



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Biología

Posgrado Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas

Área temática: Ecología y Conservación

**ESTIMACIÓN DE ALMACENES DE CARBONO EN UN BOSQUE
MANEJADO DE ENCINO EN LA SIERRA DE SANTA ROSA DE LIMA,
GUANAJUATO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el título de

Maestro en Ciencias Biológicas

Presenta

L.C.A. Alejandro López Mendoza

Directora de tesis: Dra. Mariela Gómez Romero.

Co director de tesis: Dr. Rafael Aguilar Romero.

Morelia, Michoacán, julio 2024.

Agradecimientos Institucionales

A la **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO (UMSNH)**, a la **FACULTAD DE BIOLOGÍA** y al **POSGRADO INSTITUCIONAL DE MAESTRIA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (PIMCB)** por brindarme la oportunidad de desarrollar el presente trabajo y profundizar mis conocimientos.

Al **CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONAHCYT)** por el apoyo otorgado a través de la beca de estudios de posgrado.

Al **Laboratorio de Ecología Funcional** de la **ENES Morelia UNAM** y al **LABORATORIO DE ECOLOGÍA DE LA RESTAURACIÓN** de la **FACULTAD DE BIOLOGÍA UMSNH** por brindarme la oportunidad de ser parte de sus equipos de trabajo.

A la **Dra. Mariela Gómez Romero** y al **Dr. Rafael Aguilar Romero** por la dirección del trabajo de tesis, por su apoyo y sus valiosos y acertados aportes a la investigación.

A la **Dirección General de Asuntos de Personal Académico (DGAPA)** de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el financiamiento de esta investigación a través del proyecto (IA203221) "Estrategias de uso del agua y su relación con la distribución de especies de encinos (género *Quercus*) a lo largo de gradientes ambientales locales en una comunidad semiárida de México", cuyo responsable es el Dr. Fernando Pineda García.

Al **Dr. Jesús Llanderal Mendoza** y la **M. en C. Gabriela López Barrera** por el apoyo técnico recibido.

A la **Ing. Ericka Delgado Bernal**, así como a la **Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato**, por darnos todas las facilidades para trabajar en el Área Natural Protegida "Cuenca de la Esperanza". Así como a **Industrial Santa Fe** por darnos todas las facilidades para realizar el estudio.

A los miembros del comité tutorial: **Dr. Fernando Pineda García**, **Dr. J. Arnulfo Blanco García** y **Dr. Rafael Hernández Guzmán**, por sus aportaciones, sugerencias y correcciones para la mejora de este trabajo.

Agradecimientos Personales

A mi familia por todo el apoyo incondicional y cariño que siempre me han brindado.

A mis colegas del laboratorio de ecología funcional (Ecofun) han sido un faro de luz en muchas ocasiones, se los agradezco bastante “¡Ganamos, Ganamos...!”

A mis colegas del laboratorio de ecología de la restauración de la Universidad Michoacana. Las risas y los buenos chismes no faltaron

Al Dr. Fernando Pineda García por tu acompañamiento y todo el conocimiento que has compartido en estos años, muchas gracias.

Al Dr. Rafael Aguilar Romero por tus enseñanzas y brindarme la oportunidad de pensar diferente.

A la Dra. Mariela Gómez Romero por su atención, calidad humana y apoyo cuando las cosas se ponen difíciles.

A Don Gavilán que nos acompañó “*allá tras lomita*” en busca de encinos para medir.

Índice

Agradecimientos Institucionales.....	1
Agradecimientos Personales	2
Resumen general	5
General abstract	6
Introducción General	7
Preguntas de investigación.....	9
Hipótesis	9
Objetivo general	9
Objetivos particulares	9
Capítulo 1	10
La distribución de las especies de encino definida por efecto de la orientación de la pendiente en una región semiárida de México.	10
Abstract.....	11
Introduction.....	12
Materials and methods	15
Results	19
Discussion	27
Conclusion	29
References.....	30
Capítulo 2.	37
Almacenes de carbono en bosques de <i>Quercus</i> y su relación con el ambiente en la Sierra de Santa Rosa.	37
Resumen.....	38
Introducción	39
Materiales y Métodos.....	41
Resultados.....	49
Discusión	55
Conclusión	58
Bibliografía	59
Discusión y conclusiones generales.....	65
Referencias.....	67
Anexos.	70

Resumen general

El presente trabajo se exploró como como la orientación de la pendiente puede influir en la estructura, composición y almacenes de carbono de bosques de encino (género *Quercus*) en ecosistemas semiáridos del centro de México. En el primer capítulo se exploró como la orientación de la pendiente y características ambientales afectan la distribución y los rasgos funcionales de especies cercanamente relacionadas, se utilizaron datos en campo y capas climáticas para caracterizar las condiciones ambientales, estimar la biomasa aérea por especie e identificar rasgos funcionales de las especies. Los resultados obtenidos muestran que las especies con una distribución más afín a orientaciones al sur (*Q. jonesii*, *Q. deserticola* y *Q. edueardii*) reciben mayor radiación solar y presentan mayor temperatura en el suelo, por otro lado, las especies con mayor afinidad a las orientaciones norte (*Q. laurina*, *Q. rugosa* y *Q. scytophylla*) se distribuyen en pendientes más húmedas. Se encontró que las laderas con orientación sur presentan comunidades de encino con menor biomasa, rasgos de hojas asociados a una mayor capacidad de adquisición de carbono y eran más caducifolias que las de las pendientes al norte. Estos hallazgos mejoran la comprensión de cómo los factores ambientales promueven la partición de nicho entre los robles y subrayan la importancia de combinar enfoques metodológicos para aclarar perspectivas ecológicas. En el segundo capítulo se integró la información de campo y datos de radar, se evaluaron tres sistemas de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa en bosques de encinos manejados para la producción de carbón vegetal. Se generó un modelo con random forest con un coeficiente de variación de $R^2 = 0.78$, $RMSE = 34.8 \text{ Ton/ha}$ y $\% RMSE = 38\%$ se obtuvo un mapa de densidad de carbono con un rango de 40 a 132 Mg/ha y un mapa del coeficiente de variación del modelo con un rango de 20 a 80%. Se identificó que las laderas orientadas al norte tienen mayor biomasa y menor coeficiente de variación promedio en comparación con las laderas orientadas al sur. Estos resultados son importantes porque combinan la densidad de carbono con la estructura y composición de las comunidades de encinos, identificando áreas críticas (laderas norte) para mantener los almacenes de carbono y la conservación de la biodiversidad de especies.

Palabras clave: Orientación de la pendiente, Análisis espacial, Rasgos funcionales de las hojas, Estructura y composición de las comunidades, Densidad de carbono.

General abstract

The present work explored how slope orientation can influence the structure, composition and carbon stores of oak forests (genus *Quercus*) in semi-arid ecosystems of central Mexico. In the first chapter, we explored how slope orientation and environmental characteristics affect the distribution and functional traits of closely related species, using field data and climatic layers to characterize environmental conditions, estimate aboveground biomass by species, and identify functional traits of species. The results obtained show that species with a distribution more akin to south-oriented orientations (*Q. jonesii*, *Q. deserticola* and *Q. eduardii*) receive greater solar radiation and have higher soil temperatures, on the other hand, species with a higher affinity to northerly orientations (*Q. laurina*, *Q. rugosa* and *Q. scytophylla*) are distributed on wetter slopes. It was found that the south-facing slopes present oak communities with lower biomass, leaf traits associated with a greater capacity for carbon acquisition and were more deciduous than those of the slopes to the north. These findings improve the understanding of how environmental factors promote niche partitioning among oak trees and underscore the importance of combining methodological approaches to clarify ecological perspectives. In the second chapter, field information and radar data were integrated, three systems of allometric equations were evaluated to estimate the biomass in oak forests managed for charcoal production. A random forest model was generated with a coefficient of variation of $R^2 = 0.78$, $RMSE = 34.8$ Ton/ha and $\% RMSE = 38\%$, a carbon density map was obtained with a range of 40 to 132 Mg/ha and a map of the coefficient of variation of the model with a range of 20 to 80%. It was identified that north-facing slopes have higher biomass and lower average coefficient of variation compared to south-facing slopes. These results are important because they combine carbon density with the structure and composition of oak communities, identifying critical areas (northern slopes) to maintain carbon stores and the conservation of species biodiversity.

Keyword: Slope aspect, Spatial analysis, Leaf functional traits, Structure and composition of communities, Carbon density.

Introducción General

La diversidad vegetal en los ecosistemas puede ser definida por elementos de la topografía, como la elevación, posición topográfica y orientación de la ladera, influyendo en el microclima (Méndez-Toribio et al. 2016; Yang et al. 2020; Quisehuatl-Medina et al. 2023). Se ha identificado que la orientación de la ladera afecta de manera directa en el ingreso de la radiación solar, temperatura, humedad y contenido de materia orgánica en los suelos y en consecuencia, la distribución de las especies vegetales, se diferencia entre orientaciones (Moeslound et al. 2013; Méndez-Toribio et al. 2016; Yang et al. 2020). De manera general, las laderas con orientación a los polos presentan condiciones ambientales más frías, húmedas y con menor radiación solar (Méndez-Toribio et al. 2016). Estas condiciones han permitido que la vegetación méxica, es decir, vegetación que depende de periodos de humedad estable domine en estas laderas, mientras que las laderas con orientación al ecuador, presenta mayor radiación solar, mayor temperatura y menor humedad, condiciones que han permitido que la vegetación xérica se establezca con mayor frecuencia en estos sitios (Méndez-Toribio et al. 2016; Yang et al. 2020; Shrestha et al. 2024).

Para ecosistemas semiáridos en latitudes norte, se ha reportado que la distribución diferenciada de especie entre laderas también asocia una diferenciación en la composición, estructura vegetal y biodiversidad, siendo las laderas con orientación a los polos, las que presentan mayor biomasa, altura y diversidad, a diferencia que los sitios con orientación al sur (Yang et al. 2020). En México se han desarrollado estudios en bosques secos tropicales, que sustentan la diferenciación en las condiciones ambientales entre orientaciones de ladera y a su vez, esto impacta en la capacidad de las plantas de acumular recursos para el crecimiento y reproducción durante épocas de secas (Gallardo-Cruz et al. 2009; Méndez-Toribio et al. 2013; Quisehuatl-Medina et al. 2023). A pesar de lo anterior, la información disponible no logra ser consistente con diferentes tipos de ecosistemas, salvo aquellos donde el agua es un recurso limitado (Arnesto y Martínez 1978; Sternberg y Shoshany 2001; Yang et al. 2020). Además, estas diferencias en la distribución de especies reflejan estrategias funcionales para la sobrevivencia y crecimiento en condiciones estresantes y es necesario profundizar el conocimiento para conocer la tendencia de las poblaciones vegetales ante el cambio climático.

Además, en los últimos años, la implementación de políticas públicas como los pagos por servicios ecosistémicos a partir de estimaciones de almacenes de carbono presentan una tendencia en aumento, esto con la finalidad de mitigar las actividades humanas. Por lo tanto, es necesario generar estimaciones más precisas de los almacenes de carbono terrestres en México. Recientemente se han implementado metodologías que combinan información de campo, con datos de percepción remota para mejorar la estimación, aumentar el área y disminuir costos (Hernández-Stefanoni et al. 2021). Aunque en México existen estimaciones nacionales (Cartus et al. 2014), algunos ecosistemas como los bosques de encino, no han sido abordados para las estimaciones de almacén de biomasa a profundidad. Nixon (1997), considera a los encinos como el género leñoso más importante de Norteamérica. En México los estudios en encinos han sido abordados por su riqueza de especies, abundancia, gradientes ambientales y rasgos funcionales, que le ha permitido distribuirse por casi todo el territorio nacional (Cavender-Bares 2019). A partir de datos del Inventario Nacional Forestal, se estima que los encinos aportan cerca del 29% de la biomasa aérea total nacional, registrando alrededor de 160 especies, de las cuales 90 especies son endémicas (Valencia 2004; Cavender-Bares et al. 2016; 2019). Lo anterior, es resultado de la plasticidad que este género ha desarrollado para poder establecerse en diferentes climas (Slot et al. 2012; Arenas-Navarro et al. 2020) y cómo a través de estrategias conservadoras o evitativas, administran recursos como el agua para su supervivencia y crecimiento en condiciones de estrés como la sequía o el calentamiento global (Slot et al. 2012; Pineda-García et al. 2016; Meza-Rico et al. 2021). Por lo anterior, abordar perspectivas que permitan dilucidar los factores ambientales y atributos funcionales claves en su distribución, sus estrategias de supervivencia, crecimiento y distribución en los almacenes de biomasa, serán útiles para implementar estrategias de conservación, restauración o manejo.

Como resultado del estudio se presentan dos capítulos que exploran: 1) El efecto que tienen las condiciones ambientales entre laderas y si estas diferencias influyen en la distribución de las especies de encinos y en los rasgos funcionales de especies del género *Quercus* en una región semiárida de México, 2) Cómo se distribuyen los almacenes de biomasa a escala de paisaje en la Sierra de Santa Rosa de Lima y la diferencia en la distribución de la biomasa por orientación de laderas. El presente trabajo aporta evidencias de cómo la existencia de filtros ambientales afecta la distribución diferenciada de especies, el desarrollo de rasgos funcionales para su establecimiento y adquisición de recursos como el carbono en sumideros, además de obtener un modelo de la

densidad de carbono a escala de paisaje e identificar diferencias en la distribución de almacenes de biomasa, entre orientaciones en una región semiárida del centro de México.

