

ISSN: 2007-526X



RCHSZA

REVISTA CHAPINGO SERIE
ZONAS ÁRIDAS

VOL. 23, ENERO-DICIEMBRE 2024.

Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, Volumen 23, enero-diciembre 2024, es una revista anual de publicación continua editada por la Universidad Autónoma Chapingo, a través de la Coordinación de Revistas Institucionales de la Dirección General de Investigación, Posgrado y Servicio. Oficina 114, edificio Dr. Efraím Hernández X., carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, Tel. +52 (595) 952 1569 y +52 (55) 5133 1108, ext. 1569, https://revistas.chapingo.mx/zonas_aridas/, vacrida@gmail.com. Editor responsable: Dr. Ricardo David Valdez Cepeda.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2024-051412551800-102, e-ISSN: 2007-526X, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número: Coordinación de Revistas Institucionales de la Universidad Autónoma Chapingo, Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez, Oficina 114, edificio Dr. Efraím Hernández X., carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, fecha de la última modificación, 30 de diciembre de 2024.

Revista Chapingo

Serie Zonas Áridas

Volumen 23, enero-diciembre 2024

Contenido

- 1 Hongos micorrízicos arbusculares asociados al matorral desértico rosetófilo de la Sierra de Catorce, S.L.P.**
Reyna P. Hipólito-Piedras, Heriberto Méndez-Cortés, Hugo M. Ramírez-Tobías, Catarina Loredó-Osti, Pedro Castillo-Lara, Juan F. Martínez-Montoya, Víctor Olalde-Portugal
- 15 Análisis proximal e identificación de biocompuestos del residuo agroindustrial de aguacate (*Persea americana* Mill.)**
Nydia Suarez-Suarez, Juan M. Pinos-Rodríguez, Guillermo Espinoza-Reyes, Maribel Rodríguez-Aguilar, Anayeli Vázquez-Valladolid, Héctor Lee-Rangel
- 23 Dieta de la lechuga llanera (*Athene cunicularia hypugaea*) en el sur del desierto Chihuahuense**
Luis Antonio Tarango-Arámbula, Larisa A. Veasco-Bautista, Genaro Olmos-Oropeza, Juan F. Martínez-Montoya, Jesús Romero-Nápoles, Eloy A. Lozano-Cavazos, Saúl Ugalde-Lezama
- 39 Disponibilidad y selección de forraje por cuatro especies de ungulados en Sonora, México**
Krisly Saucedo-Uuh, Luis Antonio Tarango Arámbula, Ricardo Serna-Lagunes, Genaro Olmos-Oropeza, Fernando Clemente-Sánchez, María Magdalena Crosby Galván

Arbuscular mycorrhizal fungi related to rosetophyll scrub in Sierra de Catorce, S.L.P.

Hongos micorrízicos arbusculares asociados al matorral desértico rosetófilo de la Sierra de Catorce, S.L.P.

Reyna P. Hipólito-Piedras¹; Heriberto Méndez-Cortés^{1*}; Hugo M. Ramírez-Tobías¹
Catarina Loredó-Osti¹; Pedro Castillo-Lara¹; Juan F. Martínez-Montoya²;
Víctor Olalde-Portugal³

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía y Veterinaria, carretera San Luis Potosí-Matehuala, km 14.5 Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. C. P. 78321.

²Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, Postgrado de Innovación en Manejo de Recursos Naturales, Iturbide núm. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México, C. P. 78620.

³Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN-Unidad Irapuato, Departamento de Biotecnología y Bioquímica, Libramiento Norte Carretera Irapuato-León km 9.6, Irapuato, Guanajuato, México. C. P. 36824.

*Corresponding author: heriberto.mendez@uaslp.mx Tel: 444 8261314, ORCID ID: 0000-0001-9537-9794.

Abstract

The natural plant communities in the Sierra de Catorce, located in the northern part of San Luis Potosí, have a low diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) species. The objective of this research was to document the richness of AMF present in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce. Three sampling periods were involved; in each of them a 1 km transect was delimited where soil samples were taken every 200 m. The abundance of spores and the richness of AMF species were evaluated in each period. A total of 20 AMF species were recorded. The abundance of AMF spores varied significantly between sampling seasons. The highest number of spores belonged to the dry season, while the cold season presented the highest AMF richness. This research is the first to report AMF species richness in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, San Luis Potosí

Keywords: Richness, Glomeromycota, sampling epoch, xerophytic scrub.

Resumen

La riqueza de especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA's) en las comunidades vegetales naturales de la Sierra de Catorce localizada en el norte de estado de San Luis Potosí, es escasa. Esta investigación tuvo como objetivo documentar la riqueza de HMA presente en el matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce. Tres épocas de muestreo fueron involucradas; en cada una de ellas se delimitó un transecto de 1 km en el cual cada 200 m se tomaron muestras de suelo. La abundancia de esporas y la riqueza de especies de HMA's se evaluaron en cada una de las épocas. Un total de 20 especies de HMA se registraron. La abundancia de esporas de HMA's varió significativamente entre las épocas de muestreo. En la época seca se encontró el mayor número de esporas, mientras que la época fría presentó la mayor riqueza de HMA's. La presente investigación es la primera en informar la riqueza de HMA's en el matorral desértico rosetófilo de la sierra de Catorce, San Luis Potosí.

Palabras clave: Riqueza, Glomeromycota, época de muestreo, matorral xerófilo.



Introduction

Sierra de Catorce, located in the state of San Luis Potosí, is considered a priority area for biological conservation, particularly for birds (SEMARNAT, 2008). The vegetation includes oak forests, pine forests, grasslands, and scrubland (González-Costilla et al., 2007). Among the scrublands we can find the rosetophyll scrub, characteristic of extreme climatic zones, where precipitation is exceeded by evapotranspiration, resulting in reduced vegetation growth and, consequently, low ecosystem productivity (Granados-Sánchez et al., 2013). Floristic diversity in the rosetophyll scrub is the result of ecological and evolutionary processes that have been shaped over millions of years (FAO, 2006).

The ability of plants to withstand extreme environmental conditions, such as those in the rosetophyll scrub, may be linked to the presence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) (Martínez-García, 2011). AMF are obligate symbionts that form a mutualistic association with the roots of 80 % of vascular plants and bryophytes (Brundrett & Tedersoo, 2018; Delavaux et al., 2019). In this partnership, the fungus relies on the plant as its main carbon source (Wipf et al., 2019), while in return, it enhances the plant's nutrient uptake from the soil, especially phosphorus (Le Pioufle et al., 2019; Zhang et al., 2020). Additionally, this association improves the soil's physicochemical properties (Frey, 2019).

Currently, 163 AMF species have been recorded in Mexico, with at least 75 of these species found in the country's xerophytic scrub (Polo-Marcial et al., 2021; Chimal-Sánchez et al., 2021; Polo-Marcial et al., 2022; Hipólito-Piedras et al., 2024). In the state of San Luis Potosí, there are only two studies focused on AMF. The first study characterized, identified, and propagated different AMF species associated with agricultural crops in saline soils in the high plateau and mid-region of the state (Tapia-Goné et al., 2008). Mena-Echeverría et al. (2021) identified and evaluated AMF in two soils from different plant communities in relation to the growth of sorghum and maize. However, we still have little knowledge about the richness of AMF in natural plant communities in the state of San Luis Potosí.

The richness of plant species present in a community is directly related to a higher richness support of AMF (Pagano and Gupta, 2016). In this regard, the rosetophyll scrub is the most diverse plant community in the Sierra de Catorce, as it has more than 40 % of the 530 plant species identified (González-Costilla et al., 2007); therefore, it makes it a key area for AMF (Montaño et al., 2012). The timing of sampling is a factor that influences the potential for finding AMF (Hernández-Zamudio et al., 2018). Given the local ecological importance of the Sierra de Catorce and the global impact of dif-

Introducción

La Sierra de Catorce, ubicada en el estado de San Luis Potosí, se considera área prioritaria para la conservación biológica, principalmente de aves (SEMARNAT, 2008). En sus formaciones vegetales alberga encinares, piñonares, pastizales y matorrales (González-Costilla et al., 2007). Entre los matorrales se encuentra el matorral desértico rosetófilo, característico de zonas climáticas extremas, donde la precipitación es superada por la evapotranspiración, provocando una reducción en el crecimiento de la vegetación, y a su vez una baja productividad del ecosistema (Granados-Sánchez et al., 2013). La diversidad florística en el matorral desértico rosetófilo es el resultado de procesos ecológicos y evolutivos que se han moldeado a lo largo de millones de años (FAO, 2006).

La resistencia que muestran las plantas a condiciones ambientales extremas, como el matorral desértico rosetófilo, puede estar relacionada con la presencia de hongos micorrízicos arbusculares (Martínez-García, 2011). Los HMA's son simbiontes obligados que forman una asociación mutualista con la raíz del 80 % de las plantas vasculares y briófitas (Brundrett & Tedersoo, 2018; Delavaux et al., 2019). En esta asociación, el hongo depende de la planta como su principal fuente de carbono (Wipf et al., 2019), mientras éste compensa a la planta con el incremento en la absorción de nutrientes del suelo, principalmente fósforo (Le Pioufle et al., 2019; Zhang et al., 2020). Además, esta asociación mejora las propiedades físicoquímicas del suelo (Frey, 2019).

Actualmente, en México se tiene el registro de 163 especies de HMA, de las cuales al menos 75 han sido encontradas en matorrales xerófilos del país (Polo-Marcial et al., 2021; Chimal-Sánchez et al., 2021; Polo-Marcial et al., 2022; Hipólito-Piedras et al., 2024). En el estado de San Luis Potosí, los estudios dirigidos a HMA's son dos. En el primer manuscrito se caracterizaron, identificaron y propagaron diferentes especies de HMA's asociados a cultivos agrícolas en suelos salinos en la zona altiplano y media del estado (Tapia-Goné et al., 2008). Mientras que Mena-Echeverría et al. (2021) identificaron y evaluaron los HMA's de dos suelos de diferentes comunidades vegetales en relación con el crecimiento de sorgo y maíz. Sin embargo, el conocimiento de la riqueza de HMA's en comunidades vegetales naturales en el estado de San Luis Potosí aún es escasa.

La riqueza de especies vegetales presentes en una comunidad está directamente relacionada con un mayor soporte de riqueza de HMA's (Pagano y Gupta, 2016). En este sentido, el matorral desértico rosetófilo es la comunidad vegetal más diversa en la Sierra de Catorce, ya que presenta más del 40 % de las 530 especies vegetales identificadas (González-Costilla et al., 2007); por ello, lo convierte en área clave para los HMA's (Mon-

ferent forms of life within the microbiota, this study aimed to document the temporal richness and abundance of AMF present in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, San Luis Potosí, Mexico.

Materials and Methods

This research was conducted in the Sierra de Catorce, located in the northeastern part of the Altiplano Potosino-Zacatecano, within the municipality of Catorce, San Luis Potosí. The climate in the area is semi-arid and temperate with summer rainfall (Barboza-Gudiño et al., 2004). A representative soil profile was described at coordinates 23° 34' 41.3 N and 100° 55' 06.6 W. The soil is classified as Lithic Ustic Torriorthent according to Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014), which corresponds to an Eutric Lithosol (Ie/2b) according to the FAO-UNESCO World Soil Map legend (CETENAL, 1972). Soil properties were determined using five individual samples that were combined to form a composite sample, following NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). The soil has a loamy texture with a predominance of silt and sand, a moderately alkaline pH, low salinity, moderate organic matter, and low nitrogen levels (Table 1).

Table 1. Physical and chemical properties of the soil in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, S.L.P. Values according to NOM-021-RECNAT-2000.

Soil characteristics	Value
Bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.4
Sand (%)	39.5
Silt (%)	40
Clay (%)	20.5
pH in water (1:2)	7.8
Electrical conductivity ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	1
Total carbonates (%)	0.5
Organic matter (%)	2.7
Inorganic nitrogen ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	7.7
Extractable phosphorus ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	18.8
Potassium ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	2600.7

The type of vegetation corresponds to rosetophyll scrub. A pre-sampling study found that the most important species are *Agave striata*, *A. lechuguilla*, *Dasyllirion acotriche* and *Lindleya mespiloides*, in addition to various species of cacti.

Sampling

Sampling was carried out between the coordinates 23° 34' 27.5 N, 100° 55' 12.5 W and 23° 34' 56.2" N, 100° 55' 00.8" W. For this purpose, a 1 km long transect was

taño et al., 2012). La época en que se muestrea es un factor que determina el potencial de los HMA's para ser encontrados (Hernández-Zamudio et al., 2018). En este sentido, dada la importancia ecológica que representa localmente la Sierra de Catorce y, aunado al impacto global que implica la existencia de diferentes formas de vida en la microbiota, el presente trabajo tuvo como objetivo documentar la riqueza y abundancia temporal de HMA's presentes en el matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México.

Materiales y métodos

La presente investigación se llevó a cabo en la Sierra de Catorce, misma que se ubica en el noreste del Altiplano Potosino-Zacatecano, y pertenece al municipio de Catorce, San Luis Potosí. El clima en la zona es semiseco templado con lluvias en verano (Barboza-Gudiño et al., 2004). A través de un muestreo, el perfil representativo del suelo realizado en las coordenadas 23° 34' 41.3 N y 100° 55' 06.6 W fue descrito. El suelo se clasifica como Lithic Ustic Torriorthent según Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014), lo cual corresponde a un Litosol eútrico (Ie/2b), según leyenda del mapa mundial de suelos de la FAO-UNESCO (CETENAL, 1972). Las determinaciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo se realizaron a través de cinco muestras simples que conformaron una muestra compuesta, considerando la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). El suelo presenta una textura franca en el cual predominan limo y arena, con pH medianamente alcalino, poca salinidad, materia orgánica media y bajos niveles de nitrógeno (Cuadro 1).

Cuadro 1. Propiedades físico-químicas del suelo del matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce, S.L.P. Valores obtenidos conforme a la NOM-021-RECNAT-2000.

Característica del suelo	Valor
Densidad aparente ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.4
Arena (%)	39.5
Limo (%)	40
Arcilla (%)	20.5
pH en agua (1:2)	7.8
Conductividad eléctrica ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	1
Carbonatos totales (%)	0.5
Materia orgánica (%)	2.7
Nitrógeno inorgánico ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	7.7
Fósforo extraíble ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	18.8
Potasio ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	2600.7

El tipo de vegetación corresponde a matorral desértico rosetófilo. A través de un pre-muestreo se encontró que

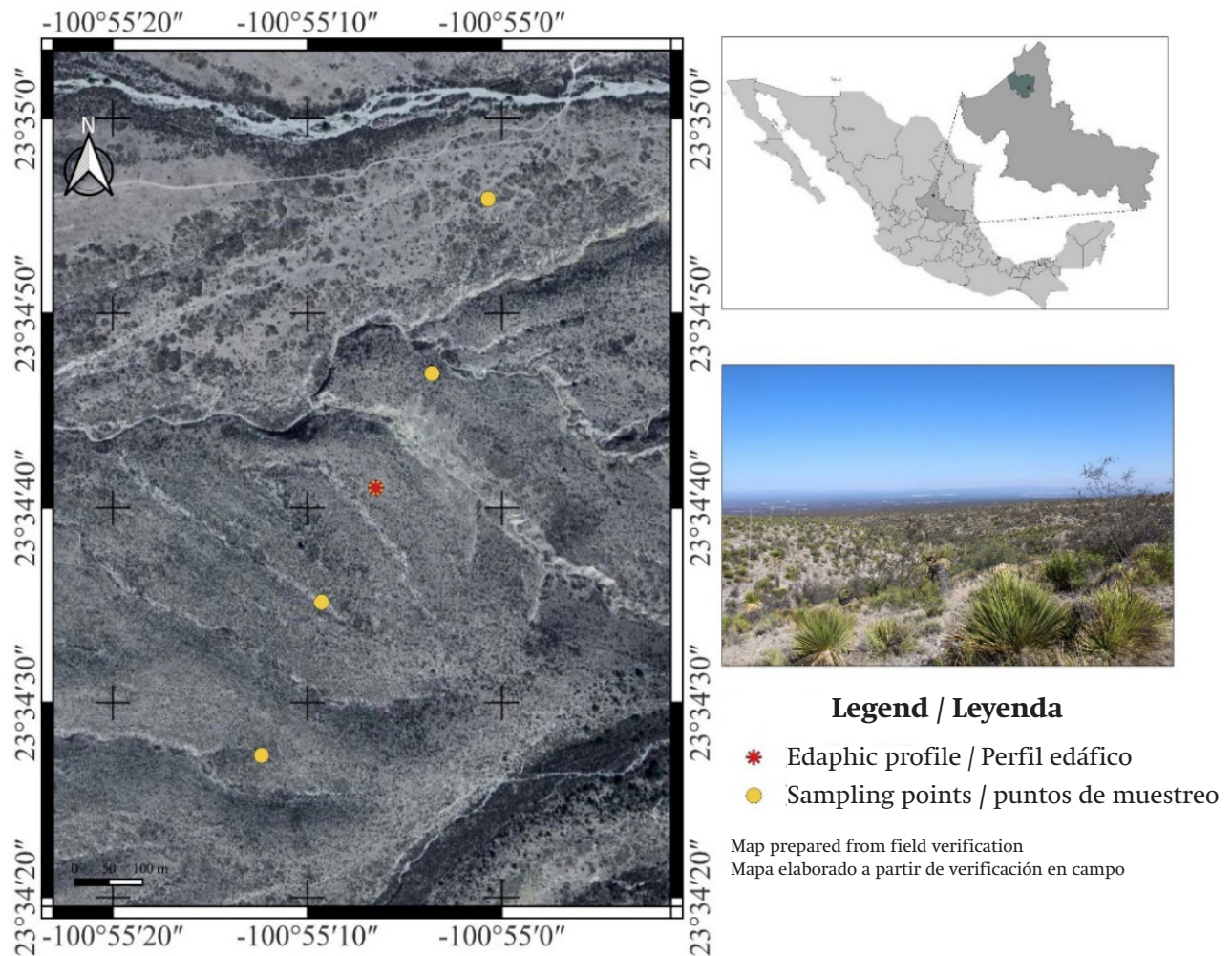


Figure 1. Location of sampling points in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, San Luis Potosí, Mexico.

Figura 1. Localización de puntos de muestreo en el matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México.

defined; sampling points were located every 200 m (Figure 1); in each of them, 1 kg of soil was collected considering a stratum from 0 to 30 cm, in an area close to the base of the most representative plant species of the sampling point in the rosetophyll scrub.

Sampling was carried out in three seasons: dry (April), rainy (August) and cold (December). The soil collected at each of the sampling points was homogenized to form a composite sample and placed in properly labeled polyethylene bags for transfer to the Phytopathology laboratory at the Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Extraction and identification of AMF

The extraction of AMF spores was carried out on 500 g of soil for each sampling period using wet sieving and decantation methods (Gerdemann & Nicolson, 1963), and sucrose gradient centrifugation (Daniels & Skipper, 1982). Using a stereo microscope, AMF spores were quantified

las especies más importantes son *Agave striata*, *A. lechuquilla*, *Dasyllirion acotriche* y *Lindleya mespiloides*, además de diversas especies de cactáceas.

Muestreo

El muestreo se realizó entre las coordenadas 23° 34' 27.5 N, 100° 55' 12.5 W y 23° 34' 56.2" N, 100° 55' 00.8" W. Para ello se definió un transecto de 1 km de longitud; cada 200 m se ubicaron puntos de muestreo (Figura 1); en cada uno de ellos se recolectó 1 kg de suelo considerando un estrato de 0 a 30 cm, en un área cercana a la base de las especies vegetales más representativas del punto de muestreo en el matorral desértico rosetófilo.

Los muestreos se realizaron en tres épocas: seca (abril), lluviosa (agosto) y fría (diciembre). El suelo recolectado en cada uno de los puntos de muestreo se homogenizó para formar una muestra compuesta y se colocó en bolsas de polietileno debidamente etiquetadas para su

and grouped according to size and color. Subsequently, AMF spores were mounted on slides with polyvinyl alcohol-lactoglycerol (PVLG) (Morton et al., 1993) and PVLG + Melzer (Koske & Tessier, 1983) and observed under a Zeiss® (Primo Star) optical microscope with Koehler fixed illumination. Taxonomic identification was performed according to the morphological characteristics proposed by Walker (1983) and Morton (1988), such as: color, size, presence/absence and type of hyphae, layers comprising the spore wall and the reaction of the layers to Melzer's reagent. We also consulted the original publications of the species reported worldwide and the species descriptions available in the International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular Mycorrhizal Fungi (<http://invam.caf.wvu.edu/>) and Phylogeny and taxonomy of Glomeromycota (<http://www.amf-phylogeny.com>).

Data Analysis

Spore abundance data per g of soil were analyzed by the non-parametric method of Kruskal & Wallis (1952), with a level of $P = 0.05$ in Minitab 15 software.

Parameter and ecological analysis

The relative abundance of species was calculated by considering the number of spores of each species divided by the total number of spores of all species found, multiplied by 100 (Marrugán, 2004). A Bray-Curtis ordination model was generated by calculating the percent similarity between sampling epochs over the year using Biodiversity Pro 2.0 software (McAleece et al., 1997).

Sampling effort

To estimate the total number of AMF species in the rosetophyll scrub, an evaluation of sampling effort was made. This was done by using fitted models of species accumulation curves with the non-parametric estimators of Chao2 and Jackknife of first order. The mathematical expression of the Chao2 model is: $\text{Chao2} = \text{Sobs} + (L^2/2M)$, where Sobs is the number of known species; L = number of species occurring only in one sample and M = number of species occurring in exactly two samples. The mathematical expression of the Jackknife model is $\text{Jack 1} = \text{Sobs} + L(m - 1/m)$, where: m = number of samples. To smooth the accumulation curve, the negative exponential model was used. The mathematical expression is: $\text{Sn} = (a[1 - \exp(-b \cdot n)]) / b$ where: a = rate of increase of new species at the beginning of the inventory, b = parameter in relation to the shape of the curve (Jiménez-Valverde & Hortal, 2000).

Results

Richness and abundance of AMF

A total of 20 AMF species were identified and distributed in six families (Table 2). Fifty-five percent

traslado al laboratorio de Fitopatología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Extracción e identificación de HMA's

La extracción de esporas de HMA se realizó en 500 g de suelo por cada época de muestreo, mediante los métodos de tamizado en húmedo y decantación (Gerdemann & Nicolson, 1963), así como de centrifugación en gradiente de sacarosa (Daniels & Skipper, 1982). Por medio de un microscopio estereoscópico se cuantificaron las esporas de HMA's y se agruparon conforme a su tamaño y color. Posteriormente, las esporas de HMA's se montaron en portaobjetos con alcohol polivinílico-lacto-glicerol (PVLG) (Morton et al., 1993) y PVLG + Melzer (Koske & Tessier, 1983) y fueron observadas bajo un microscopio óptico Zeiss® (Primo Star) con iluminación fija Koehler. La identificación taxonómica se realizó de acuerdo con las características morfológicas propuestas por Walker (1983) y Morton (1988), tales como: color, tamaño, presencia/ausencia y tipo de hifa, capas que constituyen la pared de la espóra y la reacción de las capas al reactivo de Melzer. Asimismo, realizamos una consulta de las publicaciones originales de las especies reportadas a nivel mundial y las descripciones de las especies disponibles en la Colección Internacional de Cultivos de Hongos Micorrizógenos Arbusculares y Vesiculares (<http://invam.caf.wvu.edu/>) y Phylogeny and taxonomy of Glomeromycota (<http://www.amf-phylogeny.com>).

Análisis de datos

Los datos de abundancia de esporas por g de suelo se analizaron por el método no paramétrico de Kruskal & Wallis (1952), con un nivel de $P = 0.05$ en el software Minitab 15.

Parámetro y análisis ecológico

La abundancia relativa de las especies se calculó considerando el número de esporas de cada una de las especies divididas entre el total de esporas de todas las especies encontradas, multiplicado por 100 (Marrugán, 2004). Un modelo de ordenación Bray-Curtis se generó mediante el cálculo del porcentaje de similitud entre las épocas de muestreo a través del año, utilizando el software Biodiversity Pro 2.0 (McAleece et al., 1997).

Esfuerzo de muestreo

Para estimar el número total de especies de HMA's del matorral desértico rosetófilo se realizó una evaluación del esfuerzo de los muestreos. Lo anterior se hizo mediante el uso de modelos ajustados de curvas de acumulación de especies con los estimadores no paramétricos de Chao2 y Jackknife de primer orden. La expresión matemática del modelo de Chao2 es: $\text{Chao2} = \text{Sobs} + (L^2/2$

Table 2. Species list and relative abundance of AMF in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, S.L.P. in three sampling seasons.
Cuadro 2. Listado de especies y abundancia relativa de HMA en el matorral desértico rosetófilo en las Sierra de Catorce, S.L.P. en tres épocas de muestreo.

Family/HMA species / Familia/Especie HMA	Relative abundance of AMF species / Abundancia relativa delas especies de HMA's		
	Dry / Seca	Rainy / Lluviosa	Cold / Fría
Acaulosporaceae			
<i>Acaulospora denticulata</i> (Sieverd. & S. Toro)	2.86	5.32	2.30
<i>Acaulospora laevis</i> (Gerd. & Trappe)	1.90	0	5.75
<i>Acaulospora morrowiae</i> (Spain & N.C. Schenck)	3.81	3.19	0
<i>Acaulospora rehmsii</i> (Sieverd & S. Toro)	0	0	3.45
Ambisporaceae			
<i>Ambispora fennica</i> (C. Walker, Vestberg & Schüßler)	3.81	8.51	8.05
Entrophosporaceae			
<i>Entrophospora etunicata</i> (W.N. Becker & Gerd.) Błaszk.,B.T. Goto, Magurno, Niezgoda & Cabello	19.05	27.66	17.24
<i>Entrophospora infrequens</i> (I.R. Hall) R.N. Ames & R.W. Schneid	9.52	13.83	5.75
Gigasporaceae			
<i>Gigaspora margarita</i> (W.N. Becker & I.R. Hall)	9.52	13.83	10.34
<i>Scutellospora scutata</i> (C. Walker & Dieder) Oehl, F.A. De Souza & Sieverding	11.43	11.70	10.34
Glomeraceae			
<i>Funneliformis mosseae</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler	8.57	0	6.90
<i>Glomus macrocarpum</i> (Tul. & C. Tul.)	9.52	10.64	6.90
<i>Glomus microcarpum</i> Tul. & C. Tul.	0	0	3.45
<i>Glomus rubiforme</i> (Gerd. & Trappe) R.T. Almeida & N.C. Schenck	0	0	2.30
<i>Sclerocystis sinuosa</i> (Gerd. & B.K. Bakshi)	1.90	0	3.45
<i>Rhizophagus aggregatum</i> (N.C. Schenck & G.S. Sm.) Sieverd., G.A. Silva & Oehl	2.86	2.13	1.15
<i>Rhizophagus irregularis</i> (Wubet, Renker & Buscot) G.A. Silva & Oehl	0.95	0	1.15
<i>Rhizoglomus microaggregatum</i> (Koske, Gemma & PD Olexia) Sieverd., GA Silva & Oehl , Sieverding, Da Silva, Berndt & Oehl	2.86	0	3.45
<i>Rhizophagus fasciculatus</i> ((Thaxt.) C. Walker & A. Schüßler	8.57	0	5.75
<i>Septoglomus deserticola</i> (Trappe, Bloss & J.A. Menge) G.A. Silva, Oehl & Sieverd	0	1.06	2.30
<i>Septoglomus mexicanum</i> (E.Chimal-Sánchez, C. Senés-Guerrero, N.M.Montaña, L. Varela, R. Gracia-Sánchez, A. Pacheco, S. Montaña-Arias & S.L. Camargo-Ricalde)	2.86	2.13	0

of the AMF species belong to the family Glomeraceae, 20 % to Acaulosporaceae, 10 % to Gigasporaceae, 10 % to Entrophosporaceae and 5 % to Ambisporaceae. Of the 20 species recorded only eight were found in the three sampling seasons.

The abundance values of AMF spores showed significant ($P < 0.007$) differences according to the sampling seasons. The dry season had the highest abundance of spores, while the cold season had the lowest abundance. The highest AMF richness was

M), donde Sobs es el número de especies conocidas; L= número de especies que ocurren solo en una muestra y M = número de especies que ocurren exactamente en dos muestras. La expresión matemática del modelo de Jackknife es: $Jack\ 1 = Sobs + L (m - 1/m)$, donde: m = número de muestras. Para suavizar la curva de acumulación se utilizó el modelo exponencial negativo. La expresión matemática es: $S_n = (a[1 - \exp(-b \cdot n)]) / b$ donde: a = tasa de incremento de nuevas especies al comienzo del inventario, b = parámetro en relación con la forma de la curva (Jiménez-Valverde & Hortal, 2000).

