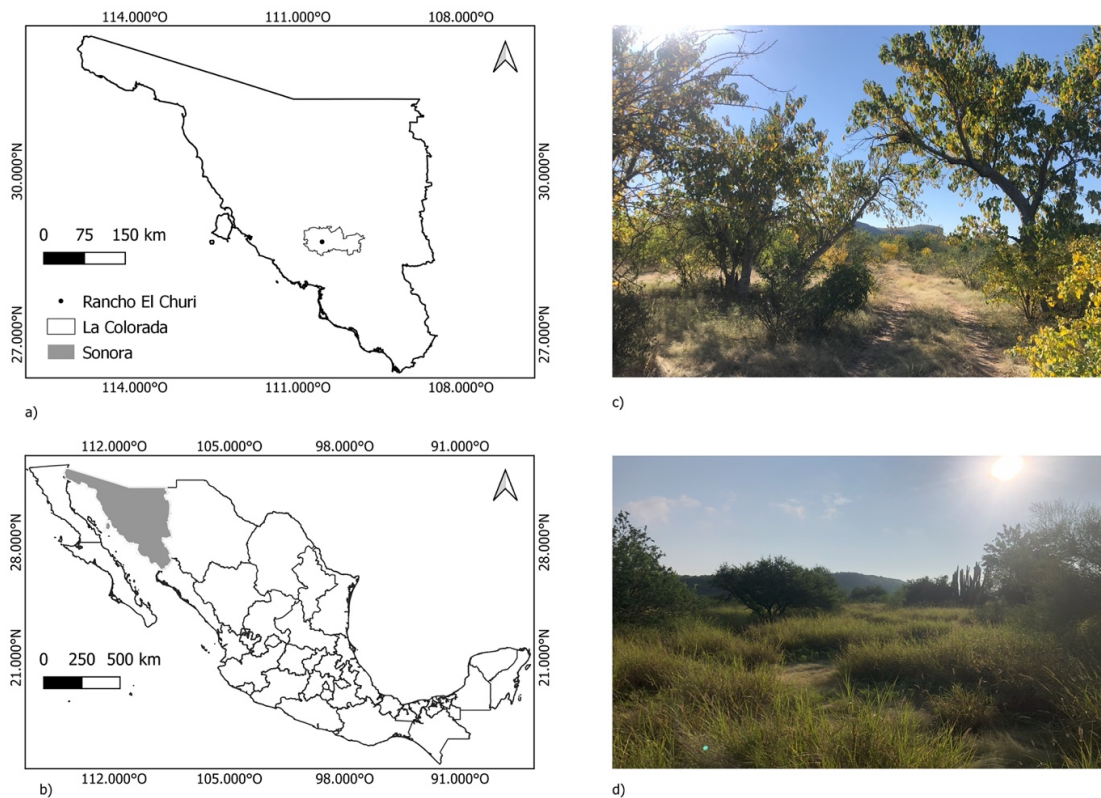


Figure 1. Location of study site in the state of Sonora (a and b), where c) subtropical scrubland and d) buffel grassland (*Cenchrus ciliaris*) predominate.

Figura 1. Localización de sitio de estudio en el estado de Sonora (a y b), donde predominan c) matorral subtropical y d) pradera de buffel (*Cenchrus ciliaris*).

grassland (*Cenchrus ciliaris* L). In the area, conspicuous stretches of modified subtropical shrubland converted into buffel grassland can be found (Hinojo-Hinojo et al., 2019).

Estimation of vegetation metrics in an open field

The census of individuals taller than 2 m was conducted during the summer (August, September, and October of 2019 and 2020), when vegetation is active and species identification is possible. The experimental design comprehended the selection of five sites in subtropical shrubland and five in buffel grassland, where 30 x 30 m quadrants (900 m²) were established, and trees taller than 2 m were measured. The following metrics were recorded for these individuals: a) maximum crown height using a clinometer (Suunto, Vantaa, Finland), b) two crown radii, measured orthogonally to each other with a measuring tape (r1 and r2), c) diameter at breast height (DBH), and d) location/coordinates of individuals using GPS (GPSMAP 62sc, Garmin Ltd, Kansas, United States). Height and radii metrics were used to estimate crown area ($A_c = r_1 * r_2 * \pi$) and crown volume ($V = A_c * \text{height}$) (Búrquez et al., 2010).

consecuencia de ello, la capacidad forrajera del ecosistema nativo ha incrementado a través del desmonte selectivo de especies leñosas, para el establecimiento de la especie exótica buffel (*Cenchrus ciliaris* L). En el sitio se pueden encontrar extensiones de matorral subtropical modificado a pradera de buffel (Hinojo-Hinojo et al., 2019).

Estimación de métricas de vegetación en campo

El censo de individuos mayores de 2 m de altura se hizo en verano (agosto, septiembre y octubre de 2019 y 2020), cuando la vegetación se encuentra activa y es posible la identificación de las especies. El diseño experimental consistió en la selección de cinco sitios en matorral subtropical y cinco de pradera de buffel, donde se ubicaron cuadrantes de 30 x 30 m (900 m²) y se midieron los individuos leñosos que cumplieran con los 2 m de altura. En estos individuos se registraron las siguientes métricas: a) altura máxima de copa con un clinómetro (Suunto, Vantaa, Finlandia), b) dos radios de copa, medidos ortogonalmente respecto uno del otro con cinta métrica (r1 y r2), c) diámetro a la altura de pecho (DAP) y d) ubicación/coordenadas de los individuos con

Aerial image processing

Aerial images were obtained using an RGB camera (FC350_3.6_4000x2250 camera, 12 MP, and 96° angle of view), mounted on a UAV (Phantom 3 Advanced, SZ DJI Technology Co, Shenzhen, Guangdong, China). The UAV-RGB system completed 10 missions (automated flights programmed in the Altizure Beta application [Intern at Shenzhen Zhuke Innovation Technology]) to collect image series corresponding to each ground-surveyed site, covering approximately 10 hectares. The missions adhered to the following parameters: a) 90 % frontal and side overlap, b) average altitude of 35 m, c) coverage of approximately 1 hectare of land, and d) initiation around 11:00 AM to avoid shadow effects. Additionally, flight days were selected to ensure minimal cloud cover and winds of no more than 10 km·h⁻¹.

The images were processed using the photogrammetry software Pix4Dmapper (v 3.1.23, Pix4D SA, Lausanne, Switzerland). This software employs the Structure from Motion and Multi-View Stereo (SfM-MVS) process, which follows the principles of stereoscopic photogrammetry. SfM-MVS automates the extraction of camera parameters from each image in the well-organized array with a high percentage of overlap to obtain the three-dimensional reconstruction of the captured scene (Escalante et al., 2016). It also refines spatial coordinates through an iterative process using non-linear least squares (Westoby et al., 2012). Based on the information from the SfM-MVS process, a point cloud (average density > 4000 points·m⁻²), a digital surface model (DSM), and an orthomosaic image were generated (Navarro et al., 2020; Özyeşil et al., 2017). Additionally, a digital terrain model (DTM) was created by interpolating visible ground points using a k-nearest neighbors' algorithm with inverse distance weighting (Navarro et al., 2020).

Subsequently, using the raster calculator in ArcMap version 10.1 program (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2011), crown height models (CHM = DSM - DTM) and crown volume models (CVM = CHM * X * Y) were obtained, where X and Y are width and length of the digital model cell, respectively. In conclusion, height and volume data for each individual were extracted from these models.

Estimating vegetation metrics with digital models

From the CHM and CVM, the location and remote metrics of visible individuals from the direct sampling plots were obtained in each orthomosaic. After localization, two approaches were established to obtain the crown area for each individual: manual and automated. The manual approach involved

GPS (GPSMAP 62sc, Garmin Ltd, Kansas, United States). Las métricas de altura y radios se utilizaron para estimar, a su vez, área de copa ($Ac = r1 * r2 * \pi$) y volumen de copa ($V = Ac * altura$) (Búrquez et al., 2010).

Procesamiento de imágenes aéreas

Las imágenes aéreas se obtuvieron con una cámara RGB (cámara FC350_3.6_4000x2250, 12 MP y ángulo de apertura 96°), montada en un VANT (Phantom 3 Advanced, SZ DJI Technology Co, Shenzhen, Guangdong, China). El conjunto VANT-RGB realizó 10 misiones (vuelos automatizados programados en la aplicación Altizure Beta [Intern at Shenzhen Zhuke Innovation Technology]) para recabar las series de imágenes correspondientes a cada sitio censado en terreno, cubriendo aproximadamente 10 ha. Las misiones cumplieron los parámetros siguientes: a) traslape frontal y lateral del 90 %, b) altura promedio 35 m, c) extensión de terreno aproximada de 1 ha y d) el inicio alrededor de las 11:00 A. M. para evitar el efecto sombra; además, se buscó que los días de vuelo no tuvieran nubosidad ni vientos mayores de 10 km·h⁻¹.