Preguntas de investigación

- 1) ¿Existen diferencias en las condiciones ambientales entre orientaciones de ladera?
- 2) ¿Las especies del género *Quercus* en la Sierra de Santa Rosa de Lima presentan una distribución diferenciada con respecto a las orientaciones de ladera?
- 3) ¿La orientación de ladera pueden influir en los patrones de distribución, composición, estructura y almacén de carbono del género *Quercus*?
- 4) ¿Las especies del género *Quercus* presentan estrategias específicas para su establecimiento?

Hipótesis

La orientación de la ladera influye en las condiciones ambientales, por lo que se espera que las orientaciones de ladera funcionen como filtros que promueven patrones de distribución, composición y almacén de carbono diferenciados.

Objetivo general

Dilucidar que factores influyen en la distribución, estructura y almacén de carbono del género *Quercus* en la Sierra de Santa Rosa de Lima, Guanajuato.

Objetivos particulares

Identificar los factores ambientales y rasgos funcionales que influyen en la distribución de las especies del género *Quercus* entre orientaciones de laderas.

Comparar diferentes sistemas de ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa.

Explorar la distribución de la densidad de carbono en la Sierra de Santa Rosa de Lima.

Comparar la densidad de carbono entre orientación de laderas.

Capítulo 1

La distribución de las especies de encino definida por efecto de la orientación de la pendiente en una región semiárida de México.

Oak's distribution is mediated by the effect of slope-aspect in a semiarid region of México

Abstract

Patterns of distribution promoted by environmental gradients associated with topographical characteristics have been explored extensively since the beginning of ecology. However, it is still not clear if slope-aspect and its associated environmental conditions promote differences in the distribution and functional traits, especially among closely related species. Toward this goal, we measured Oaks (*Quercus* genus) in randomly selected plots located in north- and south-facing slopes restricted to the same altitude in a semiarid region of Mexico. In each plot, we characterized their environmental conditions using high-resolution climatic data, the oak standing biomass by allometric equations, the community-weighted mean of three leaf functional traits, and the leaf deciduousness through normalized difference vegetation index. Our findings revealed that south-facing slopes receive higher solar radiation and experience higher soil temperatures. We detected oak differ in their distribution between slope-aspects; *Quercus laurina*, *Q. rugosa* and *Q. scytophylla* were found at the more mesic north-facing slope and *Q. jonesii*, *Q. deserticola* and *Q. eduardii* at the south-facing slope. In addition, oak communities from south-facing slopes had lower standing biomass, leaf traits associated with a higher carbon acquisition capacity, and were more deciduous than oaks from north-facing slopes. These findings enhance our understanding of how environmental drivers promote niche partitioning among oaks and highlight the importance of combining methodological approaches to clarify ecological insights.

Keywords

Mexican Oaks, distribution patterns, slope-aspect, leaf functional traits, gradients.

Keymessage

Differences in the distribution and leaf functional traits promoted by environmental conditions between north- and south-facing slopes were detected among Mexican oaks in a semiarid region.

Introduction

Though ecology is a long-standing science, there are questions posted since its beginning that are still in debate. That is the case of the mechanisms that influence the structure of communities and regional variation of species composition (Bazzaz 1996, Weiher et al. 1999, Hubbell 2001, Martin et al. 2021, Kaproth et al. 2023). Among others, it has been said that local species assemblages depend on the regional pools, species dispersion capacity, and adaptations that determine their survival under the local biotic and abiotic conditions (Willis et al. 2010). Recently, it has been detected that the structure of local communities is driven by niche-based processes (i.e. environmental filtering), however, this depends on the presence of accentuated environmental gradients (Bazzaz 1996; Willis et al. 2010). Understanding the mechanisms that influence the species distribution would help to define the vulnerability of communities to perturbation and how their structure and composition would be affected by climate change.

The topographic features such as elevation and aspect and its concomitant influence on the environment, are considered determinant factors of the distribution of species and the structure of communities (Sundqvist et al. 2013). Particularly, slope-aspects receive different radiant energy incomes, promoting contrasting environmental conditions between polar- and equator-facing slopes (Holland and Steyn 1975; Singh 2018). Equator-facing slopes are exposed to a higher number of hours of sunlight, this promotes higher temperatures, lower soil humidity, and higher vapor pressure deficit (Moeslund et al. 2013). In contrast, pole-facing slopes with fewer hours of sunlight are humid and less hot (Cantlon 1953; Holland and Steyn 1975; Bennie et al. 2006; Burnett et al 2008). These contrasting conditions are thought to filter-out species; thus, each slope-aspects would have a unique composition and vegetation characteristics. Although this effect is predicted to be more notorious at mid-latitudes, the evidence is not that clear; in some ecosystems only some features of vegetation structure and litter income show differences, but there is no consistent evidence on species rechange between slopes (Gallardo-Cruz et al. 2009; Zeng et al. 2014; Mendez-Toribio et al. 2016). However, the outcome changes and the evidence on species distribution and vegetation structure becomes clearer in regions where water is limited, i.e. arid and semiarid areas, suggesting the effects of slope-aspects are promoted when water availability is limited (Armesto and Martínez 1978; Sternberg and Shoshany 2001; Yang et al. 2020).

Regarding this, the differences in the distribution of species between slopes it would also be indicative of a change in the strategy to cope with stress, especially in leaf traits which are the

entry point of carbon and inevitable the exit of water during gas exchange (Wright 2004; Reich 2014). Species from water-scarce environments have a set of physiological, morphological, and phenological traits that enable them to grow and survive under such stress levels, which can be divided into two contrasting strategies: tolerance and avoidance (Volaire 2018). Tolerant species have physiological mechanisms that allow them to function and grow despite experiencing moderate soil drought or dehydration in their tissues. In contrast, avoidant species restrict their physiology to periods with no water limitation and reduce the drought impacts by shedding their leaves (Volaire 2018). It has been observed that the strategy to deal with water limitation changes along topographic features, i.e. altitude (Fallon and Cavender-Bares 2018), but it is still not clear if the strategy changes between slope aspects.

Oak species are a relevant taxon of the temperate forests in America with a great ecological footprint as they are an important carbon sink, host numerous interactions with other organisms, and regulate nutrient cycling (Kappelle 2006; Cavender-Bares 2016). In Mexico, Oaks radiate colonizing different ecosystems (ie. tropical, subtropical, and semiarid areas) during which numerous endemism emerged (Valencia 2004; Ramírez-Valiente et al. 2017; Hipp et al. 2018; 2020). In general, it has been detected that the distribution of oak species changes at the landscape along environmental gradients, such as fire frequency, precipitation, and altitude (Cavender-Bares et al. 2004; Ramírez-Valiente et al. 2017; Fallon and Cavender-Bares 2018; Kaproth et al. 2023). Interestingly, in Mexico there are some regions rich in oak species where more than six species co-occur locally, i.e. central-western and southern areas of the country (Torres-Miranda et al. 2013; Rodríguez-Correa et al. 2015; Arenas-Navarro et al. 2020, Martin et al. 2021). There is this region that represents a transition between the Mexican arid highlands and the Trans-Mexican Volcanic Belt, the Sierra de Santa Rosa at Guanajuato state, which is dominated by oaks, hosting 14 species (Martínez-Cruz and Téllez-Valdés 2004). This area has limited precipitation (660 mm) with a seven-month marked dry season, and a strong interannual variation in the amount of precipitation (CONAGUA 2017). Additionally, there have been detected soil water gradients promoted by the complexity of the topography (Martínez-González et al. 2010). This suggests that the contrasting environment driven by topographic features such as slope-aspect would promote the regional coexistence of closely related species. Besides, the segregation of the species along the slope-aspect would be indicative of a difference in their leaf functional traits related to the strategy to acquire resources and avoid drought.

Therefore, in the present study, we aim to elucidate several key ecological questions by conducting vegetation surveys in plots randomly located on both north- and south-facing slopes, all at the same altitude. We will characterize the environment using high-resolution climatic data and estimate community-weighted leaf functional traits. Specifically, we seek to determine: i) whether slope-aspect drives differences in the environment, especially during the period of greatest water scarcity; ii) whether slope-aspect influences the distribution of oak species; and iii) whether the changes in distribution reflect differences in structural characteristics and leaf functional traits of oak communities between north- and south-facing slopes.

Materials and methods

Study area. The study was conducted at the Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, in Central Mexico, which is located between 20°45' – 21°25' N and 100°53' – 101°25' W (altitude range between 1800 and 2750 masl) (Fig. 1). During the last 59 years, the Sierra has registered mean annual precipitation of 660.11 mm (348.4 – 1137.2 mm), a mean annual temperature of 18.76°C (17.11 - 20.11 °C) and mean annual evaporation of 1744.11 mm (451.5 – 2124.9 mm) (CONAGUA 2017). The dry season starts in November and ends in May, and during this period (winter-spring) the area registers the largest variation in temperatures and humidity. Topography is highly complex. The most abundant type of soil are the Kastanozems (65%) followed by Litosols (25%), both being very shallow (0-30 cm) (Martinez-Cruz et al. 2009, CONABIO, 2024). The dominant type of vegetation are oak forests mixed with shrubs of *Arbutus* sp and *Arcostaphylos pungens* Kunth.

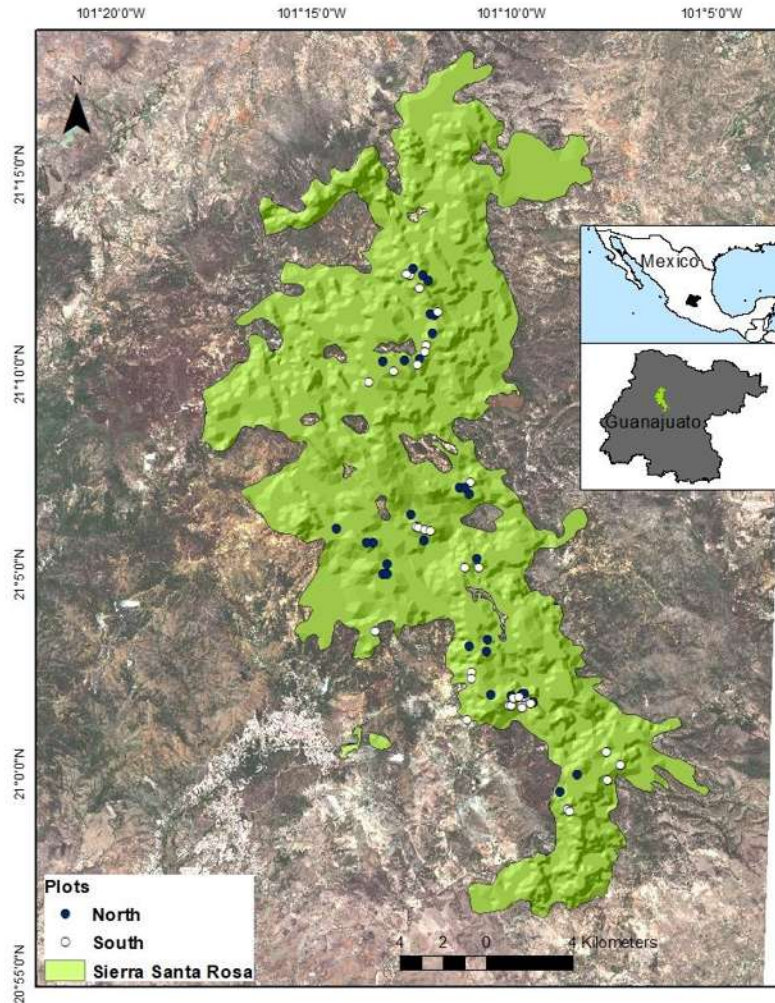


Figure 1. The Sierra de Santa Rosa at the Guanajuato State and the position of the 32 north and 34 south-facing plots.

Data collection. We generated a digital elevation model of 15 m spatial resolution from the Sierra, and the selection of plots was carried out using a geographic information system (GIS), in which approximately 2,000 random points were generated, distributed throughout the Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. Subsequently, points that did not meet the following criteria were filtered out: 1) Altitudinal range of 2500 to 2700 meters masl, 2) North and south-facing slopes, 3) Slope of 30° - 45°, and 4) Sites far from roads. In total, 66 plots that met the aforementioned criteria were selected, and their distribution represented the study area (32 north-facing plots and 34 south-

facing plots). (Fig. 1) (Fallon and Cavender-Bares, 2018). During July 2021 we conducted an extensive field survey to characterize oaks communities. In each site, we sampled the vegetation in a plot of 20 m × 50 m that was located perpendicular to the slope and recorded its geographical position. At each site, we measured the diameter at breast height (DBH) and determined the taxonomic identity of all oak trees with a dbh ≥ 5 cm. With the dbh we estimated the total standing biomass (SB) of each species for each sampling plot with the allometric equation for oaks $SB = 0.0342 * (dbh)^{2.759}$ (kg of dry mass) proposed by Aguilar-Romero et al. (2012).

Environmental characterization. For each sampling plot, we characterized the environment for the winter and spring seasons because at this latitude, the conditions between slopes are more contrasting during these times of the year (Gallardo-Cruz et al. 2009; Méndez-Toribio et al. 2018). To characterize variation in air temperature during the winter and spring seasons, we obtained five bioclimatic variables that best describe both seasons (maximum temperature of the warmest month, minimum temperature of coldest month, mean temperature of the driest quarter, mean temperature of the coldest quarter) derived from monthly temperature from 1910 to 2009 (<https://github.com/AngelaCrow/variables-bioclimatica>) (Cuervo-Robayo et al. 2014). The same approach was followed for the soil temperature, and we obtained three variables estimated from 1979 to 2013 (maximum soil temperature of the warmest month, mean soil temperature of the driest quarter and mean soil temperature of the coldest quarter) (<https://zenodo.org/record/7134169>) (Lembretschs et al. 2022). Subsequently, we extracted monthly soil water content and evapotranspiration (Trabucco and Zomer 2019) from (https://figshare.com/articles/Global_High-Resolution_Soil-Water_Balance/7707605/3) and calculated the mean value for the winter and spring seasons, as well as the solar radiation (KWh/m²) for each plot using the digital elevation model (Fallon and Cavender-Bares et al. 2018). All variables were extracted using ArcGIS 10.5 (ESRI 2016).