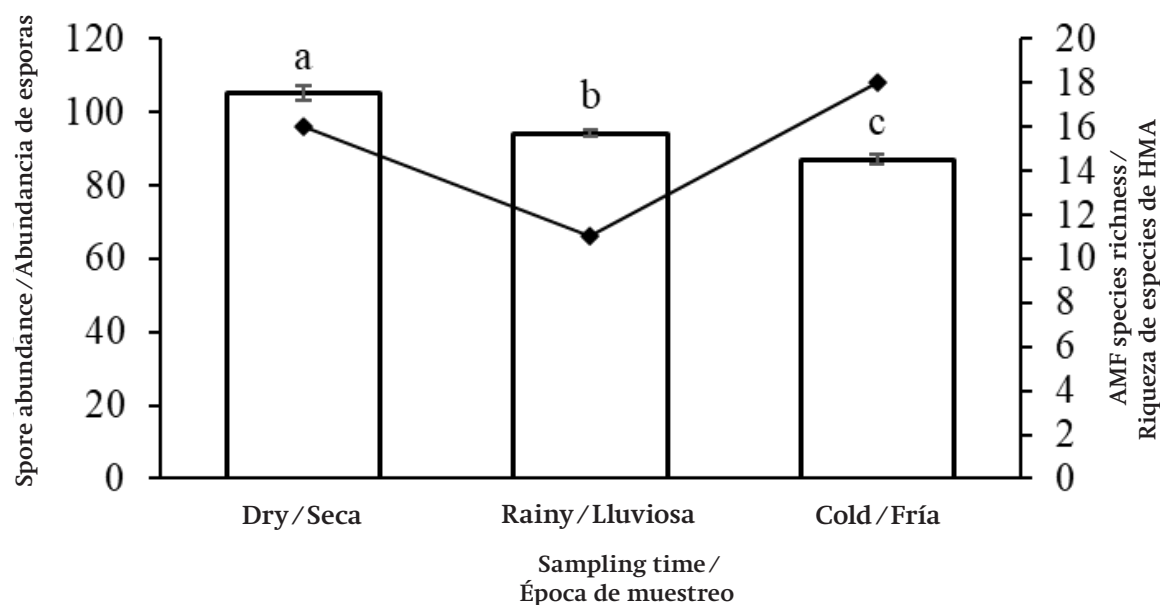


Figure 2. Spores per gram of soil (bars) and species richness (dots) of AMF in three sampling seasons. Data represent the mean $\pm$ standard error (different letters indicate significant differences).

Figura 2. Esporas por gramo de suelo (barras) y riqueza de especies (puntos) de HMA's en tres épocas de muestreo. Los datos representan la media $\pm$ el error estándar (Letras diferentes indican diferencias significativas).

recorded in the cold season with 18 species, while the lowest richness was detected in the rainy season with 11 AMF species (Figure 2).

Eight species belonging to the six AMF families were identified and recorded, without any relationship with seasonality, because they were recorded in the three sampling seasons; *Entrophospora etunicata* (formerly *Claroideoglossum etunicatum*), *Gigaspora margarita* and *Scutellospora scutata*, were the species with the highest abundance.

The species that were found in only one sampling season coincided in being the less abundant AMF species such as *Glomus microcarpum*, *G. rubiforme*, as well as *Rhizophagus irregularis*. Although the last one was recorded in two seasons, its abundance was minimal.

The sampling seasons with the highest 82 % similarity in terms of AMF species richness were the dry and cold seasons (Figure 3), sharing 13 of the 20 species recorded. The rainy season was 74 % similar to the dry and cold seasons, although the lowest AMF species richness was found in this season.

The values of AMF species richness estimated by means of the Jackknife and Chao2 methods showed non-significant differences between the known richness values (Figure 4). The Jackknife estimator showed an increase of maximum 22 species from the second sampling that corresponded to the rainy season; however, after that value, the curve stabilized. The

Resultados

Riqueza y abundancia de HMA's

Un total de 20 especies de HMA fueron identificadas y se distribuyen en seis familias (Cuadro 2). El 55 % de las especies de HMA's pertenecen a la familia Glomeraceae, 20 % a Acaulosporaceae, 10 % a Gigasporaceae, 10 % a Entrophosporaceae y 5 % a Ambisporaceae. De las 20 especies registradas solo ocho se encontraron en las tres épocas de muestreo.

Los valores de abundancia de esporas de HMA's mostraron diferencias significativas ($P < 0.007$) en función de las épocas de muestreo. La época seca presentó la mayor abundancia de esporas, mientras en la época fría se registró la menor abundancia. La mayor riqueza de HMA's se registró en la época fría con 18 especies, mientras que la menor riqueza se detectó en la época lluviosa con 11 especies de HMA's (Figura 2).

Ocho especies pertenecientes a las seis familias de HMA fueron identificadas y registradas, sin alguna relación con la estacionalidad, debido a que se registraron en las tres épocas de muestreo; *Entrophospora etunicata* (antes *Claroideoglossum etunicatum*), *Gigaspora margarita* y *Scutellospora scutata*, fueron las especies con mayor abundancia.

Las especies que se encontraron en una sola época de muestreo coinciden en ser las especies de HMA's menos abundantes como *Glomus microcarpum*, *G. rubiforme*,

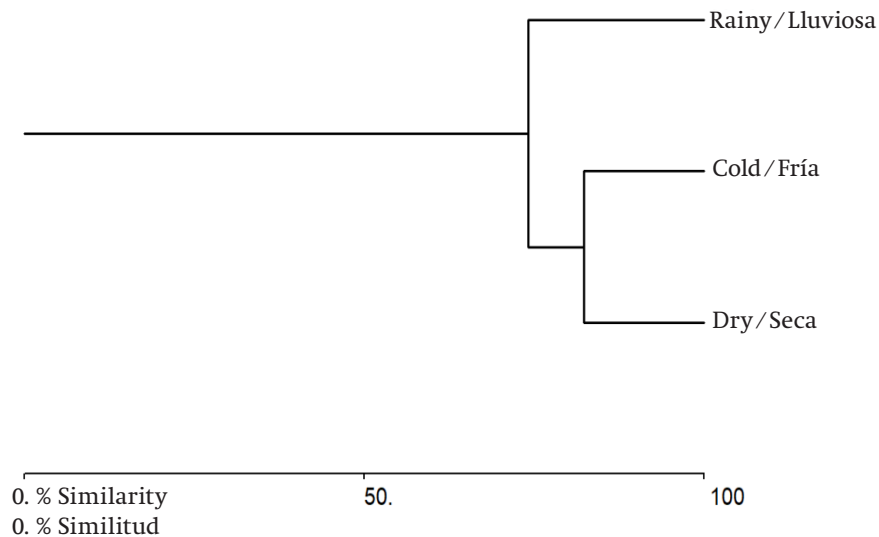


Figure 3. Bray-Curtis similarity analysis by sampling season in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce, S.L.P.
Figura 3. Análisis de similitud de Bray-Curtis por época de muestreo en el matorral desértico rosetófilo, en la Sierra de Catorce, S.L.P.

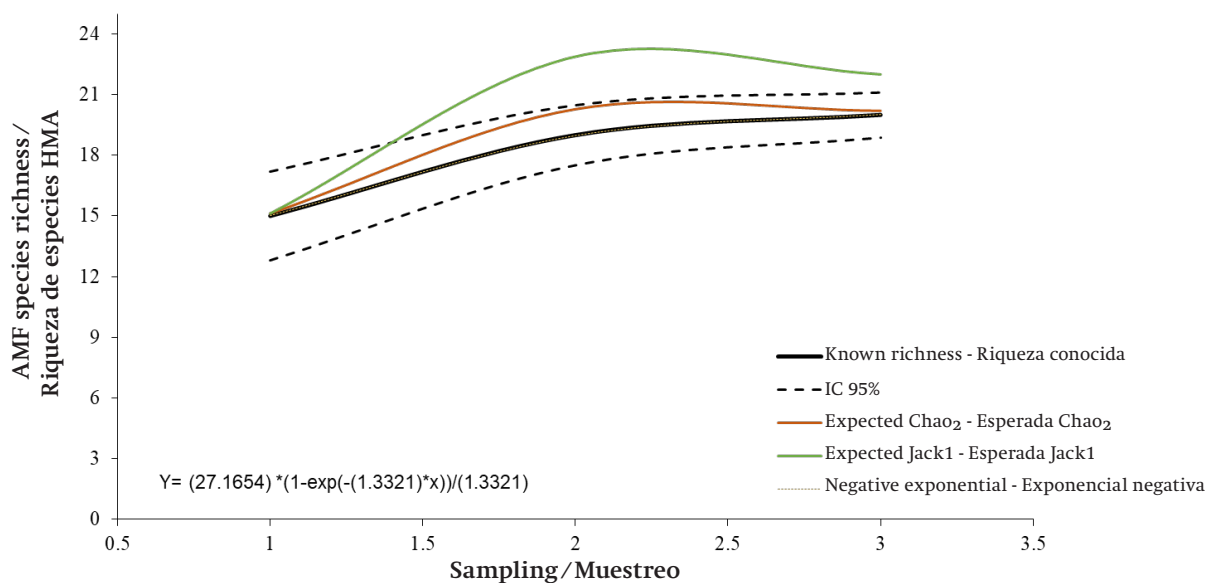


Figure 4. Cumulative curves of species and negative exponential model of AMF species recorded in the rosetophyll scrub in the Sierra de Catorce S.L.P. in three sampling seasons (dry, rainy and cold) by means of the Jackknife and Chao2 estimators.

Figura 4. Curvas de acumulación de especies y modelo exponencial negativo de especies de HMA's registradas en el matorral desértico rosetófilo en la Sierra de Catorce S.L.P. en tres épocas de muestreo (seca, lluviosa y fr a) por medio de los estimadores Jackknife y Chao2.

Chao2 estimator showed a similar tendency since it did not modify the richness (20 AMF species already recorded). To smooth these results in the negative exponential expression, it is observed that regardless of increasing the sampling effort, the richness of AMF maintains similar values to those observed.

Discussion

así como *Rhizophagus irregularis*. Aunque la última se registró en dos épocas, su abundancia fue mínima.

Las épocas de muestreo mayores al 82 % de semejanza conforme a la riqueza de especies de HMA's fueron las épocas seca y fría (Figura 3), compartiendo 13 de las 20 especies registradas. La época lluviosa se asemeja a las

The rosetophyll scrub covers 21.7 % of the total area of the state of San Luis Potosí (CONAFOR, 2018). In the Sierra de Catorce, this plant community represents a priority area for flora conservation, harboring representative species of the territory, in addition to an outstanding number of threatened cacti (González-Costilla et al., 2007). The rosetophyll scrub belongs to the xerophytic scrub, the largest vegetation type in the country and the richest in endemism (Rzedowski, 2006), a factor that influences the concentration of a high diversity of AMF (Montaño et al., 2012). According to the results, the rosetophyll scrub located in the Sierra de Catorce presented a taxonomic richness of 20 species of AMF; however, so far, no national study has been directed to species such as *Agave striata*, *A. lechuguilla*, *Dasyliirion acotriche*, and *Lindleya mespiloides*, which belong to the rosetophyll scrub studied.

The richness of AMF's documented in the present study falls within the range of records published for other plant communities belonging to xerophytic vegetation in Mexico; such records range from 5 to 29 species (Pimienta-Barrios et al., 2002; Pezzani et al., 2006; Bashan et al., 2007; Tapia-Goné et al., 2008; Ochoa-Meza et al., 2009; Bautista-Cruz et al., 2014; Chimal-Sánchez et al., 2015a; Chimal-Sánchez et al., 2015b; Trinidad-Cruz et al., 2017; Monroy-Ata et al., 2018; Hernández-Zamudio et al., 2018; Chimal-Sánchez et al., 2018; Reyes-Jaramillo et al., 2019; Mena-Echeverría et al., 2021 and Chimal-Sánchez et al., 2022).

The richness of the Glomeraceae family represents 50 % of the total AMF species documented in the present study; this family shares 25 to 31 % of the AMF species recorded in other xerophytic scrubs in the country (Chimal-Sánchez et al., 2015; Hernández-Zamudio et al., 2018; Monroy-Ata et al., 2018; Reyes-Jaramillo et al., 2019). Chimal-Sánchez et al. (2015) mention that species of this family tend to distribute in arid and semi-arid environments where they associate with a wide variety of species due to their high functionality. Additionally, these species are attributed with high competitiveness compared to those of other AMF families (Trejo-Aguilar et al., 2013).

Since spore abundance was higher during the dry season, it is possible to consider seasonality as a factor influencing the populations of these fungi. This phenomenon can be particularly related to sporulation. Sporulation is used as a survival strategy, which is more intense and significant when host plants experience water stress (da Silva et al., 2014).

The abundance and richness of AMF vary according to the different phenological stages of the plant, which are associated with seasonal changes throughout the year (Scott-Denton et al., 2006). The greater richness of AMF found in the cold season and its similarity to

épocas seca y fría en un 74 %, aunque en esta época se encontró la menor riqueza de especies de HMA's.

Los valores de la riqueza de especies de HMA's estimados por medio de los métodos de Jackknife y Chao2 presentaron diferencias no significativas entre los valores de riqueza conocidas (Figura 4). El estimador Jackknife mostró un aumento de máximo 22 especies a partir del segundo muestreo que correspondió a la época de lluvia; sin embargo, después de dicho valor, la curva se estabilizó. El estimador de Chao2 mostró una tendencia similar ya que no modificó la riqueza (20 especies de HMA's ya consignadas). Para suavizar estos resultados en la expresión exponencial negativa, se observa que a pesar de aumentar el esfuerzo de muestreo la riqueza de HMA's mantiene valores similares a los observados.

Discusión

El matorral desértico rosetófilo cubre el 21.7 % de la superficie total del estado de San Luis Potosí (CONAFOR, 2018). En la Sierra de Catorce, esta comunidad vegetal representa un área prioritaria para la conservación de flora, albergando especies representativas del territorio, además de un sobresaliente número de cactáceas amenazadas (González-Costilla et al., 2007). El matorral desértico rosetófilo pertenece al matorral xerófilo, el tipo de vegetación con mayor extensión en el país y la más rica en endemismo (Rzedowski, 2006), factor que influye en concentrar una alta diversidad de HMA's (Montaño et al., 2012). De acuerdo con los resultados, el matorral desértico rosetófilo ubicado en la Sierra de Catorce presentó una riqueza taxonómica de 20 especies de HMA's; no obstante, hasta el momento, ningún estudio a nivel nacional ha sido dirigido a especies como *Agave striata*, *A. lechuguilla*, *Dasyliirion acotriche*, y *Lindleya mespiloides*, pertenecientes al matorral desértico rosetófilo estudiado.

La riqueza de HMA's documentada en la presente investigación está en el rango de los registros publicados dentro de otras comunidades vegetales pertenecientes a la vegetación xerófila en México; tales registros oscilan entre 5 y 29 especies (Pimienta-Barrios et al., 2002; Pezzani et al., 2006; Bashan et al., 2007; Tapia-Goné et al., 2008; Ochoa-Meza et al., 2009; Bautista-Cruz et al., 2014; Chimal-Sánchez et al., 2015a; Chimal-Sánchez et al., 2015b; Trinidad-Cruz et al., 2017; Monroy-Ata et al., 2018; Hernández-Zamudio et al., 2018; Chimal-Sánchez et al., 2018; Reyes-Jaramillo et al., 2019; Mena-Echeverría et al., 2021 y Chimal-Sánchez et al., 2022).

La riqueza de la familia Glomeraceae representa el 50 % del total de las especies de HMA's documentadas en la presente investigación; esta familia comparte del 25 al 31 % de las especies de HMA's registradas en otros matorrales xerófilos del país (Chimal-Sánchez et al., 2015; Hernández-Zamudio et al., 2018; Monroy-Ata et

that of the dry season aligns with Sommerfeld et al. (2013), who mention that AMF richness is consistent in winter and summer seasons. However, further research documenting AMF richness during the cold season is necessary to generate more information on the seasonality of AMF throughout the year

Of the 20 AMF species found in the rosetophyll scrub of the Sierra de Catorce, *Entrophospora etunicata* was one of the most frequent and the most abundant; its presence, along with *Funneliformis mosseae*, has been consistently documented in most studies focused on the arid and semi-arid zones of the country (Pezzani et al., 2006; Bashan et al., 2007; Tapia-Goné et al., 2008; Bautista-Cruz et al., 2014; Chimal-Sánchez et al., 2015a; Chimal-Sánchez et al., 2015b; Trinidad-Cruz et al., 2017; Monroy-Ata et al., 2018; Chimal-Sánchez et al., 2020; Reyes-Jaramillo et al., 2019; Mena-Echeverría et al., 2021; Chimal-Sánchez et al., 2022).

Among the most abundant and frequent species are *Gigaspora margarita* and *Scutellospora scutata*; these results differ from those of Reyes-Jaramillo et al. (2019) who mention that *S. scutata* (formerly *Dentiscutata scutata*) is a species of low frequency associated with mezcal agaves in xerophytic scrub in Oaxaca. *G. margarita* is a species with few records in xerophytic vegetation (Pimienta-Barrios et al., 2002; Chimal-Sánchez et al., 2015). However, its presence in the three sampling seasons and being one of the most abundant, could be because it is a species with multiple germination, a strategy to adapt to adverse effects (Stürmer et al., 2018).

Some of the AMF morphospecies represent the second report at the national level in natural plant communities. According to Varela et al. (2019), *Ambispora fennica* has been reported only in temperate forests; however, Hernández-Zamudio et al. (2018) reports it associated with *Larrea tridentata* in Coahuila. Chimal-Sánchez et al. (2020) reported for the first time *Septoglomus mexicanum* associated with *Prosopis laevigata*; therefore, this species is considered, so far, typical of xerophytic scrubs in the country (Polo-Marcial et al., 2021). This contribution reports the first record of *Rhizophagus irregularis* in xerophytic scrub, but this species has already been recorded in coastal dunes and tropical deciduous forest in Yucatán (Lara-Pérez et al., 2020), as well as in the low deciduous forest and cloud forest in the state of Veracruz (Peñuelas-Rubio et al., 2021).

The richness of AMF was fully documented. The Chao2 ecological estimator showed no significant difference between observed and expected species; however, the Jackknife estimator predicted at least two species that were not detected in our study. López-Gómez & Williams-Linera (2006) mention that

al., 2018; Reyes-Jaramillo et al., 2019). Chimal-Sánchez et al. (2015) mencionan que las especies de esta familia tienden a distribuirse en ambientes áridos y semiáridos donde se asocian con una amplia variedad de especies por poseer una alta funcionalidad. Aunado a esto, a esas especies se les adjudica una alta competitividad con respecto a las de otras familias de HMA's (Trejo-Aguilar et al., 2013).

Debido a que la abundancia de esporas fue mayor en la época seca, lo posible es considerar que la estacionalidad es un factor que influye en las poblaciones de estos hongos. Este fenómeno puede ser relacionado particularmente con la esporulación. La esporulación es utilizada como estrategia de supervivencia, la cual es más intensa y significativa cuando las plantas hospederas presentan estrés hídrico (da Silva et al., 2014).

La abundancia y riqueza de los HMA's varía según las diferentes etapas fenológicas de la planta, mismas que se asocian con los cambios estacionales durante el año (Scott-Denton et al., 2006). La mayor riqueza de HMA's encontrada en la época fría y su similitud con la de la época seca concuerda con Sommerfeld et al. (2013), pues ellos mencionan que la riqueza de HMA's en las épocas invernal y de verano es consistente. Sin embargo, alguna investigación que documente la riqueza de HMA en la época fría es necesaria, para generar más información sobre la estacionalidad de los HMA's a través del año.

De las 20 especies de HMA's encontradas en el matorral desértico rosetófilo de la Sierra de Catorce, *Entrophospora etunicata* fue una de las más frecuentes y la más abundante, su presencia junto con *Funneliformis mosseae* han sido constantemente documentadas en la mayoría de los estudios enfocados en las zonas áridas y semiáridas del país (Pezzani et al., 2006; Bashan et al., 2007; Tapia-Goné et al., 2008; Bautista-Cruz et al., 2014; Chimal-Sánchez et al., 2015a; Chimal-Sánchez et al., 2015b; Trinidad-Cruz et al., 2017; Monroy-Ata et al., 2018; Chimal-Sánchez et al., 2020; Reyes-Jaramillo et al., 2019; Mena-Echeverría et al., 2021; Chimal-Sánchez et al., 2022).

Entre las especies más abundantes y frecuentes se encuentran *Gigaspora margarita* y *Scutellospora scutata*; estos resultados difieren de los de Reyes-Jaramillo et al. (2019) quienes mencionan que *S. scutata* (antes *Dentiscutata scutata*) es una especie de baja frecuencia asociada a agaves mezcaleros en matorrales xerófilos de Oaxaca. Por su parte, *G. margarita* es una especie con pocos registros en la vegetación xerófila (Pimienta-Barrios et al., 2002; Chimal-Sánchez et al., 2015). Sin embargo, su presencia en las tres épocas de muestreo y el ser una de las más abundantes, podría deberse a que es una especie con germinación múltiple, una estrategia para adaptarse a efectos adversos (Stürmer et al., 2018).

a difference between two to five species between the Jackknife estimator and the observed demonstrates an appropriate sampling effort that uncovers many AMF species. Our study detected 90 % of the species that could be found in the rosetophyll scrub of the Sierra de Catorce, San Luis Potosí. However, it is important to mention that the increase of explorations in xerophytic scrubs of the country could increase the richness of AMF documented so far in this vegetation type (Chimal-Sánchez et al., 2015).

Conclusions

The richness and abundance of arbuscular mycorrhizal fungi associated with rosetophyll scrub varied with the time of year. The highest abundance of AMF spores corresponds to the dry season, while the highest richness was observed in the cold season. This study allowed us to document for the first time the richness of AMF associated with the rosetophyll scrub in the Potosino-Zacatecan highlands; in addition, the first record of *Rhizophagus irregularis* in this type of vegetation corresponds to this study.

Acknowledgments

Thanks to Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the scholarship awarded to the first author for her postgraduate studies in Agricultural Sciences at the Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine of UASLP.

References / Referencias

- Barboza-Gudiño, J. R., Hoppe, M., Gómez-Anguiano, M., & Martínez-Macías, P. R. (2004). Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(3), 299-319
- Bashan, Y., Khaosaad, T., Salazar, B. G., Ocampo, J. A., Wiemken, A., Oehl, F., & Vierheilig, H. (2007). Mycorrhizal characterization of the boojum tree, *Fouquieria columnaris*, an endemic ancient tree from the Baja California Peninsula, Mexico. *Trees*, 21, 329-335. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0126-2>
- Bautista-Cruz A. A., Montañón N. M., Camargo-Ricalde, S. L., & Pacheco L. (2014). Hongos micorrizógenos arbusculares y nutrientes del suelo asociados a cuatro especies de helechos en dos ecosistemas de Oaxaca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20, 199-212. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.02.007>

Algunas de las morfoespecies de HMA's representan el segundo reporte a nivel nacional en comunidades vegetales naturales. Según Varela et al. (2019), *Ambispora fennica* ha sido reportada solo en bosques templados; sin embargo, Hernández-Zamudio et al. (2018) la reporta asociada a *Larrea tridentata* en Coahuila. Chimal-Sánchez et al. (2020) reportaron por primera vez a *Septoglomus mexicanum* asociada a *Prosopis laevigata*; por lo tanto, esa especie es considerada, hasta el momento, propia de matorrales xerófilos del país (Polo-Marcial et al., 2021). En esta contribución se reporta el primer registro de *Rhizophagus irregularis* en matorrales xerófilos, pero esta especie ya ha sido registrada en dunas costeras y bosque tropical caducifolio en Yucatán (Lara-Pérez et al., 2020), así como en la selva baja caducifolia y bosque mesófilo de montaña en el estado de Veracruz (Peñuelas-Rubio et al., 2021).

La riqueza de HMA's se documentó en su totalidad. El estimador ecológico de Chao2, mostró diferencia no significativa entre especies observadas y esperadas; sin embargo, el estimador de Jackknife predijo al menos dos especies que no fueron detectadas en nuestro estudio. López-Gómez & Williams-Linera (2006) mencionan que una diferencia entre dos a cinco especies entre el estimador de Jackknife y lo observado, demuestran un esfuerzo de muestreo apropiado que descubre la mayoría de las especies de HMA's. Nuestro estudio detectó el 90 % de las especies que se podrían encontrar en el matorral desértico rosetófilo de la Sierra de Catorce, en San Luis Potosí. Sin embargo, es importante mencionar que el aumento de exploraciones en matorrales xerófilos del país podría aumentar la riqueza de HMA's documentada hasta el momento en este tipo de vegetación (Chimal-Sánchez et al., 2015).

Conclusiones

La riqueza y abundancia de hongos micorrízicos arbusculares asociados al matorral desértico rosetófilo varían con la época del año. A época seca corresponde la mayor abundancia de esporas de HMA's, mientras que la mayor riqueza se observó en la época fría. Este estudio permitió documentar por primera vez la riqueza de HMA's asociados al matorral desértico rosetófilo, en el altiplano Potosino-Zacatecano; además, el primer registro de *Rhizophagus irregularis* en dicho tipo de vegetación corresponde a esta contribución.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada a la primera autora para sus estudios de posgrado en Ciencias Agropecuarias de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UASLP.

Fin de la versión en español

- Brundrett, M. C., & Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220, 1108-1115. <https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- CETENAL. (1972). Cartas de uso del suelo y edafológicas F14 A25, F14 A24, F14 A23 y F14 A14, escala 1:50 000. SPP, México.
- Chimal-Sánchez, E., Araiza-Jacinto, M. L., & Román-Cárdenas, V. J. (2015). El efecto del fuego en la riqueza de especies de hongos micorrizógenos arbusculares asociada a plantas de matorral xerófilo en el Parque Ecológico "Cubitos". *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 182, 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2015.09.002>
- Chimal-Sánchez, E., García-Sánchez, R., & Hernández-Cuevas, L. V. (2015). Gran riqueza de hongos micorrizógenos arbusculares en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Micología*, 41, 14-26
- Chimal-Sánchez, E., I. Reyes-Jaramillo, J. Y., Salmerón-Castro, N., Vázquez-Pérez, L., & Varela-Fregoso, L. (2018). Cuatro nuevos registros de hongos micorrizógenos arbusculares (Glomeromycota) asociados con *Agave karwinskii* y *A. angustifolia* (Agavaceae) de Oaxaca, México. *Acta Botánica Mexicana*, 125: 173-187. <https://doi.org/10.21829/abm125.2018.1356>
- Chimal-Sánchez, E., Reyes-Jaramillo, I., Camargo-Ricalde, S. L., Varela, L., Salmerón Castro, J. Y., & Montaña, N. M. (2021). *Racocetra cromosomica* sp. nov. from Oaxaca, Mexico. *Mycotaxon*, 136(3), 615-626.
- Chimal-Sánchez, E., Senés-Guerrero, C., Varela, L., Montaña, N. M., García-Sánchez, R., Pacheco, A., Montaña-Arias, S. A., & Camargo-Ricalde, S. L. (2020). *Septoglomus mexicanum*, a new species of arbuscular mycorrhizal fungi from semiarid regions in Mexico. *Mycologia*, 112, 121-132. <https://doi.org/10.1080/00275514.2019.1671147>
- Chimal-Sánchez, E., Montaña, N. M., Camargo-Ricalde, S. L., García-Sánchez, R., & Hernández Cuevas, L. V. (2022). Endemic *Mimosa* species, forming resource islands or not, and rainfall seasonality jointly influence arbuscular mycorrhizal fungi communities in a semiarid ecosystem of Mexico. *Trees*, 36(2), 609-625. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02234-4>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2018). Inventario Nacional Forestal y del suelo. Procedimientos de muestreo. Guadalajara, Jal., México. Recuperado 15 junio 2022, de: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD002905.pdf>
- da Silva, I. R., de Mello, C. M. A., Neto, R. A. F., da Silva, D. K. A., de Melo, A. L., Oehl, F., & Maia, L. C. (2014). Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the Brazilian semiarid. *Applied Soil Ecology*, 84, 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.07.008>
- Daniels, H. B. A., Skipper, H. D. (1982). Methods for the recovery and quantitative estimation of propagules from soil. In: Schenck, N.C. (ed.), *Methods and principles of mycorrhizal research*. American Society for Phytopathology, St Paul, Minn. pp. 29-37
- Delavaux, C. S., Weigelt, P., Dawson, W., Duchicela, J., Essl, F., van Kleunen, M., König, C., Pergl, J., Pyšek, P., Stein, A., Winter, M., Schultz, P., Kreft, H., & Bever, J. D. (2019). Mycorrhizal fungi influence global plant biogeography. *Nature ecology and evolution*, 3, 424-429. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0823-4>
- Frey, S. D. (2019). Mycorrhizal fungi as mediators of soil organic matter dynamics. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50, 237-259. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062331>
- Gerdemann, J. W., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological society*, 46, 235-244. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- González-Costilla, O., J. Giménez de Azcárate, J. García-Pérez, J. R., & Aguirre-Rivera, J. R. (2007). Flórula vascular de la Sierra de Catorce y territorios adyacentes, San Luis Potosí, México. *Acta Botánica Mexicana*, 78, 1-38. <https://doi.org/10.21829/abm78.2007.1027>
- Granados-Sánchez, D., M. Á. Hernández-García, A. Vázquez-Alarcón, P., & Ruiz-Puga, P. (2013). Los procesos de desertificación y las regiones áridas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19, 45-66. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.10.077>
- Hernández-Zamudio G., Sáenz-Mata J., Moreno-Reséndez A., Castañeda-Gaytán G., Ogaz A., Carballar-Hernández S., & Hernández-Cuevas, L. (2018). Dinámica de la diversidad temporal de los hongos micorrícicos arbusculares de *Larrea tridentata* (Sesse & Mocino ex DC) Coville en un ecosistema semiárido. *Revista Argentina de Microbiología*, 50, 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.07.007>
- Hipólito-Piedras, R. P., Méndez-Cortés, H., Ramírez-Tobías, H. M., & Olalde-Portugal, V. (2024). *Glomus nanolumen* (Glomeraceae), un hongo micorrízico arbuscular en México. *Acta Botanica Mexicana*, (131). <https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2226>
- International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM). (2022). Species descriptions from reference cultures. West Virginia University. Recuperado 15 junio, 2022 de: <https://invam.wvu.edu/>
- Jiménez-Valverde, A. (2000). Las curvas de acumulación de especies y la necesidad de evaluar los inventarios biológicos. *Revista Ibérica de Aracnología*, 8, 151-161
- Koske, R. E., & Tessier B. (1983). A convenient, permanent slide mounting medium. *Mycological Society of America Newsletter*, 34, 59
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47, 583-621. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Lara-Pérez, L. A., Oros-Ortega, I., Córdova-Lara, I., Estrada-Medina, H., O'Connor-Sánchez, A., Góngora-Castillo, E., & Sáenz-Carbonell, L. (2020). Seasonal shifts of arbuscular mycorrhizal fungi in *Cocos nucifera* roots