Las imágenes se procesaron en el programa de fotogrametría Pix4Dmapper (v 3.1.23, PIX4D SA, Lausanne, Switzerland). Este utiliza el proceso *Structure from Motion* y *Multi-View Stereo* (SfM-MVS), el cual se rige por las bases de fotogrametría estereoscópica. SfM-MVS automatiza la obtención de los parámetros de cámara provenientes de cada imagen del arreglo ordenado y con porcentaje alto de superposición, para obtener la construcción tridimensional de la escena registrada (Escalante et al., 2016), así como las coordenadas espaciales que son refinadas mediante un proceso iterativo que utiliza mínimos cuadrados no lineales (Westoby et al., 2012). Derivado de la información proveniente del proceso SfM-MVS se construyó una nube de puntos (densidad promedio > 4000 puntos·m⁻²), un modelo digital de superficie (DSM) y una imagen/ortomosaico (Navarro et al., 2020; Özyeşil et al., 2017). Por otra parte, se construyó un modelo digital de terreno (DTM), a partir de la interpolación de puntos visibles de suelo desnudo, utilizando un enfoque de k-vecinos más cercanos con una ponderación del inverso de la distancia (Navarro et al., 2020).

Posteriormente, utilizando la calculadora *raster*, en el programa ArcMap versión 10.1 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2011) se obtuvieron los modelos de altura de copa (MAC = DSM - DTM) y de volumen de copa (MVC = MAC * X * Y); donde, X y Y son ancho y largo de la celda que constituye el modelo digital, respectivamente. Finalmente, a partir de estos modelos se extrajeron los datos de altura y volumen por individuo.

manual digitization; that is, the contour of tree individuals present in the direct sampling plots was delineated using the orthomosaics and the ArcMap program. The second approach, automated, involved using algorithms from the ForestTools package of R program version 0.41.1 (Bartheleme et al., 2018), which identifies individuals and segments the crown area using digital height models. Prior to using this tool, it required determining a mathematical function that represented the relationship between crown diameter (twice the radius r) and height (Navarro et al., 2021), where field data were used to develop the model between these variables. Specifically, ForestTools uses a Variable Window Filter (VWF) for locating individuals based on CHM and the aforementioned mathematical function (Popescu & Wynne, 2013). It also employs a marker-controlled segmentation (MCS) algorithm that takes the output of VWF and the CHM for crown area segmentation, thereby creating an automated digital crown area model.

Having the digital layers of crown area from both manual and automated approaches, vegetation metrics at the individual level were obtained using statistical zone tools such as ArcMap tables. The crown area layers were used to select cells from the digital height and volume models corresponding to each of the trees and shrubs identified in the aerial images. Based on the information separated by individual, the maximum crown height was calculated by identifying the cell with the maximum height value. For crown volume, it was estimated by adding all the volume cells. This process was carried out using the digital crown area layers from each approach.

Estimating aboveground biomass carbon using field-measured vegetation metrics

Based on the vegetation metrics collected in the field, the biomass of trees and shrubs taller than 2 m was estimated using allometric equations at the species and community levels, as described in Table 1. For the dominant species *Ipomoea arborescens* Sweet and *Prosopis velutina* Wooton, biomass was calculated using a model constructed from data of individuals of the same species (McClaran et al., 2013; Rojas-García et al., 2015). For *Olneya tesota* A. Gray, given the similarity between the morphology of this species and *P. velutina*, the equation of the latter was adjusted using a correction factor of 1.25, representing the proportion of the wood density of *Olneya*, $0.99 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, relative to *Prosopis*, $0.79 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Silva, 2008). For other species, the non-linear model proposed by Búrquez et al. (2010) was used, which establishes the correlation between crown volume and aboveground biomass of open shrub vegetation. Following the estimation of aboveground biomass, the carbon storage in this reservoir was

Estimación de métricas de vegetación con modelos digitales

A partir de los MAC y MVC se obtuvo la ubicación y las métricas remotas de los individuos visibles de las parcelas de muestreo directo en cada ortomosaico. Posterior a la localización, se establecieron dos aproximaciones para la obtención del área de copa para cada individuo: manual y automatizado. La primera consistió en la digitalización manual; es decir, el contorno de individuos arbóreos presentes en las parcelas de muestreo directo se delineó usando los ortomosaicos y el programa ArcMap. La segunda aproximación, automatizada, consistió en el uso de los algoritmos del paquete ForestTools del programa R versión 0.41.1 (Bartheleme et al., 2018), el cual identifica los individuos y segmenta el área de copa utilizando modelos digitales de altura. De manera previa, el uso de esta herramienta requirió la determinación de una función matemática que representara la relación entre diámetro de copa (el doble del radio r) y altura (Navarro et al., 2021), en la cual se utilizaron los datos tomados en campo para la búsqueda del modelo entre estas variables. Específicamente, ForestTools utiliza un filtro de ventana variable (Variable Window Filter, VWF) para la localización de individuos a partir de MAC y de la mencionada función matemática (Popescu & Wynne, 2013). También utiliza un algoritmo de segmentación controlada de marcadores (marker-controlled segmentation, mcs) que toma como entrada el resultado de VWF y el MAC para la segmentación de área de copa y, de esta manera, crea un modelo digital de área de copa automatizada.

Al contar con las capas digitales de área de copa de las aproximaciones manual y automatizada, se obtuvieron las métricas de vegetación a nivel individuo por medio de las herramientas estadísticas por zona como tabla de ArcMap. Las capas de área de copa se emplearon para la selección de las celdas de los modelos digitales de altura y volumen, correspondientes a cada uno de los árboles y arbustos identificados en las imágenes aéreas. Con base en la información separada por individuo, se calculó la altura máxima de copa, buscando la celda con el valor máximo de altura, y en el caso de volumen de copa, se estimó a partir de la suma de todas las celdas de volumen. Este proceso se hizo con las capas digitales de área de copa de cada aproximación.

Estimación de carbono en biomasa aérea utilizando métricas de vegetación medidas en campo

A partir de las métricas de vegetación recabadas en campo se estimó la biomasa de los árboles y arbustos mayores de 2 m de altura, utilizando ecuaciones alométricas a nivel de especie y comunidad, descritas en el Cuadro 1. Para las especies dominantes *Ipomoea*

Table 1. Allometric equations for estimating aboveground biomass in subtropical shrub communities from field-collected metrics.

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa aérea en comunidades de matorral subtropical, a partir de métricas recabadas en campo.

Community or species/ Comunidad o especie	Equation/ Ecuación	Independent variable/ Variable independiente	Source/ Fuente
Scrubland/ Matorral	$y = 896.501x^{1.166}$	Crown volume (m ³)/ Volumen de copa (m ³)	Búrquez et al. (2010)
<i>Ipomoea arborescens</i> Sweet	$\ln(y) = -4.005 + 2.653(\ln x)$	Diameter at breast height (cm)/ Diámetro a la altura del pecho (cm)	Rojas-García et al. (2015)
<i>Prosopis velutina</i> Wooton	$\ln(y) = [0.67 + 1.55(\ln x)] * 1.06$	Crown area (m ²)	McClaran et al. (2013)
<i>Olneya tesota</i> A. Gray	$\ln(y) = [0.67 + 1.55(\ln x) * 1.06] * 1.25$	Crown area (m ²)	McClaran et al. (2013)

calculated by applying a conversion factor of 0.47, developed for arid and semiarid vegetation of Mexico, which indicates that 47 % of biomass is carbon (Briones et al., 2018).

Statistical Analysis

The statistical analysis was performed using the Rstudio software version 4.1.1 (R Foundation, 2021) in two stages. The first consisted of the evaluation of the vegetation metrics obtained from the aerial image products, and the second consisted of the construction and evaluation of the ABCS predictive models with these metrics.

Evaluation of vegetation metrics derived from digital models

Crown area, height and volume derived from direct sampling and those estimated from remote sampling (manual digitizing and ForestTools) were analyzed with Shapiro-Wilk tests to determine the normality of the metrics. Because the data did not meet the assumption of normality, non-parametric tests (Wilcoxon Rank-Sum) were performed to determine differences between field estimates and remote approximations. Secondly, the relationship between metrics obtained in the field and with aerial images was analyzed by linear regression, to understand whether those obtained via remote sensing can be used as a proxy for those obtained *in situ* (Montgomery et al., 2021; Shapiro & Wilk, 1965; Wilcoxon, 1992).

Construction of carbon storage predictive models in aerial biomass

To determine if there is multicollinearity among vegetation metrics obtained from aerial images, a Pearson correlation coefficient (r) analysis and variance

arborescens Sweet and *Prosopis velutina* Wooton se calculó la biomasa con un modelo construido a partir de datos de individuos de su misma especie (McClaran et al., 2013; Rojas-García et al., 2015). Para *Olneya tesota* A. Gray, dada la similitud entre la morfología de esta especie y *P. velutina*, se ajustó la ecuación de esta última por medio de un factor de corrección de 1.25 que representa la proporción de la densidad de la madera de *Olneya*, 0.99 g·cm⁻³, en relación con *Prosopis*, 0.79 g·cm⁻³ (Silva, 2008). En el caso de las demás especies, se utilizó el modelo no lineal propuesto por Búrquez et al. (2010), donde se establece la correlación entre volumen de copa y biomasa aérea de vegetación de matorral abierto. Posterior a la estimación de biomasa aérea, se calculó el almacén de carbono en este reservorio aplicando un factor de conversión de 0.47, desarrollado para vegetación árida y semiárida de México, el cual indica que 47 % de la biomasa es carbono (Briones et al., 2018).