We estimated three leaf functional traits indicative of the plant's capacity for gas exchange to calculate community-weighted mean (CWM) traits based on the standing biomass of each species within each sampling plot (Garnier et al. 2004; Wright et al. 2004; Lavorel et al. 2008, Mencuccini et al. 2019; Rosas et al. 2019). At the region scale, we randomly selected 8 to 10 individuals of each species and from each individual we collected three to five leaves and three terminal branches sun-exposed and without any apparent damage. The quantified traits were the

leaf size (LS; cm²) representing the area of a leaf; specific leaf area (SLA; cm²/g) is the ratio between the leaf area and its dry biomass and the Huber value (HV) is the ratio between twig stem cross-sectional area and the area of leaves sustain by it (Harguindeguy et al 2013). Then, the CWM of each plot was calculated based on the species regional mean trait.

To estimate the leaf deciduousness of each plot we used Sentinel 2 multispectral instrument (MSI) data of the 10 m resolution bands downloaded from the Copernicus Open Access Hub (ESA) (<https://dataspace.copernicus.eu/>) for the year 2021. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is the ratio of the difference between the near-infrared and red bands against the sum of both near-infrared and red bands (Rouse et al. 1974; Huechacona-Ruiz et al. 2020). The NDVI quantifies the green vegetation of each sampling plot and changes in the NDVI over the year are indicative of deciduousness (Bohlman 2010; Del Toro et al. 2016). We estimated the change in greening from summer to both, the winter and spring seasons as $\text{NDVI}_{\text{summer}} - \text{NDVI}_{\text{winter}}$ (or spring)/ $\text{NDVI}_{\text{summer}} \times 100$. For the summer we used NDVI of September as the maximum greening because in this month images were cloud-free. The process was done in ArcGIS 10.5 (ESRI 2006).

Statistical analysis

The differences in the environmental characteristics during winter and spring between slope-aspect were explored with a one-way ANOVA for each variable in each season. To meet the normality criteria all variables were log-transformed. To explore the change in oak species distribution between slope-aspect we performed a Nonmetric Multidimensional scaling (NMDS) with the presence data of each species from the 66 plots (32 north-facing slopes and 34 south-facing slopes) based on the Bray Curtis dissimilarity (Minchin 1997). The difference in composition between slope-aspect was tested with the analysis of similarity (ANOSIM) based on the Hellinger distance (number of permutations: 999), which is a non-parametric multivariate analysis (Clarke 1993). These two analyses were performed with the 'vegan' R package (Version 4.6-4, Oksanen, 2022). Additionally, to explore whether the slope-aspect has representative species we performed an indicator species analysis based on the species abundance matrix (Dufrene and Legendre 1997; Bergamin et al 2012). This analysis assigned an indicator value for each species in each slope-aspect and the significance of this value was tested by randomization techniques (999 permutations). This analysis was done with the "indicspecies" (version 1.7.12) package for R (De

Cáseres and Legendre 2009). Finally, we performed a one-way analysis for each trait to determine if the oak communities from north- and south-facing slopes differ in their standing biomass, leaf functional traits, and leaf deciduousness.

Results

We registered a total of 5,679 trees representing 12 oak species, three species belong to the Lobatae section and the rest to *Quercus* sections. The most abundant species was *Quercus rugosa* Née with 2,139 individuals followed by *Q. jonesii* Trel. with 1,384 individuals, both having the largest standing biomass 562,911 and 230,197 kg of dry mass, respectively. The least abundant species was *Q. resinosa* Liemb. which was restricted to only one plot (Table 1).

Table 1. Oak species registered in the Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. The table shows the regional abundance of the species, its standing biomass (Kg), and the number of plots in which each species was found.

Species	Section	Total abundance	Standing biomass (Kg)	Number of plots
<i>Quercus rugosa</i> Née	<i>Quercus</i>	2139	562,911	46
<i>Quercus jonesii</i> Trel.	<i>Quercus</i>	1384	230,197	28
<i>Quercus laurina</i> Bonpl.	<i>Lobatae</i>	783	217,439	26
<i>Quercus castanaea</i> Née	<i>Lobatae</i>	477	112,260	24
<i>Quercus eduardii</i> Trel.	<i>Lobatae</i>	508	349,276	20
<i>Quercus laeta</i> Liemb.	<i>Quercus</i>	141	34,683	13
<i>Quercus obtusata</i> Bonpl.	<i>Quercus</i>	124	28,406	10
<i>Quercus deserticola</i> Trel.	<i>Quercus</i>	44	22,450	8
<i>Quercus potosina</i> Trel.	<i>Quercus</i>	35	10,493	3
<i>Quercus mexicana</i> Bonpl.	<i>Quercus</i>	7	11,994	3
<i>Quercus scytophylla</i> Liemb.	<i>Quercus</i>	33	1,599	2
<i>Quercus resinosa</i> Liemb.	<i>Quercus</i>	4	2,708	1

We detected differences in the environment between the south- and north-facing slopes. Only two environmental variables showed significant differences when comparing the south- and north-facing slopes. The south-facing slopes received higher radiation loads during the winter season and tended to have higher soil temperatures during the driest quarter. (Fig. 2; Table 2).

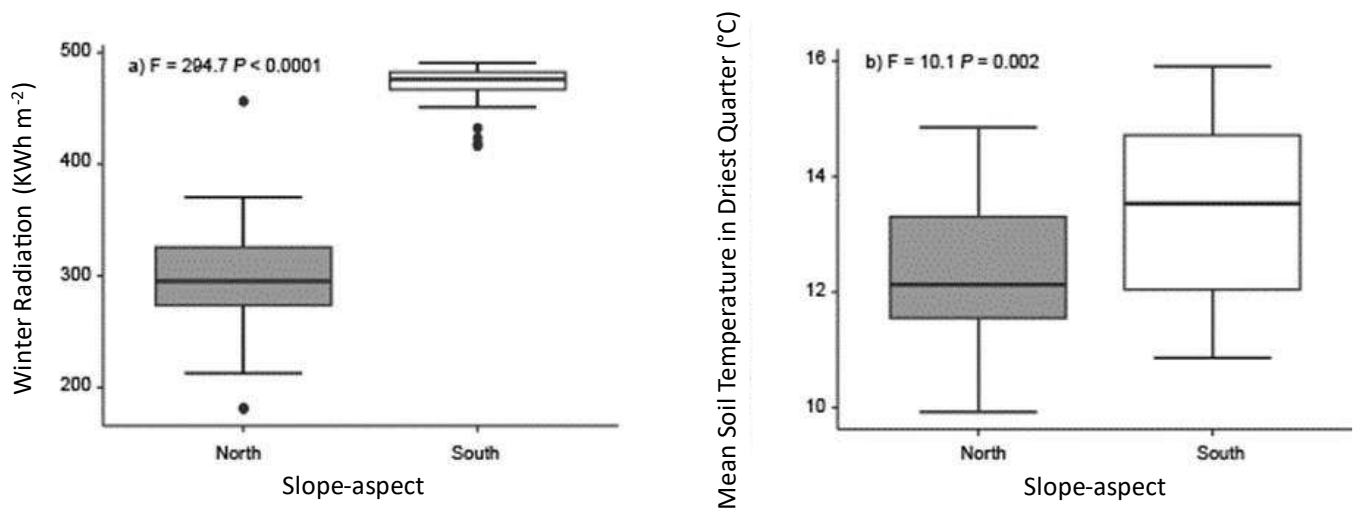


Figure 2. Comparison of the environmental conditions between north and south-facing slopes; a) Solar radiation (KWh/m²) during winter season, b) mean soil temperature (°C) of the driest quarter of the year. Each panel shows the F and P values from the one-way ANOVA.

Table 2. Environmental conditions of north- and south-slopes (mean value and the standard error for each slope-aspect). The table shows the statistics of one-way ANOVA and the number of sampling plots in parenthesis. The differences in mean environmental variables between the north- and the south-facing slopes (N-S) were calculated following Yang et al. (2020).

Environmental variable	North (32)	South (34)	N-S	F	P
Maximum Temperature of the Warmest Month (°C)	24.74±0.11	24.68±0.11	0.052	0.12	0.73
Minimum Temperature of the Coldest Month (°C)	4.32±0.04	4.39±0.04	-0.071	1.31	0.26
Mean Temperature of the Driest Quarter (°C)	12.19±0.07	12.21±0.07	-0.015	0.03	0.87
Mean Temperature of the Warmest Quarter (°C)	16.07±0.08	16.06±0.08	0.007	0.00	0.95
Mean Temperature of the Coldest Quarter (°C)	11.54±0.06	11.56±0.06	-0.017	0.04	0.85
Solar Radiation of Winter (KWh/m ²)	296.93±7.23	469.87±7.10	-172.94	294.77	<0.0001
Solar Radiation of Spring (KWh/m ²)	581.52±5.2	587.67±5.10	-6.15	0.70	0.40
Soil Water Content of Winter (mm)	46.79±0.24	46.75±0.23	0.037	0.01	0.91
Soil Water Content of Spring (mm)	26.13±0.16	25.96±0.16	0.16	0.54	0.47
Evapotranspiration of Winter (mm)	40.24±0.16	40.22±0.15	0.024	0.01	0.91
Evapotranspiration of Spring (mm)	37.68±0.16	37.50±0.16	0.177	0.61	0.44

Maximum Soil Temperature of the Warmest Month (°C)	25.37±0.17	25.71±0.17	-0.34	1.99	0.16
Mean Soil Temperature of the Driest Quarter (°C)	12.36±0.25	13.47±0.24	-0.04	10.13	0.002
Mean Soil Temperature of the Coldest Quarter (°C)	9.86±0.14	10.21±0.14	-0.34	2.89	0.09

The south and north-facing slopes were composed of a distinct group of oak species. The nonmetric multidimensional scaling analysis (NDMS) showed species separation in the ordination space ($P = 0.01$; stress value: 0.124; $R^2 = 0.98$) (Fig. 3). At the two-dimension space, the analysis of similarity (ANOSIM $R = 0.36$, $P = 0.001$) exhibited differences in the composition between slope-aspect: *Quercus potosina*, *Q. eduardii*, *Q. resinosa*, *Q. obtusata*, *Q. deserticola* and *Q. jonessi* were located at the south-facing slope while *Q. rugosa*, *Q. laurina* and *Q. scytophylla* were located at the north-facing slope. In addition, the indicator analysis showed associations between species that were exclusively restricted to one of the slope aspects; *Q. laurina* ($r.g = 0.590$; $p = 0.001$) (Lobatae), *Q. rugosa* ($r.g = 0.57$; $p = 0.001$) (Quercus) and *Q. scytophylla* ($r.g = 0.23$; $p = 0.01$) (Quercus) conformed the north-facing slope group and *Q. eduardii* ($r.g = 0.495$; $p = 0.001$) (Lobatae), *Q. jonessi* ($r.g = 0.399$; $p = 0.002$) (Quercus) and *Q. deserticola* ($r.g = 0.226$; $p = 0.028$) (Quercus) the south-facing slope group. In both cases, two species belong to the Quercus section and the other one to the Lobatae section.

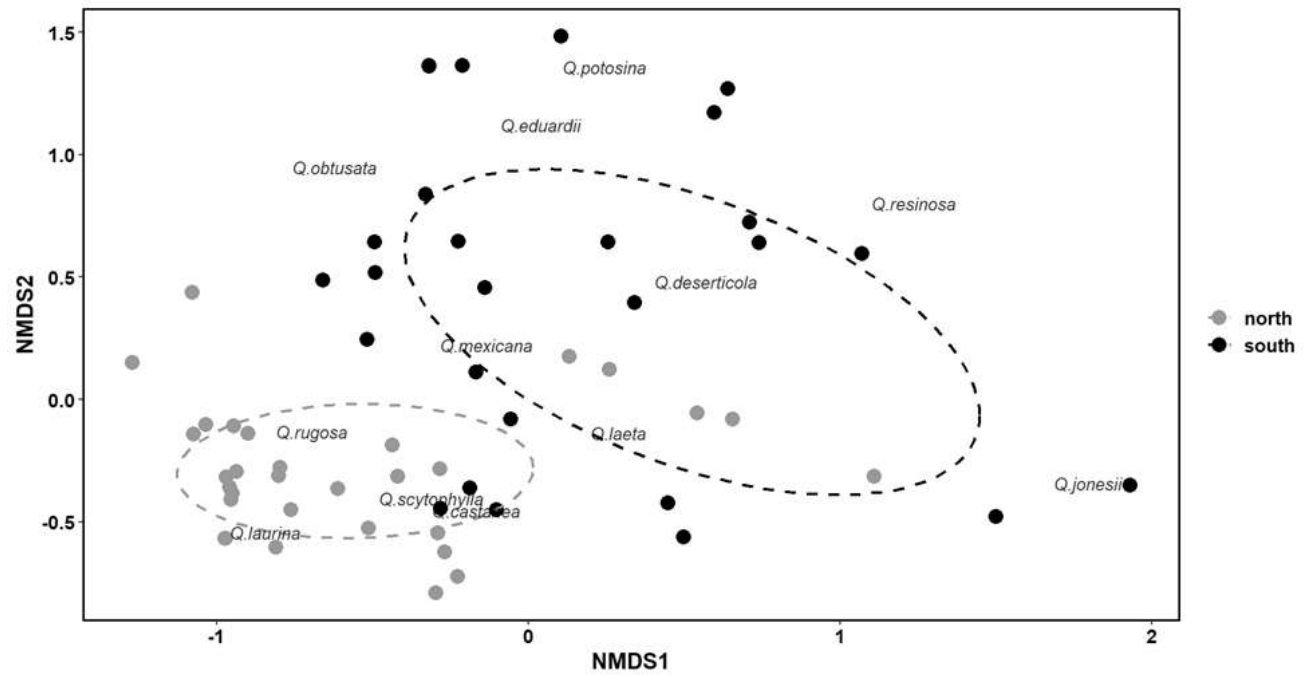


Figure 3. Nonmetric multidimensional scaling analysis (NDMS) based on the abundance of oak species surveyed in either the north or south-facing slopes ($P = 0.01$; stress value: 0.124; $R^2 = 0.98$). North- and south-facing plots are represented by different colors.