- in Yucatan, Mexico. *Mycorrhiza*, 30, 269-283. <https://doi.org/10.1007/s00572-020-00944-0>
- Le Pioufle, O., Ganoudi, M., Calonne-Salmon, M., Ben Dhaou, F., & Declerck, S. (2019). *Rhizophagus irregularis* MUCL 41833 improves phosphorus uptake and water use efficiency in maize plants during recovery from drought stress. *Frontiers in plant science*, 897. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00897>
- López-Gómez, A. M., & Williams-Linera, G. (2006). Evaluación de métodos no paramétricos para la estimación de riqueza de especies de plantas leñosas en cafetales. *Botanical Sciences*, (78), 7-15. <https://doi.org/10.17129/botsci.1717>
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Oxford: Blackwell Science. Malden, MA, USA.
- Martínez-García, L. B. (2011). Micorrizas arbusculares en ecosistemas semiáridos. Respuesta a factores de estrés ambiental. *Ecosistemas*, 20, 2-3.
- McAleece, P. H. D. Lamshead, G. L. J., & Paterson y Cage J. D. 1997. Biodiversity Professional (V.2.0). Natural History Museum and Scottish Association for Marine Science. Oban, UK. Recuperado 10 de julio, 2023 de: <https://www.sams.ac.uk/science/outputs/>.
- Mena-Echevarría, A., Méndez-Cortés, H., Ramírez-Tobías, H. M., & Rojas-Velázquez, Á. N. (2021). Comparación de dos suelos para la producción de inoculantes micorrízicos en San Luis Potosí, México. *Scientia Fungorum*, 51. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1315>
- Monroy-Ata, A., & Ramírez-Saldivar, K. Y. (2018). Relación entre sucesión ecológica vegetal y hongos micorrizógenos arbusculares en un matorral xerófilo en el centro de México. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-biológicas*, 21. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.157>
- Montaño, N. M., Alarcón, A., Camargo-Ricalde, S. L., Hernández-Cuevas, L. V., Álvarez-Sánchez, J., González-Chávez, M. A., Gavito, M. E., Sánchez-Gallen, I., Ramos-Zapata, J., Guadarrama, P., Maldonado-Mendoza, I. E., Castillo-Argüero, S., García-Sánchez, R., Trejo, D., & Ferrera-Cerrato, R. (2012). Research on arbuscular mycorrhizae in Mexico: an historical synthesis and future prospects. *Symbiosis*, 57, 111-126. <https://doi.org/10.1007/s13199-012-0184-0>
- Morton, J. B. (1988). Taxonomy of VA mycorrhizal fungi: classification, nomenclature, and identification. *Mycotaxon* 32, 267-324
- Morton, J. B., Bentivenga, S. P., & Wheeler, W. W. (1993). Germoplasm in the International Collection of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM) and procedures for culture development, documentation and storage. *Mycotaxon*, 48, 491-528
- Ochoa-Meza, A., Esqueda, M., Fernández-Valle, R., & Herrera-Peraza, R. (2009). Variación estacional de hongos micorrízicos arbusculares asociados con *Agave angustifolia* Haw. en la Sierra Sonorense, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32, 189-199
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2006). Estudio 147. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005: Hacia la ordenación forestal sostenible. FAO, Roma.
- Pagano, M. C., & Gupta, V. K. (2016). Overview of the recent advances in mycorrhizal fungi. *Recent Advances on Mycorrhizal Fungi*, pp. 1-13. Brazil
- Peñuelas-Rubio, O., Trejo-Aguilar, D., Cervantes-Gómez, R. G., & Maldonado-Mendoza, I. E. (2021). Análisis microbiómico de hongos micorrízicos arbusculares asociados a papaya, inoculada con consorcios de dos ecosistemas naturales. *Scientia Fungorum*, 51. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1292>
- Pezzani, F., Montaña, C., & Guevara, R. (2006). Associations between arbuscular mycorrhizal fungi and grasses in the successional context of a two-phase mosaic in the Chi-huahuan Desert. *Mycorrhiza*, 16, 285-295. <https://doi.org/10.1007/s00572-006-0044-y>
- Pimienta-Barrios, E., Pimienta-Barrios, E., Salas-Galván, M. E., Zañudo-Hernández, J., & Nobel, P. S. (2002). Growth and reproductive characteristics of the columnar cactus *Stenocereus queretaroensis* and their relationships with environmental factors and colonization by arbuscular mycorrhizae. *Tree Physiology*, 22, 667-674. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.9.667>
- Polo-Marcial, M. H., Lara-Pérez, L. A., Goto, B. T., Margarito-Vista, X., & Andrade-Torres, A. (2021). Glomeromycota in Mexico, a country with very high richness. *Sydowia*, 74, 33-63. <http://dx.doi.org/10.12905/0380.sydowia74-2021-0033>
- Polo-Marcial, M. H., Lara-Pérez, L. A., Goto, B. T., Noa-Carranza, J. C., Díaz-Fleischer, F., & Andrade-Torres, A. (2022). Tropical deciduous species under different land use retain a high glomerospores diversity and arbuscular and septate endophyte colonization. *Nova Hedwigia*, 487-517. http://dx.doi.org/10.1127/nova_hedwigia/2022/0723
- Reyes-Jaramillo I., Chimal-Sánchez E., Salmerón-Castro J. Y., Vázquez-Pérez N., & Varela-Fregoso L. (2019). Comunidad de hongos micorrizógenos arbusculares (Glomeromycota) asociada con agaves mezcaleros de Oaxaca y su relación con algunas propiedades edáficas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, 1-15. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2777>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Schüßler, A. (2022). The Glomeromycota. A species list with new families and new genera. Gloucester, Inglaterra: The Royal Botanic Garden Edinburgh/ The Royal Botanic Garden Kew/ Botanische Staatssammlung Munich/ Oregon State University. Recuperado 15 de junio, 2022 de: www.amf-phylogeny.com
- Scott-Denton, L. E., Rosenstiel, T. N., & Monson, R. K. (2006). Differential controls by climate and substrate over the heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration. *Global Change Biology*, 12, 205-216. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01064.x>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

- (SEMARNAT). (2008). Programa estratégico forestal del estado de San Luis Potosí (PEFE-SLP) 2006-2025. Vol. 1. Comisión Nacional Forestal. México. 204 p. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Diario oficial de la Federación 85-85
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. Traducción de: Ortiz-Solorio C.A., M.C. Gutiérrez, E.V. Gutiérrez. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Servicio de Conservación de Recursos Naturales
- Sommerfeld, H. M., Díaz, L. M., Alvarez, M., Villanueva, C. A., Matus, F., Boon, N., Boeckx, P., & Huygens, D. (2013). High winter diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities in shallow and deep grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 65, 236-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.002>
- Stürmer, S. L., Oliveira, L. Z., & Morton, J. B. (2018). Gigasporaceae versus Glomeraceae (phylum Glomeromycota): a biogeographic tale of dominance in maritime sand dunes. *Fungal Ecology*, 32, 49-56. doi: 10.1016/j.funeco.2017.11.008
- Tapia-Goné, J., Ferrera-Cerrato, R., Varela-Fregoso, L., Rodríguez-Ortiz, J. C., Lara-Mireles, J., Soria-Colunga, J. C., Cuellar-Torres, H., Tiscareño-Iracheta, M. A., & Cisneros-Almazán, R. (2008). Caracterización e identificación morfológica de hongos formadores de micorriza arbuscular, en cinco suelos salinos del estado de San Luis Potosí, México. *Revista mexicana de micología*, 26, 1-7
- Trejo-Aguilar, D., Lara-Capistrán, L., Maldonado-Mendoza, I. E., Zulueta-Rodríguez, R., Sangabriel-Conde, W., Mancera-López, M. E., Negrete-Yankelevich, S., & Barois, I. (2013). Loss of arbuscular mycorrhizal fungal diversity in trap cultures during long-term subculturing. *IMA fungus*, 4, 161-167. <https://dx.doi.org/10.5598%2Fimafungus.2013.04.02.01>
- Trinidad-Cruz, J. R., Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández-Cuevas, L. V., López-Pérez, L., & Rincón-Enríquez, G. (2017). Hongos micorrízicos arbusculares asociados a la rizósfera de Agave cupreata en regiones mezcaleras del estado de Michoacán, México. *Revista Mexicana de Micología*, 45, 13-25
- Varela, L., Hernández-Cuevas, L. V., Chimal-Sánchez, E., & Montaña, N. M. (2019). Taxonomic diversity of arbuscular mycorrhizal fungi cited from Mexico. *Biodiversidad de Microorganismos de México: Importancia, Aplicación y Conservación*. Ed. Electrónica. Universidad Nacional Autónoma de México. Cd. Méx., México
- Walker, C. (1983). Taxonomic concepts in the Endogonaceae: spore wall characteristics in species descriptions. *Mycotaxon*, 18, 443-455
- Wipf, D., Krajinski, F., van Tuinen, D., Recorbet, G., & Courty, P. E. (2019). Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks. *New Phytologist*, 223, 1127-1142. <https://doi.org/10.1111/nph.15775>
- Zhang, S., Guo, X., Yun, W., Xia, Y., You, Z., & Rillig, M. C. (2020). Arbuscular mycorrhiza contributes to the control of phosphorus loss in paddy fields. *Plant and Soil*, 447, 623-636. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04394-2>

Proximal analysis and identification of biocompounds in avocado (*Persea americana* Mill.) agro-industrial residue

Análisis proximal e identificación de biocompuestos del residuo agroindustrial de aguacate (*Persea americana* Mill.)

Nydia Suarez-Suarez¹; Juan M. Pinos-Rodríguez²; Guillermo Espinoza-Reyes³; Maribel Rodríguez-Aguilar⁴; Anayeli Vázquez-Valladolid¹; Héctor Lee-Rangel^{1*}

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía y Veterinaria. Carr. San Luis Potosí-Matehuala km 14.5, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, C. P. 78321, México.

²Universidad Veracruzana, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Av. Miguel Ángel de Quevedo s/n, esq. Yáñez, col. Centro, Veracruz, C. P. 91710, México.

³Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología (CIACYT). Av. Sierra Leona núm. 550-2ª, Lomas de San Luis, San Luis Potosí, C. P. 78210, México.

⁴Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Campus Chetumal. Blvd. Bahía s/n, esq.

Ignacio Comonfort, col. Del Bosque, Chetumal, Quintana Roo, C. P. 77019, México.

*Corresponding author: hector.lee@uaslp.mx

Abstract

The objective of this study was to identify the bioactive compounds present in avocado agro-industrial residues that could serve as an alternative ingredient in animal feed in arid and semi-arid regions of Mexico. Residue samples were collected from a guacamole processing plant in the Bajío region of Mexico for proximal chemical analysis and biocompound analysis using gas chromatography coupled with mass spectrometry. Residues had a chemical composition higher than that of some forages, with 93.35 % dry matter, 5.74 % crude protein, 17.5 % ether extract, 32.14 % neutral detergent fiber, 26.58 % acid detergent fiber, and 5.59 % ash content. Additionally, 129 different compounds were identified, including vitamin E, sitosterol, hexadecanoic acid, octadecanoic acid, and pentadecanoic acid. Therefore, the results indicate that avocado agro-industrial residue can be considered as an alternative feed source, because the bioactive compounds it contains may be beneficial when included in the diet of livestock in the arid and semi-arid regions of Mexico.

Keywords: agroindustry, livestock, avocado.

Resumen

El objetivo de este estudio fue identificar los compuestos bioactivos que tienen los residuos de la agroindustria del aguacate y que pueden ser un ingrediente alternativo en la alimentación animal en zonas áridas y semiáridas de México. Se tomaron muestras de residuos de una planta procesadora de guacamole de la región del Bajío mexicano para realizar un análisis químico proximal, así como un análisis de biocompuestos mediante cromatografía de gases acoplado a un detector de masas. Los residuos presentaron una composición química superior a la de algunos forrajes, con un 93.35 % de materia seca, 5.74 % de proteína cruda, 17.5 % de extracto etéreo, 32.14 % de fibra detergente neutro, 26.58 % de fibra detergente ácido y 5.59 % de cenizas. Además, se encontraron 129 compuestos diferentes, entre ellos vitamina E, sitosterol, ácido hexadecanoico, ácido octadecanoico y ácido pentadecanoico. Por lo tanto, los resultados indican que los residuos de la agroindustria del aguacate se pueden considerar como alimento alternativo, ya que los compuestos bioactivos pueden ser benéficos al incluirse en la dieta de animales de interés en las zonas áridas y semiáridas de México.

Palabras clave: agroindustria, ganadería, aguacate.

Please cite this article as follows (APA 7): Suarez-Suarez, N., Pinos-Rodríguez, J. M., Espinoza-Reyes, G., Rodríguez-Aguilar, M., Vázquez-Valladolid, A., & Lee-Rangel, H. (2024). Proximal analysis and identification of biocompounds in avocado (*Persea americana* Mill.) agro-industrial residue. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 23 15-22. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2020.03.006>



Revista Chapingo
Serie Zonas Áridas

Introduction

Arid zones cover approximately one third of the world's surface. According to Rivera et al. (2007), 65 % of the Mexican territory is classified as arid and semiarid, where adverse climatic and ecological conditions have limited the development of productive activities. The Bajío region is an important semi-arid zone for the country's agricultural and livestock sectors, as it has fostered the growth of agroindustry as a fundamental activity for the development of the primary sector. Some of these agroindustries, such as avocado processing, generate by-products and residues known as non-traditional ingredients, which can be used as animal feed (Avilés-Ríos et al., 2009).

Avocado is classified as a fruit native to Mexico and Central America, which has been consumed for 10,000 years (Araújo et al., 2018). Mexico is the main producer of avocado, with approximately 38 % of world production (Gutiérrez-Contreras et al., 2010). During avocado processing, several value-added products are derived, such as guacamole, essential oils and puree; however, this process generates a considerable volume of residues, representing about 30 % of the fruit, since only the pulp is used (Barbosa-Martín et al., 2016). In the Bajío region, Congeladora y Empacadora Nacional, S. A. de C. V. processes an average of 12,000 t of avocado annually and generates 4,800 t of residues (Avilés-Ríos et al., 2009). These residues have an important nutritional value and can be a potential source of energy. In addition, avocado residues contain compounds that may offer benefits for animal health (de Evan et al., 2020). Therefore, the objective of the present study was to identify bioactive compounds in avocado agroindustry residues that can be an alternative ingredient for animal feed in arid and semiarid zones of Mexico.

Materials and methods

This study was carried out in the Bromatology Laboratory of the Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine at the Universidad Autónoma de San Luis Potosí, located in Ejido Palma de la Cruz, in the municipality of Soledad de Graciano Sánchez (101° 01' 20" W and 22° 12' 27" N, 1,883 m a. s. l.). The region has a temperate dry climate, with average annual temperature of 16 °C and average annual precipitation of 400 mm (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 2011).

Industrial avocado residue samples were collected weekly for six weeks. The six samples were dried in a forced-air oven at 55 °C for 72 h, then weighed to record the dry matter (DM) weight. Samples were sieved using a 1 mm diameter mesh and ground in a

Introducción

Las zonas áridas abarcan, aproximadamente, una tercera parte de la superficie mundial. De acuerdo con Rivera et al. (2007), el 65 % del territorio mexicano se clasifica como árido y semiárido, donde las condiciones climáticas y ecológicas adversas han limitado el desarrollo de actividades productivas. La región del Bajío es una zona semiárida importante para los sectores agrícola y pecuario del país, ya que ha propiciado el crecimiento de la agroindustria como actividad fundamental para el desarrollo del sector primario. Algunas de estas agroindustrias, como la del procesamiento de aguacate, generan subproductos y desechos denominados ingredientes no tradicionales, los cuales se pueden aprovechar en la alimentación animal (Avilés-Ríos et al., 2009).

El aguacate está catalogado como un fruto originario de México y América Central, el cual se consume desde hace 10,000 años (Araújo et al., 2018). México es el principal productor de aguacate, con aproximadamente 38 % de la producción mundial (Gutiérrez-Contreras et al., 2010). Durante el procesamiento del aguacate, se obtienen diversos productos de valor agregado, como guacamole, aceites esenciales y puré; sin embargo, este proceso genera una cantidad considerable de residuos, que representan cerca del 30 % del fruto, ya que solo se utiliza la pulpa (Barbosa-Martín et al., 2016). En la región del Bajío, la Congeladora y Empacadora Nacional, S. A. de C. V. procesa anualmente un promedio de 12,000 t de aguacate y genera 4,800 t de desecho (Avilés-Ríos et al., 2009). Estos residuos tienen un valor nutricional importante y pueden ser una fuente potencial de energía. Además, los residuos de aguacate contienen compuestos que pueden ofrecer beneficios para la salud animal (de Evan et al., 2020). Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue identificar los compuestos bioactivos que tienen los residuos de la agroindustria del aguacate y que pueden ser un ingrediente alternativo en la alimentación animal en las zonas áridas y semiáridas de México.

Materiales y métodos

El presente trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, ubicada en el Ejido Palma de la Cruz, municipio de Soledad de Graciano Sánchez (101° 01' 20" LO y 22° 12' 27" LN, a 1,883 m s. n. m). El clima de la región es seco templado, con una temperatura media anual de 16 °C y precipitación media anual de 400 mm (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 2011).

Las muestras de residuos industriales de aguacate se recolectaron semanalmente durante seis semanas. Las

Thomas-Wiley Mill (Thomas Scientific®, USA). Crude protein (CP) content was determined using method 920.105, and ether extract (EE) was measured using method 942.05, both procedures as described by the Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2006). Neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) were analyzed according to the method of Van Soest et al. (1991).

The characterization of biocompounds in industrial avocado residues was carried out with a composite sample; that is, the six samples were mixed to obtain a homogeneous sample. The extraction was performed with an ultrasonic processor (GEX130, 115 V 50/60 Hz) equipped with a 3 mm titanium tip and mechanical stirrers (Cole-Parmer®, USA). For this, 1 g of residue was mixed with 10 mL of acetone; subsequently, the organic phase was separated, concentrated to 1 mL of extracted mixture and evaporated (Zymark TurboVap LV Evaporator, USA) for final analysis.

The extract characterization was performed using a gas chromatograph (HP 6890) coupled to a mass spectrometer (HP 5973) (GC-MS). The system was equipped with a capillary column measuring 60 m in length, 0.255 mm in diameter, and with a 0.25 μm film thickness (HP 5MS, Agilent). The analysis was carried out under the following conditions: 70 °C for 2 min, followed by an increase to 250 °C at a rate of 20 °C·min⁻¹; then, the temperature was raised to 290 °C at 5 °C·min⁻¹, then to 300 °C at 1 °C·min⁻¹, and finally up to 310 °C at 5 °C·min⁻¹, holding this final temperature for 36 min. The injector temperature was set at 250 °C in splitless mode, with a helium flow of 1 mL·min⁻¹. Mass spectrometry was programmed in SCAN mode (50-500 m/z) for compound identification.

Results and discussion

The proximal analysis indicated that processed industrial avocado residues in the Bajío region contained 93.35 % DM, 5.74 % CP, 17.5 % EE, 32.14 % NDF, 26.58 % ADF, and 5.59 % ash (dry basis) (Table 1). Determining the chemical composition of a food is a routine, quick, and economical method used to estimate its nutritional value. This method is based on the relationship between the analyzed chemical components and the quality of the food (Van Soest, 1982). However, no single parameter of chemical composition can adequately predict nutritional value. Nevertheless, the combination of several analyses can provide a better estimation of the food's nutritional value.

The results of chemical analysis indicated that industrial avocado residues have a reduced CP content, comparable to that of maize grain, used as an energy source (Church & Pond, 1988). Protein quality is crucial

seis muestras se secaron en una estufa de aire forzado a 55 °C por 72 h; después, se pesaron para registrar el peso de la materia seca (MS). Las muestras se cribaron con una malla de 1 mm de diámetro y se molieron en un molino (Thomas-Wiley Mill, Thomas Scientific®, EUA). Posteriormente, se determinó el contenido de proteína cruda (PC) por el método 920.105 y el extracto etéreo (EE) mediante el método 942.05, ambos procedimientos descritos por la *Association of Official Analytical Chemists* (AOAC, 2006). La fibra detergente neutro (FDN) y la fibra detergente ácido (FDA) se analizaron conforme al método de van Soest et al. (1991).

La caracterización de biocompuestos de los residuos industriales de aguacate se realizó con una muestra compuesta; es decir, se mezclaron las seis muestras para tener una muestra homogénea. La extracción se realizó con un procesador ultrasónico (GEX130, 115 V 50/60 Hz) equipado con una punta de titanio de 3 mm y agitadores mecánicos (Cole-Parmer®, EUA). Para ello, se mezcló 1 g de residuo con 10 mL de acetona; posteriormente, se separó la fase orgánica, se concentró a 1 mL de mezcla extraída y se evaporó (Zymark TurboVap LV Evaporator, EUA) para el análisis final.

La caracterización del extracto se realizó con un cromatógrafo de gases (HP 6890) acoplado a espectrometría de masas (HP 5973) (GC-MS). El sistema contaba con una columna capilar de 60 m de longitud, 0.255 mm de diámetro y 0.25 μm de espesor de película (HP 5MS, Agilent). El análisis se realizó bajo las siguientes condiciones: 70 °C durante 2 min, seguido de un incremento hasta 250 °C a razón de 20 °C·min⁻¹; después, la temperatura se aumentó a 290 °C a razón de 5 °C·min⁻¹, luego a 300 °C a razón de 1 °C·min⁻¹ y, finalmente, incrementó hasta 310 °C a razón de 5 °C·min⁻¹, manteniéndose así 36 min. La temperatura del inyector fue de 250 °C en modo “splitless”, con un flujo de helio de 1 mL·min⁻¹. La espectrometría de masas se programó en modo SCAN (50-500 m/z) para la identificación de compuestos.

Resultados y discusión

El análisis proximal indicó que los residuos industriales de aguacate procesados en la región del Bajío contenían 93.35 % de MS, 5.74 % de PC, 17.5 % de EE, 32.14 % de FDN, 26.58 % de FDA y 5.59 % de cenizas (base seca) (Cuadro 1). La determinación de la composición química de un alimento es un método rutinario, rápido y económico utilizado para estimar su valor nutritivo. Esta se basa en la relación entre los componentes químicos analizados y la calidad del alimento (van Soest, 1982). Sin embargo, ningún parámetro individual de la composición química puede predecir adecuadamente el valor nutritivo. No obstante, la combinación de varios análisis puede proporcionar una mejor estimación del valor nutritivo del alimento.

Table 1. Proximal analysis of industrial avocado residues generated in the Bajío region, Mexico.
Cuadro 1. Análisis proximal de residuos industriales de aguacate generados en la región del Bajío, México.

Component based on dry matter (DM)/ Componente con base en materia seca (MS)	Amount (%) / Cantidad (%)
Dry matter / Materia seca	93.35
Crude protein / Proteína cruda	5.74
Ether extract / Extracto etéreo	17.5
Neutral detergent fiber / Fibra detergente neutro	32.14
Acid detergent fiber / Fibra detergente ácido	26.58
Ash / Cenizas	5.59
Organic matter / Materia orgánica	94.4

in selecting ingredients for the feeding of livestock animals, and processing methods can directly affect that quality. In this context, three factors have been identified as influencing the nutritional quality of proteins: 1) amino acid composition, 2) amino acid availability or digestibility, and 3) the presence or absence of biological components (Aherne & Kenelley, 1982). Despite the low CP content in avocado residues, NDF and FDA levels were high, so they could be compared with those of wheat bran, considered a medium quality ingredient (Skenjana, 2011). Thus, high fiber contents result in a higher proportion of indigestible components.

One of the main characteristics of avocado is its high lipid content, which ranges from 10 to 30 %, depending on the variety, seasonality, and, in the case of industrial by-products, the processing method (Qin et al., 2016). In plants, fats or oils can be found in various forms (Goodridge, 1985). Fat is a concentrated energy source in animal diets, providing up to 2.25 times more energy than carbohydrates (Schingoethe, 1991). Besides its energy value, fat is essential as a source of fatty acids vital to animal health (Rooke et al., 2003). According to Krumreich et al. (2018), oleic acid is the most abundant fatty acid in avocado industrial by-products, followed by linoleic, palmitic, vaccenic, and palmitoleic acids. Evan et al. (2020) mention that monounsaturated fatty acids account for two-thirds of the total fatty acids, while saturated and polyunsaturated fatty acids constitute only 15.9 and 16.2 %, respectively

The analysis of avocado industrial residue extract, conducted using GC-MS, identified 129 compounds, some of which have biological activity (Figure 1). Table 2 shows 36 of these compounds with their relative quantities, collectively representing 90.79 % of the total. The most abundant metabolites were oleic acid (39.04%), hexadecanoic acid (22.34 %), oleic acid (4.61 %), cyclopropaneoctanal (1.8 %), stigmasterol (1.48 %), and cis-p-Menth-8(10)-en-9-ol (1.01 %).

Los resultados del análisis químico indicaron que los residuos industriales de aguacate tienen un contenido reducido de PC, comparable al del grano de maíz, utilizado como fuente de energía (Church & Pond, 1988). La calidad de la proteína es crucial en la selección de los ingredientes destinados a la alimentación de animales de interés zootécnico, y los métodos de procesamiento pueden afectar directamente dicha calidad. En este contexto, se han identificado tres factores que influyen a la calidad nutricional de las proteínas: 1) la composición de aminoácidos, 2) la disponibilidad o digestibilidad de los aminoácidos y 3) la presencia o ausencia de componentes biológicos (Aherne & Kenelley, 1982). A pesar del bajo contenido de PC en los residuos de aguacate, los niveles de FDN y FDA fueron elevados, por lo que se podrían comparar con los del salvado de trigo, considerado un ingrediente de calidad media (Skenjana, 2011). De esta manera, los contenidos elevados de fibra resultan en una mayor proporción de componentes indigestibles.

Una de las principales características del aguacate es su alto contenido lipídico, el cual oscila entre un 10 y 30 %, dependiendo de la variedad, la estacionalidad y, en caso de subproductos industriales, del procesamiento (Qin et al., 2016). En las plantas, las grasas o aceites se pueden encontrar en diversas formas (Goodridge, 1985). La grasa es una fuente concentrada de energía en la dieta animal, al proporcionar hasta 2.25 veces más energía que los carbohidratos (Schingoethe, 1991). Además de su valor energético, la grasa es fundamental como fuente de ácidos grasos esenciales para el organismo animal (Rooke et al., 2003). De acuerdo con Krumreich et al. (2018), el ácido oléico es el ácido graso más abundante en los residuos industriales de aguacate, seguido por los ácidos linoleico, palmítico, vaccénico y palmitoleico. De Evan et al. (2020) mencionan que los ácidos grasos monosaturados representan dos tercios del total de ácidos grasos, mientras que los saturados y los poliinsaturados constituyen solo el 15.9 y 16.2 %, respectivamente.

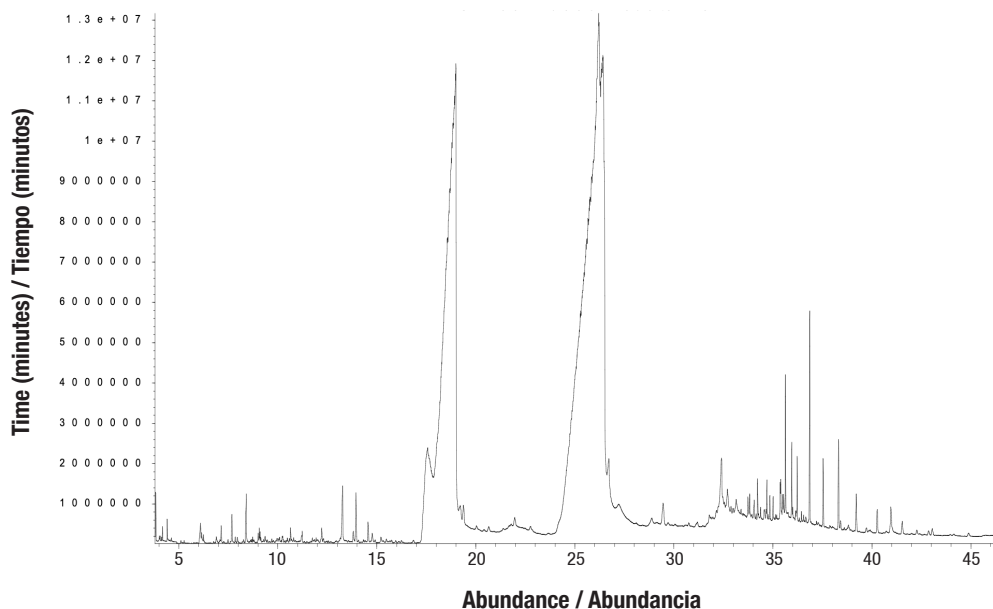


Figure 1. Ion chromatogram of chemical components in avocado industrial residue samples from the Bajío Region, Mexico.

Figura 1. Cromatograma iónico de componentes químicos en muestra de residuos industriales de aguacate en la región del Bajío, México.