Análisis estadístico

El análisis estadístico se hizo con el programa Rstudio versión 4.1.1 (R Foundation, 2021) en dos etapas. La primera consistió en la evaluación de las métricas de vegetación obtenida de los productos de las imágenes aéreas, y la segunda en la construcción y evaluación de los modelos predictivos de ACBA con estas métricas.

Evaluación de métricas de vegetación obtenidas con modelos digitales

El área de copa, altura y volumen obtenidos con el muestreo directo y los estimados a partir del muestreo remoto (digitalización manual y ForestTools) se analizaron con pruebas de Shapiro-Wilk, para determinar la normalidad de las métricas. Debido a que los datos no cumplieron con el supuesto de normalidad, se hicieron pruebas no paramétricas (Wilcoxon Rank-Sum) para determinar diferencias entre las estimaciones en el

inflation factors (VIF) were generated (Lindner et al., 2020). After establishing the presence or absence of collinearity, regression analyses (simple/multiple) were conducted to understand the contribution of variables to explain the variation of carbon storage in aboveground biomass of tree and shrub individuals (Montgomery et al., 2021).

Results and Discussion

Vegetation metrics estimated from field data

In the quadrats established for sampling, 117 trees and shrubs greater than 2 m in height were found, belonging to 13 species (Table 2). In the sites denominated as buffel grasslands, 20 individuals corresponding to four species were recorded, of which *O. tesota* (eight individuals) and *P. velutina* (nine individuals) dominated, while for the subtropical scrub, 97 individuals belonging to 10 species were recorded, with *I. arborescens* (23 individuals) and *O. tesota* (34 individuals) being the dominant ones. It should be noted that, combining the information from the two communities of interest, the species *I. arborescens* and *O. tesota* represent >50 % of the individuals sampled. The trees and shrubs surveyed had crown area ranging from 2.41 m² to 67.73 m², maximum crown height between 2.04 m and 6.55 m, and crown volume from 4.93 m³ to 389.15 m³. This natural variation is due to the demographic structure of the populations, the

terreno y las aproximaciones remotas. En segunda instancia, la relación entre métricas obtenidas en campo y con imágenes aéreas se analizó mediante regresión lineal, con la finalidad de entender si las obtenidas vía percepción remota se pueden utilizar como *proxy* de las obtenidas *in situ* (Montgomery et al., 2021; Shapiro & Wilk, 1965; Wilcoxon, 1992).

Construcción de modelos predictivos de almacén de carbono en biomasa aérea

Para conocer si existe multicolinealidad entre las métricas de la vegetación obtenidas con imágenes aéreas, se generó un análisis de coeficiente de Pearson (r) y factores de influencia de la varianza (VIF) (Lindner et al., 2020). Después de establecer la presencia o ausencia de colinealidad, se hicieron análisis de regresión (simple/múltiple) con el fin de conocer la contribución de las variables, para explicar la variación del almacén de carbono en biomasa aérea de los individuos arbóreos y arbustivos (Montgomery et al., 2021).

Resultados y discusión

Métricas de vegetación estimadas con datos de campo

En los cuadrantes establecidos para el muestreo se encontraron 117 árboles y arbustos mayores de 2 m de altura, pertenecientes a 13 especies (Cuadro 2). En los

Table 2. In Situ vegetation census compared with vegetation censuses obtained with digital layers of crown area by manual digitization (DM) and automated with the ForestTools (FT) algorithm.

Cuadro 2. Censo de vegetación *in situ* comparado con censos de vegetación obtenidos con capas digitales de área de copa mediante digitalización manual (DM) y automatizada con el algoritmo ForestTools (FT).

Species / Especie	Field data / Datos de campo	DM data / Datos DM	FT data / Datos FT
<i>Bursera laxiflora</i> S. Watson	4	2	1
<i>Eysenhardtia orthocarpa</i> (A. Gray) S. Watson	8	7	6
<i>Fouquieria macdougalii</i> Nash	7	7	4
<i>Guaiacum coulteri</i> A. Gray	1	1	-
<i>Ipomoea arborescens</i> Sweet	23	21	13
<i>Jatropha cardiophylla</i> (Torr.) Muell. -Arg.	4	2	2
<i>Jatropha cordata</i> Müll. Arg.	12	9	4
<i>Mimosa laxiflora</i> Benth.	3	1	0
<i>Olneya tesota</i> A. Gray	42	36	28
<i>Parkinsonia florida</i> (Benth. ex A. Gray) S. Watson	2	2	2
<i>Phaulothamnus spinescens</i> A. Gray	1	1	1
<i>Prosopis velutina</i> Wooton	9	9	9
<i>Vachellia farnesiana</i> (L.) Wight & Arn.	1	1	1
Total	117	99	71

intrinsic differences between the species sampled and the differences in the field (Búrquez et al., 2010; Lai et al., 2022).

Vegetation metrics estimated with digital models

As a result of the image processing, 10 orthomosaics of 900 m² were obtained, equally distributed between subtropical scrubland and buffel grassland (five for each vegetation type). Together with each orthomosaic, a DSM and a DTM were also obtained, which correspond to the area of the composite image (orthomosaic). All the digital products mentioned above have a spatial resolution of less than 10 cm. Once the DSM and DTM were obtained, digital models of crown height and volume were generated, which have a similar spatial resolution to the models from which they are derived (<10 cm).

A total of 20 digital crown area layers were generated: 10 corresponding to the manual approximation and 10 derived from the automated approximation. Prior to the generation of the layers with the latter approximation, the relationship between height and crown area diameter was established: $Y = X * 1.1066 - 0.3142$ ($R^2 = 0.64$ and $P < 0.001$), a process necessary to use the VWF algorithm; where Y is crown diameter (m) and X is height (m).

The results with the manual approach suggest that it is possible to locate more than 80 % of the individuals sampled in the field, while with the automated processes it was possible to locate more than 60 % of the individuals (Table 2). Height, crown area and crown volume values were estimated for the 99 individuals obtained with the manual digitization approach and for 71 individuals obtained with the automated approach using ForestTools. The results suggest that the clustering of trees makes their segregation by automated methods difficult (Figure 2) (Navarro et al., 2020; Vivar-Vivar et al., 2022). On the other hand, even though the separation of individuals does not match field surveys, manual digitization suggests that it is possible to recognize and separate a large percentage of them.

Evaluation of vegetation metrics estimated with digital models

To standardize the number of individuals when comparing the efficiency between remote approaches (manual and automated), tree and shrub elements detected commonly in the digital layers were selected. Thus, the analysis includes the use of 45 tree and shrub individuals. As a result of this exercise, the estimated averages for each of the metrics with field data and remote approaches were obtained (Table 3).

sitios denominados como praderas de buffel se censaron 20 individuos correspondientes a cuatro especies, de las cuales dominan *O. tesota* (ocho individuos) y *P. velutina* (nueve individuos), mientras que para el matorral subtropical se censaron 97 individuos pertenecientes a 10 especies, siendo *I. arborescens* (23 individuos) y *O. tesota* (34 individuos) las dominantes. Cabe destacar que, uniendo la información de las dos comunidades de interés, las especies *I. arborescens* y *O. tesota* representan >50 % de los individuos muestreados. Los árboles y arbustos censados tuvieron área de copa desde 2.41 m² hasta 67.73 m², altura máxima de copa entre 2.04 m y 6.55 m, y volumen de copa de 4.93 m³ a 389.15 m³. Esta variación natural se presenta, debido a la estructura demográfica de las poblaciones, las diferencias intrínsecas entre las especies muestreadas y las diferencias en el terreno (Búrquez et al., 2010; Lai et al., 2022).

Métricas de vegetación estimadas con modelos digitales

Como resultado del procesamiento de las imágenes se obtuvieron 10 ortomosaicos de 900 m², distribuidos equitativamente entre matorral subtropical y pradera de buffel (cinco para cada tipo de vegetación). Junto con cada ortomosaico se obtuvo también un DSM y un DTM, los cuales corresponden al área de la imagen compuesta (ortomosaico). Todos los productos digitales mencionados presentan resolución espacial menor de 10 cm. Una vez obtenidos los DSM y DTM, se generaron modelos digitales de altura y volumen de copa, los cuales tienen una resolución espacial similar a los modelos de los cuales se derivan (<10 cm).

Se generaron 20 capas digitales de área de copa: 10 correspondientes a la aproximación manual y 10 derivadas de la aproximación automatizada. Previo a la generación de las capas con esta última aproximación, se estableció la relación entre altura y el diámetro de área de copa: $Y = X * 1.1066 - 0.3142$ ($R^2 = 0.64$ y $P < 0.001$), proceso necesario para utilizar el algoritmo VWF; donde, Y es diámetro de copa (m) y X es altura (m).