The change in oak species composition between slope aspects, also reflected differences in the leaf functional traits, south-facing slopes had species with larger leaf sizes, specific leaf area and lower Huber values than the north-facing slopes (Fig. 4, Table 3). At the same time, south-facing slopes exhibited a reduction in their NDVI values from summer to spring, representing a higher degree of deciduousness (Fig. 4, Table 3). Finally, we detected that south-facing slopes had a lower biomass (66,499 kg of dry mass) than the north-facing slopes (114,160 kg of dry mass) (Fig. 4, Table 3).

Table 3. Oak community (plots) traits of north- and south-facing slopes. The table shows the statistics of one-way ANOVA (F statistic and P-value) and the number of sampling plots in parenthesis. The differences in mean trait between the north- and the south-facing slopes (N-S) were calculated following Yang et al. (2020). The standing biomass (SB) was calculated based on the allometric equation for oaks $SB = 0.0342 * (dbh)^{2.759}$ (kg of dry mass) proposed by Aguilar-Romero et al (2012). The three (leaf size, specific leaf area, and Huber value) community weighted mean (CWM) traits were based on the standing biomass for each plot. Community leaf deciduousness was based on the normalized difference vegetation index (NDVI) and estimated as the change in greening from the summer to the winter and to the spring seasons as $NDVI_{summer} - NDVI_{winter}$ (or spring)/ $NDVI_{summer} \times 100$.

Community trait	North (32)	South (34)	N-S	F	P
<i>Structural</i>					
Standing Biomass (kg)	114,160 ±9,401	66,499 ±9,120	4,766	13.24	0.0005
<i>Community weighted mean traits</i>					
Leaf size (cm ²)	32.84 ±5.22	49.54 ±5.06	-16.70	5.28	0.02
Specific Leaf Area (cm ² g ⁻¹)	65.84 ±2.34	72.60 ±2.27	-6.75	4.30	0.04
Huber value (cm ² cm ⁻²)	0.04 ±0.002	0.03 ±0.002	0.01	16.13	0.0002
<i>Leaf deciduousness</i>					
NDVI Summer- Winter	15.90 ±1.66	21.99 ±1.69	-6.08	6.57	0.01
NDVI Summer- Spring	27.78 ±2.05	37.30 ±2.05	-9.51	10.81	0.001

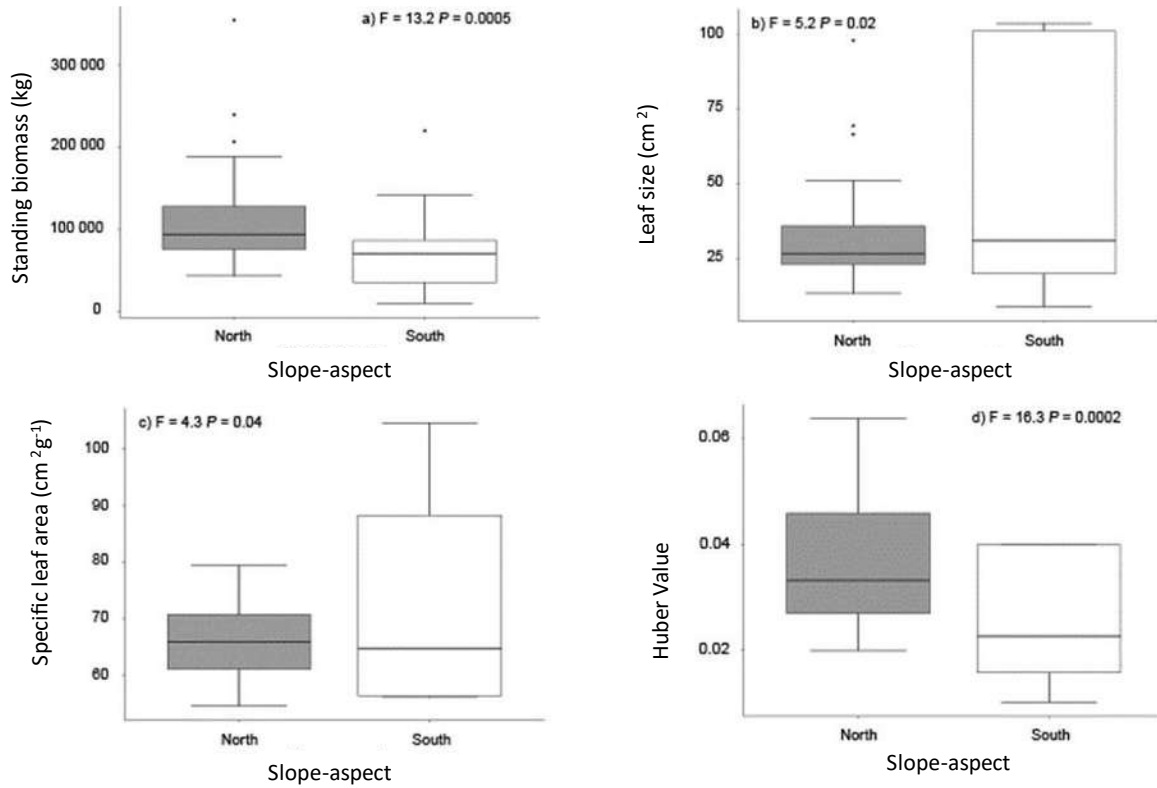


Figure 4. Comparison of oak community's traits between north and south-facing slopes; a) standing biomass (kg) derived from the allometric equation for oaks proposed by Aguilar-Romero et al 2016; b) leaf size (cm²); c) specific leaf area (cm²/g); d) Huber value. Each panel shows the F and P values from the one-way ANOVA.

Discussion

Our study shed light on ecological mechanisms that facilitate the coexistence of oaks in a highly rich region. Our study reveals that environmental conditions promote the differentiated distribution of species between slope orientation and leaf functional traits in this semiarid region, local environmental conditions changed between slope-aspect. Overall, south-facing slopes received higher radiation loads than north-facing slopes, which influence air and soil temperature. Our results evidence that local oak species have contrasting patterns of distribution and particularly six species were exclusively located within each of the slope-aspects. The distribution pattern also reflected a difference in leaf functional traits indicative of the carbon gain and water loss, and finally in the leaf phenology. Oaks from south-facing slopes had an acquisitive strategy and were more deciduous than north-facing slopes. Our results indicate that the environmental conditions between slope-aspect are species filter based on their capacity for resource exploitation and avoidance to drought.

The environmental characteristics were different between slope-aspect; in general, south-facing slopes receive higher radiation loads during the winter season than in spring. This result agrees with previous works at similar latitudes (Burnett et al 2008; Gallardo-Cruz et al. 2009; Méndez-Toribio et al. 2018). As stated by Burnet et al (2008) and Warren II (2008), differences in radiation input would have consequences in the air and soil temperature and in the soil water content. We detected the soil temperature tend to be higher in south facing slopes during the winter and during the spring. This result is interesting given the lack of difference in the radiation input between the slopes at this time of the year and could be more an effect of the vegetation properties. During spring, trees at south-facing slopes lose most of their leaves (see above), which minimizes the interception of solar radiation by the canopy promoting higher soil temperatures. However, we did not observe that higher solar loads and soil temperature translate into a higher water deficit at the south-facing slopes, this could be an effect of the lower geographical resolution in the soil water content data.

We detected evidence of a change in the distribution of the species between the slope-aspects, suggesting spatial niche partitioning among oaks promoted by the environmental gradients in the region. Specifically, we observed that three species (*Quercus rugosa*, *Q. laurina* and *Q.*

schytophylla) were exclusively at the mesic north-facing slopes. In Mexico, these three species have a distribution range up in the limit of altitude for oaks (*ca* 3000 masl), most of the time mixed with pine species. The climatic conditions of these high-altitude areas are humid with higher precipitation and lower temperatures (Valencia 1994; Uribe-Salas et al. 2008; Zacarias-Eslava et al. 2011; Aguilar-Romero et al. 2016; Arenas-Navarro et al. 2020; Vaca-Sánchez et al. 2021). At the south-facing slopes, we located *Q. jonessi*, *Q. eduardii* and *Q. deserticola*. These three species had a lower-limit of altitude in their distribution range and are typical from the drylands of Mexico. For instance, *Q. deserticola* can be found in the ecotone with the tropical dry forest (Casas et al. 1995; Aguilar-Romero et al. 2016; Rodríguez-Gómez et al. 2017; Cabrera-Rodríguez et al. 2018). Overall, we observed that at the same altitude, oak species distribution changes by the difference in environmental conditions between slope-aspects.

In our study, the change in the distribution of the species between the slope-aspect also reflected differentiation in the leaf functional traits and structure of oak communities. In contrast with the more mesic north-facing slopes, we detected the oaks from south-facing slopes had trees with bigger leaves with a higher specific leaf area and lower Huber value. Large leaves with a higher specific leaf area have a higher photosynthetic capacity and a fast retribution of the carbon invested in their construction (Wright 2004). In addition, the Huber value is an integrative trait that relates the stem capacity for water supply to the leaves where it is lost during gas exchange, and lower values are indicative of a higher capacity of water transport to the leaves (Mencuccini et al. 2019; Rosas et al. 2019). These three traits are associated with an acquisitive strategy (Wright 2004), which is counterintuitive because of the more stressful conditions experienced at this slope-aspect. However, we also observed that oaks from south-facing slopes lose their leaves both during winter and spring with the onset of the dry season. Evidence shows that deciduous species have traits associated with a higher capacity for carbon gain to maximize resource exploitation when water is available and lose their leaves to avoid dry season and prevent xylem hydraulic failure (Méndez-Alonso et al. 2012; Pineda-García et al. 2013). In addition, it has been observed that deciduous species with an acquisitive strategy are restricted to areas with a lower water supply and more seasonal precipitation, and located on south-facing slopes (Warren II 2008; Méndez-Alonso et al. 2013; Aguilar-Romero et al. 2016; Del Toro et al. 2016), which is in line with our findings. Finally, we observed that oaks from plots at south-facing slopes accumulate less biomass than

north-facing slopes, which contrasts with the finding that at these slopes' oaks had an acquisitive strategy, suggesting that the south-facing slope has a more restrictive growth season.

Conclusion

Our work shows that in this semiarid region where a high number of oak species inhabit, the topography features and its associated environmental conditions sort the distribution of oaks. Furthermore, the contrasting distribution also reflects differences in the strategy of oaks to acquire resources and the leaf phenology between slope-aspects. Oaks from south-facing slopes were more avoidant to drought but had leaves with a higher capacity for carbon gain than oaks from north-facing slopes. This suggests that the strategy to cope with drought is a key feature in defining the oaks communities between slope-aspect.