According to The Nutraceuticals Research Institute, nutraceuticals (commonly known as phytochemicals or functional foods) are natural bioactive chemical compounds with medicinal properties that promote health or prevent diseases (Wildman, 2000). Among the compounds found is β -sitosterol, with levels similar to those found in soy and olives (Gómez et al., 1991). This compound inhibits intestinal cholesterol absorption in humans and has the potential to prevent cancers such as breast cancer and colon cancer (Acosta-Moreno, 2011). Another relevant compound identified was vitamin E, which acts as a stabilizer of cell membranes and neutralizes free radicals responsible for oxidative stress, associated with aging, degenerative diseases, and cancer (Sangines, 2008). Additionally, squalene plays a key role in steroid synthesis and has demonstrated antioxidant, antitumor, and cytoprotective properties (Auffray, 2007; Passi et al., 2002).

The analysis of the extract from avocado industrial residues suggests the presence of nutraceutical components, as well as a mixture of high-quality lipids, such as oleic, hexadecanoic, octadecanoic, and pentadecanoic acids. De Evan et al. (2020) mention that the use of avocado residues in the diets of lactating goats tends to increase the fat content in milk and induces slight changes in the fatty acid profile. Supplementation with oils rich in long-chain fatty acids has shown benefits in animal production in arid areas by improving the composition of the final products. Lerma-Reyes et al. (2018) supplemented goats with

El análisis del extracto de los residuos industriales de aguacate, realizado por GC-MS, identificó 129 compuestos, algunos de ellos con actividad biológica (Figura 1). En el Cuadro 2 se muestran 36 de estos compuestos con sus cantidades relativas, los cuales en conjunto representan el 90.79 % del total. Los metabolitos más abundantes fueron el ácido oleico (39.04 %), ácido hexadecanoico (22.34 %), ácido oleico (4.61 %), ciclopropanooctanal (1.8 %), estigmasterol (1.48 %) y p-Menth-8(10)-en-9-ol, cis (1.01 %).

De acuerdo con *The Nutraceuticals Research Institute*, los nutraceuticos (conocidos comúnmente como fitoquímicos o alimentos funcionales) son compuestos químicos bioactivos naturales con propiedades medicinales, que promueven la salud o previenen enfermedades (Wildman, 2000). Entre los compuestos encontrados está el β -sitosterol, con niveles similares a los encontrados en la soya y aceitunas (Gómez et al., 1991). Dicho compuesto inhibe la absorción intestinal del colesterol en humanos y tiene potencial para prevenir cánceres como el de mama y colon (Acosta-Moreno, 2011). Otro compuesto relevante identificado fue la vitamina E, la cual actúa como estabilizador de las membranas celulares y neutraliza los radicales libres responsables del estrés oxidativo, asociado al envejecimiento, enfermedades degenerativas y cáncer (Sangines, 2008). Asimismo, el escualeno desempeña un papel clave en la síntesis de esteroides y ha demostrado propiedades antioxidantes, antitumorales y citoprotectoras (Auffray, 2007; Passi et al., 2002).

Table 2. Main compounds identified in avocado industrial residue extract using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), obtained in the Bajío Region, Mexico.

Cuadro 2. Principales compuestos identificados en el extracto de residuos industriales de aguacate mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), obtenidos en la región del Bajío, México.

Elution order/ Orden elución	Retention time (min)/ Tiempo de retención (min)	Compound/ Compuesto	Relative quantity (%) / Cantidad relativa (%)
1	6.15	Hexanoic acid / Ácido hexanoico	0.53
2	6.89	1,3-Bis(trimetilsilil)benzene / 1,3-Bis(trimetilsilil)benceno	0.72
3	8.40	Nonanoic acid / Ácido nonanoico	0.49
4	10.24	2-n-Octylfuran / 2-n-Octilfurano	0.51
5	12.22	Ciclopentadecanone / Ciclopentadecanona	0.58
6	13.16	Tetratriacontane / Tetratriacontano	0.67
7	13.27	Tetradecanoic acid / Ácido tetradecanoico	0.66
8	13.81	4-Tetradecyn / 4-Tetradecino	0.60
9	13.95	2-n-Octylfuran / 2-n-Octilfurano	0.58
10	14.55	2-n-Octylfuran / 2-n-Octilfurano	0.62
11	14.76	Bicycloheptane, 2,6,6-trimethyl / Bicicloheptano, 2,6,6-trimetil	0.77
12	15.20	Pentadecanoic acid / Ácido pentadecanoico	0.73
13	18.27	Hexadecanoic acid / Ácido hexadecanoico	22.34
14	19.37	1-Pentadecene / 1-Pentadecino	1.32
15	25.06	Oleic acid / Ácido oleico	39.07
16	29.45	Ciclohexane, 1,5-diethenyl-2,3-dimethyl / Ciclohexano, 1,5-diethenil-2,3-dimetil	1.14
17	31.79	9,12-octadecadienoic acid / Ácido 9,12-octadecadienoico	4.61
18	32.41	Cyclopropanooctanal / Ciclopropanooctanal	1.80
19	33.74	9,17-Octadecadienal / 9,17-Octadecadienal	0.84
20	34.23	Eicosane / Eicosano	0.49
21	34.38	Phenol, 2,2'-metilenebis / Fenol, 2,2'-metilenobis	0.72
22	34.56	Cis-p-Menth-8(10)-en-9-ol / p-Menth-8(10)-en-9-ol, cis	1.01
23	34.84	Cyclohexanone, 5-methyl-2 / Ciclohexanona, 5-metil-2	0.52
24	35.01	Hexacosane / Hexacosano	0.52
25	35.54	8-Methylindolizine / Indolizina, 8-metil	0.51
26	36.44	Squalene / Escualeno	0.77
27	37.54	Triacotane / Triacotano	0.49
28	38.31	Nonacosane / Nonacosano	0.49
29	38.81	Vitamine E / Vitamina E	0.76
30	39.21	Dotriacontane / Dotriacontano	0.59
31	39.72	1-Methyl-4-hexahydropyridine / Hexahidropiridina, 1-metil-4-	0.74
32	40.27	Nonadecane / Nonadecano	0.67
33	40.95	Stigmasterol / Estigmasterol	1.48
34	41.53	Heptacosane / Heptacosano	0.81
35	42.86	1,3-Bis-benzene / 1,3-Bis-benceno	0.80
36	43.05	Octadecane / Octadecano	0.84

soybean and canola oil in the Mexican Plateau of San Luis Potosí and observed changes in fatty acids in milk, identified as anti-mutagenic substances with potential anti-cancer properties.

Conclusions

The industrial residues from avocados generated in the Bajío region has a chemical composition comparable to that of certain conventional ingredients used in dietary feeds. Additionally, these residues contain many bioactive compounds and beneficial long-chain fatty acids for animal health.

End of the English version

References / Referencias

- Acosta-Moreno, M. C. (2011). *Evaluación y escalamiento del proceso de extracción de aceite de aguacate utilizando tratamiento enzimático*. [Master's Thesis in Chemical Engineering]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7633>
- Aherne, F. X., & Kennelly, J. J. (1982). Oilseed meals for livestock feeding. In W. Haresing (Ed.), *Recent advances in animal nutrition* (pp. 39-89). Butterworths, London.
- Araújo, R. G., Rodríguez-Jasso, R. M., Ruiz, H. A., Pintado, M. M., & Aguilar, C. N. (2018). Avocado by-products: Nutritional and functional properties. *Trends in Food Science and Technology*, 80, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.027>
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2006). *Official methods of analysis*. (18th edition). AOAC. www.aoac.org
- Auffray, B. (2007). Protection against singlet oxygen, the main actor of sebum squalene peroxidation during sun exposure, using *Commiphora myrrha* essential oil. *International Journal of Cosmetic Science*, 29(1), 23-29. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2494.2007.00360.x>
- Avilés-Ríos, E. D., Espinosa-García, J. A., Rentería-Flores, J. A., Mejía-Guadarrama, C. A., Mariscal-Landín, G., & Cuarón-Ibargüengoytia, J. A. (2009). Disponibilidad de ingredientes no tradicionales con potencial de ser usados en la alimentación de cerdas gestantes en el Bajío mexicano. *Veterinaria México*, 40(4), 357-370. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-50922009000400002&lng=es&tlng=es
- Barbosa-Martín, E., Chel-Guerrero, L., González-Mondragón, E., & Betancur-Ancona, D. (2016). Chemical and technological properties of avocado (*Persea americana* Mill.) seed fibrous residues. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 457-463. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.09.006>
- Church, D.C., & Pond, W.G. (1988). *Basic animal nutrition and feeding* (3rd edition). John Wiley and Sons.
- de Evan, T., Carro, M. D., Fernández-Yepes, J. E., Haro, A., Arbesú, L., Romero-Huelva, M., & Molina-Alcaide, E. (2020). Effects of feeding multinutrient blocks including avocado pulp and peels to dairy goats on feed intake and milk yield and

El análisis del extracto de los residuos industriales de aguacate sugiere la presencia de componentes nutracéuticos, así como una mezcla de lípidos de alta calidad, como ácido oleico, hexadecanoico, octadecanoico y pentadecanoico. De Evan et al. (2020) señalan que el uso de residuos de aguacate en dietas de cabras lactantes tiende a incrementar el contenido de grasa en leche y a inducir ligeros cambios en el perfil de ácidos grasos. La suplementación con aceites ricos en ácidos grasos de cadena larga ha demostrado beneficios en la producción animal en zonas áridas, al mejorar la composición de los productos finales. Lerma-Reyes et al. (2018) suplementaron cabras con aceite de soya y canola en la región del Altiplano de San Luis Potosí, y observaron cambios en los ácidos grasos en la leche, identificados como sustancias anti-mutágenas con potencial anticancerígeno.

Conclusiones

Los residuos industriales de aguacate generados en la región del Bajío presentan una composición química comparable a la de ciertos ingredientes convencionales utilizados en dietas alimenticias. Además, estos residuos contienen numerosos compuestos bioactivos y ácidos grasos de cadena larga benéficos para la salud animal.

Fin de la versión en español

- composition. *Animals*, 10(2),194. <https://doi.org/10.3390/ani10020194>
- Gómez, C. (1991). Cowpea: Post-harvest operations. In D. Mejía, & E. Parrucci (Eds), *Compendium on post-harvest operations*. FAO. <https://www.fao.org/fileadmin/templates/inpho/documents/Cowpea%20Postharvest%20III%20Definit.pdf>
- Goodridge, A. G. (1985). Fatty acid synthesis in Eukaryotes. In D. E. Vance, & J. E. Vance (Eds), *Biochemistry of lipids and membranes* (pp. 143-180). The Benjamin/Cummings Publishing, Inc. California.
- Gutiérrez-Contreras, M., Lara-Chávez, M. B. N., Guillén-Andrade, H., & Chávez-Bárcenas, A. T. (2010). Agroecología de la franja aguacatera en Michoacán, México. *Interciencia*, 35(9), 647-653. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33914212003.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2011). *Censo de población y vivienda 2010*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Krumreich, F. D., Borges, C. D., Mendonça, C. R. B., Jansen-Alves, C., & Zambiasi, R. C. (2018). Bioactive compounds and quality parameters of avocado oil obtained by different processes. *Food Chemistry*, 257, 376-381. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.048>
- Lerma-Reyes, I., Mendoza-Martínez, G. D., Rojo-Rubio, R., Mejía, M., García-López, J. C. & Lee-Rangel, H. A. (2018). Influence of supplemental canola or soybean oil on milk yield, fatty acid profile and postpartum weight changes in grazing

- dairy goats. *Asian-Australas Journal of Animal Science*, 31(2), 225-229. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0058>
- Passi, S., de Pità, O., Puddu, P., & Littarru, G. P. (2002). Lipophilic antioxidants in human sebum and aging. *Free Radical Research*, 36(4), 471-477. <https://doi.org/10.1080/10715760290021342>
- Qin, X., & Zhong, J. (2016). A review of extraction techniques for avocado oil. *Journal of Oleo Science*, 65(11), 881-888. <https://doi.org/10.5650/jos.ess16063>
- Rivera, J., Losada, H., Grande, D., Cortes, J., & Sosa, F. (2007). Uso de calendarios estacionales en la producción de goma de mezquite (*Prosopis laevigata*) como una alternativa en el manejo sustentable en el Ejido de Llanos de la Angostura, San Luís Potosí. México. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 15(1), 514-518.
- Rooke, J. A., Ferguson, E. M., Sinclair, A. G., & Speake, B. K. (2003). Fatty acids and reproduction in the pig. In P. C. Garnsworthy, & J. Wiseman (Eds.), *Recent Advances in Animal Nutrition* (pp. 47-66). Nottingham University Press.
- Sangines, L. (2008). *Aguacates en alimentación humana y animal: una reseña corta*. Instituto de Investigaciones Porcinas.
- Schingoethe, D. J. (1991). By-products feeds: Feed analysis and interpretation. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 7(2), 577-584. [https://doi.org/10.1016/S0749-0720\(15\)30787-8](https://doi.org/10.1016/S0749-0720(15)30787-8)
- van Soest, P. J. (1982). *Nutritional ecology of the ruminant*. Cornell University Press.
- Skenjana, A. (2011). *The potential nutritive value of waste products from the sub-tropical fruit processing industry as livestock feed*. [Master's Thesis in Animal Nutrition]. University of Pretoria. <https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/26653/dissertation.pdf;sequence=1>
- van Soest, P. V., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Wildman, R. E., & Bruno, R. S. (2000). *Handbook of nutraceuticals and functional foods*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420036695>

Diet of the western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*) in the southern Chihuahuan Desert

Dieta de la lechuza llanera (*Athene cunicularia hypugaea*) en el sur del desierto Chihuahuense

Luis Antonio Tarango-Arámbula^{1*}; Larisa A. Velasco-Bautista¹;
Genaro Olmos-Oropeza¹; Juan F. Martínez-Montoya¹; Jesús Romero-Nápoles²;
Eloy A. Lozano-Cavazos³; Saúl Ugalde-Lezama⁴

¹Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí. Iturbide núm. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, C.P. 78620, México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México, C. P. 56230, México.

³Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calz. Antonio Narro núm. 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, C. P. 25315, México.

⁴Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

*Corresponding author: ltarango@colpos.mx

Abstract

Raptors, such as the western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*), are at the top of the food chain and play a critical role in regulating prey populations. The objective of this study was to determine the composition and seasonal variation in the diet of the western burrowing owl in a region of the Chihuahuan Desert during two seasons, summer and autumn. From June to December 2018, 79 pellets were collected and analyzed to identify the main prey orders consumed, the trophic niche breadth, and the dietary overlap between seasons. The primary prey orders identified in the owl's diet were Coleoptera, Hymenoptera, and Orthoptera. Trophic niche breadth analysis revealed that the owl feeds mainly on coleoptera, which comprised 75.5 % of its diet in summer and 76.7 % in autumn. This pattern was quantified using Levins' standardized trophic niche breadth index (BEST), yielding values of 0.09854 in summer and 0.09375 in autumn, confirming dietary specialization in both seasons ($B_{EST} = 0.09857$). Additionally, no overlap with other dietary components was observed, which may be attributed to the seasonal availability of potential prey in the study area. Understanding the trophic ecology of the western burrowing owl is crucial for developing effective management strategies and habitat conservation.

Keywords: diet, birds, pellet, insects.

Resumen

Las aves rapaces, como la lechuza llanera (*Athene cunicularia hypugaea*), se encuentran en la cima de la cadena alimenticia y regulan las poblaciones de sus presas. El objetivo de esta investigación fue determinar la composición y variación de la dieta de la lechuza llanera en una zona del desierto Chihuahuense durante dos estaciones del año (verano y otoño). Entre junio y diciembre de 2018, se recolectaron y analizaron 79 egagrópilas, con lo cual se identificaron las principales órdenes de presas consumidas, la amplitud del nicho trófico y el traslape de la dieta entre estaciones. Las órdenes principales de presas registradas en la dieta fueron Coleoptera, Hymenoptera y Orthoptera. La amplitud del nicho trófico sugiere que la lechuza consume principalmente coleópteros: 75.5 % de su dieta en verano y 76.7 % en otoño. Este patrón se cuantificó mediante el índice de amplitud trófica de Levins estandarizado (BEST), y se obtuvieron valores de 0.09854 en verano y 0.09375 en otoño, lo cual confirmó la especialización de su dieta en ambas estaciones ($B_{EST} = 0.09857$). Además, no se observó solapamiento con otros componentes alimenticios, lo que se podría deber a la disponibilidad estacional de sus presas potenciales en el área de estudio. El entendimiento de la ecología trófica de la lechuza llanera es importante para proponer estrategias de manejo y conservación de su hábitat.

Palabras clave: alimentación, aves, egagrópila, insectos.

Please cite this article as follows (APA 7): Tarango-Arámbula, L. A., Velasco-Bautista, L. A., Olmos-Oropeza, G., Martínez-Montoya, J. F., Romero-Nápoles, J., Lozano-Cavazos, E. A., & Ugalde-Lezama, S. (2024). Diet of the western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*) in the southern Chihuahuan Desert. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 23, 23–37. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2020.01.003>



Revista Chapingo
Serie Zonas Áridas

Introduction

The western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*) is a raptor that relies on grassland ecosystems and is distributed in northern, central and southern America (Poulin et al., 2020). This species plays a significant ecological role by regulating populations of invertebrates and small vertebrates (Sergio et al., 2008). In Mexico, its presence has been documented in Aguascalientes, the Sierra Madre Occidental and Oriental, Baja California, Sonora, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí and Zacatecas (Enríquez-Rocha et al., 1993; Holroyd et al., 2001; Palacios et al., 2000; Velasco-Bautista et al., 2022). However, populations of this species have declined sharply in North America (Askins et al., 2007; Stanton et al., 2018; Vickery et al., 1999). In Mexico, the *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales* (SEMARNAT) classifies it as a species “Subject to Special Protection” (NOM-059-SEMARNAT, 2010). On an international level, the establishment of conservation areas has been recommended to protect its populations (Azpiroz et al., 2012).

The western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*) is highly sensitive to fluctuations in prey availability and habitat changes, making it a valuable bioindicator of the ecological health of arid and semi-arid grassland ecosystems (Desmond et al., 2000; Loyd & Watkins, 2019; Rodríguez-Estrella, 1997; Velasco-Bautista et al., 2022). Understanding its diet is therefore essential for the effective management and conservation of *A. c. hypugaea* habitat (Sutherland, 2000), as habitat selection depends, among other factors, on the availability of space and food (Schmutz, et al., 1991; Tuomainen & Candolin, 2011).

The western burrowing owl's diet is diverse, consisting primarily of invertebrates (such as insects), although it also includes small vertebrates (such as rodents, reptiles, and birds). In Texas, its diet ($n = 182$ pellets) consisted of arthropods (98 %), with crickets (Orthoptera, 50 %), lepidopteran larvae (13 %), beetles (Coleoptera, 8 %), spiders (Arachnida, 7 %), and earwigs (Dermaptera, 6.0 %) being the most common prey; small mammals and birds made up only 2 % of its diet (Littles et al., 2007). In the Mapimí Biosphere Reserve in Mexico, 85.5 % of its diet consisted of invertebrates (Rodríguez-Estrella, 1997). Similarly, in Nuevo León, invertebrates accounted for 85.3 %, followed by mammals (12.3%), birds (2%), and reptiles (0.4%) (Cruz-Nieto, 2006).

The western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*), despite its ecological significance, faces numerous challenges. Habitat loss and fragmentation (Askins et al., 2007), driven largely by land-use changes (Ribic et

Introducción

La lechuza llanera (*Athene cunicularia hypugaea*) es un ave rapaz que depende del ecosistema pastizal, y está distribuida en el norte, centro y sur de América (Poulin et al., 2020). Esta especie desempeña un papel ecológico importante, al regular poblaciones de invertebrados y pequeños vertebrados (Sergio et al., 2008). En México, su presencia ha sido documentada en Aguascalientes, las Sierras Madre Occidental y Oriental, Baja California, Sonora, Coahuila, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí y Zacatecas (Enríquez-Rocha et al., 1993; Holroyd et al., 2001; Palacios et al., 2000; Velasco-Bautista et al., 2022). Sin embargo, las poblaciones de esta especie han disminuido drásticamente en América del Norte (Askins et al., 2007; Stanton et al., 2018; Vickery et al., 1999). En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la clasifica como una especie “Sujeta a Protección Especial” (NOM-059-SEMARNAT, 2010), mientras que a nivel internacional se ha recomendado establecer áreas de conservación para proteger sus poblaciones (Azpiroz et al., 2012).

Debido a su sensibilidad a cambios en la disponibilidad de presas y alteraciones del hábitat, la lechuza llanera se considera un bioindicador del estado de los ecosistemas de pastizales áridos y semiáridos (Desmond et al., 2000; Loyd & Watkins, 2019; Rodríguez-Estrella, 1997; Velasco-Bautista et al., 2022). En este sentido, los estudios sobre su dieta son importantes para manejar y conservar el hábitat de *A. c. hypugaea* (Sutherland, 2000), pues la selección de un hábitat por una especie depende, entre otros factores, del espacio y el alimento disponibles (Schmutz, et al., 1991; Tuomainen & Candolin, 2011).

La dieta de la lechuza llanera es variada y está compuesta principalmente por invertebrados (como insectos), aunque también incluye pequeños vertebrados (como roedores, reptiles y aves). En Texas, su dieta ($n = 182$ egagrópilas) estuvo compuesta por artrópodos (98 %), donde destacaron grillos (Orthoptera, 50 %), larvas de lepidópteros (13 %), escarabajos (Coleoptera, 8 %), arañas (Arachnida, 7 %) y tijerillas (Dermaptera, 6.0 %); los pequeños mamíferos y las aves representaron únicamente el 2 % de su dieta (Littles et al., 2007). En la Reserva de la Biósfera de Mapimí, México, el 85.5 % de su dieta consistió en invertebrados (Rodríguez-Estrella, 1997), y en Nuevo León, los invertebrados representaron el 85.3 %, seguidos de mamíferos (12.3 %), aves (2 %) y reptiles (0.4 %) (Cruz-Nieto, 2006).

A pesar de su importancia ecológica, la lechuza llanera enfrenta serias amenazas como la fragmentación y pérdida de hábitat (Askins et al., 2007), derivadas principalmente del cambio de uso de suelo (Ribic et al., 2009), la agricultura intensiva (Askins et al., 2007;

al., 2009), intensive agricultural practices (Askins et al., 2007; Azpiroz et al., 2012) and the reduction of available burrows (Desmond et al., 2000). Additionally, exposure to agrochemical pollutants adversely impacts its fertility (Bennett et al., 1991; Stromborg, 1986), while nest predation, the presence of feral animals, and the effects of climate change disrupt resource availability and threaten its population viability (Wellicome, 2000).

A. cunicularia has been extensively studied in Canada, the United States, Brazil, and Chile, with research focusing on reproductive biology, movement patterns, habitat use, pesticide impacts, genetics, behavior and diet (Poulin et al., 2020). However, studies in Mexico remain limited and have primarily addressed its distribution (Palacios et al., 2000), habitat use (Velasco-Bautista et al., 2022) and diet (Cruz-Nieto, 2006). Since the species' success hinges on its ability to meet its trophic needs, it is essential to complement knowledge on its diet composition.

Based on the above, the objective of this study was to identify and analyze the dietary components of *A. c. hypugaea* in a region of the Chihuahuan Desert. This information provides elements for developing management and conservation strategies for its habitat in grassland ecosystems of the Chihuahuan Desert (Gervais et al., 2000; Haug et al., 1993; Sutherland, 2000).

Materials and methods

Pellet collection was conducted at seven sites located in the states of Coahuila, Durango, San Luis Potosí, and Zacatecas, Mexico, from June to December 2018 (Figure 1). The sites were selected based on sighting reports and consultations with other researchers.

Among the seven sites sampled, five featured calcareous soils (Calcisols), one had shallow soils (Leptosols), and others exhibited deeper and more fertile soils (Phaeozems). The dominant vegetation types in the area include microphyll desert scrub, natural grassland, and agricultural lands. Altitudes ranged from 1715 m at El Gallo, Vanegas, San Luis Potosí, to 2136 m at Rancho Los Ángeles, Saltillo, Coahuila. The climate is arid to semi-arid temperate, with average temperatures ranging from 12 to 18 °C. In the coldest month, temperatures may drop to -3 °C, while in the warmest month, the temperature exceeds 18 °C. Average annual precipitation varies by site: four sites report between 300 and 400 mm, two record between 400 and 500 mm, and one site, San Julián in Santiago Papasquiaro, Durango, reaches between 500 and 600 mm (Velasco-Bautista et al., 2022).

Azpiroz et al., 2012) y la reducción de madrigueras (Desmond et al., 2000). Además, la contaminación por agroquímicos afecta su fertilidad (Bennett et al., 1991; Stromborg, 1986), mientras que la depredación de nidos, la presencia de animales ferales y los efectos del cambio climático afectan la disponibilidad de recursos y la viabilidad de sus poblaciones (Wellicome, 2000).

A. cunicularia ha sido ampliamente estudiada en Canadá, Estados Unidos, Brasil y Chile, en aspectos como biología reproductiva, patrones de movimiento, uso del hábitat, impacto de pesticidas, genética, comportamiento y dieta (Poulin et al., 2020). Sin embargo, en México los estudios son escasos y se han enfocado en su distribución (Palacios et al., 2000), uso de hábitat (Velasco-Bautista et al., 2022) y dieta (Cruz-Nieto 2006). Debido a que el éxito de la especie depende de su capacidad para satisfacer sus necesidades tróficas, es fundamental complementar el conocimiento sobre la composición de su dieta.

Considerando lo anterior, el objetivo de esta investigación fue identificar y analizar los componentes de la dieta de *A. c. hypugaea* en una zona del desierto Chihuahuense. Esta información aporta elementos que permitirán desarrollar estrategias de manejo y conservación de su hábitat en ecosistemas de pastizal del desierto Chihuahuense (Gervais et al., 2000; Haug et al., 1993; Sutherland, 2000).

Materiales y métodos

La recolecta de egagrópilas se realizó en siete sitios ubicados en los estados de Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, México, de junio a diciembre de 2018 (Figura 1). Los sitios se seleccionaron con base en reportes de avistamientos y consultas con otros investigadores.

De los siete sitios muestreados, cinco presentaban suelos calcáreos (Calcisols), en uno era muy delgado (Leptosols), y en otros eran más profundos y fértiles (Feozems). La vegetación predominante de la zona es matorral desértico micrófilo, pastizal natural y áreas agrícolas. La altitud varía de 1715 m en El Gallo, Vanegas, San Luis Potosí, a 2136 m en el Rancho Los Ángeles, Saltillo, Coahuila. El clima es árido y semiárido templado, con temperatura promedio de 12 a 18 °C. En el mes más frío, la temperatura puede bajar a -3 °C, mientras que en el mes más cálido superan los 18 °C. La precipitación media anual varía según el sitio: cuatro sitios registran entre 300 y 400 mm, otros dos entre 400 y 500 mm, y uno, San Julián en Santiago Papasquiaro, Durango, alcanza entre 500 y 600 mm (Velasco-Bautista et al., 2022).

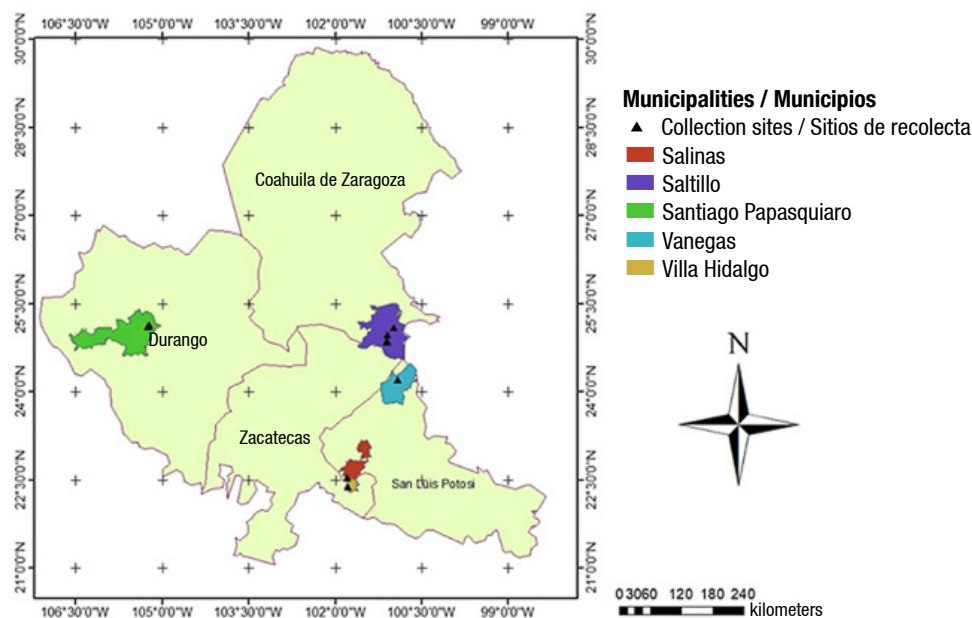


Figure 1. Pellet collection sites for western burrowing owls (*Athene cunicularia hypugaea*) in the Southern Chihuahuan Desert.

Figura 1. Sitios de recolecta de egagrópilas de lechuza llanera (*Athene cunicularia hypugaea*) en el sur del desierto Chihuahuense.

Pellets collected in the field (Figure 2) were stored in Petri dishes labeled with the burrow number, pellet number, collection site, and date, then categorized by season: summer (June–September) and fall (September–December). The samples were transported to the Water-Soil-Plant Laboratory at the Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, where they were air-dried. To determine the dietary composition of the burrowing owl, the pellets were manually dissected using latex gloves. Remnants were separated under a LEICA® stereoscopic microscope and stored in cellophane bags with corresponding labels. For the identification of key dietary components, the pellet contents were analyzed at the Phytosanitation Program Laboratory, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, using as reference the institutional insect collection and other biological materials.