Los resultados con la aproximación manual sugieren que es posible localizar más del 80 % de los individuos muestreados en campo, mientras que con los procesos automatizados se pudo localizar más del 60 % de los individuos (Cuadro 2). Se estimaron los valores de altura, área de copa y volumen de copa de los 99 individuos obtenidos con el enfoque por digitalización manual y de 71 individuos obtenidos con la aproximación automatizada con ForestTools. Los resultados sugieren que el agrupamiento de individuos leñosos hace difícil su segregación por medio de métodos automatizados (Figura 2) (Navarro et al., 2020; Vivar-Vivar et al., 2022). Por otro lado, aun cuando la separación de individuos no iguala a los censos realizados en el terreno, la

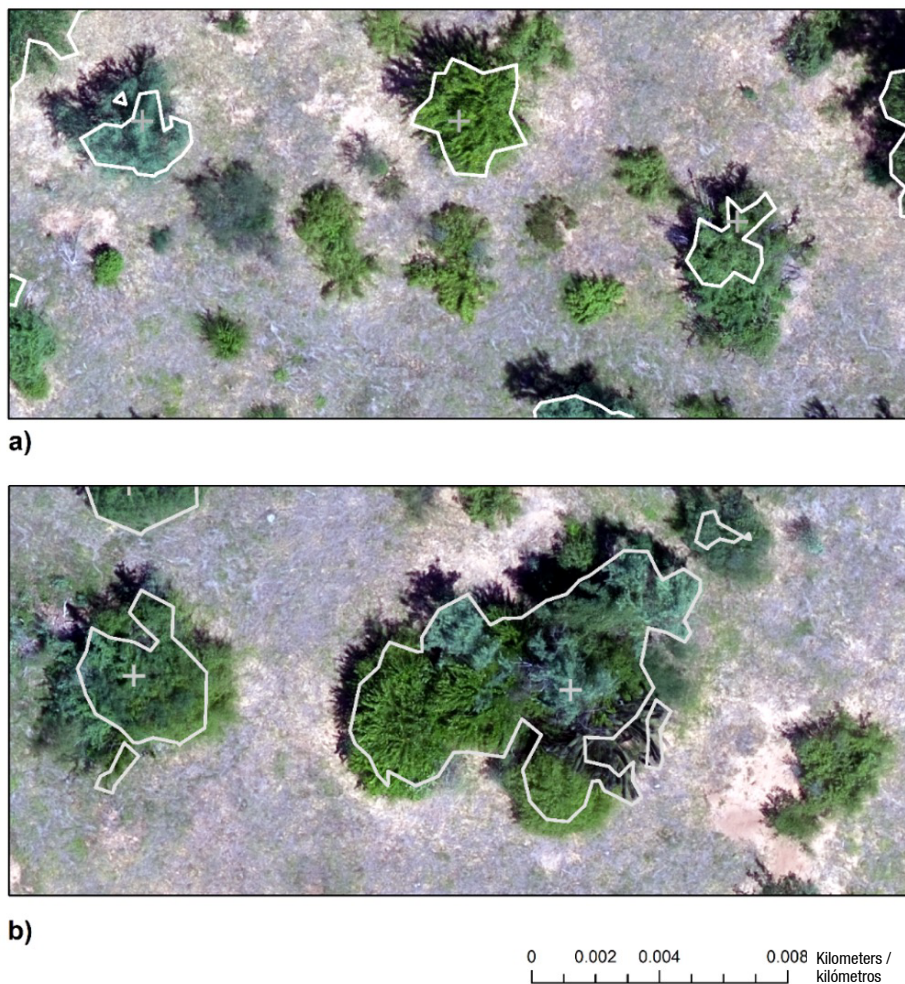


Figure 2. Digital crown area layer with ForestTools algorithm. a) Example of trees taller than 2 m segmented individually and b) example of group of trees taller than 2 m segmented as a single individual.

Figura 2. Capa digital de área de copa con algoritmo de ForestTools. a) Ejemplo de individuos leñosos mayores de 2 m segmentados individualmente y b) ejemplo de grupo de individuos leñosos mayores de 2 m segmentados como un solo individuo.

Table 3. Vegetation metrics of tree and shrub individuals taller than 2 m in height, obtained in the open field and with remote approaches (manual digitization [DM] and automated with the ForestTools [FT] algorithm) in tropical shrubland communities and induced buffel grassland.

Cuadro 3. Métricas de vegetación de individuos arbóreos y arbustivos mayores de 2 m de altura, obtenidas en campo y con aproximaciones remotas (digitalización manual [DM] y automatizada con el algoritmo ForestTools [FT]) en comunidades de matorral tropical y praderas inducidas de buffel.

Attribute/Atributo	Field data/ Datos en campo	DM data/ Datos DM	FT data/ Datos FT
Crown area (m ²)/Área de copa (m ²)	17.50 ± 14.50	19.32 ± 13.12	13.93 ± 10.92
Crown height (m ²)/Altura de copa (m ²)	4.51 ± 2.00	3.79 ± 1.01	3.83 ± 1.04
Volume (m ³)/Volumen (m ³)	73.88 ± 99.19	82.33 ± 71.35	45.36 ± 43.16

± standard deviation of the mean.

± desviación estándar de la media.

The metrics analyzed suggest a non-normal distribution, thus the Wilcoxon test was used. For the maximum crown height, the statistical evidence suggests that there is no significant difference between field estimates and both approaches (manual: $W = 1145$, $P = 0.28$; automated: $W = 1127$, $P = 0.35$). Some studies have found that height estimated from aerial imagery shows high and statistically significant correlation with field data (Gonzalez Musso et al., 2020; Holiaka et al., 2021; Kachamba et al., 2016; Vivar-Vivar et al., 2022). This metric has been used for estimating carbon storage in other plant communities (Holiaka et al., 2021; Kachamba et al., 2016; Navarro et al., 2020).

Estimation of crown area in the field is not significantly different from the manual digitizing approach ($W = 1007$, $P = 0.96$), but it is significantly different from the ForestTools approach ($W = 1278$, $P = 0.03$). Taking into account that crown area measurement is fundamental for the correct estimation of volume and crown height of individuals, results in other studies also suggest that the manual digitizing approach presents data closer to those obtained in the field (Creasy et al., 2021; Holiaka et al., 2021; Gallardo-Salazar & Pompa-García, 2020; Navarro et al., 2020; Vivar-Vivar et al., 2022). However, this difference derives from the approach used, since the automated processes take into account the variability of the crown structure (irregular shapes), while the manual digitization approach and the field approach consider a regular geometric structure. On the other hand, the nature of the aerial images, with both methods, avoids the detection of individuals below the highest canopy layer.

Regarding volume estimations, it was found that field measurements show no significant difference with manual digitization approximations ($W = 1058$, $P = 0.71$), but do differ from the automated approximation ($W = 1393$, $P = 0.001$). Similar to the crown area analysis, these results are attributed to the difference between approximations, as ForestTools estimates volume in irregular crowns (structures built by pixels with spatial resolution <10 cm representing variation in crown strata), while manual digitization estimated figures closer to a regular cylinder (irregular crown area, but only multiplying by maximum crown height, assuming a more orderly construction in crown strata) (Gallardo-Salazar & Pompa-García, 2020).

To evaluate the relationships between remotely sensed vegetation metrics and field measurements, simple linear regression analyses were performed (Figure 3). All metrics showed significant correlation ($P < 0.01$) and $R^2 > 0.7$ when using the manual approach. On the other hand, the automated approach also showed significant correlation ($P < 0.01$) for all estimations with $R^2 > 0.55$. This suggests that remote sensing methods can predict

digitalización manual sugiere que es posible reconocer y separar gran porcentaje de ellos.

Evaluación de las métricas de vegetación estimadas con modelos digitales

Con el fin de homogeneizar el número de individuos al comparar la eficiencia entre las aproximaciones remotas (manual y automatizada), se seleccionaron los elementos arbóreos y arbustivos detectados de manera común en las capas digitales. De esta manera, el análisis comprende el uso de 45 individuos arbóreos y arbustivos. Como resultado de este ejercicio se obtuvieron los promedios estimados para cada una de las métricas con datos de terreno y los enfoques remotos (Cuadro 3).

Las métricas analizadas sugieren una distribución no normal, por lo cual se utilizó la prueba de Wilcoxon. Para la altura máxima de copa, la evidencia estadística sugiere que no existe diferencia significativa entre las estimaciones en el terreno y ambas aproximaciones (manual: $W = 1145$, $P = 0.28$; automatizada: $W = 1127$, $P = 0.35$). Algunos estudios han encontrado que la altura estimada con imágenes aéreas presenta correlación alta y estadísticamente significativa con datos de campo (Gonzalez Musso et al., 2020; Holiaka et al., 2021; Kachamba et al., 2016; Vivar-Vivar et al., 2022). Esta métrica se ha utilizado para la estimación del almacén de carbono en otras comunidades vegetales (Holiaka et al., 2021; Kachamba et al., 2016; Navarro et al., 2020).

La estimación de área de copa en campo no presenta diferencia significativa con la aproximación de digitalización manual ($W = 1007$, $P = 0.96$), pero sí con la aproximación ForestTools ($W = 1278$, $P = 0.03$). Tomando en cuenta que la medición de área de copa es fundamental para la estimación correcta del volumen y la altura de la copa de los individuos, los resultados en otros estudios también sugieren que la aproximación con digitalización manual presenta datos más cercanos a los obtenidos en terreno (Creasy et al., 2021; Holiaka et al., 2021; Gallardo-Salazar & Pompa-García, 2020; Navarro et al., 2020; Vivar-Vivar et al., 2022). No obstante, esta diferencia deriva de la aproximación realizada, pues los procesos vía automatizada toman en cuenta la variabilidad de la estructura de la copa (formas irregulares), mientras que la aproximación por digitalización manual y la de terreno consideran una estructura geométrica regular. Por otra parte, la naturaleza de las imágenes aéreas, con ambos métodos, evita la detección de individuos por debajo de la capa del dosel más alto.