References

- Aguilar-Romero R, Pineda-García F, Paz H, González-Rodríguez A, Oyama K. 2017. Differentiation in the water-use strategies among oak species from central Mexico. *Tree Physiology* 37:915-25. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx033>
- Arenas-Navarro M, García-Oliva F, Torres-Miranda A, Telléz-Valdés O, Oyama K. 2020. Environmental filters determine the distribution of tree species in a threatened biodiversity hotspot in western Mexico. *Botanical Sciences* 98:219-237. <https://doi.org/10.17129/botsoci.2398>
- Armesto J, Martínez J. 1978. Relations between vegetation structure and slope aspect in the Mediterranean region of Chile. *Journal of Ecology* 66:881-889. <https://doi.org/10.2307/2259301>
- Bazzaz FA. 1996. *Plants in changing environments: linking physiological, population and community ecology*. Cambridge University Press.
- Bergamin RS, Muller S, Mello SP. 2012. Indicator species and floristic patterns in different forest formations in southern Atlantic rainforest of Brazil. *Community Ecology* 13: 162-170. <https://doi.org/10.1556/comec.13.2012.2.5>
- Bennie J, Huntley B, Wiltshire A, Hill MO y Baxter R. 2008. Slope, aspect and climate: spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland. *Ecological Modelling* 216: 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.04.010>
- Bohlman SA. 2010. Landscape patterns and environmental controls of deciduousness in forest of central Panama. *Global Ecology and Biogeography* 19:376-385. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00518.x>
- Burnett B, Meyer G, McFaden L. 2008. Aspect-related microclimatic influences on slope forms and processes, northeastern Arizona. *Journal of Geophysical Research* 113: F03002. <https://doi.org/10.1029/2007JF000789>
- Cabrera-Rodríguez A, Flores-Cano J. A, Martínez-Montoya J. F, Palacio-Núñez J, Olmos-Oropeza Genaro, Torres-Aquino M. 2018. Distribution of *Quercus* species in the Altiplano Potosino-Zacatecano. *Revista Chapingo Serie Zonas Aridas*. 18, 21-29. doi: 10.5154/r.rchsza.2018.01.002
- Cantlon JE 1953. Vegetation and microclimates on north and south slopes of Cushtunk Mountain, New Jersey. *Ecology Monograph* 23:241-270. <https://doi.org/10.2307/1943593>

- Casas R, González S, Tena JA. 1995. Estructura y tendencias sucesionales en vegetación de clima semi-seco en Durango, México. *Madroño* 42:501-515.
- Cavender-Bares J, Holbrook NM. 2001. Hydraulic properties and freezing-induced cavitation in sympatric evergreen and deciduous oaks with contrasting habitats. *Plant, Cell and Environment* 24: 1243-1256. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00797.x>
- Cavender-Bares J, Kitajima K, Bazzaz F. 2004. Multiple Trait Associations in Relation to Habitat Differentiation Among 17 Floridian Oak Species. *Ecological Monographs* 74:635-62. <https://doi.org/10.1890/03-4007>
- Cavender-Bares J. 2016. Diversity, distribution, and ecosystem services of the North American Oaks. *International Oaks* 27:37-48.
- Clarke, K.R. 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal Ecology* 18; 117-143.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. 2017. Red de estaciones climatológicas. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional. (<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>).
- CONABIO. 2024. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. (<http://geoportal.conabio.gob.mx/>)
- Cuervo-Robayo AP, Téllez-Valdés O, Gómez-Albores MA, Venegas-Barrera CS, Manjarrez J, Martínez-Meyer E. 2014. An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology* 34:2427-2437. <https://doi.org/10.1002/joc.3848>
- De Cáseres M, Legendre P. 2009. Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference. *Ecology* 90:3566-3574. <https://doi.org/10.1890/08-1823.1>
- Del Toro FJ, Hinojosa-Corona A Kretschmar TG. 2016. A comparative study of NDVI values between North- and South-facing slopes in a semiarid Mountainous region. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9: 5350-5336. [10.1109/JSTARS.2016.2618393](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2618393)
- Dufrene M, Legendre P. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* 67:345-366. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0345:SAAIST\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0345:SAAIST]2.0.CO;2)

- ESRI. 2006. ArcGIS 10.5, Environmental Systems Research Institute: Redlands, CA, USA.
- Lembrechts et al. 2022. Global maps of soil temperature. *Global Change Biology* 28:3110-3144. <https://doi.org/10.1111/gcb.16060>
- Fallon B, Cavender-Bares J. 2018. Leaf-Level Trade-Offs between Drought Avoidance and Desiccation Recovery Drive Elevation Stratification in Arid Oaks. *Ecosphere* 9:e02149. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2149>
- Gallardo-Cruz J, Pérez-García E, Meave JA. 2009. B-diversity and vegetation structure as influenced by slope aspect and altitude in a seasonally dry tropical landscape. *Landscape Ecology* 24:473-482. 10.1007/s10980-009-9332-1. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9332-1>
- Garnier E, Cortez J, Billes G, Navas M, Roumet C, Debussche M, Laurent G, Blanchard A, Aubry D, Bellmann A, Neill C y Toussaint J. 2004. Plant functional markers capture ecosystems properties during secondary succession. *Ecology* 85:2630-2637. <https://doi.org/10.1890/03-0799>
- Hipp AL, Manos P, González-Rodríguez A, Hahn M, Kaproth M, McVay J, Valencia S, Cavender-Bares J. 2018. Sympatric parallel diversification of major clades in the Americas and the origins of Mexican species diversity. *New Phytologist* 217:439-452. <https://doi.org/10.1111/nph.14773>
- Hipp AL, Manos PS, Hahn M, Avishai M, Bodénès C, Cavender-Bares J, Crawl A, Deng M, Denk T, Fitz-Gibbon S, Gailing O, González-Elizondo MS, González-Rodríguez A, Grimm G, Jiang X-L, Kremer A, Lesur I, McVay JD, Plomion C, Rodríguez-Correa H, Schulze E-D, Simeone M, Sork V y Valencia-Avalos S. 2020. Genomic Landscape of the Global Oak Phylogeny. *New Phytologist* 226:1198-1212. <https://doi.org/10.1111/nph.16162>
- Holland PG, Steyn DG. 1975. Vegetational responses to latitudinal variations in slope angle and aspect. *Journal of Biogeography* 2:179-183. <https://doi.org/10.2307/3037989>
- Huechacona-Ruiz A, Dupuy JM, Schwartz N, Powers J, Reyes-García C, Tun-Dzul F, Hernández-Stefanoni J. 2020. Mapping tree species deciduousness of tropical dry forests combining reflectance, spectral unmixing and texture data from high-resolution imagery. *Forests*. 11:1234. <https://doi.org/10.3390/f11111234>
- Kappelle M. 2006. Ecology and conservation of neotropical montane oak forests. Springer Science.

- Kaproth MA, Fredericksen BW, González-Rodríguez A, Hipp A, Cavender-Bares J. 2023. Drought response strategies are coupled with leaf habit in 35 evergreen and deciduous oak (*Quercus*) species across a climatic gradient in America. *New Phytologist* 239:888-904. <https://doi.org/10.1111/nph.19019>
- Lavorel S, Grigulis K, McIntyre S, Williams N, Garden D, Dorrough J, Berman S, Quetier F, Thebault A, Bonis A. 2008. Assessing functional diversity in the field -methodology matters! *Functional Ecology* 22:134-147. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01339.x>
- Martin MP, Peters CM, Asbjornsen H, Ashton M. 2021. Diversity and niche differentiation of a mixed pine-oak forest of Sierra Norte, Oaxaca, Mexico. *Ecosphere* 12:e03475. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3475>
- Martínez-González F, Sosa-Pérez F, Ortiz-Medel J. 2010. Behavior of soil moisture with different plant covers in the La Esperanza watershed. *Tecnologías y Ciencias del Agua* 1:89-103.
- Martínez-Cruz J, Téllez-Valdés O. 2004. Listado florístico de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 74:31-49. <https://doi.org/10.17129/botsci.1685>
- Martínez-Cruz J, Téllez-Valdés O y Ibarra-Manríquez G. 2009. Oak forest structure de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80:145-146.
- Mencuccini M, Rosas T, Rowland L, Choat B, Cornelissen H, Jansen S, Kramer K, Lapenis A, Manzoni S, Niinemets U, Reich P, Schrod F, Soudzilovskaia N, Wright I, Martínez-Villalta J. 2019. Leaf economics and plant hydraulics drive: wood area ratios. *New Phytologist* 224:1544-1556. <https://doi.org/10.1111/nph.15998>
- Méndez-Alonso R, Paz H, Cruz R, Rosell J, Olson M. 2012. Coordinated evolution of leaf and stem economics in tropical dry forest trees. *Ecology* 93: 2397-2406. <https://doi.org/10.1890/11-1213.1>
- Méndez-Alonso R, Pineda-García F, Paz H, Rosell J, Olson M. 2013. Leaf phenology is associated with soil water availability and xylem traits in a tropical dry forest. *Trees* 27: 745-754. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0829-x>
- Méndez-Toribio M, Meave J, Zermeño-Hernández I and Ibarra-Manríquez G. 2016. Effects of slope aspect and topographic position on environmental variables, disturbance regime and tree community attributes in a seasonal tropical dry forest. *Journal of Vegetation Science* 27: 1094-1103. <https://doi.org/10.1111/jvs.12455>

- Pérez-Harguindeguy et al. 2013. New handbook for standardized measurements of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* 61:167-234. <https://doi.org/10.1071/BT12225>
- Pineda-Garcia F, Paz H, Meizer F.C. 2013. Drought resistance in early and late successional species from tropical dry forest: the interplay between xylem resistance to embolism, sapwood water storage and leaf shedding. *Plant, Cell and Environment* 36:405-418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02582.x>
- Ramírez-Valiente J, Cavender-Bares J. 2017. Evolutionary trade-offs between drought resistance mechanisms across precipitation gradients in a seasonally dry tropical oak (*Quercus oleoides*). *Tree Physiology* 37:889-901. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx040>
- Reich P. 2014. The world-wide “fast-slow” plant economic spectrum: a trait manifesto. *Journal of Ecology* 102:275-301. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12211>
- Ricklefs RE 1987. Community diversity: relative roles of local and regional processes. *Science* 235:167-171. DOI: 10.1126/science.235.4785.167
- Rodríguez-Gómez F, Oyama K, Ochoa-Orozco M, Mendoza-Cuenca L, Gaytán-Legaria R, González-Rodríguez A. 2018. Phylogeography and climate-associated morphological variation in the endemic white oak *Quercus deserticola* (Fagaceae) along Trans-Mexican Volcanic Belt. *Botany* 96:121-133. <https://doi.org/10.1139/cjb-2017-0116>
- Rodríguez-Correa H, Oyama K, MacGregor-Fors I, González-Rodríguez A. 2015. How are oaks distributed in the neotropics? A perspective from species turnover, areas of endemism, and climatic niches. *International Journal of Plant Sciences* 176:222–231. <https://doi.org/10.1086/679904>
- Rouse, J.W. Hass, R.H. Scheel, J.A. Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1: 48-62. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Rosas T, Mencuccini M, Barba J, Cochard H, Sura-Mas S, Martínez-Villalta J. 2019. Adjustments and coordination of hydraulics, leaf and stem traits along a water availability gradient. *New Phytologist* 223:632-646. <https://doi.org/10.1111/nph.15684>
- Singh S. 2018. Understanding the role of slope aspect in shaping the vegetation attributes and soil properties in Montane ecosystems. *Tropical Ecology* 59; 417-430.

- Sternberg M, Shoshany M. 2001. Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: Comparison of a semiarid and an arid site in Israel. *Ecological Research* 16:335-345. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2001.00393.x>
- Sundqvist MK, Sanders NJ y Wardle DA. 2013. Community and ecosystem responses to elevational gradients: processes, mechanisms, and insights for global change. *Annual Review in Ecology, Evolution and Systematics* 44; 261-280. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135750>.
- Torres-Miranda A, Luna-Vega I, Oyama K. 2013. New approaches to the biogeography and areas of endemism of red oaks (*Quercus* L., Section Lobatae). *Systematic Biology* 62:555–573. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syt021>
- Trabucco A, Zomer R. 2019. Global High-Resolution Soil Water Balance. Figshare. Dataset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7707605.v3>
- Uribe-Salas D, Saénz-Romero C, González-Rodríguez A, Téllez-Valdéz O, Oyama K. 2008. Foliar morphological variation in the White oak *Quercus rugosa* Neé (Fagaceae) along a latitudinal gradient in Mexico: Potential implications for management and conservation. *Forest Ecology and Management*. 256: 2121-2126. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.08.002>
- Vaca-Sánchez M, González-Rodríguez A, Maldonado-López Y, Oyama K, Lopes de Faria M, Fagundes M, Cuevas-Reyes P. 2021. Genetic and functional leaf variability of *Quercus laurina* along an oak diversity gradient. *European Journal of Forest Research* 140:1211-1225. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01401-z>
- Valencia S. 2004. Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 75:33-53. <https://doi.org/10.17129/botsci.1692>
- Volaire, Florence. 2014. A unified framework of plant adaptive strategies to drought Crossing scales and disciplines. *Global Change Biology* 24(7), 2929-2938. <https://doi.org/10.1111/gcb.14062>
- Warren II RJ. 2008. Mechanisms driving understory evergreen herb distribution across slope aspects: as derived from landscape position. *Plant Ecology* 198:297-308. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9406-1>
- Willis CG, Halina M, Lehman C Reich PB, Keen A, McCarthy S y Cavender-Bares J. 2010. Phylogenetic community structure in Minnesota oak savanna is influenced by spatial extent

and environmental variation. *Ecography* 33: 567-577. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05975.x>

Wright I et al. 2004. The worldwide leaf economic spectrum. *Nature* 428:821-827.
<https://doi.org/10.1038/nature02403>.

Yang J, El-Kassaby Y, Guan W. 2020. The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountain dry valley Southwest China. *Scientific Reports* 10: 16465.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-73496-0>

Zeng X, Zhang W, Song Y, Shen H. 2014. Slope aspect and slope position have effects on plant diversity and spatial distribution in the hilly region of Mount Taihang, North China. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 12:391-397.

Capítulo 2.

Almacenes de carbono en bosques de *Quercus* y su relación con el ambiente en la Sierra de Santa Rosa.

Resumen

La integración de la información acerca de la distribución de los almacenes de carbono y la afinidad en la composición de especies de *Quercus* (encinos), entre las orientaciones norte y sur, es fundamental para entender cómo la estructura y la composición de especies puede maximizar los almacenes de carbono en los ecosistemas semiáridos del centro de México. En este estudio se evaluaron tres sistemas de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa en bosques de encinos manejados para la elaboración de carbón vegetal encontrando diferencias significativas entre los tres sistemas. Nosotros mapeamos la densidad de carbono mediante datos de campo y métricas de textura mediante la modelación con random forest. Los modelos de validación de los mapas obtenidos utilizando datos independientes mostraron coeficientes de determinación de (R^2) 0.78, RMSE = 34.8 Ton/ha y % RMSE = 38 % para la biomasa en pie. Como resultado, el mapa de densidad de carbono mostró un rango de 40 a 132 Ton/ha y un mapa que muestra el porcentaje de coeficiente de variación del 20 al 80%. Finalmente, se identificó que existe una diferencia en la distribución de la biomasa por orientación de ladera siendo los sitios con orientación norte los que presentan mayor biomasa y menor coeficiente de variación promedio a comparación con los sitios con orientación sur. Nuestros resultados son importantes porque combinan la densidad de carbono con la estructura y composición de las comunidades de encinos e identifica áreas críticas (laderas norte), para mantener los almacenes de carbono y la conservación en la biodiversidad de especies.