The study was conducted under official authorization number SGPA/DGVS/004759/18, issued by the Dirección General de Vida Silvestre of the Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, for scientific collection. Recorded data were organized into an Excel (Microsoft Excel, ver. 2016) database for subsequent analysis.

The frequency of prey present was determined using the relative frequency of observation (RFO) formula:

$$RFO = \frac{(\text{Number of individuals of each order identified})}{\text{Total number of prey}} \times 100$$

To determine whether the proportion of recorded prey corresponds with the potential trophic niche breadth of the burrowing owl, the data on the absolute

Las egagrópilas recolectadas en campo (Figura 2) se colocaron en cajas Petri identificadas con el número de madriguera, número de egagrópila, lugar y fecha de recolecta, y se clasificaron por estación: verano (junio, julio, agosto y septiembre) y otoño (septiembre, octubre, noviembre y diciembre). Las muestras se trasladaron al laboratorio de Agua-Suelo-Planta del Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, donde se secaron al aire libre. Para determinar la composición de la dieta de la lechuza llanera, las egagrópilas se disgregaron manualmente utilizando guantes de látex. Los restos se separaron con ayuda de un microscopio estereoscópico LEICA® y se colocaron en bolsas de celofán con su respectiva identificación. Para identificar los principales componentes de la dieta, las egagrópilas se analizaron en el laboratorio del Programa de Fitosanidad del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, donde se usó como referencia la colección de insectos y otros materiales biológicos.

La investigación contó con la autorización oficial núm. SGPA/DGVS/004759/18, otorgada por la Dirección General de Vida Silvestre de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, para realizar la colecta científica. Las variables obtenidas se registraron en valores ordinales y se sistematizaron en una base de datos elaborada en Excel (Microsoft Excel, ver. 2016) para su análisis.

La frecuencia de las presas presentes se determinó mediante la fórmula de frecuencia relativa de observación (FRO):

$$FRO = \frac{(\text{Número de individuos de cada orden identificado})}{\text{Número total de presas}} \times 100$$

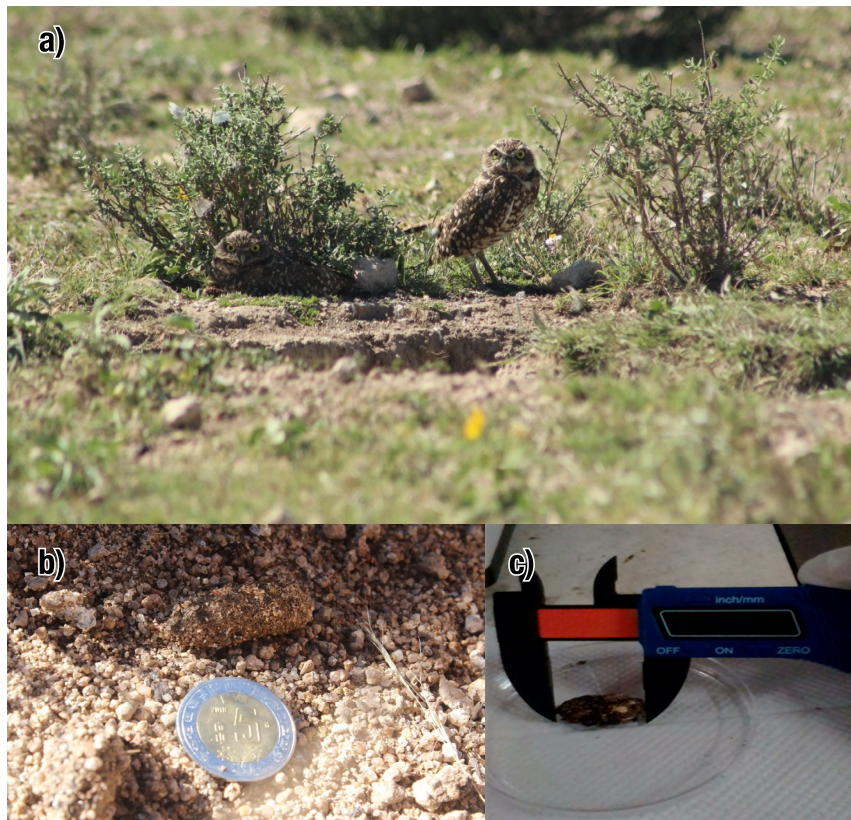


Figure 2. Collection (a and b) and measurement (c) of *Athene cunicularia hypugaea* pellets in the southern Chihuahuan Desert (Source: compiled by the author).

Figura 2. Recolección (a y b) y medición (c) de egagrópila de *Athene cunicularia hypugaea* en el sur del desierto Chihuahuense (Fuente: elaboración propia).

frequency of prey present in the pellets were analyzed using a χ^2 homogeneity test in contingency tables (Infante, 1980; Krebs, 1978). This analysis, applied to two or more independent samples, allowed us to evaluate whether there was homogeneity between the observed populations and the expected ones according to the model (Molinero, 2003) under the following hypotheses: H_0 (all the prey that potentially form the trophic niche breadth of the burrowing owl were recorded) and H_a (a proportion of potential prey is not represented in the record).

The expected number of individuals in cell (i, j) was calculated using the following equation:

$$E_{ij} = \frac{n_i c_j}{N}$$

where E_{ij} is the expected number of individuals in cell ij , n_i is the total number of individuals observed for prey i (both seasons: summer, autumn), c_j is the total number of individuals observed in the season j (all species), and N is the total number of individuals observed (all species in both seasons). These analyses were performed using JMP software version 17.2 (JMP, 2024).

Para determinar si la proporción de presas registradas correspondían con la amplitud potencial de nicho trófico de la lechuza llanera, se analizaron los datos de frecuencia absoluta de presas presentes en las egagrópilas mediante una prueba de homogeneidad de χ^2 en tablas de contingencia (Infante, 1980; Krebs, 1978). Este análisis, aplicado a dos o más muestras independientes, permitió evaluar si existió homogeneidad entre las poblaciones observadas y las esperadas por el modelo (Molinero, 2003) bajo las siguientes hipótesis: H_0 (todas las presas que potencialmente conforman la amplitud de nicho trófico de la lechuza llanera se registraron) y H_a (una proporción de presas potenciales no se encuentra representada en el registro).

El número de individuos esperados en la celda (i, j) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$E_{ij} = \frac{n_i c_j}{N}$$

donde E_{ij} es el número de individuos esperados en la celda ij , n_i es el número total de individuos observados de la presa i (ambas estaciones: verano, otoño), c_j es el número total de individuos observados en la estación j (todas las especies) y N es el número total de individuos

To determine the dominance of any order in the diet of *A. cunicularia*, Simpson's index (Simpson, 1949) was used, which estimates alpha diversity by combining values of richness and relative abundance. This estimator is a weighted arithmetic mean of proportional abundance that calculates the probability of two randomly selected individuals belonging to the same species and is expressed as $1-D$, where:

$$D = \sum \pi^2$$

According to the classification proposed by Patil and Taillie (1982), this index belongs to the additive class. If $\tau_i = 1$ (i.e., all species have the same rank) and $R(\pi) = 1 - \pi_i$, then $\lambda = 1 - H$, where H is the Herfindahl concentration index, commonly used as a descriptive statistic. The value of Simpson's D ranges from 0 to 1, where 0 indicates infinite diversity and 1 represents an absence of diversity; therefore, a higher D value implies lower diversity.

The trophic niche breadth was determined using Levins' index, which is the inverse of Simpson's index. This index quantifies the breadth and overlap of the trophic niche and is particularly useful for studying predator-prey relationships and evaluating species coexistence in space and time (MacArthur & Levins, 1967; Toft, 1980). For this reason, it has been used to describe feeding habits, complementing other diversity indices such as Shannon-Wiener or Simpson (Lizana-Avia et al., 1986).

The species richness that defines the trophic niche breadth was analyzed using the Jackknife estimator, which allowed inference of species richness per season (summer, autumn) based on presence-absence or species abundance data (Colwell, 2004). In this case, the estimator was based on the number of prey items occurring exclusively in one season (L) and minimized estimation bias by reducing the true number of prey by an order of $1/n$ (Moreno, 2001). The equation describing the estimator is:

$$S_{jackt} = S_{obs} + L \left(\frac{n-1}{n} \right)$$

where S_{obs} is the total number of recorded prey items, and n is the number of seasons.

Results and discussion

A total of 79 owl pellets were collected, processed, and analyzed (Table 1), accounting for 1169 prey items (Table 2) and recorded an average of 14.8 individuals per pellet. Carevic et al. (2013) reported an average of 4.3 ± 1.4 individuals per pellet ($n = 111$) in the Atacama Desert.

Invertebrates, particularly insects from the order Coleoptera, made up 92.3 % of the burrowing owl's

observados (todas las especies en ambas estaciones). Estos análisis se realizaron en el programa JMP ver.17.2 (JMP, 2024).

Para determinar la dominancia de algún orden en la dieta de *A. cunicularia*, se utilizó el índice de Simpson (Simpson, 1949), el cual estima la diversidad alfa al combinar valores de riqueza y abundancia relativa. Dicho estimador es una media aritmética ponderada de la abundancia proporcional que calcula la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar pertenezcan a la misma especie y se expresa como $1-D$, donde:

$$D = \sum \pi^2$$

De acuerdo con la clasificación propuesta por Patil y Taillie (1982), este índice pertenece a la clase aditiva. Si $\tau_i = 1$ (es decir, todas las especies tienen el mismo rango) y $R(\pi) = 1 - \pi_i$, entonces $\lambda = 1 - H$, donde H es el índice de concentración de Herfindall, usado comúnmente como un estadístico descriptivo. El valor de la D de Simpson fluctúa entre 0 y 1, donde 0 indica diversidad infinita y 1 representa ausencia de diversidad; por tanto, un mayor valor de D implica menor diversidad.

La amplitud del nicho trófico se determinó con el índice de Levins, que es el inverso del índice de Simpson. Este índice cuantifica la amplitud y el solapamiento del nicho trófico, y es particularmente útil para estudiar relaciones depredador-presa y evaluar la coexistencia de especies en espacio y tiempo (MacArthur & Levins, 1967; Toft, 1980). Por ello, este índice se ha utilizado para describir hábitos alimenticios, al complementar otros índices de diversidad como Shannon-Wiener o Simpson (Lizana-Avia et al., 1986).

La riqueza de especies que conforma la amplitud del nicho trófico se analizó con el estimador Jackknife, el cual permitió inferir la riqueza de especies por estación (verano, otoño) mediante los datos de presencia-ausencia o de abundancia por especie (Colwell, 2004). En este caso, el estimador se basó en el número de presas que ocurrieron únicamente en una estación (L) y minimizó el sesgo en la estimación al reducir el número verdadero de presas en un orden de $1/n$ (Moreno, 2001). La ecuación que describe al estimador es:

$$S_{jackt} = S_{obs} + L \left(\frac{n-1}{n} \right)$$

donde S_{obs} es el número total de presas registradas y n es el número de estaciones.

Resultados y discusión

Se recolectaron, procesaron y analizaron 79 egagrópilas (Cuadro 1), de donde se contabilizaron 1169 presas (Cuadro 2); es decir, 14.8 individuos por egagrópila. Carevic et al. (2013) obtuvieron un promedio de 4.3 ± 1.4

Table 1. Number of *A. c. hypugaea* pellets collected in Coahuila, Durango, San Luis Potosí, and Zacatecas, Mexico, from June to December 2018.

Cuadro. Número de egagrópilas de *A. c. hypugaea* recolectadas en Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, México, de junio a diciembre de 2018.

State/ Estado	Municipality/ Municipio	Locality/ Localidad	No. pellets / Núm. de egagrópilas	
			Summer / Verano	Autumn / Otoño
San Luis Potosí	Salinas	Conejillo	5	11
	Vanegas	El Gallo	3	0
Coahuila	Saltillo	San Juan del Retiro	7	0
		Guadalupe Victoria	6	0
		Rancho Los Ángeles	1	0
Durango	Santiago Papasquiaro	San Julián	29	9
Zacatecas	Villa Hidalgo	San Agustín	2	6
Total			53	26

Table 2. Absolute frequency (AF) and relative frequency of observation (RFO) of prey identified in pellets of *Athene cunicularia hypugaea* in Coahuila, Durango, San Luis Potosí, and Zacatecas, Mexico, collected from June to December 2018.

Cuadro 2. Frecuencia absoluta (FA) y frecuencia relativa de observación (FRO) de las presas indentificadas en las egagrópilas de *Athene cunicularia hypugaea* en Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, México, recolectadas de junio a diciembre de 2018.

Order / Orden	Summer / Verano		Autumn / Otoño	
	AF/FA	RFO (%) / FRO (%)	AF/FA	RFO (%) / FRO (%)
Coleoptera	601	75.5	286	76.7
Hymenoptera	108	13.6	22	5.9
Orthoptera	34	4.2	26	7
Rodentia	26	3.2	3	0.8
Scorpions / Scorpiones	12	1.5	3	0.8
Decapoda	10	1.2	0	0
Hemiptera	1	0.1	1	0.2
UO / ONI	4	0.5	32	8.5

UO: Unidentified organisms.

ONI: organismos no identificados.

diet. This is consistent with findings from previous studies (Andrade et al., 2004; Martínez & de Brito-Freire, 2018; Ruiz-Aymá et al., 2019). Some of the prey species identified in the pellets exhibit terrestrial habits and are commonly found in dark, moist environments, such as the burrows occupied by *Athene cunicularia* (Schlatter et al., 1982). Moreover, precipitation has been shown to significantly influence the abundance of terrestrial arthropods (Cepeda-Pizarro et al., 2005). Figure 3 shows the precipitation data recorded during the study period.

The western burrowing owl perches outside its burrow while waiting for prey (Haug et al., 1993), which are attracted by the livestock manure it places around its refuge (Levey et al., 2004). This strategy enables

individuos por egagrópila ($n = 111$) en el desierto de Atacama.

El 92.3 % de la dieta de la lechuza llanera se conformó por invertebrados, en particular insectos del orden Coleoptera. Esto coincide con lo reportado en otros estudios (Andrade et al., 2004; Martínez & de Brito-Freire, 2018; Ruiz-Aymá et al., 2019). Algunas de las presas identificadas en las egagrópilas son de hábitos terrícolas y suelen concentrarse en lugares oscuros y húmedos, como las madrigueras utilizadas por *Athene cunicularia* (Schlatter et al., 1982). Además, se ha documentado que la precipitación tiene un impacto significativo en la abundancia de artrópodos terrestres (Cepeda-Pizarro et al., 2005). En este sentido, la Figura 3

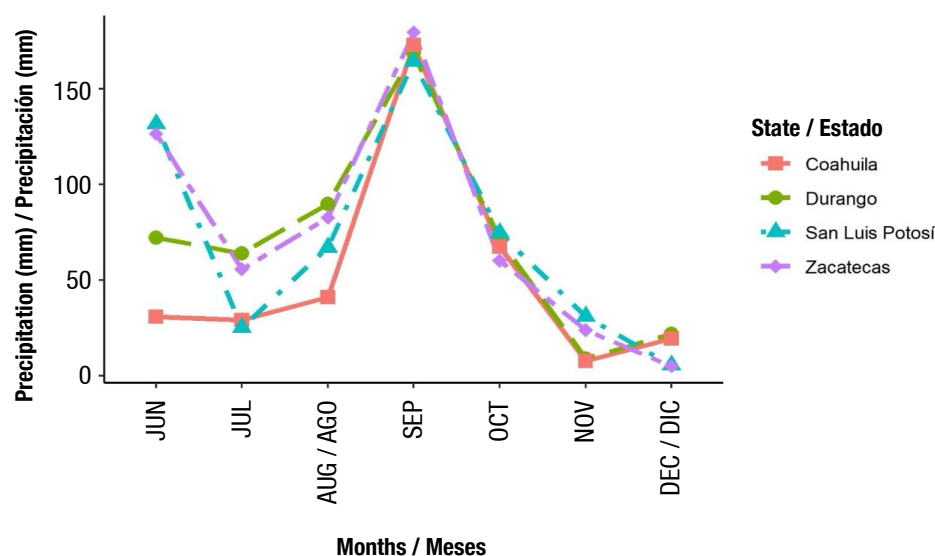


Figure 3. Precipitation recorded at the study sites during the evaluation period.

Figura 3. Precipitación registrada en los sitios de estudio durante el periodo de evaluación.

adult owls to feed without the need to travel, thereby minimizing their energy expenditure in searching for and obtaining food (Cavalli et al., 2014).

Scorpions and individuals from the order Rodentia were identified in the diet of the burrowing owl, although in small proportions (Table 2). The primary taxonomic families identified in the pellets were Scarabaeidae, Formicidae, Tenebrionidae, Acrididae, Curculionidae, Gryllidae, Chrysomelidae, Elateridae, Reduviidae, and Silphidae. Cruz-Nieto (2006) reported that the most abundant families in the burrowing owl's diet in Nuevo León, Mexico, were Carabidae, Acrididae, Scarabaeidae, Curculionidae, Cerambycidae, and Tenebrionidae. These differences in diet composition suggest that the burrowing owl selects its food based on the availability of prey in its environment (Andrade et al., 2010; Carevic et al., 2013; Torres-Contreras & Silva-Aranguiz, 1994).

During the digestion process, the components of the burrowing owl's diet break down to a point where their identification at the species level becomes difficult. In this study, it was possible to identify some dietary components at the genus level, and in a few cases, at the species level. Among the identified prey items were *Canthon* spp., *Dichotomius* spp., *Temnothorax* spp., *Euphoria basalis*, *Pogonomyrmex barbatus*, *Phanaeus quadridens*, *Polyphylla hammondi*, *Cotinis mutabilis* and *Nicrophorus mexicanus*.

The results of the χ^2 analysis suggest that in both summer ($df = 36$, $p = 0.2270$) and autumn ($df = 30$, $p = 0.2426$), all prey species potentially contributing to the burrowing owl's trophic niche breadth were recorded. This appears to be influenced by the

muestra los datos de precipitación registrados durante el periodo de estudio.

La lechuza llanera se posa afuera de su madriguera en espera de sus presas (Haug et al., 1993), las cuales son atraídas por el estiércol de ganado doméstico que coloca alrededor de su refugio (Levey et al., 2004). Esta estrategia permite que los adultos se alimenten sin la necesidad de desplazarse, con lo que minimizan su gasto energético en la búsqueda y obtención del alimento (Cavalli et al., 2014).

Los escorpiones e individuos del orden Rodentia se identificaron en la dieta de la lechuza llanera, pero en proporciones pequeñas (Cuadro 2). Las principales familias taxonómicas identificadas en las egagrópilas fueron Scarabaeidae, Formicidae, Tenebrionidae, Acrididae, Curculionidae, Gryllidae, Chrysomelidae, Elateridae, Reduviidae y Silphidae. Cruz-Nieto (2006) reportó que las familias más abundantes en la dieta de la lechuza llanera en Nuevo León, México, fueron Carabidae, Acrididae, Scarabaeidae, Curculionidae, Cerambycidae y Tenebrionidae. Estas diferencias en la composición de la dieta sugieren que la lechuza selecciona su alimento con base en la disponibilidad de presas en su entorno (Andrade et al., 2010; Carevic et al., 2013; Torres-Contreras & Silva-Aranguiz, 1994).

Durante el proceso de digestión, los componentes de la dieta de la lechuza llanera se descomponen al punto de dificultar su identificación a nivel de especie. En este estudio, fue posible identificar algunos componentes de la dieta a nivel de género, y en pocos casos a nivel de especie. Entre las presas identificadas se encontraron *Canthon* spp., *Dichotomius* spp., *Temnothorax* spp., *Euphoria*

availability and seasonal distribution of its prey, which prevents the overlap of ecological feeding niches. Soberón (2007) proposes that a species' distribution within a habitat largely depends on the distribution of its prey, which is determined by factors such as biotic interactions and access to sites with optimal conditions.

According to the standardized Levins index, the trophic breadth of *A. cunicularia hypugaea* shows slight specialization in prey consumption during the summer ($B_{EST} = 0.09854$) and autumn ($B_{EST} = 0.09375$). This specialization appears to be influenced by an increase in the consumption of beetles, which accounted for 76.7 % of their diet in autumn (286 individuals) and 75.5% in summer (601 individuals). This suggests that the owl species maintains a relatively stable trophic spectrum with minimal seasonal variation ($B_{EST} = 0.09857$). Low values of this index are consistent with those reported by Bó et al. (2007). Bellocq (1998) notes that index values are influenced by the dominance of certain species in the diet. If the Levins index is below 0.60, it indicates specialization, meaning that the species utilizes a limited number of resources and prefers certain specific food components. This contrasts with the findings of Drielle et al. (2022), Pulido et al. (2021), and Vieira and Teixeira (2008), who classify the burrowing owl as a generalist and opportunist.

The Simpson index showed values of $\lambda = 0.59$ in summer and $\lambda = 0.60$ in autumn, which also reflects a generalist behavior in terms of consuming abundant prey (Andrade et al., 2010; Carevic et al., 2013; Torres-Contreras & Silva-Aranguiz, 1994). Diet composition depends on resource availability (Luque-Fernández, 2020), and selectivity is related to the relative abundance of prey (Pulido et al., 2021). Drielle et al. (2022) observed a predominant consumption of invertebrates in Brazil due to their abundance, representing 84.8 % of the diet, while Vieira and Teixeira (2008) reported higher consumption of amphibians (78.1 %) because they were the most frequent. In southern Texas, Woodin et al. (2007) found that insects dominated the diet of the burrowing owl in winter (91 %). On the other hand, Zunino and Jofre (1999) reported that in a region of Chile, the owl consumed rodents during the breeding season and shifted to arthropods when the rodent population declined.

In this study, the percentage of individuals from the order Rodentia represented 3.2 % of the diet in summer and 0.8 % in autumn, values like those reported by York et al. (2002), who observed rodent consumption at 0.2 % of the diet. However, these results contrast with findings from Colorado, USA, where rodents accounted for 52 % of the diet (Plumpton & Scott, 1993). These differences are likely due to prey availability.

basalis, *Pogonomyrmex barbatus*, *Phanaeus quadridens*, *Polyphylla hammondi*, *Cotinis mutabilis* y *Nicrophorus mexicanus*.

Los resultados del análisis de χ^2 sugieren que en verano ($gl = 36$, $p = 0.2270$) y otoño ($gl = 30$, $p = 0.2426$) se registraron todas las presas que potencialmente conforman la amplitud de nicho trófico de la lechuza llanera. Esto parece estar influenciado por la disponibilidad y distribución estacional de sus presas, lo cual evita el solapamiento de nichos ecológicos alimenticios. Soberón (2007) plantea que la distribución de una especie en un hábitat depende, en gran medida, de la distribución de sus presas, lo que está determinado por factores como interacciones bióticas y acceso a sitios con condiciones óptimas.

De acuerdo con el índice de Levins estandarizado, la amplitud trófica de *A. cunicularia hypugaea* exhibe una ligera especialización en el consumo de presas en verano ($B_{EST} = 0.09854$) y otoño ($B_{EST} = 0.09375$). Dicha especialización parece estar influenciada por el incremento en el consumo de coleópteros, que representaron el 76.7 % de su dieta en el otoño (286 individuos) y el 75.5 % en verano (601 individuos). Esto sugiere que la especie mantiene un espectro trófico sin grandes variaciones estacionales ($B_{EST} = 0.09857$). Valores bajos de este índice coinciden con lo reportado por Bó et al. (2007). Bellocq (1998) menciona que los valores del índice se deben a la dominancia de ciertas especies en la dieta. Si el índice de Levins es menor a 0.60 indica especialización; es decir, utiliza un número limitado de recursos y prefiere ciertos componentes alimenticios. Lo anterior contrasta con los resultados de Drielle et al. (2022), Pulido et al. (2021), y Vieira y Teixeira (2008), quienes clasifican a la lechuza llanera como generalista y oportunista.

El índice de Simpson mostró valores de $\lambda = 0.59$ en verano y $\lambda = 0.60$ en otoño, lo que también refleja un comportamiento generalista en términos de consumo de presas abundantes (Andrade et al., 2010; Carevic et al., 2013; Torres-Contreras & Silva-Aranguiz, 1994). La composición de la dieta depende de la disponibilidad de recursos (Luque-Fernández, 2020), y su selectividad está relacionada con la abundancia relativa de las presas (Pulido et al., 2021). Drielle et al. (2022) observaron un consumo predominante de invertebrados en Brasil debido a su abundancia, al representar el 84.8 % de la dieta, mientras que Vieira y Teixeira (2008) reportaron un consumo mayor de anfibios (78.1 %) por ser los más frecuentes. En el sur de Texas, Woodin et al. (2007) encontraron que los insectos dominaban la dieta de la lechuza llanera en invierno (91 %). Por otro lado, Zunino y Jofre (1999) reportaron que, en una región de Chile, la lechuza consumía roedores durante la temporada de reproducción y cambiaba a artrópodos cuando la población de roedores disminuía.

Herse (2016) notes that the burrowing owl consumes mammals because they provide more biomass compared to invertebrates. In Brazil, Drielle et al. (2022) reported that rodents made up 8.6 % of the diet, while in Nuevo León, Mexico, González-Rojas et al. (2020) indicated that, although rodents comprised only 2 % of the prey, they accounted for 41 % of the diet's weight.

Prey consumption appears to be related to prey size. The burrowing owl, which weighs approximately 150 g, does not consume very heavy prey (Barclay & Brigham, 1991; Marti et al., 1993), unlike other species of the *Strigidae* family, whose diets are primarily based on small mammals (Aragón et al., 2002; Pozo-Zamora et al., 2017; Rafael-Valdez, 2018).

Species richness determined using the Jackknife1 estimator suggests that the average number of prey orders found was lower than expected by the model (Figures 4, 5, and 6). This may be related to the fragility and easy digestion of insects, the primary components of the owl's diet, which difficult its identification in the pellets.

This study found that the diet of the burrowing owl is primarily composed of insects, which are highly vulnerable to the impacts of habitat fragmentation (Didham et al., 1996). Therefore, effective grassland management, which respects the animal carrying capacity, is crucial. Insects not only serve as a food source for the burrowing owl and other insectivorous birds but also play a key role in maintaining and enhancing the physical and chemical properties of the soil (Beare, 1997), as well as improving nutrient cycling in ecosystems (Lavelle, 1997; MacMahon et

En este estudio, el porcentaje de individuos del orden Rodentia representaron el 3.2 % de la dieta en verano y el 0.8 % en otoño, valores similares a los reportados por York et al. (2002), quienes observaron el consumo de roedores en el 0.2 % de la dieta. Sin embargo, estos resultados contrastan con los obtenidos en Colorado, EUA, donde los roedores alcanzaron el 52 % de la dieta (Plumpton & Scott, 1993). Estas diferencias probablemente se deban a la disponibilidad de las presas. Herse (2016) señala que la lechuza llanera consume mamíferos porque le representan más biomasa en comparación con la que obtiene de invertebrados. En Brasil, Drielle et al. (2022) mencionan que los roedores representaron el 8.6 % de la dieta, mientras que, en Nuevo León, México, González-Rojas et al. (2020) indican que, aunque los roedores conformaron solo el 2 % de las presas, estos representaron el 41 % del peso de la dieta.

El consumo de presas parece estar relacionado con el tamaño de estas. La lechuza llanera, cuyo peso es de aproximadamente 150 g, no consume presas muy pesadas (Barclay & Brigham, 1991; Marti et al., 1993), a diferencia de otras especies de la familia Strigidae, cuya dieta se basa principalmente en mamíferos pequeños (Aragón et al., 2002; Pozo-Zamora et al., 2017; Rafael-Valdez, 2018).

La riqueza de especies determinada con el estimador Jackknife1 sugiere que el número promedio de órdenes de presas encontrado fue menor al esperado por el modelo (Figuras 4, 5 y 6). Esto podría estar relacionado con la fragilidad y fácil digestión de los insectos, principales componentes de la dieta de la lechuza, lo cual dificulta su identificación en las egagrópilas.

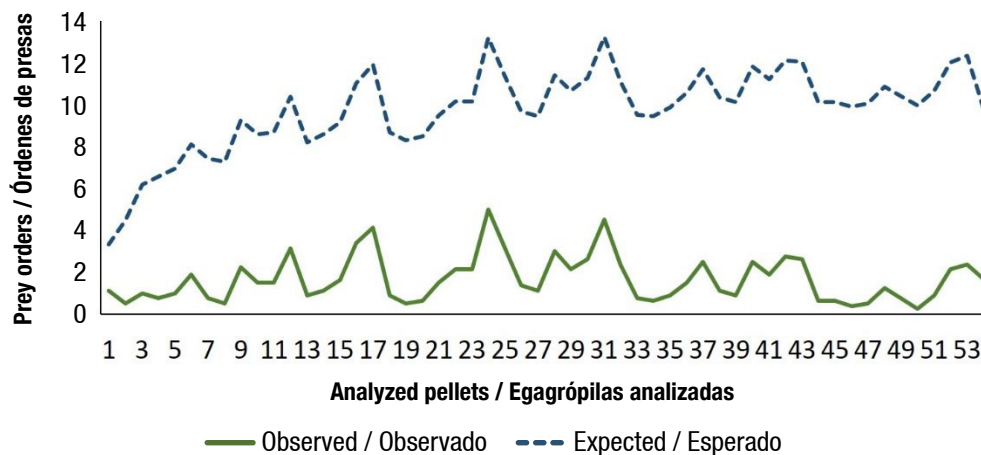


Figure 4. Rarefaction curves for the species richness of prey found in pellets of *Athene cunicularia hypugaea* collected in Coahuila, Durango, San Luis Potosí, and Zacatecas, Mexico, in summer of 2018.

Figura 4. Curvas de rarefacción para la riqueza de especies de presas encontradas en las egagrópilas de *Athene cunicularia hypugaea* recolectadas en Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, México, en verano de 2018.