Con respecto a las estimaciones de volumen, se encontró que las mediciones en campo no muestran diferencia significativa con las aproximaciones de digitalización

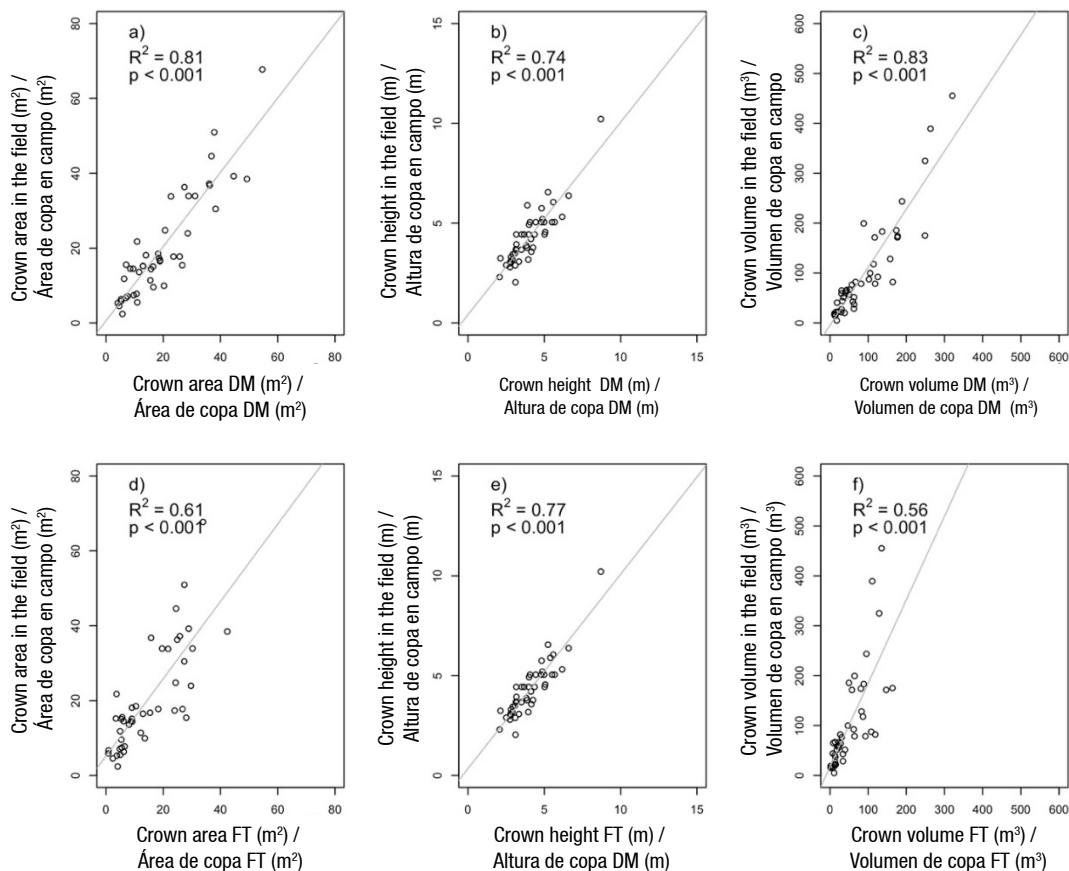


Figure 3. Scatter plots of vegetation metrics estimated from field data and aerial imagery. Y-axes show field data and X-axes show data estimated with manual approximation (DM) and automated approximation with ForestTools (FT).

Figura 3. Diagramas de dispersión de métricas de vegetación estimadas a través de datos recabados en campo y obtenidas de imágenes aéreas. En los ejes Y se presentan los datos de campo y en los ejes X se encuentran los datos estimados con aproximación manual (DM) y aproximación automatizada con ForestTools (FT).

morphological attributes measured on the ground with varying degrees of accuracy. Specifically, the results of the present study suggest that estimations via manual digitization represent a tool with potential for the estimation of morphological attributes of individuals in vegetation types where trees and shrubs crowns is visible via aerial images.

Estimation of carbon in aerial biomass with remote vegetation metrics

Predictive models for the estimation of carbon storage in aboveground biomass were generated from remote estimates of vegetation metrics obtained with the manual and automated approaches. Using Pearson's test, it was found that, with the automated approach, crown volume is closely related to crown area ($r = 0.95$) and crown height ($r = 0.81$) and, therefore, it is not necessary to include volume in the multiple correlation analysis. It is worth mentioning that this step was omitted for the manual digitization approach, since volume is estimated from the multiplication

manual ($W = 1058$, $P = 0.71$), pero sí con la aproximación automatizada ($W = 1393$, $P = 0.001$). De la misma forma que con el análisis de área de copa, estos resultados se atribuyen a la diferencia entre aproximaciones, pues ForestTools estima el volumen en copas irregulares (estructura construida por píxeles de resolución espacial < 10 cm que representan la variación de los estratos en la copa), mientras que con la digitalización manual se estimaron figuras más cercanas a un cilindro regular (área de copa irregular, pero solo multiplicando por altura máxima de copa, suponiendo una construcción más ordenada en los estratos de la copa) (Gallardo-Salazar & Pompa-García, 2020).

Con el fin de evaluar las relaciones entre las métricas de la vegetación obtenidas vía percepción remota con las medidas en el terreno, se hicieron análisis de regresión lineal simple (Figura 3). Todas las métricas presentaron correlación significativa ($P < 0.01$) y $R^2 > 0.7$, al utilizar la aproximación manual. Por otro lado, la aproximación automatizada también presenta correlación significativa ($P < 0.01$) para todas

of crown area and height. The relationship between height and crown area is significantly correlated in the manual ($r = 0.63$) and automated ($r = 0.69$) approaches; however, complementing the analysis with VIF (VIF = 1.68 [manual] and VIF = 1.95 [automated]), it was found that the influence of the correlation between these variables represents no high effect in the multiple regression analysis.

Multiple regression analysis (Tables 4) shows that both manual and automated digitization models are statistically significant ($P < 0.001$). The explanation of the dependent variable (ABCS) in both cases is about 42 % (adjusted R^2). According to the degree of significance of the metrics, crown height is the variable that contributes the most in the model. This suggests that, if height is used as an independent variable, the use of simple linear regression models for ABCS prediction would have similar results.

I. arborescens trees were not fitted to the trend line (blue dots, Figure 4). Because of this, the analysis was done with and without this data set. The models generated without taking *I. arborescens* into account had better fits, explaining the variation in ABCS (Figure 5). The crown area and volume obtained from the manual approach had the best estimation results of ABCS ($R^2 > 0.7$; $P < 0.001$) for most tree species (Figure 5; Table 5). It may be necessary to conduct exclusive sampling and determine the morphological attributes contributing to the estimation of ABCS for the dominant species *I. arborescens*.

According to field data, on average, the surveyed tree species contain ABCS = 64.88 kg of carbon (Table 6). The multiple regression model with manual digitization data (ABCS = $-83.53 + AC*1.79 + AMC*27.93$) has an average ABCS of 64.81 kg, while with automated data

las estimaciones y $R^2 > 0.55$. Lo anterior sugiere que los métodos de percepción remota pueden predecir atributos morfológicos medidos en el terreno, con diversos grados de precisión. Específicamente, los resultados del presente estudio sugieren que las estimaciones vía digitalización manual representan una herramienta con potencial para la estimación de los atributos morfológicos de individuos en tipos de vegetación donde la copa de los árboles y arbustos es discernible vía imágenes aéreas.

Estimación de carbono en biomasa aérea con métricas de vegetación remotas

Se generaron modelos predictivos para la estimación de almacén de carbono en biomasa aérea, a partir de estimaciones remotas de las métricas de vegetación, obtenidas con las aproximaciones manual y automatizada. Mediante la prueba de Pearson, se encontró que, con la aproximación automatizada, el volumen de copa está estrechamente relacionado con el área de copa ($r = 0.95$) y altura de copa ($r = 0.81$) y, por tanto, no es necesario incluir el volumen en el análisis de correlación múltiple. Cabe mencionar, que este paso se omitió para el enfoque de digitalización manual, ya que el volumen es estimado a partir de la multiplicación de área de copa y altura. La relación entre altura y área de copa presenta correlación significativa en la aproximación manual ($r = 0.63$) y automatizada ($r = 0.69$); sin embargo, complementando el análisis con VIF (VIF = 1.68 [manual] y VIF = 1.95 [automatizada]), se encontró que la influencia de la correlación entre estas variables no representa un efecto alto en el análisis de regresión múltiple.