Palabras clave: modelación de almacenes de carbono, encinos, orientaciones, estrategias funcionales y fenología.

Introducción

Los bosques templados son un ecosistema clave para el bienestar de la humanidad al brindar múltiples servicios ecosistémicos: por ejemplo, servicios de provisión como los productos obtenidos de manera directa para su aprovechamiento (alimentos y leña para consumo), servicios culturales relacionados con actividades de recreación o servicios de regulación que incluyen procesos ecosistémicos como el secuestro y almacén de carbono (De Groot et al. 2010; Kumar, 2010; Gil-Pelegrín et al. 2017). A nivel mundial, se estima que las reservas de carbono en bosques son de alrededor de 860 Pg de C, de las cuales la biomasa viva representa el 42% de C (360 Pg de C), los bosques templados almacenan el 32% de C (272 Pg de C) (Pan et al. 2011). Los bosques templados abarcan aproximadamente 10 millones de km² lo que representa alrededor del 25% de la cobertura forestal total mundial (FAO, 2011; Pan et al. 2011; Galicia y Zarco-Arista, 2014; Cavender-Bares, 2016). Se ha estimado que los almacenes de carbono de los bosques templados y boreales de latitudes norte abarcan cerca de 80 Pg C, de manera puntual, se estima que los bosques de latifoliados almacenan 40 Pg de C (Thurner et al. 2013). En un estudio previo que utiliza metodologías similares a este trabajo se ha estimado un rango de 75 a 150 Mg/ha para bosques latifoliados en el mediterráneo (Vatandaşlar y Abdikan, 2022).

Particularmente para México, uno de los ecosistemas con mayor necesidad de generar información son los bosques templados de pinos y encinos ya que abarcan alrededor de 32 millones de ha, correspondientes al 16% de la cobertura vegetal nacional (Challenger y Soberon, 2008). Se han registrado alrededor de 700 especies de plantas y más de la mitad de las especies de pino y encino registradas se encuentran en estos ecosistemas (Rzedowsky, 1991; Challenger y Soberon, 2008; Cavender-Bares, 2016). A pesar de la importancia que tienen los bosques templados, se estima que se ha perdido el 26% de su cobertura original, pasando de 43 millones de ha a 32 millones de ha (INEGI, 2014), resultado de la expansión de la frontera agrícola y el aprovechamiento extractivo de los bosques (Laurence, 2010). A nivel nacional, se ha autorizado el manejo forestal con fines extractivos de 6.2 millones de ha, que se traducen en aproximadamente 152.7 millones de m³ de madera aprovechados (INF, CONAFOR 2021). Finalmente, dadas estas actividades de manejo, de los bosques de encino a nivel nacional se estima que quedan 10 millones de ha, de las cuales un tercio se consideran vegetación secundaria (INEGI, 2005; Challenger y Soberón, 2008). Por lo que resulta de vital importancia generar información de los almacenes de carbono remanentes de la cobertura vegetal de los bosques de encinos.

En la actualidad, la estimación de biomasa ha sido ampliamente abordada para el aprovechamiento forestal, el desarrollo de políticas públicas o de investigación (Mendoza-Ponce y Galicia-Sarmiento, 2010), siendo la metodología más utilizada el uso de ecuaciones alométricas. Esto consiste en modelos matemáticos contruidos para la cuantificación de la biomasa en pie a partir de muestreos destructivos de individuos de diferentes diámetros a la altura del pecho (DAP), medidos *in situ* (Picard, 2012). Esta metodología es muy útil para conocer el estado general de los almacenes de carbono a diferentes escalas: local, paisaje o regional. Para tener una mejor aproximación a las estimaciones se ha sugerido utilizar ecuaciones alométricas locales evitando sesgos en la variación ambiental que puede tener fuertes efectos en el desarrollo de la vegetación (Cortés-Sánchez et al. 2019)

En el caso puntual de los ecosistemas templados de México, los bosques de *Quercus* (encinos), tienen una dinámica particular de manejo. Tal es el caso de la sobreexplotación de los bosques para la extracción de leña y la elaboración de carbón vegetal *in situ* (Aguilar-Romero et al. 2012). Este manejo en particular tiene mucha influencia en el desarrollo de la vegetación ya que una vez que se explota el individuo del tocón remanente surgen rebrotes a partir de los meristemos epicórmicos ubicados en el tocón remanente, lo que da pie a la regeneración vegetativa (Bellingham y Sparrow, 2000). El desarrollo de los rebrotes que surgen después del disturbio, tiene una arquitectura muy diferente a la regeneración sexual o regeneración por semilla de un individuo. Por lo que se considera muy relevante tomar en consideración que para evaluar la estimación de biomasa se utilicen modelos alométricos que se hayan generado para rebrotes o individuos de regeneración vegetativa. Con esto se pretende minimizar el nivel de sesgo en las estimaciones (Cortés-Sánchez et al. 2019). Sin embargo, actualmente en México es muy poca la información con la que se cuenta de modelos alométricos que consideren este tipo de manejo o de regeneración vegetativa (García-Rojas et al. 2015) y por lo tanto, existe una necesidad actual de generar información con mayor precisión para robustecer las estimaciones de biomasa en bosques manejados, ya que en políticas públicas como los pagos de servicios ambientales se requiere conocer con gran detalle la dinámica de los almacenes de carbono a nivel local (Mendoza-Ponce y Galicia-Sarmiento, 2010).

Por otro lado, el avance tecnológico ha permitido implementar nuevas metodologías con enfoques que combinan la información de campo, los modelos alométricos (ecuaciones alométricas) y la percepción remota. Con estas combinaciones metodológicas es posible realizar estimaciones de biomasa robustas a diferentes escalas principalmente de paisaje y regionales. Estas metodologías, reducen los costos logísticos del trabajo de campo (Hernández-Stefanoni et al. 2020). Además, las nuevas propuestas metodológicas toman en consideración la combinación de información de campo, ecuaciones alométricas e imágenes de satélites ópticos, radares o LiDAR (Kellndorfer et al., 2010, Hernández-Stefanoni et al. 2020). Lo cual, permite obtener información útil para la caracterización de la estructura de la vegetación a diferentes escalas (Anderson et al. 2006; Baccini et al. 2008, Kellndorfer et al. 2010; Rodriguez-Veiga et al. 2016; Urbazaez et al. 2018), mejorando la prospección de la estimación de la biomasa, lo que brinda información útil para los tomadores de decisiones con fines de aprovechamiento, conservación o restauración de ecosistemas.

En este estudio, se analizó la estructura de la comunidad de encinos en escala de paisaje, en una región semiárida en el centro de México. Se estudiaron 66 parcelas distribuidas en orientaciones norte y sur de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato. El objetivo de este estudio fue probar si las afinidades en la distribución de las especies entre orientaciones norte y sur determina los almacenes de biomasa. Particularmente, los objetivos fueron: i) Comparar modelos alométricos para la estimación de biomasa, ii) elaboración de los modelos de densidad de carbono y iii) comparar si la densidad de carbono difiere entre orientaciones norte y sur.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La sierra de Santa Rosa de Lima (SSRL), se encuentra entre los municipios de Guanajuato y Dolores Hidalgo en el estado de Guanajuato ($20^{\circ}45' - 21^{\circ}25' \text{ N}$ and $100^{\circ}53' - 101^{\circ}25' \text{ O}$) (Figura 1), presenta un área aproximada de 29,2000 ha. Los rangos de temperatura anual van de los 17.7 a 20.11 °C, con una media de 18.76°C, mientras que la precipitación anual es de 660.11 mm/año con la temporada de lluvias presentándose de mayo a octubre, siendo julio el mes con mayor precipitación. El clima predominante es C(w2) y C(w1)(w), templado sub-húmedo con una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C y precipitación media anual de 200 mm a 1800 mm

(INEGI, 2008). En el área se han registrado tres tipos de suelo luvisol, litosol y faozem (CONABIO, 2024), se consideran suelos de profundidad muy somera a profundidad media (CONAFOR, 2022). La vegetación dominante son los bosques de encinos (*Quercus sp.*) en donde se han registrado cerca de 12 especies de encinos (López-Mendoza *en prep*). Así como asociaciones con madroños (*Arbutus sp.*), pingüica (*Arctostaphylos pungens*), jarilla (*Senecios sp.*), aile (*Alnus sp.*), y uña de gato (*Mimosa sp.*) (Tabla 1) (IEEG, 1998, 2014; Martínez-Cruz et al. 2009). Los bosques de encino en la Sierra de Santa Rosa, han estado bajo manejo de manera histórica desde la época virreinal, por lo tanto, la composición y estructura que podemos encontrar ha sido producto de la actividad antrópica a través de la historia (Quintanilla-Padrón et al. 2017; Cortés-Sánchez et al. 2019).

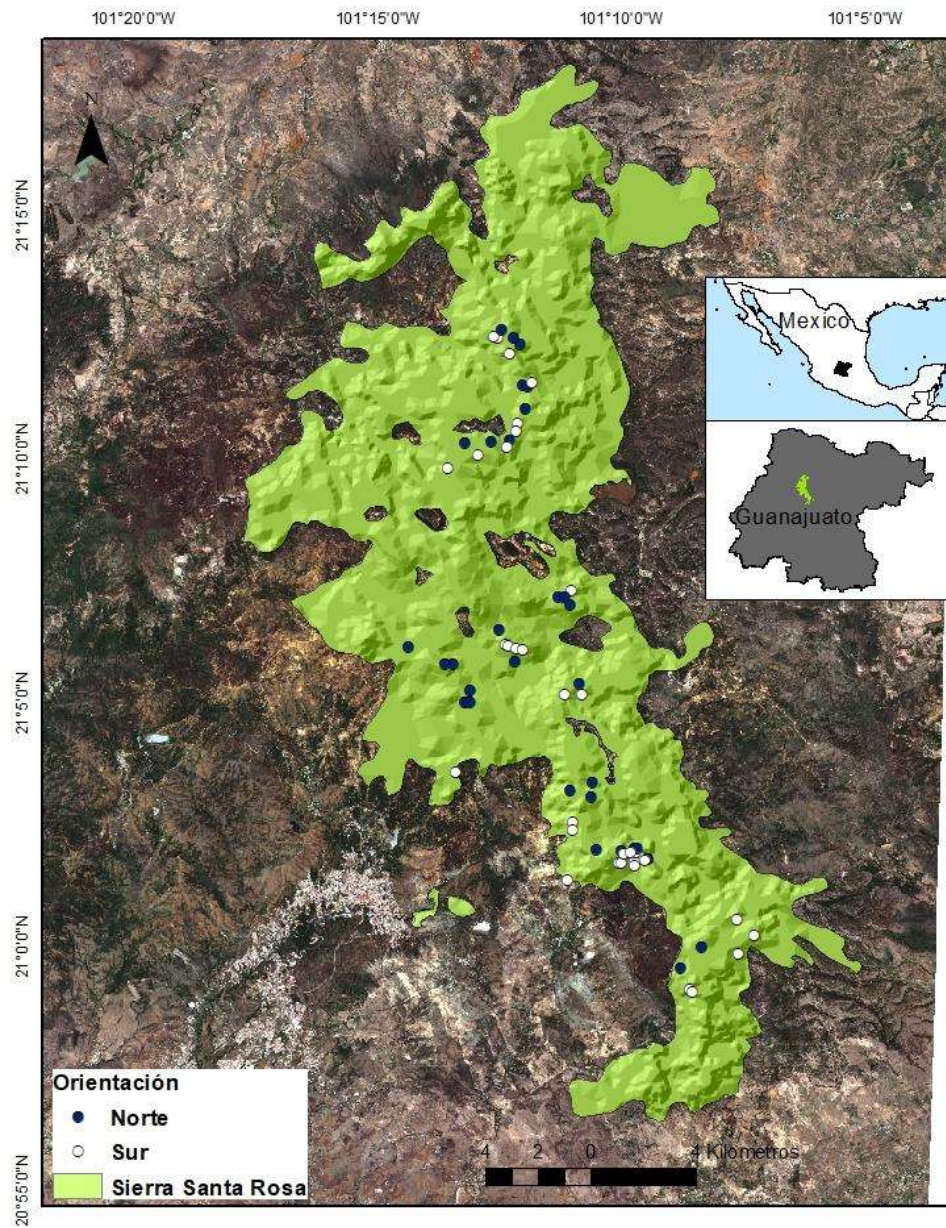


Figura 1. Localización de la Sierra de Santa Rosa de Lima, Guanajuato y la distribución de las 66 parcelas en los bosques de encinos.

Selección de parcelas

La selección de parcelas se llevó a cabo utilizando un sistema de información geográfica (SIG), en el cual se generaron alrededor de 2,000 puntos al azar, distribuidos por toda el área de la Sierra de Santa Rosa. Posteriormente, se filtraron los puntos que no cumplieran con los siguientes criterios: 1) Rango altitudinal de 2500 a 2700 msnm, 2) Laderas con orientación norte y sur, 3) Pendiente = 30° - 45° y 4) Sitios alejados de carreteras. En total, se seleccionaron 66 parcelas que cumplieron con los criterios mencionados anteriormente y cuya distribución representó el área de estudio (32 parcelas con orientación norte y 34 parcelas con orientación sur) (Fallon y Cavender-Bares, 2018).