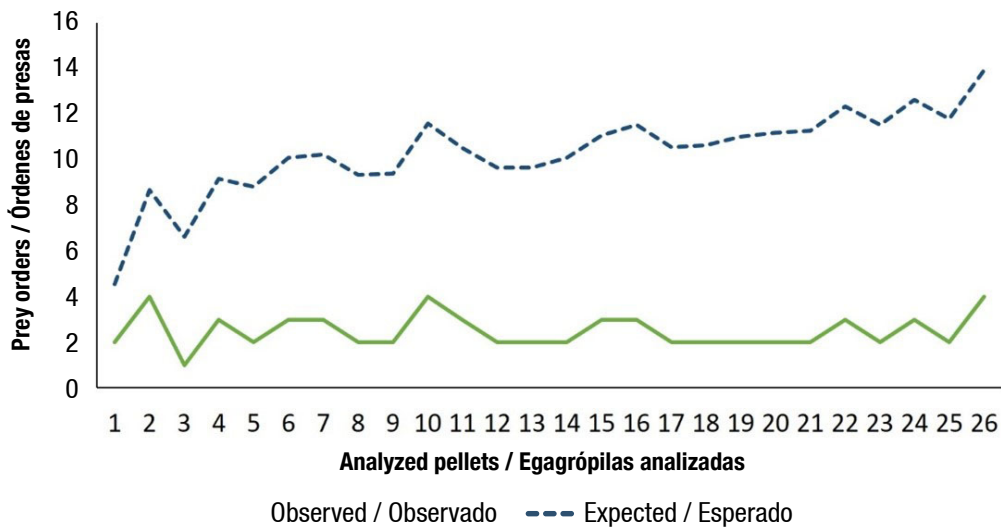


Figure 5. Rarefaction curves for the species richness of prey found in pellets of *Athene cunicularia hypugaea* collected in Coahuila, Durango, San Luis Potosí, and Zacatecas, Mexico, in autumn of 2018.

Figura 5. Curvas de rarefacción para la riqueza de especies de presas encontradas en las egagróvilas de *Athene cunicularia hypugaea* recolectadas en Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, México, en otoño de 2018.

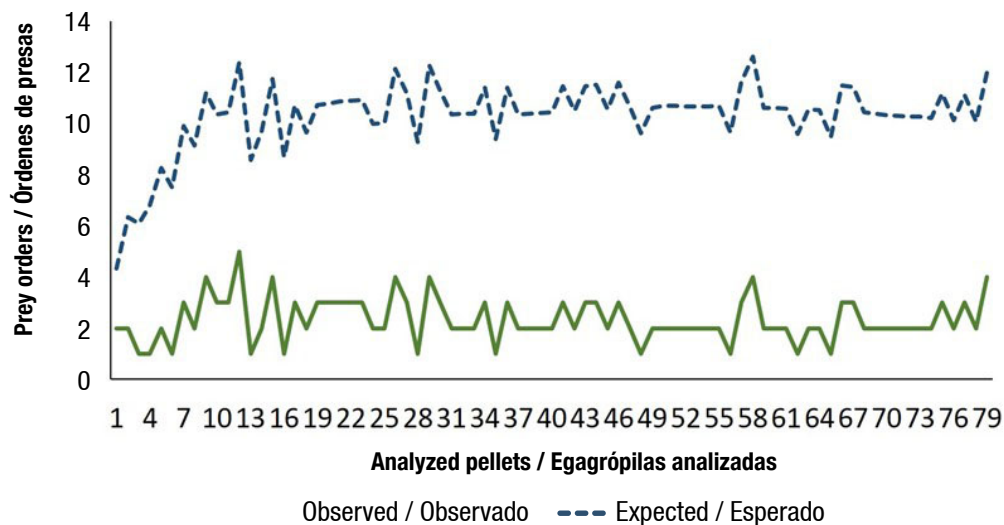


Figure 6. Rarefaction curves for the species richness of prey found in pellets of *Athene cunicularia hypugaea* collected in Coahuila, Durango, San Luis Potosí, and Zacatecas, Mexico, in summer and autumn of 2018.

Figura 6. Curvas de rarefacción para la riqueza de especies de presas encontradas en las egagróvilas de *Athene cunicularia hypugaea* recolectadas en Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, México, en verano y otoño de 2018.

al., 2000). However, the introduction of chemicals into the biosphere has negatively affected wildlife populations (Martínez et al., 2000). For instance, the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) is toxic to rodents during pre- and postnatal stages (Chernoff et al., 1990), and it reduces fertility in invertebrates (Martínez et al., 2000), leading to population declines and imbalances in grassland ecosystems.

En este estudio, se determinó que la dieta de la lechuza llanera está compuesta principalmente por insectos, los cuales son altamente sensibles a los efectos de la fragmentación del hábitat (Didham et al., 1996); por ello, el manejo adecuado de los pastizales, respetando la capacidad de carga animal, es fundamental. Además de ser una fuente de alimento para la lechuza llanera y otras aves insectívoras, los insectos contribuyen

To increase populations of *A. c. hypugaea* and other grassland bird species, it is essential to conserve burrowing mammals, which, in addition to providing burrows for the burrowing owl, help maintain short vegetation and remove some shrubs from grasslands. It is also crucial to preserve native grasslands and implement good livestock management practices that follow the stocking rates established by the Comisión Técnico Consultiva de Coeficientes de Agostadero Rates (COTECOCA, 1978), since the improper management of rangelands can have adverse ecological and economic consequences.

To ensure the availability of insects that serve as prey for *A. c. hypugaea*, it is essential to adopt sustainable agricultural practices, such as reducing the use of agrochemicals or replacing them with more environmentally friendly alternatives. Additionally, soil conservation practices should be implemented to restore grasslands and benefit birds associated with this ecosystem.

The results of this research provide valuable input for developing management plans focused on the conservation of the burrowing owl. However, it is important to intensify efforts and conduct long-term monitoring of this species' populations to better understand their needs throughout the year.

Conclusions

In seven sites located in Coahuila, Durango, San Luis Potosí, and Zacatecas, Mexico, 79 pellets from *Athene cunicularia hypugaea* were collected. The sampling locations were grasslands with scattered shrubs. During summer, the diet of the burrowing owl was primarily composed of insects from the orders Coleoptera (75.5 %), Hymenoptera (13.6 %), and Orthoptera (4.2 %). In autumn, the diet showed a similar composition, with insects from the orders Coleoptera (76.7 %), Orthoptera (7.0 %) and Hymenoptera (5.9 %) being predominant. The trophic niche breadth was very similar in both seasons, likely due to the similarity in prey availability.

To complement the dietary analysis, it is necessary to conduct studies on the availability of potential prey for *Athene cunicularia hypugaea*, as, unlike other studies, small mammals did not constitute a significant part of the diet in this case. This is likely due to the reduced abundance of these species in the evaluated sites or the presence of competitors, such as other raptors or mammals.

End of English version

a mantener y enriquecer las propiedades físicas y químicas del suelo (Beare, 1997), así como a mejorar el ciclo de nutrientes en los ecosistemas (Lavelle, 1997; MacMahon et al., 2000). Sin embargo, la incorporación de sustancias químicas en la biosfera ha afectado a las poblaciones de fauna silvestre (Martínez et al., 2000). Por ejemplo, el herbicida ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) es tóxico para roedores en etapas pre y postnatal (Chernoff et al., 1990) y en invertebrados afecta su fertilidad (Martínez et al., 2000), lo cual provoca una disminución de sus poblaciones y causa desequilibrios en los ecosistemas de pastizales.

Para incrementar las poblaciones de *A. c. hypugaea* y de otras especies de aves de pastizal, es necesario conservar a los mamíferos excavadores, los cuales, además de proveer madrigueras para la lechuza llanera, mantienen a la vegetación corta y eliminan algunos arbustos de los pastizales. Asimismo, es crucial preservar los pastizales nativos e implementar buenas prácticas ganaderas que respeten los coeficientes de agostadero establecidos por la Comisión Técnico Consultiva de Coeficientes de Agostadero (COTECOCA, 1978), ya que el manejo inadecuado de los agostaderos puede tener consecuencias ecológicas y económicas adversas.

Para garantizar la disponibilidad de insectos que sirven de presa a *A. c. hypugaea*, es fundamental adoptar prácticas agrícolas sostenibles, como la disminución del uso de agroquímicos o su sustitución por métodos alternativos más amigables con el ambiente. Además, se deben implementar prácticas de conservación de suelos para recuperar los pastizales y beneficiar a las aves asociadas a este ecosistema.

Los resultados de esta investigación representan un aporte valioso para el desarrollo de planes de manejo enfocados en la conservación de la lechuza llanera. Sin embargo, se deben redoblar esfuerzos y monitorear a largo plazo las poblaciones de esta especie para identificar sus necesidades durante el año.

Conclusiones

En siete sitios ubicados en Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, México, se recolectaron 79 egagrópilas de *Athene cunicularia hypugaea*. Los lugares de muestreo correspondieron a pastizales con arbustos dispersos. Durante el verano, la dieta de la lechuza llanera estuvo compuesta principalmente por insectos de los órdenes Coleoptera (75.5 %), Hymenoptera (13.6 %) y Orthoptera (4.2 %). En otoño, la dieta mostró una composición similar, al predominar los insectos de los órdenes Coleoptera (76.7 %), Orthoptera (7.0 %) e Hymenoptera (5.9 %). La amplitud del nicho

References / Referencias

- Andrade, A., Teta, P., & Contreras, J. R. (2004). Dieta de la lechucita vizcachera (*Speotyto cunicularia*) en el parque nacional Médanos del Chaco (Paraguay). *Ornitología Neotropical*, 15, 87-92. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/105764>
- Andrade, A., Nabte, M. J., & Kun, M. E. (2010). Diet of the burrowing owl (*Athene cunicularia*) and its seasonal variation in Patagonian steppes: Implications for biodiversity assessments in the Somuncurá Plateau Protected Area, Argentina. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 45(2), 101-110. <https://doi.org/10.1080/01650521.2010.502010>
- Aragón, E. E., Castillo, B., & Garza, A. (2002). Roedores en la dieta de dos aves rapaces nocturnas (*Bubo virginianus* y *Tyto alba*) en el noreste de Durango, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 86, 29-50. <https://azm.ojs.inacol.mx/index.php/azm/article/view/2498/2874>
- Askins, R. A., Chávez-Ramírez, F., Dale, B. C., Haas, C. A., Herkert, J. R., Knopf, F. L., & Vickery, P. D. (2007). Conservation of grassland birds in North America: Understanding ecological processes in different regions. *Ornithological Monographs*, 64, 1-46. <http://www.jstor.org/stable/40166905>
- Azpiroz, A. B., Isacch, J. P., Dias, R. A., Di Giacomo, A. S., Fontana, C. S., & Morales-Palarea, C. (2012). Ecology and conservation of grassland birds in southeastern South America: A review. *Journal of Field Ornithology*, 83(3), 217-246. <https://doi.org/10.1111/j.1557-9263.2012.00372.x>
- Barclay, R. M., & Brigham, R. M. (1991). Prey detection, dietary niche breadth, and body size in bats: why are aerial insectivorous bats so small? *The American Naturalist*, 137(5), 693-703. <http://www.jstor.org/stable/2462602>
- Beare, M. H. (1997). Fungal and bacterial pathways of organic matter decomposition and nitrogen mineralization in arable soils. In L. Brussaard & R. Ferrera-Cerrato (Eds.), *Soil Ecology in Sustainable Agricultural System* (pp. 41-74). CRC Press LLC. <https://doi.org/10.1201/9781003040057>
- Belloq, M. I. (1998). Prey selection by breeding and nonbreeding Barn Owls in Argentina. *The Auk*, 115(1), 224-229. <https://doi.org/10.2307/4089132>
- Bennett, R. S., Williams, B. A., Schmedding, D. W., & Bennett, J. K. (1991). Effects of dietary exposure to methyl parathion on egg laying and incubation in mallards. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 10(4), 501-507. <https://doi.org/10.1002/etc.5620100410>
- Bó, M. S., Baladrón, A. V., & Biondi, L. M. (2007). Ecología trófica de Falconiformes y Strigiformes: tiempo de síntesis. *El Hornero*, 22(2), 97-115. <https://www.scielo.org.ar/pdf/hornero/v22n2/v22n2a03.pdf>
- Carevic, F. S., Carmona, E. R., & Muñoz-Pedrerros, A. (2013). Seasonal diet of the burrowing owl *Athene cunicularia* Molina, 1782 (Strigidae) in a hyperarid ecosystem of the Atacama desert in northern Chile. *Journal of Arid Environments*, 97, 237-241. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.07.008>
- Cavalli, M., Baladrón, A. V., Isacch, J. P., Martínez, G., & Bó, M. S. (2014). Prey selection and food habits of breeding burrowing owls (*Athene cunicularia*) in natural and modified habitats of trófico fue muy similar en ambas estaciones, debido probablemente a la similitud en la disponibilidad de las presas.
- Para complementar el análisis de la dieta, es necesario realizar estudios sobre la disponibilidad de presas potenciales para *Athene cunicularia hypugaea*, ya que, a diferencia de otras investigaciones, en este estudio los pequeños mamíferos no representaron una parte significativa de la dieta. Esto debido, probablemente, a la abundancia reducida de estas especies en los sitios evaluados o a la presencia de competidores, como otras aves rapaces o mamíferos.
- Fin de la versión en español**
- Argentine pampas. *Emu-Austral Ornithology*, 114(2), 184-188. <http://dx.doi.org/10.1071/MU13040>
- Cepeda-Pizarro, J., Pizarro-Araya, J., & Vásquez, H. (2005). Composición y abundancia de artrópodos epígeos del Parque Nacional Llanos de Challe: impactos del ENOS de 1997 y efectos del hábitat pedológico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 78(4), 635-650. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2005000400004>
- Chernoff, N., Setzer, R. W., Miller, D. B., Rosen, M. B., & Rogers, J. M. (1990). Effects of chemically induced maternal toxicity on prenatal development in the rat. *Teratology*, 42(6), 651-658. <https://doi.org/10.1002/tera.1420420610>
- Colwell, R. K. (2004). *EstimateS user's Gguide*. <http://purl.oclc.org/estimates>
- Comisión Técnica Consultiva para la Determinación de los Coeficientes de Agostadero (COTECOCA). (1978). *Determinación de Coeficientes de Agostadero*. COTECOCA-SARH.
- Cruz-Nieto, M. A. (2006). *Ecología invernal de la Lechuza llanera (Athene cunicularia), en pastizales ocupados por Perrito llanero Mexicano (Cynomys mexicanus), Galeana, Nuevo León, México* [Ph.D. Thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/4035/1/1080253546.pdf>
- Desmond, M. J., Savidge, J. A., & Eskridge, K. M. (2000). Correlations between burrowing owl and black-tailed prairie dog declines: A 7-year analysis. *The Journal of Wildlife Management*, 64(4), 1067-1075. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1163&context=natrespapers>
- Didham, R. K., Ghazoul, J., Stork, N. E., & Davis, A. J. (1996). Insects in fragmented forests: a functional approach. *Trends in Ecology & Evolution*, 11(6), 255-260. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(96\)20047-3](https://doi.org/10.1016/0169-5347(96)20047-3)
- Drielle, A., Branco, J. O., & Barrilli, G. H. C. (2022). Prey ecology of the burrowing owl *Athene cunicularia cunicularia* (Molina, 1782) on the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 57(3), 283-290. <https://doi.org/10.1080/01650521.2020.1867953>
- Enríquez-Rocha, P., Rangel-Salazar, J. L., & Holt, D. W. (1993). Presence and distribution of Mexican owls: A review. *Journal of Raptor Research*, 27(3), 154-160. <https://sora.unm.edu/sites/default/files/journals/jrr/v027n03/p00154-p00160.pdf>

- Gervais, J. A., Rosenberg, D. K., Fry, D. M., Trulio, L., & Sturm, K. K. (2000). Burrowing owls and agricultural pesticides: Evaluation of residues and risks for three populations in California, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(2), 337-343. <https://doi.org/10.1002/etc.5620190213>
- González-Rojas, J. I., Cruz-Nieto, M. A., Guzmán-Velasco, A., Ruvalcaba-Ortega, I., Olalla-Kerstupp, A., & Ruiz-Ayma G. (2020). Winter diet of burrowing owls in the Llano La Soledad, Galeana, Nuevo León, México. *Peer J*, 10, e13324. <https://doi.org/10.7717/peerj.13324>
- Haug, E. A., Millsap, B. A., & Martell, M. S. (1993). Burrowing owl (*Speotyto cunicularia*). In Poole, A., & Gill, F. (Eds.), *The birds of North America* (pp. 1-20). The Academy of Natural Sciences, Philadelphia, and The American Ornithologists' Union.
- Herse, M. R. (2016). Diet and behavior of extralimital western burrowing owls (*Athene cunicularia hypoleuca*) in tallgrass prairie. *Southwestern Naturalist*, 61(4), 341-348. <https://doi.org/10.1894/0038-4909-61.4.341>
- Holroyd, G. L., Rodríguez-Estrella, R., & Sheffield, S. R. (2001). Conservation of the burrowing owl in western North America: Issues, challenges, and recommendations. *Journal of Raptor Research*, 35(4), 399-407. <https://sora.unm.edu/sites/default/files/journals/jrr/v035n04/p00399-p00407.pdf>
- Infante, G. S. (1980). *Métodos estadísticos no paramétricos*. Centro de Estadística y Cálculo, Colegio de Postgraduados.
- JMP. (2024). *Statistics for the Apple Macintosh: Statistics and Graphics Guide* (ver. 17.2). Academic SAS Institute Inc.
- Krebs, C. J. (1978). *Ecology: The experimental analysis of distribution and abundance* (2a ed.). Harper International Edition. Harper and Row Publishers.
- Lavelle, P. (1997). Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research*, 27, 93-132. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60007-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60007-0)
- Levey, D. J., Duncan, R. S., & Levins, C. F. (2004). Use of dung as a tool by burrowing owls. *Nature*, 431, 39. <https://doi.org/10.1038/431039a>
- Littles, C. J., Williford, D., Skoruppa, M. K., Woodin, M. C., & Hickman, G. C. (2007). Diet of western burrowing owls wintering in southern Texas. *Journal of Raptor Research*, 41(4), 307-313. [https://doi.org/10.3356/0892-1016\(2007\)41\[307:DOWBOW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3356/0892-1016(2007)41[307:DOWBOW]2.0.CO;2)
- Lizana-Avia, M., Ciudad-Pizarro, J. M., & Pérez-Mellado, V. (1986). Uso de los recursos tróficos en una comunidad ibérica de anfibios. *Revista Española de Herpetología*, 1, 209-271.
- Loyd, K. A., & Watkins, R. T. (2019). Habitat characteristics and nesting success of the Western burrowing owl in a suburban desert landscape. *Arizona Birds*, 13, 8-12.
- Luque-Fernández, C. R. (2020). Diet and behavior of the burrowing owl (*Athene cunicularia*) in Atiquipa, an ecosystem of Lomas in the south of Peru. *Biodiversitas*, 21(1), 137-143 <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210118>
- MacArthur, R. H., & Levins, R. (1967). The limiting similarity, convergence and divergence of coexisting species. *The American Naturalist*, 101(921), 337-385. <https://doi.org/10.1086/282505>
- MacMahon, J. A., Mull, J. F., & Crist, T. O. (2000). Harvester ants (*Pogonomyrmex* spp.): their community and ecosystem influences. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31(1), 265-291. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.31.1.265>
- Marti, C. D., Steenhof, K., Kochert, M. N., & Marks, J. S. (1993). Community trophic structure: the roles of diet, body size, and activity time in vertebrate predators. *Oikos*, 67(1), 6-18. <https://doi.org/10.2307/3545090>
- Martínez, M., Cruz, R., & Lumaret, J. P. (2000). Efecto del diferente manejo de los pastizales y del ganado sobre los escarabajos coprófagos *Ataenius apicalis* Hinton y *Ataenius sculptor* Harold (Scarabaeidae: Aphodiinae: Eupariini). *Acta Zoológica Mexicana*, 80, 185-196. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57508010>
- Martínez, A. C., & de Brito-Freire, G. (2018). Análise temporal da dieta de *Athene cunicularia* em Brasília-DF. *Pubvet*, 12(8), 1-3. <https://doi.org/10.31533/pubvet.v12n8a160.1-3>
- Molinero, L. M. (2003). *Análisis de tablas de contingencia de más de 2 variables cualitativas*. Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión. <https://www.alceingenieria.net/bioestadistica/loglinear.pdf>
- Moreno, E. C. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.
- Palacios, E., Anderson, D. W., Mellink, E., & González-Guzmán, S. (2000). Distribution and abundance of burrowing owls on the peninsula and islands of Baja California. *Western Birds*, 31(2), 89-99.
- Patil, G. P., & Taile, C. (1982). Diversity as a concept and its measurement. *Journal of the American Statistical Association*, 77(379), 548-567. <https://doi.org/10.2307/2287709>
- Plumpton, D. L., & Scott, L. R. (1993). Prey selection and food habits of burrowing owls in Colorado. *The Great Basin Naturalist*, 53(3), 299-304. <https://www.jstor.org/stable/41712786>
- Poulin, R. G., Todd, L. D., Haug, E. A., Millsap, B. A., & Martell, M. S. (2020). Burrowing owl (*Athene cunicularia*), ver. 1.0. Birds of the World. <https://doi.org/10.2173/bow.burowl.01>
- Pozo-Zamora, G. M., Brito, J., García, R., Alarcón, I., & Cadena-Ortiz, H. F. (2017). Primeras observaciones de la dieta del Búho Orejicorto *Asio flammeus bogotensis* (Strigiformes: Strigidae) en Pichincha, Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Ornitología*, 1, 1-7. <https://doi.org/10.18272/reo.v0i1.463>
- Pulido, V., Salinas, L., del Pino, J., & Arana, C. (2021). Revisión del conocimiento actual y conservación de la lechuza de los arenales *Athene cunicularia* (Molina, 1782) en el Perú. *Revista Peruana de Biología*, 28(1), e19242. <https://doi.org/10.15381/rpb.v28i1.19242>
- Rafael-Valdez, J. (2018). *Ecología del tecolote moteado mexicano (Strix occidentalis lucida) en el centro-norte de la sierra madre occidental, México* [Master's Thesis, Colegio de Postgraduados]. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/3128>
- Ribic, C. A., Koford, R. R., Herkert, J. R., Johnson, D. H., Niemuth, N. D., Naugle, D. E., Bakker, K. K., Sample, D. W., & Renfrew, R. B. (2009). Area sensitivity in North American grassland birds: Patterns and processes. *The Auk*, 126(2), 233-244. <https://doi.org/10.1525/auk.2009.1409>
- Rodríguez-Estrella, R. (1997). Nesting sites and feeding habits of the burrowing owl in the Biosphere Reserve of Mapimi, Mexico. *Journal of Raptor Research*, 9, 99-106.

- Ruiz-Aymá, G. R., Olalla-Kerstupp, A., Guzmán-Velasco, A., & González-Rojas, J. I. (2019). Diet and prey delivery of burrowing owls (*Athene cunicularia hypugaea*) during the breeding season in the Chihuahuan Desert, Mexico. *Journal of Raptor Research*, 53(1), 75-83. <https://doi.org/10.3356/JRR-17-90>
- Schlatter, R., Yañez, J., Nuñez, H., & Jaksic, F. (1982). Estudio estacional de la dieta del pequén, *Athene cunicularia* (Molina) (Aves, Strigidae) en la Precordillera de Santiago. *Medio Ambiente*, 6, 9-18.
- Schmutz, J. K., Wood, G., & Wood, D. (1991). Spring and summer prey of burrowing owls in Alberta. *Blue Jay*, 49(2), 93-97. <https://doi.org/10.29173/bluejay5191>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). NOM-059-SEMARNAT: Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. 30 diciembre de 2010. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091
- Sergio, F., Caro, T., Brown, D., Clucas, B., Hunter, J., Ketchum, J., & Hiraldo, F. (2008). Top Predators as conservation tools: ecological rationale, assumptions, and efficacy. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 39(1), 1-19. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/59719/1/annurev.ecolsys.39.110707.pdf>
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10(12), 1115-1123. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x>
- Stanton, R. L., Morrissey, C. A., & Clark, R. G. (2018). Analysis of trends and agricultural drivers of farmland bird declines in North America: a review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 254, 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.028>
- Stromborg, K. L. (1986). Reproduction of bobwhites fed different dietary concentrations of an organophosphate insecticide, methamidophos. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 15(2), 143-147. <https://doi.org/10.1007/BF01059963>
- Sutherland, W. J. (2000). *The conservation Handbook: Research, Management and Policy*. Blackwell Science. <https://doi.org/10.1002/9780470999356>
- Toft, C. (1980). Feeding ecology of thirteen syntopic species of anurans in a seasonal tropical environment. *Oecologia*, 45, 131-141. <https://doi.org/10.1007/BF00346717>
- Torres-Contreras, H., & Silva-Aranguiz, E. (1994). Dieta y selectividad de presas de *Speotyto cunicularia* en una localidad semi-árida del norte de Chile a lo largo de siete años (1987-1993). *Revista Chilena de Historia Natural*, 67, 329-340. https://rchn.biologiachile.cl/pdfs/1994/3/Torres-Contreras_et_al_1994.pdf
- Tuomainen, U., & Candolin, U. (2011). Behavioural responses to human-induced environmental change. *Biological Reviews*, 86(3), 640-657. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2010.00164.x>
- Velasco-Bautista L., Tarango-Arámbula L., Olmos-Oropeza G., Ugalde-Lezama S., Martínez-Guerrero J., & Martínez-Montoya J. (2022). Caracterización del hábitat de *Athene cunicularia hypugaea* (Bonaparte, 1825) en el Centro-Norte de México. *Abanico Veterinario*, 12, 1-17. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2022.27>
- Vickery, P. D., Tubaro, P. L., Cardosa-da Silva, J. M., Peterjohn, B. G., Herkert, J. R., & Cavalcanti, R. B. (1999). Conservation of grassland birds in the western hemisphere. *Studies in Avian Biology*, 19, 2-26. https://sora.unm.edu/sites/default/files/SAB_019_1999%20P2-26_Introduction%20Conservation%20of%20Grassland%20Birds%20in%20the%20Western%20Hemisphere_Vickery,%20Tubaro,%20da%20Silva,%20Peterson,%20Herkert,%20Cavalcanti.pdf
- Vieira, L. A., & Teixeira R. L. (2008). Diet of *Athene cunicularia* (Molina, 1782) from a sandy coastal plain in southeast Brazil. *Boletim do Museu de Biologia Mello Leitão*, 23, 5-14. http://boletim.sambio.org.br/pdf/23_01.pdf
- Wellicome, T. I. (2000). *Effects of food on reproduction in burrowing owl (Athene cunicularia) during three stages of the breeding season* [Thesis Ph. D. University of Alberta]. https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape2/PQDD_0010/NQ60040.pdf
- Woodin, M. C., Skoruppa, M. K., & Hickman, G. C. (2007). Winter ecology of the Western burrowing owl (*Athene cunicularia hypugaea*) in Southern Texas 1999–2004. Texas A&M University–Corpus Christi
- York, M. M., Rosenberg, D. K., & Sturm, K. K. (2002). Diet and food-niche breadth of burrowing owls (*Athene cunicularia*) in the Imperial Valley, California. *Western North American Naturalist*, 62(3), 280-287. <https://scholarsarchive.byu.edu/wnan/vol62/iss3/3>
- Zunino, S., & Jofre, C. (1999). Dieta de *Athene cunicularia* en Isla Choros, Reserva Nacional Pingüino de Humboldt, IV Región. *Boletín Chileno de Ornitología*, 6, 2-7. <https://www.aveschile.cl/wp-content/uploads/2019/03/2-7-bco-1999-szunino-dieta-pequen-ichoros.pdf>

Availability and forage selection by four species of ungulates in Sonora, Mexico

Disponibilidad y selección de forraje por cuatro especies de ungulados en Sonora, México

Krisly Saucedo-Uuh¹; Luis Antonio Tarango Arámbula^{1*};
Ricardo Serna-Lagunes²; Genaro Olmos-Oropeza¹;
Fernando Clemente-Sánchez¹; María Magdalena Crosby Galván³

¹Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí. Iturbide núm. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, C. P. 78620, México.

²Universidad Veracruzana. Calle Josefa Ortiz de Domínguez s/n, col. Centro, Peñuela, Amatlán de Los Reyes, Veracruz, C. P. 94945, México.

³Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

*Corresponding author: ltarango@colpos.mx

Abstract

In Wildlife Management and Conservation Units (UMAs), both livestock and hunting are common activities. However, the knowledge of nutritional aspects that increases the economic yield and ensures the sustainable use of resources is still limited. Therefore, the objective of this research was to generate knowledge about forage selectivity of some ungulates to conserve their populations and habitats. The relationship between forage uses and availability was determined for white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*), mule deer (*O. hemionus*), bighorn sheep (*Ovis canadensis mexicana*) and cattle (*Bos taurus*) in the UMA Rancho Noche Buena, Sonora, Mexico. During August-November 2022, plots were sampled to identify the plant species present in the diet of ungulates. The chi-squared test was used to evaluate the hypothesis that forage plants are consumed in proportion to their availability by each herbivore species. Plant selectivity was determined using Bonferroni intervals and Ivlev's selectivity index. Bonferroni intervals identified a higher percentage of rejected species, while the Ivlev index highlighted a higher percentage of selected species. Among the plants preferred by ungulates, *Olnya tesota* and *Simmondsia chinensis* were found. Understanding the foraging behavior of wild ungulates in interaction with cattle is essential for developing sustainable management strategies.

Keywords: sustainable management, Ivlev index, Bonferroni intervals, hunting management, forage patterns, arid zones.