El análisis de regresión múltiple (Cuadros 4) muestra que los modelos tanto de digitalización manual como automatizada son estadísticamente significativos ($P < 0.001$). La explicación de la variable dependiente

Table 4. Multiple regression analysis for the evaluation of predictive models of aboveground biomass carbon storage. Crown area and height, estimated with the manual (DM) and automated (FT) digitization approaches, were the independent variables.
Cuadro 4. Análisis de regresión múltiple para la evaluación de modelos predictivos de almacén de carbono en biomasa aérea. El área y altura de copa, estimadas con las aproximaciones de digitalización manual (DM) y automatizada (FT), fueron las variables independientes.

Variables	Coefficients/ Coeficientes	Standard error/ Error estándar	T value/ Valor T	Pr(> t)/ Pr(> t)
DM data/Datos DM				
Intercept/Intercepto	- 83.53	29.97	-2.78	<0.001
Crown area/Área de copa	1.79	0.90	1.97	<0.05
Crown height/Altura de copa	27.97	9.06	3.08	<0.001
FT data/Datos FT				
Intercept/Intercepto	- 77.00	31.55	-2.44	<0.01
Crown area/Área de copa	1.903	1.17	1.61	>0.05
Crown height/Altura de copa	28.05	9.74	2.87	<0.001

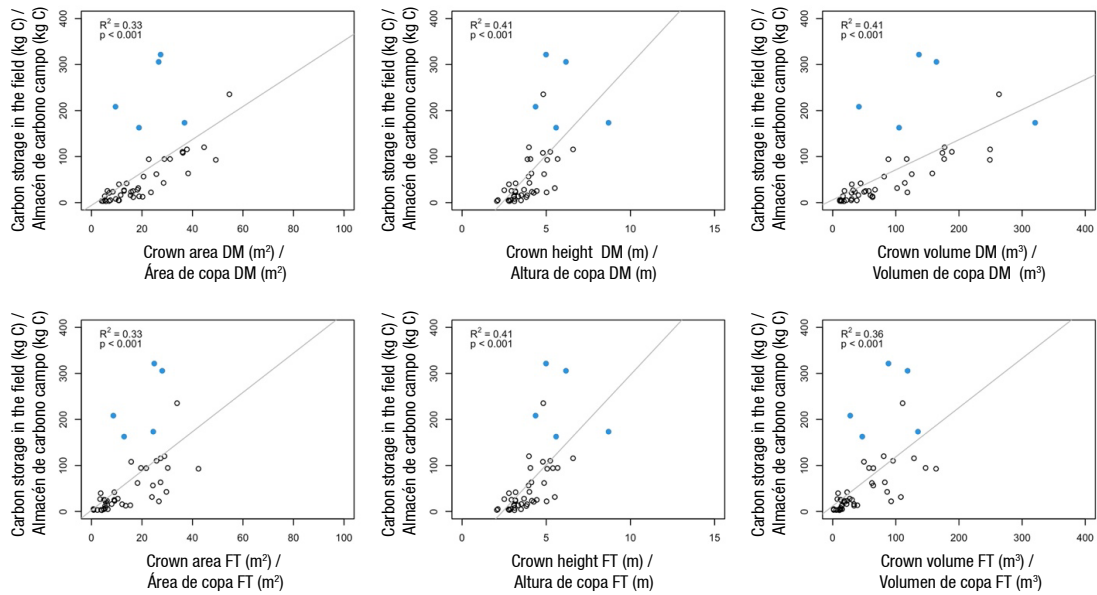


Figure 4. Regression diagrams. The dependent variable is the aboveground biomass carbon storage (individual level) of subtropical shrub communities, and the independent variables are vegetation metrics estimated from aerial images using manual digitization (DM) and automated (FT) approaches. Blue points represent individuals belonging to the species *Ipomoea arborescens*.

Figura 4. Diagramas de regresión. La variable dependiente es el almacén de carbono en biomasa aérea (nivel individuo) de comunidades de matorral subtropical y las variables independientes son las métricas de vegetación estimadas con imágenes aéreas mediante las aproximaciones de digitalización manual (DM) y automatizada (FT). Los puntos azules representan a los individuos pertenecientes a la especie *Ipomoea arborescens*.

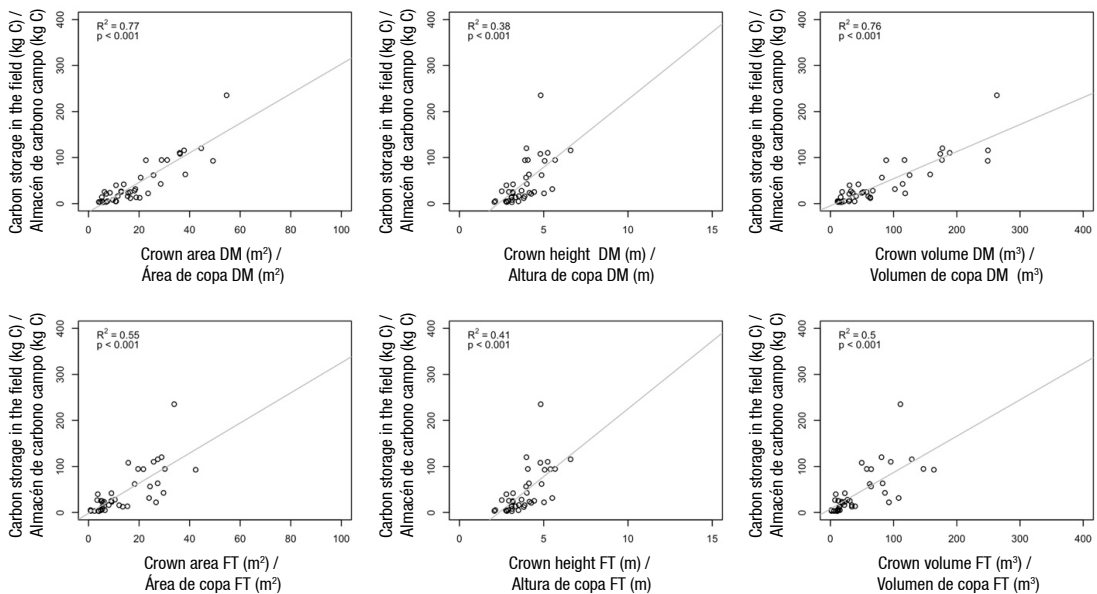


Figure 5. Regression diagrams. The dependent variable is the aboveground biomass carbon storage (individual level) of subtropical shrub communities, excluding the species *Ipomoea arborescens*. The independent variables are vegetation metrics estimated from aerial images using manual digitization (DM) and automated (FT) approaches.

Figura 5. Diagramas de regresión. La variable dependiente es el almacén de carbono en biomasa aérea (nivel individuo) de comunidades de matorral subtropical, excluyendo la especie *Ipomoea arborescens*. Las variables independientes son métricas de vegetación estimadas con imágenes aéreas mediante las aproximaciones de digitalización manual (DM) y automatizada (FT).

Table 5. Predictive models of aboveground biomass excluding the species *Ipomoea arborescens*, where the independent variables were vegetation metrics estimated using manual digitization (DM) and automated approaches (ForestTools algorithms: FT). Cuadro 5. Modelos predictivos de biomasa aérea excluyendo a la especie *Ipomoea arborescens*, donde las variables independientes fueron las métricas de vegetación estimadas mediante las aproximaciones de digitalización manual (DM) y automatizada (algoritmos de ForestTools: FT).

Approach/ Enfoque	Metrics/ Métrica	Equation/ Ecuación	Standard error/ Error estándar	P value/ Valor P	R ²
DM	Crown area/Área de copa	$y = -18.40 + 3.21x$	0.28	<0.0001	0.77
FT	Crown area/Área de copa	$y = -1.90 + 3.27x$	0.47	<0.0001	0.55
DM	Height/Altura	$y = -67.75 + 29.37x$	6.01	<0.0001	0.38
FT	Height/Altura	$y = -69.11 + 29.44x$	5.71	<0.0001	0.41
DM	Volume/Volumen	$y = -4.74 + 0.58x$	0.05	<0.0001	0.76
FT	Volume/Volumen	$y = 7.86 + 0.79x$	0.12	<0.0001	0.50

Table 6. Values of aboveground biomass carbon storage (ABCS), at the individual tree scale, obtained using manual digitization (DM) and automated (FT) approaches tree in representative subtropical shrub communities in central Sonora. Cuadro 6. Valores de almacén de carbono en biomasa aérea (ACBA), a escala individuo leñoso, obtenidos mediante las aproximaciones de digitalización manual (DM) y automatizada (FT) en comunidades representativas de matorral subtropical del centro de Sonora.

Measurements/ Medidas	Data site ABCS (kg)/ Datos sitio ACBA (kg)	DM data ABCS (kg)/ Datos DM ACBA (kg)	FT data ABCS (kg)/ Datos FT ACBA (kg)
Mean \pm SD/Promedio \pm DE	64.88 \pm 78.88	64.81 \pm 53.50	64.83 \pm 52.74
Maximum/Máximo	321.55	225.79	213.54
Minimum/Mínimo	2.82	0*	0*

*The model yields negative values due to construction. SD: standard deviation.