Caracterización de la vegetación

La caracterización de la vegetación se llevó a cabo durante el año 2021, utilizando el método Gentry (Gentry, 1991). Se establecieron parcelas de 1000 m² (0.1 ha), ya que este tamaño de parcela ha demostrado tener una fuerte influencia en la precisión de la estimación de biomasa (Hernández-Stefanoni et al. 2018). En cada parcela se tomaron datos topográficos de altitud, orientación, y pendiente. También se registraron todos los individuos de encinos con diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 5 cm, se identificaron a nivel de especie y se calculó la altura promedio por especie.

Cálculo de la biomasa y comparación de Modelos alométricos.

La biomasa en cada parcela fue calculada en unidades estándar (Mg ha⁻¹) utilizando ecuaciones alométricas locales y regionales, las cuales se desarrollaron para vegetación de bosques de *Quercus* y en particular para rebrotes de encinos (Tabla 1). Las ecuaciones alométricas que toman en consideración la densidad de la madera fueron obtenidas de estudios previos (Aguilar-Romero et al. 2012; Cortés-Sánchez, 2019). En cada parcela se estimó la biomasa para cada individuo y se cuantificó la biomasa total por parcela utilizando los modelos reportados en la literatura.

Se realizó una comparación entre las estimaciones de biomasa mediante los sistemas de ecuaciones alométricas reportadas en la literatura para evaluar el sesgo (Tabla 1). La comparación de los

sistemas de ecuaciones se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA). Posteriormente, una prueba post hoc Tukey, fue probada con un nivel de significancia ($\alpha=0.05$), para probar las diferencias en la sobreestimación y subestimación de biomasa entre los tres modelos reportados en la literatura.

Tabla 1. Ecuaciones alométricas para rebrotes de encinos usadas para estimar la biomasa en los bosques de *Quercus* en la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México.

	Ecuación	Tipo de vegetación	Forma de crecimiento	Diámetro (cm)	Sistema de ecuación
Aguilar-Romero et al., 2012	$0.0342(\text{DAP})^{2.759}$	Encino	Rebrotes	≥ 3.8 a 26.6	Sistema 1
Cortés-Sanchez et al., 2019	$0.074153((\text{DAP})^{2.423372}(\text{H})^{0.174426})$	Encino	Rebrotes	≥ 4.8 a 48.6	Sistema 2
Cortés-Sanchez et al., 2019	$0.057707((\text{P})(\text{DAP}^2)(\text{H}))^{0.989101}$	Encino	Rebrotes	≥ 4.8 a 48.6	Sistema 3

Donde: **DAP** es el diámetro a la altura de pecho (cm), **H** es la altura promedio (m) de las especies muestreadas y **P**: Densidad de la madera por especie.

Obtención y procesamiento de datos SAR

Los análisis de estimación de biomasa aérea utilizando herramienta de percepción remota suelen estar condicionados al tipo de sensores implementados para el análisis. La herramienta más común es el uso de sensores pasivos (satélites ópticos) para obtener valores de reflectancia o índices de vegetación, sin embargo, su aplicación depende del porcentaje de nubosidad en el terreno o la densidad de la vegetación ya que pueden saturarse y limitar la estimación (Lu et al. 2012). Por lo que, utilizar datos de radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) que pertenecen a la banda L como son PALSAR-2 se utilizan de manera eficaz para la estimación de biomasa a escala regional y de paisaje. Estos radares cuentan con la capacidad de penetrar nubes y el dosel de la vegetación siendo útiles para la estimación de la biomasa aérea en zonas que suelen presentar alta nubosidad y alta densidad de dosel (Hernández-Stefanoni et al. 2020).

Para el presente trabajo, se obtuvo una imagen ALOS-2 PALSAR-2 (Advanced Land Observing Satellite Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar), con una resolución de 25 m y una polarización dual (HH y HV), cubriendo el área de estudio. La imagen fue adquirida de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (en inglés: Japanese Aerospace Exploration Agency [JAXA]) (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/palsar_fnf/registration.htm) en el año 2021. La imagen SAR para el área de estudio fue preprocesada por JAXA usando la metodología de Shimada y Ohtaki (2010). Este proceso incluyó la ortorectificación, corrección de pendiente y la calibración radiométrica. Las señales de radar ALOS PALSAR fueron convertidas de números digitales (DN) a coeficientes de retrodispersión (γ°) utilizando la ecuación (1). Finalmente, se aplicó el filtro Lee a cada pixel de 3x3, para eliminar el ruido en las imágenes (Hernández-Stefanoni et al. 2021) y se reproyectaron a la proyección Cónica Conforme de Lambert (CCL) y el Datum ITRF2008.

$$\gamma^\circ = 10 \log_{10}(DN2) - 83.0 \quad (1)$$

Se calculó el índice diferencial de retrodispersión normalizada (NDBI), mediante las bandas HH y HV, utilizando la ecuación (2), para evaluar las contribuciones diferenciales. Esto se realiza con la finalidad de distinguir áreas con diferente estructura del bosque y mejora la superficie para la estimación de biomasa (Hernández-Stefanoni et al. 2021).

$$NDBI = \frac{HH - HV}{HH + HV} \quad (2)$$

Se obtuvo la variabilidad de retrodispersión entre píxeles mediante las métricas de textura de las imágenes SAR (Haralick et al. 1973, Hernández-Stefanoni et al. 2021). Las métricas de textura fueron utilizadas para examinar la variabilidad en los valores de los píxeles, los cuales pueden ser utilizados para caracterizar la estructura vertical de las copas y podría ayudar en la estimación de biomasa (Fischer et al. 2019). Como resultado del procesamiento de la imagen ALOS2-PALSAR2, se obtuvieron métricas de textura de segundo orden (media, varianza, entropía, segundo momento angular, disimilitud, correlación, homogeneidad y contraste) mediante la aplicación de una matriz de coocurrencia de grises (GLMC), para las dos polarizaciones de retrodispersión (HH, HV) y el índice NDBI, utilizando la librería GMLC (Zvoleff, 2022), en el software R (R Core Team, 2022). Las métricas de textura de segundo orden nos permiten identificar zonas homogéneas cuando los valores de media, correlación y homogeneidad son altos. Además, identificamos las zonas heterogéneas cuando los valores en las métricas de varianza, entropía, segundo momento angular, disimilitud y contraste son altos (Peña-Lara et al., 2022). Las métricas de textura se calcularon en cuatro direcciones (0° , 45° , 90° , 135°) y se promediaron. Las unidades de área en cada parcela, se estandarizaron a hectáreas y se utilizó un tamaño de pixel de 3×3 (0.56 ha), el cual es cercano a las unidades de cada parcela.

Modelación y mapeo de la biomasa

Se utilizó un conjunto de variables explicativas obtenidas del procesamiento de la imagen ALOS2-PALSAR2. Los modelos fueron construidos utilizando las métricas de textura. Se desarrolló un modelo de regresión Random Forest, para estimar la distribución espacial de la biomasa aérea. Los modelos se llevaron a cabo utilizando el paquete ModelMap (versión 3.4.03) en el software R (Freeman et al., 2009).

Para el desarrollo de los modelos, se realizó un remuestreo aleatorio de las parcelas de la siguiente manera: 1) el 70% de los datos (44 parcelas) se usaron para la calibración del modelo, 2) el 30% restante (20 parcelas) se usaron para validar el modelo. Posteriormente, se estimaron correlaciones de Pearson entre pares de variables para evaluar la colinealidad utilizando el software R y el paquete stats, (versión 4.2.0, 2022). Para los casos en que el coeficiente de determinación R^2 fue ≥ 0.9 entre los pares de variables, se descartaban aquellas variables con menos significado

biológico. Las variables utilizadas para el desarrollo de los modelos fueron: HH, NDBI, HH mean, HV disimilaridad y HV entropía.

Este procedimiento evalúa el grado de contribución de cada variable y se compara con los datos del modelo generado con datos independientes. La significancia del modelo se determina mediante el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el porcentaje del error cuadrático medio (%RMSE). El porcentaje del error cuadrático medios (%RMSE), representa el porcentaje de error relativo a la media de los valores predichos con los datos de validación. Todos los análisis anteriormente descritos fueron realizados en el ambiente de programación de R (R Core Team 2024)

Mapa de densidad de carbono y de incertidumbre

Se generaron los mapas de distribución espacial para la densidad de carbono, así como el mapa que representa el nivel de incertidumbre del modelo (coeficiente de variación). Finalmente, se calculó el almacén de carbono por individuo multiplicando por el factor de conversión considerado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático IIPCC (2001). El valor total se obtuvo sumando todos los individuos por parcela.

Análisis estadísticos

Se evaluó la diferencia en la densidad de carbono entre orientaciones de ladera y el grado de incertidumbre que presentan las parcelas correspondientes a orientaciones de ladera norte y sur a partir de análisis de varianza de una vía (ANOVA).

Resultados

Comparación entre los sistemas alométricos

El análisis de varianza ANOVA muestra diferencias estadísticas ($F= 4.22$; $p= 0.016$), entre los sistemas alométricos reportados en la literatura. Particularmente, el sistema 1 que considera únicamente valores de diámetro a la altura de pecho (DAP) muestra una menor estimación de biomasa aérea (una media de 91.22 ± 7 Mg/ha). Por otro lado, los sistemas 2 y 3 que consideran otras variables como: densidad de la madera (P) y altura (h), tienden a una mayor estimación de biomasa aérea (110.9 ± 7.75 Ton/ha y 129.77 ± 12.44 Mg/ha, respectivamente) (Figura 2).

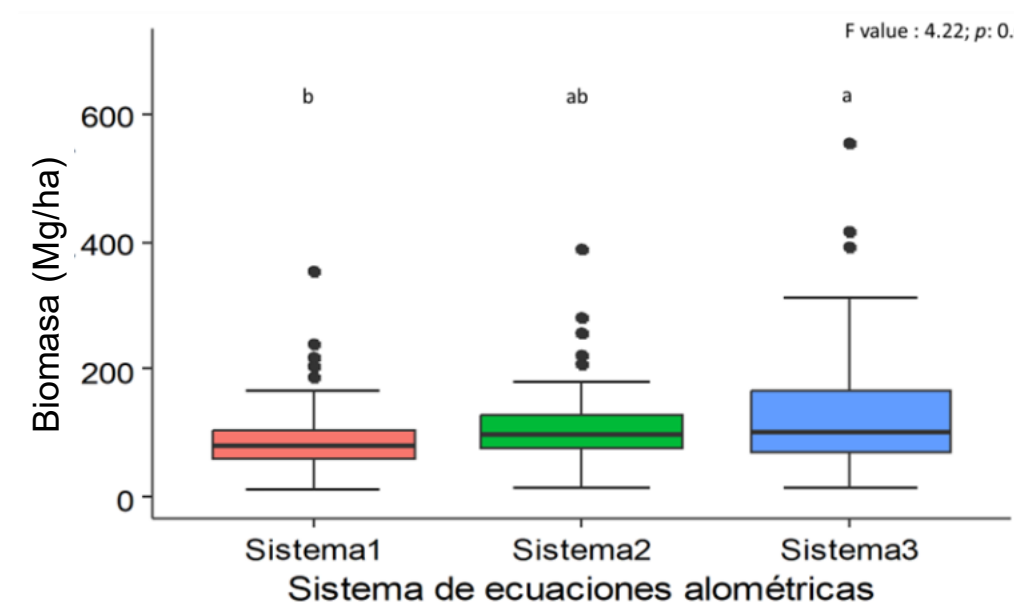


Figura 2. Comparación entre la media de los valores de estimación de biomasa aérea calculados con los tres sistemas de ecuaciones.

Modelo de estimación de biomasa aérea

En general, el modelo de estimación de la densidad de biomasa aérea desarrollado con los datos de calibración tuvo un porcentaje alto de variación explicada ($R^2 = 0.78$). La validación del modelo muestra un buen ajuste para la estimación de biomasa aérea. Además, se obtuvieron los valores de los parámetros de la raíz del error cuadrático promedio (RMSE= 34.94 Ton/ha) y el error cuadrático promedio relativo (%RMSE=38.08), para comparar los valores observados y predichos de biomasa del bosque de *Quercus* (Tabla 2, Figura 3).

Tabla 2. Estadísticos de Random forest para la calibración y validación de los modelos de Biomasa Aérea (AGB).