Resumen

En las Unidades de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre (UMA) concurren la ganadería y el aprovechamiento cinegético. Sin embargo, el conocimiento sobre los aspectos alimenticios que permitan incrementar el rendimiento económico y garantizar el uso sostenible de los recursos es aún limitado. Por ello, el objetivo de esta investigación fue generar conocimiento sobre la selectividad forrajera de algunos ungulados para conservar sus poblaciones y hábitats. Se determinó la relación entre el uso y la disponibilidad del forraje para el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), venado bura (*O. hemionus*), borrego cimarrón (*Ovis canadensis mexicana*) y ganado bovino (*Bos taurus*) en la UMA Rancho Noche Buena, Sonora, México. Durante agosto y noviembre de 2022, se realizaron muestreos en parcelas para identificar las especies vegetales presentes en la dieta de los ungulados. Se empleó la prueba de ji-cuadrada para evaluar la hipótesis de que las plantas forrajeras son consumidas en proporción a su disponibilidad por cada especie de herbívoro. La selectividad de las plantas se identificó con los intervalos de Bonferroni y el índice de selectividad de Ivlev. Los intervalos de Bonferroni identificaron un mayor porcentaje de especies rechazadas, mientras que el índice de Ivlev destacó un mayor porcentaje de especies seleccionadas. Entre las plantas preferidas por las especies de ungulados, se encontraron *Olnya tesota* y *Simmondsia chinensis*. Comprender el comportamiento forrajero de ungulados silvestres en interacción con el ganado bovino es fundamental para desarrollar estrategias de manejo sostenible.

Palabras clave: aprovechamiento sostenible, índice de Ivlev, intervalos de Bonferroni, manejo cinegético, patrones forrajeros, zonas áridas.

Please cite this article as follows (APA 7): Saucedo-Uuh, K., Tarango Arámbula, L. A., Serna-Lagunes, R., Olmos-Oropeza, G., Clemente-Sánchez, F., & Crosby Galván, M. M. (2024). Availability and forage selection by four species of ungulates in Sonora, Mexico. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 23, 39–51. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2023.10.008>



Revista Chapingo
Serie Zonas Áridas

Introduction

Ungulates are mammals that move by using their toe tips and whose herbivorous diets depend on the availability of food in their habitats (Yeates & McGreevy, 2018). In Mexico, species such as white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*), mule deer (*Odocoileus hemionus*), and bighorn sheep (*Ovis canadensis mexicana*) are important for the sustainable hunting use of biodiversity. This use is carried out through Wildlife Management and Conservation Units (UMAs), which provide a productive alternative to livestock and agriculture. However, different authors point out that these means of production have deficiencies in the knowledge of the basic biology of the harvested species, which leads to both economic and conservation limitations (Avendaño-Carmona & Hernández-Ramírez, 2018; Domenge-Muñoz & Pérez-Gómez, 2019; Guajardo-Quiroga & Martínez-Muñoz, 2004).

Forage selection by herbivores depends on intrinsic and extrinsic factors. Bailey et al. (1996) describe forage selection as a decision-making process, where animals prefer to forage in areas where they obtain more nutrients and avoid places with lower quality or difficult to access forage. In the habitat, forage availability and nutritional quality are factors that influence the selective patterns of wild ungulates (Ramírez-Lozano, 2004). To develop and implement sustainable management and conservation strategies for ungulates, it is essential to figure out their foraging ecology, including the analysis of the nutrients of the consumed forage, preferences for certain plant species and variations in their availability (Granados et al., 2014; Mellado, 2016).

In Mexico, more than half of the territory corresponds to arid and semi-arid zones, characterized by variable precipitation events in terms of quantity, space and time distribution. These conditions significantly affect plant phenology, forage conditions and their availability (Briones et al., 2018; Cain et al., 2017; Tarango-Arámbula, 2005). Therefore, studies may need to analyze the relationship between the use and availability of forage for the conservation of wildlife *in situ*, the preservation of native vegetation and the production of economic goods based on the biodiversity of these ecosystems (Granados et al., 2014; Mellado, 2016).

In view of the above, the objective of this study was to generate knowledge on the forage selectivity of some ungulates to preserve their populations and habitats. To this end, the relationship between the use and availability of forage plants for white-tailed deer, mule deer, bighorn sheep and cattle was analyzed at the UMA Rancho Noche Buena, located in Sonora, Mexico.

Introducción

Los ungulados son mamíferos que se desplazan apoyándose en la punta de sus dedos y cuya dieta herbívora depende de la disponibilidad de alimento en sus hábitats (Yeates & McGreevy, 2018). En México, especies como el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el venado bura (*Odocoileus hemionus*) y el borrego cimarrón (*Ovis canadensis mexicana*) tienen importancia en el aprovechamiento cinegético sostenible de la biodiversidad. Este aprovechamiento se realiza a través de las Unidades de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre (UMA), las cuales ofrecen una alternativa productiva frente a la ganadería y la agricultura. Sin embargo, diversos autores señalan que estos medios de producción presentan deficiencias en el conocimiento de la biología básica de las especies aprovechadas, lo que genera limitaciones tanto económicas como de conservación (Avendaño-Carmona & Hernández-Ramírez, 2018; Domenge-Muñoz & Pérez-Gómez, 2019; Guajardo-Quiroga & Martínez-Muñoz, 2004).

La selección de forraje por los herbívoros depende de factores intrínsecos y extrínsecos. Bailey et al. (1996) describen la selección forrajera como un proceso de toma de decisiones, en donde los animales prefieren forrajear en áreas donde obtienen más nutrientes y evitan sitios con forraje de menor calidad o de difícil acceso. En el hábitat, la disponibilidad de forraje y la calidad nutrimental son factores que influyen sobre los patrones selectivos de los ungulados silvestres (Ramírez-Lozano, 2004). Para desarrollar e implementar estrategias sostenibles de manejo y conservación de ungulados, es fundamental comprender su ecología de forrajeo, incluyendo el análisis de los nutrientes del forraje consumido, las preferencias por ciertas especies vegetales y las variaciones en su disponibilidad (Granados et al., 2014; Mellado, 2016).

En México, más de la mitad del territorio corresponde a zonas áridas y semiáridas, las cuales se caracterizan por presentar eventos de precipitación variables en cantidad, distribución espacial y temporal. Estas condiciones impactan significativamente sobre la fenología de las plantas, las condiciones del forraje y su disponibilidad (Briones et al., 2018; Caín et al., 2017; Tarango-Arámbula, 2005). Por lo tanto, se requieren estudios que analicen la relación entre el uso y la disponibilidad del forraje para la conservación *in situ* de la fauna silvestre, la preservación de la vegetación nativa y la producción de bienes económicos basados en la biodiversidad de estos ecosistemas (Granados et al., 2014; Mellado, 2016).

Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo fue generar conocimiento sobre la selectividad forrajera de algunos ungulados para conservar sus poblaciones y hábitats. Para ello, se analizó la relación entre el uso y

Materials and Methods

Study area

This study was carried out at the Rancho Noche Buena UMA, located in Hermosillo, Sonora, Mexico ($29^{\circ} 07' 58.67''$ N and $112^{\circ} 02' 11.48''$ W) (Figure 1), from August to November 2022. The UMA has a predominantly flat topography, with two mountainous zones: Sierra Pico Johnson and Sierra Noche Buena (López-Saavedra et al., 1999). These mountain zones, due to their size and topography, are key to the development and survival of continental populations of bighorn sheep; additionally, they serve as an important ecological corridor for this game species (Segundo-Galán et al., 2024). Its climate is classified as BWh(x') -very arid and semi-warm-, with an annual average temperature between 18 and 22°C . The dry season extends from March to June, whereas the rainy season occurs primarily in July, August, September and November (García, 1998). The predominant vegetation types are arbosuffrutescent desert scrub, sarco-caulescent scrub, and crasicaule scrub (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información, 2019).

la disponibilidad de plantas forrajeras para venado cola blanca, venado bura, borrego cimarrón y ganado bovino en la UMA Rancho Noche Buena, ubicada en Sonora, México.

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en la UMA Rancho Noche Buena, ubicada en Hermosillo, Sonora, México ($29^{\circ} 07' 58.67''$ N y $112^{\circ} 02' 11.48''$ O) (Figura 1), de agosto a noviembre de 2022. La UMA posee una topografía predominantemente plana, con presencia de dos zonas montañosas: Sierra Pico Johnson y Sierra Noche Buena (López-Saavedra et al., 1999). Estas sierras son clave para el desarrollo y la supervivencia de las poblaciones continentales de borrego cimarrón debido a su extensión y topografía; además, son importantes como corredor ecológico de esta especie cinegética (Segundo-Galán et al., 2024). Su clima es BWh(x') muy árido y semicálido, con temperatura media anual entre 18 y 22°C . La temporada seca se extiende de marzo a junio, mientras que la temporada de lluvias se concentra entre julio, agosto, septiembre y noviembre (García,

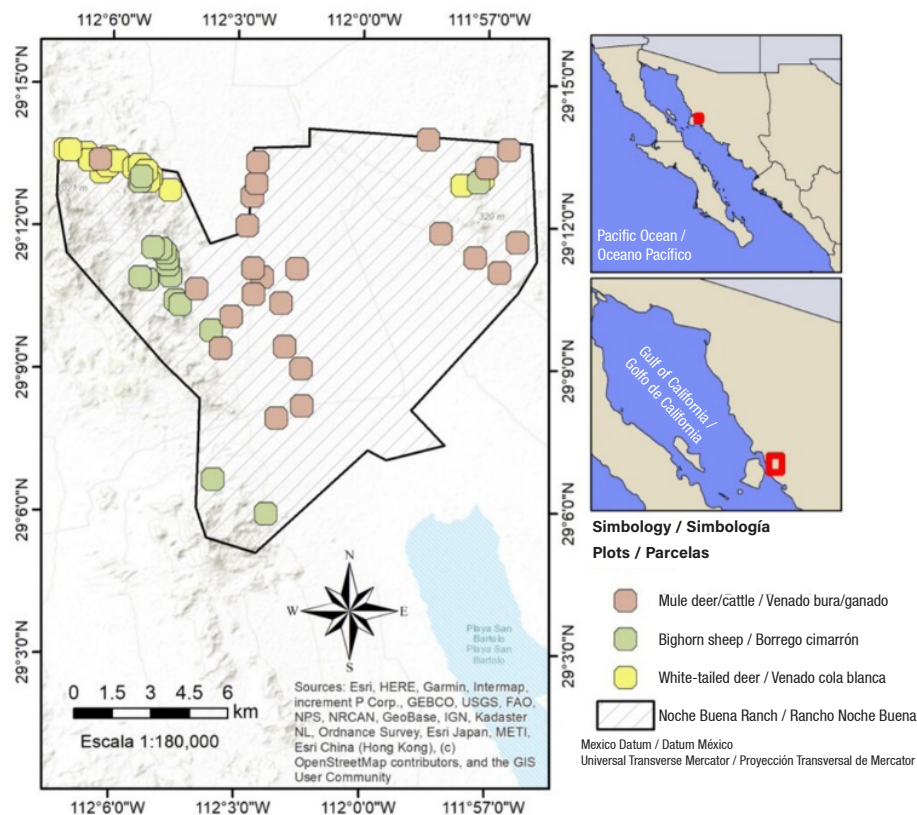


Figure 1. Location of the Rancho Noche Buena Wildlife Management and Conservation Unit, municipality of Hermosillo, Sonora, Mexico.

Figura 1. Ubicación de la Unidad de Manejo para la Conservación de Vida Silvestre Rancho Noche Buena, municipio de Hermosillo, Sonora, México.

Forage use and availability

The diet composition of ungulates in the study area was obtained from the results of Peralta-Pardo (2020), using the micro-histological technique described by González-Enbarradero and Améndola (2010). Forage availability was assessed through the analysis of plots located in the distribution areas of the ungulate species within the UMA. The minimum number of sampling units in each zone was determined through prior sampling. The plots in areas occupied by mule deer and cattle (flat areas) measured 25 × 25 m, while those in the distribution areas of white-tailed deer and bighorn sheep (mountain areas) measured 20 × 20 m (Matteucci & Colma, 1982). In total, 56 plots were sampled ($n = 24$, mule deer/cattle; $n = 16$, white-tailed deer; $n = 16$, bighorn sheep) (Figure 1). Plots were delineated using a rope provided with four equidistant stakes marking the vertices. Within each plot, the botanical species included in the diet of the herbivore species studied were recorded and counted. For each plot, the coordinates in the Universal Transverse Mercator (UTM) system and the altitude (m a. s. l.) were recorded with a portable global positioning satellite system (GPS; model 20x, Garmin eTrex®).

Statistical analysis

Diet composition and vegetation sampling data (plant frequency) were analyzed using chi-squared tests, Bonferroni intervals (Byers et al., 1984) and Ivlev's selectivity index (Stuth, 1991) with the Excel® program (ver. 2016). For these analyses, it was assumed that the plant species registered in the plots matched those available during the sampling period used to determine the botanical composition of the diet by Peralta-Pardo (2020).

The Chi-squared test ($\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$) was used to evaluate the hypothesis that forage plants were consumed by the herbivore species in proportion to their availability. When this hypothesis was rejected (χ^2 calculated > χ^2 from tables; $\alpha = 0.05$), plant selection by ungulates was identified with Bonferroni intervals as described by Byers et al. (1984). For example, the χ^2 test was performed for the case of bighorn sheep as shown in Table 1.

With Bonferroni intervals, forage was classified into three categories: 1) selected, when the relative proportion of availability (P_{io}) was less than the lower limit, 2) proportional use according to its availability, when P_{io} was within the confidence interval, and 3) rejected, when P_{io} was higher than the upper limit. Plant species that did not have an expected use ($e_i \geq 5$) were excluded from the analysis (Byers et al., 1984).

1998). Los tipos de vegetación predominantes son el matorral arbosufruticente, matorral sarcocaulicente y matorral crasicaulic (Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística [INEGI], 2019).

Uso y disponibilidad del forraje

La composición de la dieta de los ungulados en el área de estudio se obtuvo de los resultados de Peralta-Pardo (2020), a través de la técnica microhistológica descrita por González-Enbarradero y Améndola (2010). La disponibilidad de forraje se evaluó mediante el análisis de parcelas ubicadas en las zonas de distribución de las especies de ungulados dentro de la UMA. El número mínimo de unidades de muestreo en cada zona se determinó en un muestreo previo. Las parcelas en las áreas ocupadas por el venado bura y el ganado bovino (áreas planas) fueron de 25 × 25 m, mientras que en las zonas de distribución del venado cola blanca y el borrego cimarrón (áreas de montaña) fueron de 20 × 20 m (Matteucci & Colma, 1982). En total se muestrearon 56 parcelas ($n = 24$, venado bura/ganado bovino; $n = 16$, venado cola blanca; $n = 16$, borrego cimarrón) (Figura 1). Las parcelas se delimitaron con una cuerda provista de cuatro estacas equidistantes correspondientes a los vértices. Dentro de cada parcela, se registraron y contabilizaron las especies botánicas presentes, correspondientes a la dieta de las especies de herbívoros estudiadas. Para cada parcela, se registraron las coordenadas en el sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) y la altitud (m s. n. m.) con un sistema portátil de posicionamiento global satelital (GPS; modelo 20x, Garmin eTrex®).

Análisis estadístico

Los datos de la composición de la dieta y los muestreos de vegetación (frecuencia de plantas) se analizaron mediante pruebas de ji-cuadrada, intervalos de Bonferroni (Byers et al., 1984) e índice de selectividad de Ivlev (Stuth, 1991) con el programa Excel® (ver. 2016). Para estos análisis, se asumió que las especies vegetales registradas en las parcelas correspondían a las mismas disponibles durante el periodo de muestreo utilizado para determinar la composición botánica de la dieta por Peralta-Pardo (2020).

La prueba de ji-cuadrada ($\chi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$) se utilizó para evaluar la hipótesis de que las plantas forrajeras fueron consumidas por las especies de herbívoros en proporción a su disponibilidad. Cuando esta hipótesis fue rechazada (χ^2 calculada > χ^2 de tablas; $\alpha = 0.05$), la selección de plantas por los ungulados se identificó con los intervalos de Bonferroni de acuerdo con lo descrito por Byers et al. (1984). Por ejemplo, la prueba de χ^2 se realizó para el caso de borrego cimarrón como se aprecia en el Cuadro 1.

Table 1. Example of X^2 calculation to test the hypothesis that forage plants were consumed by bighorn sheep (*Ovis canadensis mexicana*) in proportion to their availability.

Cuadro 1. Ejemplo del cálculo de X^2 para probar la hipótesis de que las plantas forrajeras fueron consumidas por el borrego cimarrón (*Ovis canadensis mexicana*) en proporción con su disponibilidad.

Forage species / Especie forrajera	Field frequency / Frecuencia en campo	Observed usage (O_i) / Uso observado (O_i)	Relative proportion in the field / Proporción relativa en campo	Expected usage / Uso esperado (E_i)	$(O_i - E_i)^2/E_i$
<i>Acacia willardiana</i>	56	311	0.021	21.98	3801.1
<i>Allionia incarnata</i>	19	21	0.007	7.46	24.6
<i>Bursera microphylla</i>	104	41	0.038	40.81	0.00085
<i>Cardiospermum corindum</i>	107	28	0.039	41.99	4.7
<i>Carnegiea giganteae</i>	19	32	0.007	7.46	80.8
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
<i>Trixis californica</i>	67	1	0.025	26.29	24.3
Total	2724	1069			$X^2 = 4359.9$

O_i = frequency of forage species in the botanical composition of the diet, E_i = relative proportion in the field multiplied by the total number of observations of O_i . The X^2 of tables ($\alpha = 0.05$) was equal to 32.67.

O_i = frecuencia de las especies forrajeras en la composición botánica de la dieta; E_i = multiplicación de la proporción relativa en campo por el total de observaciones de O_i . La X^2 de tablas ($\alpha = 0.05$) fue igual a 32.67.

Furthermore, the Ivlev index (E_i) was calculated to identify forage selection using the following equation:

$$E_i = \frac{(r_i - p_i)}{(r_i + p_i)}$$

where r_i is the proportion of use/consumption of botanical species i in the botanical composition of the diet and p_i is the proportion of the botanical species i available in the vegetation. E_i values were classified according to Stuth (1991): >0.35 (selected botanical species), -0.35 a 0.35 (proportional to its availability) and <-1.0 (rejected botanical species). Species with a proportion of less than 2% in the diet were excluded from the analysis.

Results and discussion

The number of plants consumed by white-tailed deer, mule deer, bighorn sheep and cattle were 39, 44, 48 and 41, respectively (Peralta-Pardo, 2020). However, for the selectivity analysis, only 20, 18, 21 and 19 species were considered, along with 12, 10, 13 and 7 plant species consumed by the four ungulate species based on the Bonferroni and Ivlev exclusion criteria, respectively. The four ungulated species consumed mostly *Simmondsia chinensis*, although *Jatropha cinerea* had the highest frequency in the plots. Considering both forage selection parameters, the use and selection of the tree species *Olneya tesota*, *Mariosousa heterophylla*, *Bursera microphylla* and *Bursera laxiflora*, by at least two of the ungulate species studied were identified (Table 2).

Con los intervalos de Bonferroni, el forraje se clasificó en tres categorías: 1) seleccionado, cuando la proporción relativa de disponibilidad (P_{io}) fue menor al límite inferior, 2) uso proporcional de acuerdo con su disponibilidad, cuando P_{io} estuvo dentro del intervalo de confianza, y 3) rechazado, cuando P_{io} fue mayor al límite superior. Las especies vegetales que no presentaron un uso esperado ($e_i \geq 5$) fueron excluidas del análisis (Byers et al., 1984).

Adicionalmente, se calculó el índice de Ivlev (E_i) para identificar la selección forrajera mediante la siguiente ecuación:

$$E_i = \frac{(r_i - p_i)}{(r_i + p_i)}$$

donde r_i es la proporción de uso/consumo de la especie botánica i en la composición botánica de la dieta y p_i es la proporción de la especie botánica i disponible en la vegetación. Los valores de E_i se clasificaron de acuerdo con Stuth (1991): >0.35 (especie botánica seleccionada), -0.35 a 0.35 (proporcional de acuerdo con su disponibilidad) y <-1.0 (especie botánica rechazada). Del análisis se excluyeron las especies que tuvieron una proporción menor a 2 % en la dieta.

Resultados y discusión

El número de plantas consumidas por el venado cola blanca, venado bura, borrego cimarrón y ganado bovino fue de 39, 44, 48 y 41, respectivamente (Peralta-Pardo,

Table 2. Type of use of tree and herbaceous species consumed by white-tailed deer (WTD; *Odocoileus virginianus*), mule deer (MD; *Odocoileus hemionus*), bighorn sheep (BS; *Ovis canadensis mexicana*) and cattle (C; *Bos taurus*).

Cuadro 2. Tipo de uso de las especies arbóreas y herbáceas consumidas por el venado cola blanca (VCB; *Odocoileus virginianus*), el venado bura (VB; *Odocoileus hemionus*), el borrego cimarrón (BC; *Ovis canadensis mexicana*) y el ganado bovino (GB; *Bos taurus*).

Especie forrajera / Forage species	WTD / VCB		MD / VB		BS / BC		C / GB	
	IB	IV	IB	IV	IB	IV	IB	IV
Árboles / Trees								
<i>Olneya tesota</i>	P	S	S	S	S	S	S	S
<i>Cercidium microphyllum</i>	S	S	R	P	P	P	P	P
<i>Mariosousa heterophylla</i>	S	S	-	-	S	S	-	-
<i>Bursera microphylla</i>	R	R	S	S	P	P	P	-
<i>Bursera laxiflora</i>	-	-	-	S	-	S	-	-
<i>Mimosa laxiflora</i>	-	-	-	-	R	-	-	-
Hierbas / Herbs								
<i>Cardiospermum corindum</i>	R	R	S	S	P	P	-	-
<i>Passiflora quercetorum</i>	-	S	-	-	-	-	-	-
<i>Senna covesii</i>	-	-	P	-	P	P	-	-
<i>Allionia incarnata</i>	-	-	-	-	P	-	-	-
<i>Boerhavia coulteri</i>	P	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ditaxis lanceolata</i>	R	R	R	-	-	-	R	-
<i>Euphorbia eriantha</i>	-	-	-	-	P	-	-	-
<i>Trixis californica</i>	-	-	P	-	R	-	R	-
<i>Encelia farinosa</i>	-	-	-	-	-	-	R	-
<i>Euphorbia hyssopifolia</i>	R	-	-	-	-	-	-	-
<i>Tidestromia lanuginosa</i>	-	-	-	-	R	-	-	-

IB = type of use according to Bonferroni intervals; IV = type of use according to Ivlev index; S = selected; P = usage according to their availability; R = rejected.

IB = tipo de uso de acuerdo con los intervalos de Bonferroni; IV = tipo de uso de acuerdo con el índice de Ivlev; S = seleccionado; P = usado de acuerdo con su disponibilidad; R = rechazado.

Among the selected shrub species, *S. chinensis* stands out, being preferred by all four ungulate species, and the succulent *Carnegiea gigantea*, selected by three herbivore species (Table 3). This marked forage selection for certain plant species endangers the coexistence of herbivore populations by increasing competition and threatening the long-term survival and maintenance of the selected plants. Bailey et al. (1996) suggest that forage selection may be due to animals preferring to forage in areas where they can get more nutrients and avoiding areas with lower quality or difficult to forage access.

In this regard, it is important to conduct a long-term nutritional assessment of the plants consumed by ungulates in the study area. In addition, the use of mineral and protein supplements (Bautista-de Luna et al., 2022) should be considered to help mitigate forage competition. Actions should also be implemented to promote the natural coexistence of herbivores and ensure the sufficient and adequate presence of key plant species. In this context, Saucedo-Uuh et al. (2022) propose establishing forage restriction areas

2020). Sin embargo, para el análisis de selectividad, únicamente se consideraron 20, 18, 21 y 19, así como 12, 10, 13 y 7 especies de plantas consumidas por las cuatro especies de ungulados con base en los criterios de exclusión de Bonferroni e Ivlev, respectivamente. La especie vegetal más consumida por los cuatro ungulados fue *Simmondsia chinensis*, mientras que *Jatropha cinerea* fue la de mayor frecuencia en las parcelas. Al considerar los dos parámetros de selección forrajera, se identificó el uso y la selección de las especies arbóreas *Olneya tesota*, *Mariosousa heterophylla*, *Bursera microphylla* y *Bursera laxiflora* por al menos dos de las especies de ungulados estudiadas (Cuadro 2).

Entre las especies arbustivas seleccionadas destaca *S. chinensis*, preferida por las cuatro especies de ungulados, y la suculenta *Carnegiea gigantea*, seleccionada por tres especies de herbívoros (Cuadro 3). Esta selección forrajera marcada por algunas especies vegetales pone en riesgo la coexistencia de las poblaciones de herbívoros, al aumentar la competencia y amenazar la supervivencia y mantenimiento a largo plazo de las plantas seleccionadas. Bailey et al. (1996) señalan que la selección forrajera se

Table 3. Type of use of shrub and succulent species consumed by white-tailed deer (WTD; *Odocoileus virginianus*), mule deer (MD; *Odocoileus hemionus*), bighorn sheep (BS; *Ovis canadensis mexicana*) and cattle (C; *Bos taurus*).

Cuadro 3. Tipo de uso de las especies arbustivas y suculentas consumidas por el venado cola blanca (VCB; *Odocoileus virginianus*), el venado bura (VB; *Odocoileus hemionus*), el borrego cimarrón (BC; *Ovis canadensis mexicana*) y el ganado bovino (GB; *Bos taurus*).

Especie forrajera / Forage species	WTD / VCB		MD / VB		BS / BC		C / GB	
	IB	IV	IB	IV	IB	IV	IB	IV
Shrubs / Arbustos								
<i>Simmondsia chinensis</i>	S	S	S	S	-	S	S	S
<i>Hibiscus denudatus</i>	R	R	R	-	P	P	S	P
<i>Fouquieria splendens</i>	R		-		S	P	-	-
<i>Abutilon incanum</i>	-	-	-	-	-	-	S	-
<i>Solanum hindsianum</i>	R	P	-	-	-	-	-	-
<i>Krameria erecta</i>	-	-	P	P	-	-	-	-
<i>Lippia palmeri</i>	-	-	R	-	-	-	-	-
<i>Jatropha cinerea</i>	R	R	R	-	R	R	R	-
<i>Jatropha cuneata</i>	R	-	R	-	-	-	R	-
<i>Ambrosia dumosa</i>	-	-	R	-	-	-	R	-
<i>Cordia parviflora</i>	-	-	R	-	-	-	R	-
<i>Croton sonorae</i>	-	-	-	-	R	-	R	-
<i>Melochia tomentosa</i>	R	-	-	-	R	-	P	-
<i>Lycium berlandieri</i>	-	-	-	-	P	-	-	-
<i>Colubrina viridis</i>	R	-	R	-	R	-	R	-
<i>Larrea tridentata</i>	-	-	R	-	-	-	R	-
Succulent / Suculentas								
<i>Carnegiea gigantea</i>	R	-	S	S	S	S	S	S
<i>Stenocereus thurberi</i>	S	-	-	S	-	-	-	S
<i>Pachycereus pringlei</i>	R	-	-	-	S	P	-	-
<i>Cylindropuntia fulgida</i>	P	P	P	P	-	-	S	S

IB = type of use according to Bonferroni intervals; IV = type of use according to Ivlev index; S = selected; P = usage according to availability; R = rejected.

IB = tipo de uso de acuerdo con los intervalos de Bonferroni; IV = tipo de uso de acuerdo con el índice de Ivlev; S = seleccionado; P = usado de acuerdo con su disponibilidad; R = rechazado.

(exclosures) in overgrazed zones, monitoring ungulate diet composition, respecting animal carrying capacity and strategically managing competing species.

The Bonferroni interval exclusion rule allowed for the analysis of 35 plant species consumed by the four ungulate species. The ungulates selected between 20 and 31 % of the species, used between 15 and 38 % according to their availability, and rejected 38 to 65 % of the species. On the other hand, 19 species were analyzed with the Ivlev index. Among these, ungulates selected between 33.4 and 71.4 %, used between 25 and 53.8 % according to their availability, and rejected between 7.7 and 41.6 % of forage species.

Ungulate species inhabiting desert and semi-desert areas, such as mule deer and bighorn sheep, are considered opportunistic due to the high variability in their diet composition and plant species selection,

puede deber a que los animales prefieren forrajear en áreas donde obtienen más nutrientes, y evitan sitios con forraje de menor calidad o de difícil acceso.

En ese sentido, resulta importante realizar un diagnóstico nutricional a largo plazo de las plantas consumidas por los ungulados en la zona de estudio. Además, se debe contemplar el uso de suplementos minerales y proteicos (Bautista-de Luna et al., 2022) para contribuir a mitigar la competencia forrajera. También se deben implementar acciones que promuevan la coexistencia natural de los herbívoros y aseguren la presencia adecuada y suficiente de las especies vegetales clave. Al respecto, Saucedo-Uuh et al. (2022) proponen establecer áreas de restricción forrajera (exclusiones) en zonas de sobrepastoreo, monitorear la composición de la dieta de los ungulados, respetar la capacidad de carga animal y manejar estratégicamente las especies en competencia.

adapting to plant availability and nutrient content (Alcala-Galvan & Krausman, 2012; Guerrero-Cárdenas et al., 2018; Krausman et al., 1997; Olivas-Sánchez et al., 2015; Tarango et al., 2002; Wagner & Peek, 2006). Although the white-tailed deer is considered a selective herbivore, the composition of its diet and its preference for plant species varies depending on the environment in which it lives (Ramírez-Lozano, 2004).