*El modelo arroja valores negativos por su construcción. DE: desviación estándar.

using ForestTools, the average is ABCS = 64.83 kg (ACBS = $-77 + AC*1.90 + AMC*28.05$). The ABCS estimates in this study fall within the reported limits in other studies conducted in arid areas (Búrquez et al., 2010; McClaran et al., 2013). When contrasting the ABCS estimation excluding the species *I. arborescens*, the linear model (crown area as independent variable) indicated that the average ABCS per individual with field data is 43.70 kg, and with manual and automated digitization data, it was 43.63 kg and 43.66 kg, respectively.

Because of the use of specific allometric equations for *I. arborescens*, generalist models may present poor fits ($R^2 < 0.40$ for some models). This derives from the fact that aerial images captured by UAV-mounted cameras do not allow the measurement of the required parameters (e.g. trunk diameter at breast height) for this equation (Creasy et al., 2021; Kachamba et al., 2016; Sun et al., 2021). On the other hand, tree species, whose ABCS estimation depends on metrics measurable via aerial photography (crown area and estimated volume), show good fit between field estimates and measurements via remote sensing. The results suggest that it is possible to generate models that predict the

(ACBA) en ambos casos es de alrededor de 42 % (R^2 ajustada). De acuerdo con el grado de significancia de las métricas, la altura de copa es la variable que contribuye en mayor medida en el modelo. Lo anterior sugiere que, si se utiliza la altura como variable independiente, el uso de modelos de regresión lineal simple para la predicción de ACBA tendría resultados similares.

Los individuos de *I. arborescens* no se ajustaron a la línea de tendencia (puntos azules, Figura 4). Debido a lo anterior, el análisis se hizo con y sin este grupo de datos. Los modelos generados sin tomar en cuenta a *I. arborescens* tuvieron mejores ajustes, al explicar la variación de ACBA (Figura 5). El área de copa y volumen del enfoque manual obtuvieron los mejores resultados de estimación de ACBA ($R^2 > 0.7$; $P < 0.001$) para la mayoría de las especies arbóreas (Figura 5; Cuadro 5). Es posible que en el caso de *I. arborescens* sea necesario hacer un muestreo exclusivo y determinar los atributos morfológicos que aportan a la estimación de ACBA de esta especie dominante.

Acorde con los datos de campo, en promedio, las especies arbóreas censadas contienen ACBA = 64.88 kg

ABCS in arid zones per tree. This is consistent with other works, which show models to calculate ABCS from crown area obtained with RGB-VANT images (Ding et al., 2022; Guo et al., 2021). It should be noted that studies using high-resolution area images for the analysis of carbon storage in arid areas are very limited (Issa et al., 2020), even though these have shown good estimates when contrasted with direct field measurements (Holiaka et al., 2021; Navarro et al., 2020). However, it is necessary to better understand the performance and limitations of these approaches that will be key to integrate them in the study of vegetation structure and ecosystem processes (Sun et al., 2020).

Conclusions

The use of aerial images is a viable and functional source of information for the detection of trees in arid and semi-arid communities to estimate morphological metrics. Based on measurements obtained from an unmanned aerial vehicle (UAV), it was possible to estimate the carbon storage in aerial biomass of trees in subtropical shrubland communities in the arid zones of northwestern Mexico. The development of methodological approaches, such as those proposed in this manuscript, contribute to increase the knowledge of carbon pools in plant communities, which are key in the ecosystem processes of arid zones. New allometric equations are proposed that use morphological metrics obtained with UAV, reducing the intensity/cost of field surveys. This is fundamental in the construction of knowledge for decision making on natural resource management and the establishment of adaptation strategies in the face of climate change.

Acknowledgments

MGVP thanks CONACYT and the Biosciences Graduate Program of the University of Sonora for accepting him as a PhD scholar and the Ecosystems, Remote Sensing and Plant Ecophysiology Laboratories for the valuable support received during this study. JRRL and AECV thank CONACYT for supporting projects CB61865 and CB223525. JRRL appreciates the support of the University of Sonora for the approval of the project registered as USO313008559. The authors thank Mr. L. Sierra Maldonado (Rancho El Churi) for allowing us to conduct the study on his property.

End of English version

References / Referencias

Acuña-Acosta, D. M., Castellanos-Villegas, A. E., Llano-Sotelo, J. M., & Romo-León, J. R. (2021). Responses of photosynthetic and stoichiometric traits to aridity in species and functional

de carbono (Cuadro 6). Por su parte, el modelo de regresión múltiple con datos de digitalización manual ($ACBA = -83.53 + AC*1.79 + AMC*27.93$) presenta un promedio de $ACBA = 64.81$ kg, mientras que con los datos automatizados con ForestTools, el promedio es de $ACBA = 64.83$ kg ($ACBA = -77 + AC*1.90 + AMC*28.05$). Las estimaciones de ACBA en el presente estudio están dentro de los límites reportados en otros estudios desarrollados en zonas áridas (Búrquez et al., 2010; McClaran et al., 2013). Al contrastar la estimación de ACBA excluyendo la especie *I. arborescens*, el modelo lineal (área de copa como variable independiente) indicó que el promedio de ACBA por individuo con datos de campo es de 43.70 kg y con datos de digitalización manual y automatizada fueron 43.63 kg y 43.66 kg, respectivamente.

Como consecuencia del uso de ecuaciones alométricas específicas para *I. arborescens*, los modelos generalistas pueden presentar ajustes pobres ($R^2 < 0.40$ para algunos modelos). Lo anterior deriva del hecho de que las imágenes aéreas capturadas por cámaras fotográficas montadas en VANT no permiten la medición de los parámetros requeridos (v. g. diámetro del tronco a la altura del pecho) para dicha ecuación (Creasy et al., 2021; Kachamba et al., 2016; Sun et al., 2021). Por otro lado, las especies arbóreas, cuya estimación de ACBA depende de métricas medibles vía fotografía aérea (área de copa y volumen estimado), presentan buen ajuste entre estimaciones en campo y mediciones vía percepción remota. Los resultados sugieren que es posible la generación de modelos que predigan el ACBA en zonas áridas por individuo leñoso. Lo anterior es consistente con otros trabajos, en los cuales se muestran modelos para calcular ACBA a partir de área de copa obtenida con imágenes RGB-VANT (Ding et al., 2022; Guo et al., 2021). Cabe destacar que los estudios que utilizan imágenes áreas de alta resolución para el análisis de almacén de carbono en zonas áridas son muy escasos (Issa et al., 2020), aun cuando estos han mostrado buenas estimaciones al ser contrastado con mediciones directas en campo (Holiaka et al., 2021; Navarro et al., 2020). No obstante, es necesario conocer mejor el funcionamiento y limitaciones de estas aproximaciones que serán clave para integrarlas en el estudio de estructura de la vegetación y procesos ecosistémicos (Sun et al., 2020).

Conclusiones

El uso de imágenes aéreas es una fuente de información viable y funcional para la detección de individuos leñosos de comunidades áridas y semiáridas con el fin de estimar métricas morfológicas. Con base en las mediciones obtenidas desde un vehículo aéreo no tripulado (VANT) fue posible la estimación del almacén de carbono en biomasa aérea de individuos

- types of two Sonoran Desert plant communities. *Botanical Sciences*, 99(2), 257–278. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.2708>
- Ahlström, A., Raupach, M. R., Schurgers, G., Smith, B., Arneth, A., Jung, M., Reichstein, M., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Jain, A. K., Kato, E., Poulter, B., Sitch, S., Stocker, B. D., Viovy, N., Wang, Y. P., Wiltshire, A., Zaehle, S., & Zeng, N. (2015). The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science*, 348(6237), 895–899. <https://doi.org/10.1126/science.aaa1668>
- Arriaga-Ramírez, S., & Cavazos, T. (2010). Regional trends of daily precipitation indices in northwest Mexico and southwest United States. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(14), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2009JD013248>
- Barthelme, S. (2018). *Imager: Image processing library based on 'CImg'. Version 0.41.1*. R Package. <https://cran.r-project.org/web/packages/imager/imager.pdf>
- Biederman, J. A., Scott, R. L., Arnone, J. A., Jasoni, R. L., Litvak, M. E., Moreo, M. T., Papuga, S. A., Ponce-Campos, G. E., Schreiner-McGraw, A. P., & Vivoni, E. R. (2018). Shrubland carbon sink depends upon winter water availability in the warm deserts of North America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.005>
- Bradley, B. A., Houghton, R. A., Mustard, J. F., & Hamburg, S. P. (2006). Invasive grass reduces aboveground carbon stocks in shrublands of the Western US. *Global Change Biology*, 12(10), 1815–1822. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01232.x>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Núñez, S., Quintero, T., & Aparicio, A. (2010). Aboveground biomass in three Sonoran Desert communities: Variability within and among sites using replicated plot harvesting. *Journal of Arid Environments*, 74, 1240–1247. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.04.004>
- Castellanos, A. E., Hinojo-Hinojo, C., Rodríguez, J. C., Romo-Leon, J. R., Wilcox, B. P., Biederman, J. A., & Peñuelas, J. (2022). Plant functional diversity influences water and carbon fluxes and their use efficiencies in native and disturbed dryland ecosystems. *Ecology*, 103(5), e42415. <https://doi.org/10.1002/eoc.2415>
- Choza-Farías, S., Romo-Leon, J. R., & Castellanos-Villegas, A. E. (2021). Análisis de la respuesta productiva ante la variabilidad climática en tipos de vegetación exótica y nativa del Desierto Sonorense. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 20(1). <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2021.20.3>
- Cornejo-Denman, L., Romo-Leon, J. R., Castellanos, A. E., Diaz-Caravantes, R. E., Moreno-Vázquez, J. L., & Mendez-Estrella, R. (2018). Assessing riparian vegetation condition and function in disturbed sites of the arid northwestern Mexico. *Land*, 7(1), 8–10. <https://doi.org/10.3390/land7010013>
- Creasy, M. B., Tinkham, W. T., Hoffman, C. M., & Vogeler, J. C. (2021). Potential for individual tree monitoring in ponderosa pine dominated forests using unmanned aerial system structure from motion point clouds. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(8), 1093–1105. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0433>
- leñosos en comunidades características de matorral subtropical de las zonas áridas del noroeste de México. El desarrollo de aproximaciones metodológicas, como las propuestas en este manuscrito, contribuyen al incremento del conocimiento de los reservorios de carbono en comunidades vegetales, los cuales son clave en los procesos ecosistémicos de zonas áridas. Se proponen nuevas ecuaciones alométricas que usan métricas morfológicas obtenidas con VANT, reduciendo la intensidad/costo de los levantamientos en campo. Lo anterior es fundamental en la construcción de conocimiento, para la toma de decisiones sobre manejo de recursos naturales y el establecimiento de estrategias de adaptación ante el cambio climático.