Granados et al. (2014) mention that white-tailed deer in Campeche, Mexico, base their diet on shrub species and increase the consumption of herbaceous plants during the rainy season. Aguilera-Reyes et al. (2013) also observed higher herbaceous consumption during this season. However, Vásquez et al. (2016) found no differences in plant consumption between seasons, but they reported that the diet was concentrated on 15.6% of the available species, indicating a preference for certain plants. The limited precipitation characteristic of arid and semi-arid zones reduces the production and availability of herbaceous plants (Arnold & Drawe, 1979; Dye et al., 2016); therefore, they become a key resource during the rainy season (Alcala-Galvan & Krausman, 2012; Marshal et al., 2012). Plant selection by ungulates is influenced by several factors beyond availability. Contreras-Moreno et al. (2015) noted that cattle presence affected the foraging patterns of white-tailed deer; when cattle were removed from pastures, deer began utilizing them.

In the present study, white-tailed deer rejected most herbaceous species (Table 2), contrary to previous research results (Holechek, 1984; Ramírez-Lozano, 2004). In contrast, mule deer and bighorn sheep mainly rejected shrub species and preferred tree species (Tables 2 and 3). Meanwhile, cattle primarily selected succulents and shrubs (Table 3), in contrast to what has been observed in other studies where grasses and herbaceous species predominate in their diet (Holechek, 1984; Lyons & Stuth, 2007; Sprinkle et al., 2015). These outcomes are related to the precipitation recorded during July-September 2022, which directly affects forage availability and varies from year to year depending on the amount and distribution of rain.

Woody species (trees and shrubs) exhibit consistent foliage production throughout the year, maintaining stable nutrient content across seasons (Bautista-de Luna et al., 2022; Holechek, 1984; Memmott et al., 2011). In contrast, deciduous and herbaceous species increase their nutrient concentration in the wet season but decrease it during the dry season (Holechek, 1984; Ramírez-Lozano, 2004). These nutrient variations are associated with the selective patterns of ungulates in UMA Rancho Noche Buena. Phosphorus (P) and crude protein (CP) are essential nutrients for the growth, development, maintenance, reproduction and health of herbivores (Cienfuegos-Rivas et al., 2015; National

La regla de exclusión de los intervalos de Bonferroni permitió analizar 35 especies vegetales consumidas por las cuatro especies de ungulados. Los ungulados seleccionaron entre 20 y 31 % de las especies, utilizaron entre el 15 y 38 % de acuerdo con su disponibilidad, y rechazaron del 38 al 65 % de las especies. Por otro lado, con el índice de Ivlev se analizaron 19 especies, de las cuales los ungulados seleccionaron entre 33.4 y 71.4 %, utilizaron entre 25 y 53.8 % de acuerdo con su disponibilidad, y rechazaron entre 7.7 y 41.6 % de especies forrajeras.

Las especies de ungulados que habitan zonas desérticas y semidesérticas, como el venado bura y el borrego cimarrón, se consideran oportunistas debido a la alta variabilidad en la composición de su dieta y en la selección de especies vegetales, al adaptarse a la disponibilidad vegetal y su contenido nutrimental (Alcala-Galvan & Krausman, 2012; Guerrero-Cárdenas et al., 2018; Krausman et al., 1997; Olivas-Sánchez et al., 2015; Tarango et al., 2002; Wagner & Peek, 2006). Aunque al venado cola blanca se le considera un herbívoro selectivo, la composición de su dieta y su preferencia hacia especies vegetales varían dependiendo del entorno en el que este se desarrolla (Ramírez-Lozano, 2004).

Granados et al. (2014) mencionan que el venado cola blanca en Campeche, México, basa su dieta en especies arbustivas, e incrementa el consumo de herbáceas durante la temporada de lluvias. Aguilera-Reyes et al. (2013) también observaron un mayor consumo de herbáceas durante dicha época, aunque Vásquez et al. (2016) no encontraron diferencias en el consumo de plantas entre temporadas, pero si reportaron que la dieta se centró en el 15.6 % de las especies disponibles, lo cual indica una selección por ciertas plantas. La limitada precipitación característica de las zonas áridas y semiáridas reduce la producción y disponibilidad de herbáceas (Arnold & Drawe, 1979; Dye et al., 2016); por ello, estas se convierten en un recurso clave durante la temporada húmeda (Alcala-Galvan & Krausman, 2012; Marshal et al., 2012). La selección de plantas por ungulados está relacionada con diversos factores, además de su disponibilidad. Contreras-Moreno et al. (2015) señalan que la presencia de ganado afectó los patrones de forrajeo del venado cola blanca, cuando el ganado se retiró de los potreros, el venado hizo uso de ellos.

En el presente estudio, el venado cola blanca rechazó la mayoría de las especies de herbáceas (Cuadro 2), contrario a lo reportado en investigaciones previas (Holechek, 1984; Ramírez-Lozano, 2004). En cambio, el venado bura y el borrego cimarrón rechazaron principalmente las especies arbustivas y prefiriendo especies arbóreas (Cuadros 2 y 3). Por su parte, el ganado bovino seleccionó principalmente succulentas y arbustivas (Cuadro 3), a diferencia de lo observado en otros estudios donde predominan las gramíneas y

Research Council [NRC], 2007; Smolko et al., 2022; Vandeloecht et al., 2022). Bautista-de Luna et al. (2022) found that selected woody and herbaceous species contained intermediate P and CP concentrations, while some rejected species exhibit high levels. This discrepancy may be explained by interannual nutritional variation or the presence of secondary metabolites (Bester et al., 2023; Xin et al., 2012).

As for the selected succulents, they show low P and CP contents but serve as an important water source, making them essential during droughts (Cain et al., 2006; Nefzaoui et al., 2014; Tarango et al., 2002). Seasonal precipitation and temperature are related to food selection as they influence the nutritional properties of plants or provide complementary water sources (Cain et al., 2017; Gedir et al., 2016; Glass et al., 2022; Selebatso et al., 2018; Sprinkle et al., 2015). It is important to note that CP and P concentrations are not the only plant nutritional attributes that explain the observed selection patterns.

Most of the herbivore species at Rancho Noche Buena did not consume forage species according to their availability. Therefore, the selection or rejection of certain forage species can be explained by other factors or their interaction, along with the combined effect of required nutrients (Ceacero et al., 2015; Estevez et al., 2010) or the interaction between nutrients and secondary metabolites (Villalba et al., 2002). Animals may even self-select secondary metabolites due to their multiple properties (Amit et al., 2013; Beaulieu et al., 2014; Copani et al., 2013; Juhnke et al., 2012; Singer et al., 2009; Villalba et al., 2010).

The fiber content of plants is another crucial aspect, as it prevents metabolic disorders, enhances digestibility and maintains optimal rumen content (Van Soest et al., 1991). In addition, external factors, such as the presence of predators also influence foraging behavior, forcing herbivores to restrict their feeding to safer areas and diversify their diet (Catano et al., 2014; Hernández & Laundré, 2005; McArthur et al., 2012; Nersesian et al., 2011).

Conclusions

Not all forage species at Rancho Noche Buena were consumed by white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*), mule deer (*O. hemionus*), bighorn sheep (*Ovis canadensis mexicana*) and cattle (*Bos taurus*); in fact, these species predominantly selected only two: *Olneya tesota* and *Simmondsia chinensis*. These outcomes were consistent with Bonferroni intervals and Ivlev's index, which revealed a significant selection of arboreal and succulent species, while the consumption of herbaceous differed according to ungulate species.

herbáceas en su dieta (Holechek, 1984; Lyons & Stuth, 2007; Sprinkle et al., 2015). Estos resultados están relacionados con la precipitación registrada durante julio-septiembre de 2022, la cual influye directamente en la disponibilidad de forraje y varía de un año a otro según la cantidad y distribución de la lluvia.

Las especies leñosas (árboles y arbustos) presentan una producción constante de follaje durante el año, lo cual mantiene estable su contenido nutrimental entre estaciones (Bautista-de Luna et al., 2022; Holechek, 1984; Memmott et al., 2011). En contraste, las especies de hoja caduca y herbáceas incrementan su concentración de nutrientes en la temporada húmeda, pero disminuyen en la temporada seca (Holechek, 1984; Ramírez-Lozano, 2004). Estas variaciones nutricionales se relacionan con los patrones selectivos de los ungulados en la UMA Rancho Noche Buena. El fósforo (P) y la proteína cruda (PC) son nutrientes importantes para el crecimiento, desarrollo, mantenimiento, reproducción y salud de los herbívoros (Cienfuegos-Rivas et al., 2015; National Research Council [NRC], 2007; Smolko et al., 2022; Vandeloecht et al., 2022). Bautista-de Luna et al. (2022) determinaron que las especies leñosas y herbáceas seleccionadas poseían concentraciones medias de P y PC, mientras que algunas especies rechazadas presentaban niveles altos, lo cual se podría explicar por variaciones nutricionales interanuales o por la presencia de metabolitos secundarios (Bester et al., 2023; Xin et al., 2012).

En cuanto a las suculentas seleccionadas, estas mostraron bajos niveles de P y PC, pero son una fuente importante de agua, lo cual las hace esenciales durante periodos de sequía (Cain et al., 2006; Nefzaoui et al., 2014; Tarango et al., 2002). La precipitación y temperatura estacionales están relacionadas con la selección del alimento al influir en las propiedades nutricionales de las plantas o proporcionar fuentes complementarias de agua (Cain et al., 2017; Gedir et al., 2016; Glass et al., 2022; Selebatso et al., 2018; Sprinkle et al., 2015). Es importante destacar que las concentraciones de PC y P no son las únicas cualidades nutricionales presentes en las plantas que explican los patrones de selección observados.

La mayoría de las especies de herbívoros del Rancho Noche Buena no consumieron las especies forrajeras de acuerdo con su disponibilidad. Por lo tanto, la selección o rechazo de ciertas especies forrajeras se puede explicar por otros factores o su interacción, más el efecto combinado de los nutrientes requeridos (Ceacero et al., 2015; Estevez et al., 2010) o de la interacción entre nutrientes y metabolitos secundarios (Villalba et al., 2002). Los animales podrían, incluso, autoseleccionar metabolitos secundarios dadas sus múltiples propiedades (Amit et al., 2013; Beaulieu et

According to the Bonferroni intervals, ungulates selected between 20 and 31.6 % of the available plants, while with the Ivlev index, selection ranged between 33.3 and 71.43 %. In contrast, rejection values were higher, ranging from 38.1 to 65.0 % according to Bonferroni and from 7.7 to 41.7 % based on Ivlev's index.

Ungulates consumed a reduced percentage of forage species in proportion to their availability, demonstrating selective feeding behavior. Among the four ungulate species, cattle were the most selective, with a higher number of species classified as rejected and selected.

The information obtained identifies the most relevant plant species for ungulates in the UMA Rancho Noche Buena. The selection of *Simmondsia chinensis* and *Olneya tesota* by all four ungulate species have important implications for habitat management and conservation. Overuse of these plants could lead to ecosystem degradation and increased competition among ungulates. Therefore, it is recommended to implement management strategies, such as forage exclusion areas or nutritional supplementation to reduce pressure on these key species and ensure ecosystem sustainability.

End of English version

References / Referencias

- Aguilera-Reyes, U., Sánchez-Cordero, V., Ramírez-Pulido, J., Monroy-Vilchis, O., García López, G. I., & Janczur, M. (2013). Hábitos alimentarios del venado cola blanca *Odocoileus virginianus* (Artiodactyla: Cervidae) en el Parque Natural Sierra Nanchititla, Estado de México. *Revista de Biología Tropical*, 61(1), 243-253. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442013000100019
- Alcala-Galvan, C. H., & Krausman, P. R. (2012). Diets of desert mule deer in altered habitats in the lower Sonoran Desert. *California Fish and Game*, 98(2), 81-103. https://www.originalwisdom.com/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2019/03/Alcala-Galvan-and-Krausman_2012_diets-of-mule-deer.pdf
- Amit, M., Cohen, I., Marcovics, A., Muklada, H., Glasser, T. A., Ungar, E. D., & Landau, S. Y. (2013). Self-medication with tannin-rich browse in goats infected with gastro-intestinal nematodes. *Veterinary Parasitology*, 198(3-4), 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2013.09.019>
- Arnold, L. A., & Drawe, D. L. (1979). Seasonal food habits of white-tailed deer in the south Texas plains. *Journal of Range Management Archives*, 32(3), 175-178. <https://doi.org/10.2307/3897116>
- Avendaño-Carmona, E., & Hernández-Ramírez, A. (2018). Cacería deportiva: ¿Cultura, desarrollo o conservación?. *Cuadernos de Biodiversidad*, 54, 1-8. <https://doi.org/10.14198/cdbio.2018.54.01>
- al., 2014; Copani et al., 2013; Juhnke et al., 2012; Singer et al., 2009; Villalba et al., 2010).
- El contenido de fibra en las plantas es otro aspecto crucial, ya que evita trastornos metabólicos, favorece la digestibilidad y mantiene en buen estado el contenido ruminal (Van Soest et al., 1991). Además, factores externos, como la presencia de depredadores, también influyen en el comportamiento de forrajeo, al obligar a los herbívoros a restringir su alimentación a zonas más seguras y diversificar su dieta (Catano et al., 2014; Hernández & Laundré, 2005; McArthur et al., 2012; Nersesian et al., 2011).

Conclusiones

No todas las especies forrajeras del Rancho Noche Buena fueron consumidas por el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el venado bura (*O. hemionus*), el borrego cimarrón (*Ovis canadensis mexicana*) y el ganado bovino (*Bos taurus*); de hecho, estas especies seleccionaron predominantemente solo dos: *Olneya tesota* y *Simmondsia chinensis*. Estos resultados fueron consistentes con los intervalos de Bonferroni y con el índice de Ivlev, los cuales revelaron una selección significativa de especies arbóreas y suculentas, mientras que el consumo de herbáceas varió según la especie de ungulado.

De acuerdo con los intervalos de Bonferroni, los ungulados seleccionaron entre el 20 y 31.6 % de las plantas disponibles, mientras que con el índice de Ivlev, la selección osciló entre 33.3 y 71.43 %. Por el contrario, los valores de rechazo fueron más altos, con un rango de 38.1 a 65.0 % según Bonferroni y de 7.7 a 41.7 % según el índice de Ivlev.

Los ungulados consumieron un porcentaje reducido de especies forrajeras en proporción a su disponibilidad, con lo cual demostraron un comportamiento alimenticio selectivo. Entre las cuatro especies de ungulados, el ganado bovino fue el más selectivo, con un mayor número de especies clasificadas, como rechazadas y seleccionadas.

La información obtenida permite identificar las especies vegetales de mayor relevancia para los ungulados en la UMA Rancho Noche Buena. La selección de *Simmondsia chinensis* y *Olneya tesota* por las cuatro especies de ungulados tiene implicaciones importantes para el manejo y la conservación de sus hábitats. El sobreuso de estas plantas podría provocar la degradación del ecosistema y un incremento en la competencia entre los ungulados. Por ello, se recomienda implementar estrategias de manejo, como áreas de exclusión forrajera o la suplementación nutricional, para reducir la presión sobre estas especies clave y garantizar la sostenibilidad del ecosistema.

Fin de la versión en español

- Bailey, D. W., Gross, J. E., Laca, E. A., Rittenhouse, L. R., Coughenour, M. B., Swift, D. M., & Sims, P. L. (1996). Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management*, 49(5), 386-400. <https://doi.org/10.2307/4002919>
- Bautista-de Luna, M. S., Tarango-Arámbula, L. A., Mendoza-Martínez, G., Oropeza, G. O., Martínez-Montoya, J. F., Ugalde-Lezama, S., & Lánderos-Sánchez, C. (2022). Requerimientos y balance nutricional de fósforo y proteína cruda en plantas preferidas por el borrego cimarrón (*Ovis canadensis mexicana*). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 21(1), 3-12. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2021.21.1>
- Beaulieu, M., Haas, A., & Schaefer, H. M. (2014). Self-supplementation and effects of dietary antioxidants during acute thermal stress. *Journal of Experimental Biology*, 217(3), 370-375. <https://doi.org/10.1242/jeb.092825>
- Bester, T., Schmitt, M. H., & Shrader, A. M. (2023). The deterrent effects of individual monoterpene odours on the dietary decisions of African elephants. *Animal Cognition*, 26, 1049-1063. <https://doi.org/10.1007/s10071-023-01755-4>
- Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24, 1-19. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>
- Byers, C., Steinhorst, R., & Krausman, P. (1984). Clarification of a technique for analysis of utilization-availability data. *The Journal of Wildlife Management*, 48(3), 1050-1053. <https://doi.org/10.2307/3801467>
- Cain, J. W., Krausman, P. R., Rosenstock, S. S., & Turner, J. C. (2006). Mechanisms of thermoregulation and water balance in desert ungulates. *Wildlife Society Bulletin*, 34(3), 570-581. [https://doi.org/10.2193/0091-7648\(2006\)34\[570:MOTAWB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0091-7648(2006)34[570:MOTAWB]2.0.CO;2)
- Cain, J. W., Gedir, J. V., Marshal, J. P., Krausman, P. R., Allen, J. D., Duff, G. C., Jansen, B., & Morgart, J. R. (2017). Extreme precipitation variability, forage quality and large herbivore diet selection in arid environments. *Oikos*, 126(10), 1459-1471. <https://doi.org/10.1111/oik.04282>
- Catano, L. B., Shantz, A. A., & Burkepille, D. E. (2014). Predation risk, competition, and territorial damselfishes as drivers of herbivore foraging on Caribbean coral reefs. *Marine Ecology Progress Series*, 511, 193-207. <https://doi.org/10.3354/meps10921>
- Ceacero, F., Landete-Castillejos, T., Olguín, A., Miranda, M., García, A., Martínez, A., Cassinello, J., & Gallego, L. (2015). Avoiding toxic levels of essential minerals: a forgotten factor in deer diet preferences. *PLoS One*, 10(1), e0115814. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0115814>
- Cienfuegos-Rivas, E. G., Cantú-Medina, F. G., González-Reyna, A., Castillo-Rodríguez, S. P., & Martínez-González, J. C. (2015). Composición mineral de astas de venado cola blanca texano (*Odocoileus virginianus texanus*) en el noreste de México. *Zootecnia Tropical*, 33(3), 255-260. <http://www.publicaciones.inia.gob.ve/index.php/zootecniatropical/article/view/196>
- Contreras-Moreno, F. M., Zúñiga-Sánchez, S., & Bello-Gutiérrez, J. (2015). Preferencia de hábitat de *Odocoileus virginianus thomasi* Merriam en dos ejidos ganaderos del sureste de México. *Agro Productividad*, 8(3), 49-55. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/683>
- Copani, G., Hall, J. O., Miller, J., Priolo, A., & Villalba, J. J. (2013). Plant secondary compounds as complementary resources: are they always complementary? *Oecologia*, 172, 1041-1049. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2551-1>
- Domenge-Muñoz, R., & Pérez-Gómez, M. (2019). Modelo de evaluación de estrategias de conservación y aprovechamiento en una reserva de turismo cinegético en México. *Journal of Management & Business Studies*, 1(2), 65-89. <https://doi.org/10.32457/jmabs.v1i2.299>
- Dye, D. G., Middleton, B. R., Vogel, J. M., Wu, Z., & Velasco, M. (2016). Exploiting differential vegetation phenology for satellite-based mapping of semiarid grass vegetation in the Southwestern United States and Northern Mexico. *Remote Sensing*, 8(11), 889. <https://doi.org/10.3390/rs8110889>
- Estevez, J. A., Landete-Castillejos, T., García, A. J., Ceacero, F., Martínez, A., Gaspar-López, E., Calatayud, A., & Gallego, L. (2010). Seasonal variations in plant mineral content and free-choice minerals consumed by deer. *Animal Production Science*, 50(3), 177-185. <https://doi.org/10.1071/AN09012>
- García, E. (1998). 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Gedir, J. V., Cain, J. W., Krausman, P. R., Allen, J. D., Duff, G. C., & Morgart, J. R. (2016). Potential foraging decisions by a desert ungulate to balance water and nutrient intake in a water-stressed environment. *PLoS ONE*, 11(2), e0148795. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148795>
- Glass, D. M., Prentice, P. R., Evans, A. D., & Schmitz, O. J. (2022). Local differences in maximum temperature determine water use among desert bighorn sheep populations. *The Journal of Wildlife Management*, 86(8), e22313. <https://doi.org/10.1002/jwmg.22313>
- González-Enbarcadero, A., & Améndola, M. R. (2010). *Técnica microhistológica para la determinación de la composición botánica de la dieta de herbívoros*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Granados, D., Tarango, L., Olmos, G., Palacios, P., Clemente, F., & Mendoza, G. (2014). Dieta y disponibilidad de forraje del venado cola blanca *Odocoileus virginianus thomasi* (Artiodactyla: Cervidae) en un campo experimental de Campeche, México. *Revista de Biología Tropical*, 62(2), 699-710. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44931383024>
- Guajardo-Quiroga, R. G., & Martínez-Muñoz, A. (2004). Cuantificación del impacto económico de la caza deportiva en el norte de México y perspectivas de desarrollo. *Entorno Económico*, 42(250), 1-17. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/8690>
- Guerrero-Cárdenas, I., Álvarez-Cárdenas, S., Gallina, S., Corcuera, P., Ramírez-Orduña, R., & Tovar-Zamora, I. (2018).

- Variación estacional del contenido nutricional de la dieta del borrego cimarrón del desierto (*Ovis canadensis weemsi*), en Baja California Sur, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 34(1), 1-18. <https://doi.org/10.21829/azm.2018.3412113>
- Hernández, L., & Laundré, J. W. (2005). Foraging in the 'landscape of fear' and its implications for habitat use and diet quality of elk *Cervus elaphus* and bison *Bison bison*. *Wildlife Biology*, 11(3), 215-220. [https://doi.org/10.2981/0909-6396\(2005\)11\[215:FITLOF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2981/0909-6396(2005)11[215:FITLOF]2.0.CO;2)
- Holechek, J. L. (1984). Comparative contribution of grasses, forbs, and shrubs to the nutrition of range ungulates. *Rangelands*, 6(6), 261-263. <http://hdl.handle.net/10150/638545>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística (INEGI). (2019). *Carta del uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie VI*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/ususuelo/>
- Juhnke, J., Miller, J., Hall, J. O., Provenza, F. D., & Villalba, J. J. (2012). Preference for condensed tannins by sheep in response to challenge infection with *Haemonchus contortus*. *Veterinary Parasitology*, 188(1-2), 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.02.015>
- Krausman, P. R., Kuenzi, A. J., Etchberger, R. C., Rautenstrauch, K. R., Ordway, L. L., & Herver, J. J. (1997). Diets of desert mule deer. *Journal of Range Management*, 50(5), 513-522. <https://doi.org/10.2307/4003707>
- López-Saavedra, E. E., Lee, R. M., de Vos, J. C., Schweinsburg, R. E., & Luna-Salazar, G. (1999). Relación uso-disponibilidad de componentes topográficos y un modelo de calidad del hábitat para el borrego cimarrón en Sonora, México. *Acta Zoológica*, 76, 17-34. <https://azm.ojs.inacol.mx/index.php/azm/article/view/1697/1811>
- Lyons, R. K., & Stuth, J. W. (2007). Cattle, browse, and range health. *Rangelands*, 29(6), 8-11. [10.2111/1551-501X\(2007\)29\[8:CBARH\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2111/1551-501X(2007)29[8:CBARH]2.0.CO;2)
- McArthur, C., Orlando, P., Banks, P. B., & Brown, J. S. (2012). The foraging tightrope between predation risk and plant toxins: a matter of concentration. *Functional Ecology*, 26(1), 74-83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2011.01930.x>
- Marshall, J. P., Bleich, V. C., Krausman, P. R., Reed, M. L., & Neibergs, A. (2012). Overlap in diet and habitat between the mule deer (*Odocoileus hemionus*) and feral ass (*Equus asinus*) in the Sonoran Desert. *The Southwestern Naturalist*, 57(1), 16-25. <https://doi.org/10.1894/0038-4909-57.1.16>
- Matteucci, S. D., & Colma, A. (1982). *Metodología para el estudio de la vegetación* (pp. 26-25). Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos.
- Mellado, M. (2016). Dietary selection by goats and the implications for range management in the Chihuahuan desert: A review. *The Rangeland Journal*, 38(4), 331-341. <https://doi.org/10.1071/RJ16002>
- Memmott, K. L., Anderson, V. J., & Fugal, R. (2011). Seasonal dynamics of forage shrub nutrients. *Rangelands*, 33(6), 12-16. <https://doi.org/10.2111/1551-501X-33.6.12>
- Nefzaoui, A., Louhaichi, M., & Ben Salem, H. (2014). Cactus as a tool to mitigate drought and to combat desertification. *Journal of Arid Land Studies*, 24(1), 121-124.
- Nersesian, C. L., Banks, P. B., & McArthur, C. (2011). Titrating the cost of plant toxins against predators: determining the tipping point for foraging herbivores. *Journal of Animal Ecology*, 80(4), 753-760. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01822.x>
- National Research Council (NRC). (2007). *Nutrient requirements of small ruminants: sheep, goats, cervids and new world camelids*. The National Academies Press.
- Oliva-Sánchez, M. P., Vital-García, C., Flores-Márquez, J. P., Quiñonez-Martínez, M., & Clemente-Sánchez, F. (2015). Cambios estacionales en la dieta del venado bura (*Odocoileus hemionus* Crooki) en matorral desértico Chihuahuense. *Agro Productividad*, 8(6), 59-64. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/698>
- Peralta-Pardo, R. (2020). *Traslape de dieta en ungulados silvestres y domésticos en Sonora, México*. Colegio de Postgraduados.
- Ramírez-Lozano, R. G. (2004). *Nutrición del venado cola blanca*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Saucedo-Uuh, K., Peralta-Pardo, R., Cadena-Iñiguez, J., Tarango-Arámbula, L. A., Olmos-Oropeza, G., Clemente-Sánchez, F., & Serna-Lagunes, R. (2022). Modelo de manejo y conservación de flora endémica relacionada con dieta de ungulados silvestres. *Agro-Divulgación*, 2(4), 17-24. <https://agrodivulgacion-colpos.org/index.php/1agrodivulgacion1/article/view/86>
- Segundo-Galán, J. M., Torres-Romero, E. J., & Bender, L. C. (2024). Mapping core habitats, landscape permeability, and movement corridors for conservation of desert bighorn sheep in Sonora, México. *Therya*, 15(3), 279-288. <https://mastozoologiamexicana.com/therya/index.php/THERYA/article/view/6126>
- Selebatso, M., Maude, G., & Fynn, R. W. (2018). Adaptive foraging of sympatric ungulates in the Central Kalahari Game Reserve, Botswana. *African Journal of Wildlife Research*, 48(2), 1-12. <https://doi.org/10.3957/056.048.023005>
- Singer, M. S., Mace, K. C., & Bernays, E. A. (2009). Self-medication as adaptive plasticity: increased ingestion of plant toxins by parasitized caterpillars. *PLoS ONE*, 4(3), e4796. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004796>
- Smolko, P., Garaj, P., Lebocký, T., Bútorá, L., Pataky, T., Jaňáková, Z., Babic, M., Veselovská, A., Kubala, J., & Kropil, R. (2022). Soil nutrients and deer density affect antler size of the Carpathian red deer. *Mammalian Biology*, 102, 119-130. <https://doi.org/10.1007/s42991-021-00203-5>
- Sprinkle, J., Grumbles, R., & Meen, A. (2015). *Nutritional characteristics of Arizona browse* (pp. 1-11). Arizona Cooperative Extension.
- Stuth, J. W. (1991). Foraging behavior. In R. K. Heitschmidt & J. W. Stuth (Eds), *Grazing management. An ecological perspective* (pp. 65-83). Timber Press.
- Tarango, L. A., Krausman, P. R., Valdez, R., & Kattnig, R. M. (2002). Research observation: desert bighorn sheep diets in northwestern Sonora, Mexico. *Journal of Range Management Archives*, 55(6), 530-534. <https://doi.org/10.2307/4003995>
- Tarango-Arámbula, L. A. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2), 17-21. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=455545052003>

- Van Soest, P. V., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Vandeloecht, B., Pierce, R. A., & Flinn, E. (2022). *Nutritional requirements of white-tailed deer in Missouri* (pp. 1-12). University of Missouri. Extension.
- Vásquez, Y., Tarango, L., López-Pérez, E., Herrera, J., Mendoza, G., & Mandujano, S. (2016). Variación de la composición de la dieta del venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(1), 87-98. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.04.012>
- Villalba, J. J., Provenza, F. D., & Bryant, J. P. (2002). Consequences of the interaction between nutrients and plant secondary metabolites on herbivore selectivity: benefits or detriments for plants? *Oikos*, 97(2), 282-292. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2002.970214.x>
- Villalba, J. J., Provenza, F. D., Hall, J. O., & Lisonbee, L. D. (2010). Selection of tannins by sheep in response to gastrointestinal nematode infection. *Journal of Animal Science*, 88(6), 2189-2198. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2272>
- Wagner, G. D., & Peek, J. M. (2006). Bighorn sheep diet selection and forage quality in central Idaho. *Northwest Science*, 80(4), 246-258. https://objects.lib.uidaho.edu/twrs/Wagner_PeekNWSBighornDiet.pdf
- Xin, D., Gu, X., Shi, J., Yuan, F., Yin, B., Wang, A., Wei, W., & Yang, S. (2012). The seasonal changes of plant secondary metabolites and their influence on the food selection of plateau pika. *Acta Theriologica Sinica*, 32(4), 306-317.
- Yeates, J., & McGreevy, P. (2018). Ungulates (Ungulata). In Yeates, J. (Ed.), *Companion Animal Care and Welfare* (pp. 249-265). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119333708.ch12>