Agradecimientos

MGVP agradece al CONACYT y al Posgrado en Biociencias de la Universidad de Sonora, por la aceptación como becario para estudios de doctorado y a los Laboratorios de Ecosistemas, Percepción Remota y Ecofisiología Vegetal por el valioso apoyo recibido durante este estudio. JRRL y AECV agradecen al CONACYT por el apoyo a los proyectos CB61865 y CB223525. JRRL reconoce el apoyo de la Universidad de Sonora por la aprobación del proyecto registrado como USO313008559. Los autores agradecen al Sr. L. Sierra Maldonado (Rancho El Churi), por permitirnos realizar el estudio en su propiedad.

Fin de la versión en español

- Ding, J., Zhipeng, L., Zhang, H., Zhang, P., Xiaoming, C., & Feng, Y. (2022). Quantifying the aboveground biomass (AGB) of Gobi Desert Shrub communities in Northwestern China based on unmanned aerial vehicle (UAV) RGB images. *Land*, 11(4), 543. <https://doi.org/10.3390/land11040543>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2011). *ArcGIS: version 10.1*. Redlands, CA. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products>
- Escalante, J. O., Cáceres, J. J., & Porras-Díaz, H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura*, 20(50), 119–140. <https://www.redalyc.org/journal/2570/257049511010/html/>
- Gallardo-Salazar, J. L., & Pompa-García, M. (2020). Detecting individual tree attributes and multispectral indices using unmanned aerial vehicles: Applications in a pine clonal orchard. *Remote Sensing*, 12(24), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs12244144>
- George, G., & Schillebeeckx, S. J. (2018). *Managing natural resources: Organizational strategy, behaviour and dynamics*. Edward Elgar Publishing.
- Gonzalez Musso, R. F., Oddi, F. J., Goldenberg, M. G., & Garibaldi, L. A. (2020). Applying unmanned aerial vehicles (UAVs) to map shrubland structural attributes in northern Patagonia, Argentina. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(7), 615–623. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0440@cjfrjuvs-uav.issue1>

- Guo, Z. C., Wang, T., Liu, S. L., Kang, W. P., Chen, X., Feng, K., Zhang, X., & Zhi, Y. (2021). Biomass and vegetation coverage survey in the Mu Us sandy land-based on unmanned aerial vehicle RGB images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 94, 102239. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102239>
- Hinojo-Hinojo, C., Castellanos, A. E., Huxman, T., Rodríguez, J. C., Vargas, R., Romo-León, J. R., & Biederman, J. A. (2019). Native shrubland and managed buffelgrass savanna in drylands: Implications for ecosystem carbon and water fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.030>
- Holiaka, D., Kato, H., Yoschenko, V., Onda, Y., Igarashi, Y., Nanba, K., Diachuk, P., Holiaka, M., Zadorozhniuk, R., Kashparov, V., & Chyzhevskiy, I. (2021). Scots pine stands biomass assessment using 3D data from unmanned aerial vehicle imagery in the Chernobyl Exclusion Zone. *Journal of Environmental Management*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113319>
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Current Forestry Reports*, 5(3), 155–168. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
- Issa, S., Dahy, B., Ksiksi, T., & Saleous, N. (2020). A review of terrestrial carbon assessment methods using geo-spatial technologies with emphasis on arid lands. *Remote Sensing*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/rs12122008>
- Kachamba, D. J., Ørka, H. O., Gobakken, T., Eid, T., & Mwase, W. (2016). Biomass estimation using 3D data from unmanned aerial vehicle imagery in a tropical woodland. *Remote Sensing*, 8(11), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs8110968>
- Kim, J. Y., & Chung, Y. S. (2021). A short review of RGB sensor applications for accessible high-throughput phenotyping. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 24(5), 495–499. <https://doi.org/10.1007/s12892-021-00104-6>
- Kumar, L., & Mutanga, O. (2017). Remote sensing of above-ground biomass. *Remote Sensing*, 9(9), 935. <https://doi.org/10.3390/rs9090935>
- Lai, H. R., Chong, K. Y., Yee, A. T. K., Mayfield, M. M., & Stouffer, D. B. (2022). Non-additive biotic interactions improve predictions of tropical tree growth and impact community size structure. *Ecology*, 103(2). <https://doi.org/10.1002/ecy.3588>
- Lindner, T., Puck, J., & Verbeke, A. (2020). Misconceptions about multicollinearity in international business research: Identification, consequences, and remedies. *Journal of International Business Studies*, 51, 283–298. <https://doi.org/10.1057/s41267-019-00257-1>
- McClaran, M. P., McMurtry, C. R., & Archer, S. R. (2013). A tool for estimating impacts of woody encroachment in arid grasslands: Allometric equations for biomass, carbon, and nitrogen content in *Prosopis velutina*. *Journal of Arid Environments*, 88, 39–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.08.015>
- McLaughlin, B. C., Ackerly, D. D., Klos, P. Z., Natali, J., Dawson, T. E., & Thompson, S. E. (2017). Hydrologic refugia, plants, and climate change. *Global Change Biology*, 23(8), 2941–2961. <https://doi.org/10.1111/gcb.13629>
- Montaño, N. M., Ayala, F., Bullock, S. H., Briones, O., Oliva, F. G., Sánchez, R. G., Maya, Y., Perroni, Y., Siebe, C., Torres, Y. T., Troyo, E., & Yépez, E. (2016). Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México: síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 39–59. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57344471003>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Navarro, A., Young, M., Allan, B., Carnell, P., Macreadie, P., & Ierodiaconou, D. (2020). The application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to estimate above-ground biomass of mangrove ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111747>
- Özyeşil, O., Voroninski, V., Basri, R., & Singer, A. (2017). A survey of structure from motion. *Acta Numerica*, 26, 305–364. <https://doi.org/10.1017/S096249291700006X>
- Pordel, F., Ebrahimi, A., & Azizi, Z. (2018). Canopy cover or remotely sensed vegetation index, explanatory variables of above-ground biomass in an arid rangeland, Iran. *Journal of Arid Land*, 10(5), 767–780. <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0017-y>
- Popescu, S. C., & Wynne, R. H. (2013). Seeing the trees in the forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(5), 589–604. <https://doi.org/10.14358/pers.70.5.589>
- Poulter, B., Frank, D., Ciais, P., Myneni, R. B., Andela, N., Bi, J., Broquet, G., Canadell, J. G., Chevallier, F., Liu, Y. Y., Running, S. W., Sitch, S., & van der Werf, G. R. (2014). Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature*, 509(7502), 600–603. <https://doi.org/10.1038/nature13376>
- Rojas-García, F., De Jong, B., Martínez-Zurimendi, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72, 835–864. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52, 591. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Silva, J. A. (2008). *Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México*. México: Coordinación, Educación y Desarrollo Tecnológico- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).
- Sun, Z., Wang, X., Wang, Z., Yang, L., Xie, Y., & Huang, Y. (2021). UAVs as remote sensing platforms in plant ecology: Review of applications and challenges. *Journal of Plant Ecology*, 14(6), 1003–1023. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtab089>
- R Foundation. (2021). *The R Project for Statistical Computing [R]. RStudio, version 4.1.1*. <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/old/4.1.1/>
- Vivar-Vivar, E. D., Pompa-García, M., Martínez-Rivas, J. A., & Mora-Tembre, L. A. (2022). UAV-Based characterization of tree-attributes and multispectral indices in an uneven-aged mixed conifer-broadleaf forest. *Remote Sensing*, 14(12), 2775. <https://doi.org/10.3390/rs14122775>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wilcoxon, F. (1992). Individual comparisons by ranking methods. In S. Kotz, & N. Johnson (Eds.), *Breakthroughs in statistics* (pp. 196–202). Springer.