Variable	Tipo de datos	Parcelas	R^2	RMSE	%RMSE
AGB	Calibración	44	0.78	34.94	38.08
	Validación	20	0.08	37.93	39.88

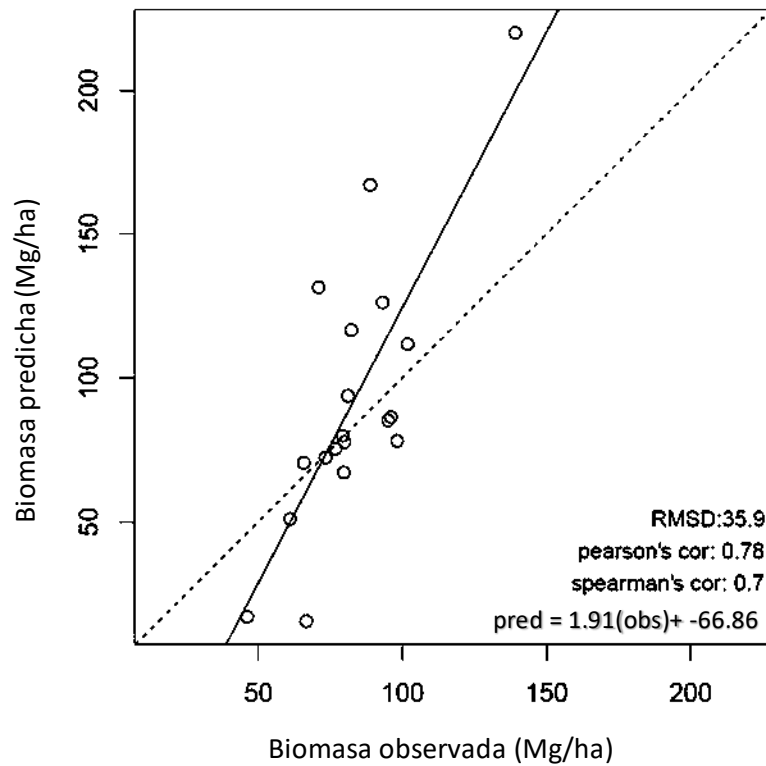


Figura 3. Modelo de validación de los valores observados vs predichos por el modelo estimación de biomasa aérea (Mg ha^{-1}). La línea punteada muestra la referencia 1:1, mientras que la línea negra muestra el ajuste de la regresión. El coeficiente de determinación (R^2), los valores de la raíz del error cuadrático promedio (RMSE) y el error cuadrático promedio relativo (%RMSE).

Mapas de densidad de carbono y mapa de incertidumbre

Los mapas de densidad de carbono y el mapa de incertidumbre, desarrollados en función del coeficiente de variación, se construyeron para el área de estudio con los datos tomados durante el año 2021 para un tamaño de pixel de 25m (Figura 4A) y utilizando el sistema de ecuaciones 1. Este mapa muestra los valores máximos y mínimos de almacenes de carbono para los bosques de *Quercus*. El valor máximo estimado fue de 132.27 Mg/ha y el valor mínimo fue de 44.99 Mg/ha. Se encontraron diferencias significativas ($F= 6.21$ $p= 0.01$), entre las distintas orientaciones norte y sur, mostrando que los valores con mayor almacén de carbono se concentran en las orientaciones norte. En cambio, las orientaciones sur muestran los valores más bajos de almacén de carbono para los bosques de *Quercus* (Figura 5A). Finalmente, el mapa de incertidumbre muestra diferencias significativas entre las orientaciones ($F= 5.24$ $P=0.02$), las zonas con mayor sesgo se localizan en las laderas sur y las zonas planas del área de estudio. Las laderas con orientación norte muestran menor sesgo en la estimación de biomasa aérea (Figura 5B).

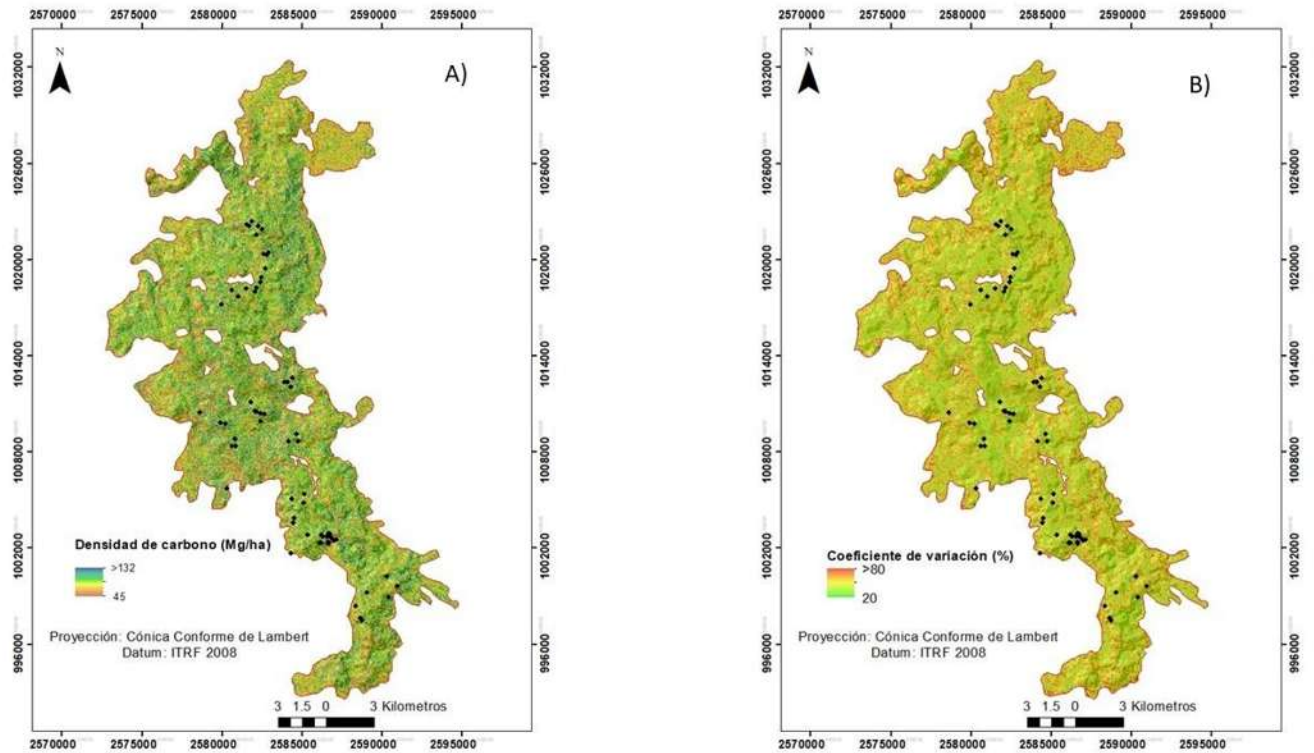


Figura 4. El mapa muestra la densidad de carbono para la Sierra de Santa Rosa (A) se utilizó el sistema de ecuaciones 1 para la construcción del modelo y el mapa de la incertidumbre en función del coeficiente de variación (B).

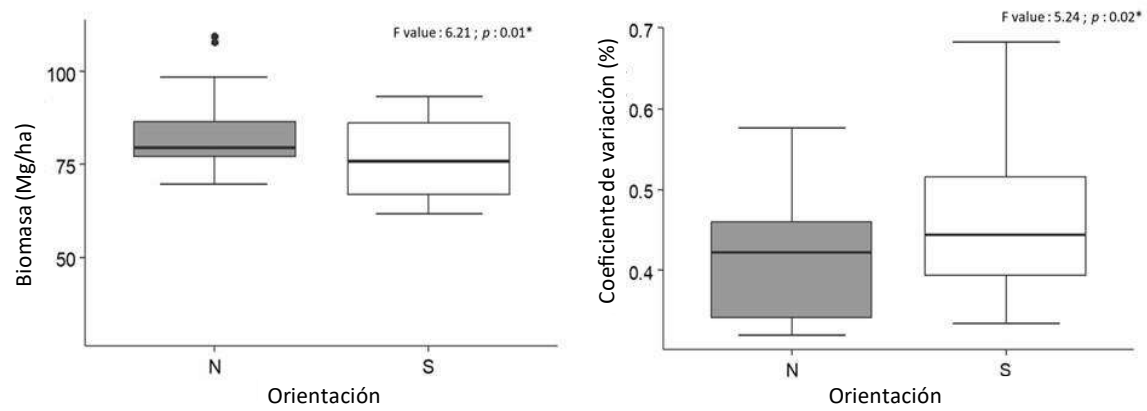


Figura 5. Se muestra la diferencia de la estimación de la biomasa entre orientaciones de ladera, y la diferencia en el coeficiente de variación obtenida de los modelos entre orientaciones.

Discusión

Los sistemas de ecuaciones alométricos reportados en la literatura (Rojas-García *et al.*, 2015), se han desarrollado para especies en un contexto de no perturbación (no manejadas) y con un crecimiento diferente al que presentan las especies del género *Quercus* en la zona de estudio. Los encinos en la sierra de Santa Rosa, son producto del manejo forestal intensivo y extensivo para la elaboración de carbón vegetal, el desarrollo de los individuos después de la perturbación es resultado del crecimiento o desarrollo vegetativo de los rebrotes que surgen del tocón remanente. Los tocones de los encinos, presentan múltiples rebrotes dado por los meristemos epicórmicos localizados en el crecimiento secundario del tocón, por lo que su desarrollo y arquitectura es más compleja a la de un individuo de regeneración sexual o a través de una bellota (Bellingham y Sparrow, 2000). Los bosques que se encuentran bajo manejo, requieren que los modelos alométricos que se utilicen para la estimación de biomasa sean desarrollados para individuos o especies de regeneración vegetativa para minimizar el sesgo en la estimación (Aguilar-Romero *et al.* 2012; García-Rojas, 2015).

Debido a esto se realizó una búsqueda en la literatura de ecuaciones alométricas construidas para rebrotes de encinos y se llevó a cabo una comparación entre tres modelos de ecuaciones generales con la finalidad de comparar la cantidad de biomasa estimada y el error asociado a la estimación (Aguilar-Romero *et al.* 2012; Cortés-Sánchez *et al.* 2019). Para los ecosistemas templados, los modelos alométricos que reportan mejor ajuste incluyen la altura total (At) y el diámetro a la altura de pecho (DAP) (Chave *et al.* 2005; Henry *et al.* 2010; Forrester *et al.* 2017; Cortés-Sánchez *et al.* 2019). En el presente estudio, las variables consideradas son: diámetro a la altura del pecho (DAP), altura promedio para cada especie (At) y densidad de la madera por especie (p) (Tabla 1). Al comparar los tres sistemas de ecuación, encontramos una diferencia significativa en los valores de estimación de biomasa entre el sistema 1, con una media de 91.22 ± 7 Mg/ha y el sistema 3 con una media 129.77 ± 12.4 Mg/ha. El sistema 3 presenta valores más altos en la estimación de biomasa y mayor error estándar de la media, lo anterior puede ser el resultado de integrar como variable explicativa la altura promedio en lugar de incluir altura de cada individuo por especie generando así un sesgo en la estimación de la biomasa. En este trabajo, se decidió utilizar el sistema 1 para la construcción de los modelos de densidad de carbono, ya que cuenta con menor error estándar, considerando únicamente la variable del diámetro a la altura de pecho

(DAP) de cada individuo, ya que se ha demostrado que trabajar con esa variable puede ser un buen predictor en escenarios de manejo al presentar mayor precisión y solo requerir de una sola variable (Aguilar-Romero et al. 2012).

En relación a la estimación de la biomasa aérea, se desarrolló un modelo de densidad de carbono a partir de datos de campo e índices de textura calculados por imágenes de radar. Estudios previos que han utilizado datos de inventarios forestales e imágenes obtenidas de radares de apertura sintética (SAR) reportan rangos de almacenes de carbono y biomasa aérea que van de 75 a 150 Ton/ha para bosques de latifoliadas en la región del mediterráneo (Vatandaşlar y Abdikan, 2022). Para México, los rangos que se han reportado oscilan entre 40 y 50 Mg/ha en el almacén de carbono para bosques latifoliados (Cartus et al. 2014). En el caso particular del centro de México se han reportado rangos de 0.86 a 87.7 Mg/ha con un valor medio de 35.28 Mg/ha para bosques de encinos manejados utilizando datos de sensores ópticos, por lo que la estimación puede estar subestimada a causa de la saturación en los valores de reflectancia (Castillo-Santiago et al. 2013, Hernández-Stefanoni, 2020). En el caso del presente estudio, los valores de densidad de carbono oscilaron en un rango de 40 a 135 Mg/ha y una media de 75 Mg/ha, estos valores se encuentran por encima de los rangos reportados en los estudios previos (Castillo-Santiago et al. 2013; Cartus et al. 2014; Vatandaşlar y Abdikan, 2022). Estas diferencias pueden ser el reflejo del manejo forestal histórico intensivo y extensivo en la zona. Lo anterior, puede explicarse como el resultado de la intensidad del manejo del paisaje de encinares en su totalidad, que muestran desarrollo vegetativo, proliferando las primeras fases de sucesión en las cuales se maximiza la productividad primaria del bosque (Schroeder et al. 1997; Gough et al. 2016; 2021). Se ha demostrado que los bosques de encinos producto del rebrote presentan un crecimiento más rápido en sus etapas iniciales, ya que el tocón remanente cuenta con un sistema radicular desarrollado que permite acceder a los recursos en el suelo (agua y nutrientes), lo que se traduce en una mayor explotación de los recursos asignándolos a las partes aéreas y secundarias de los individuos y presentando una menor vulnerabilidad a condiciones de estrés hídrico (Pietras et al. 2015).

Durante la validación del modelo, se obtuvo un buen ajuste y un bajo porcentaje de error entre los datos observados y los predichos por el modelo para la densidad de carbono ($R^2 = 0.78$, RMSE= 34.8 Ton/ha y %RMSE= 38.08). Los resultados obtenidos presentan están en los rangos superiores de estudios previos que han utilizado metodologías similares, en ejemplo de lo anterior

es el mayor ajuste comparado con el modelo de almacén de carbono a nivel nacional desarrollado por Cartus et al. (2014) ya que este trabajo presentó un valor de ajuste de $R^2 = 0.32$. Por otro lado, Rodríguez-Veiga et al. (2016), presenta un ajuste de $R^2 = 0.17$, Santiago-Castillo et al. (2013) presenta un valor de $R^2 = 0.61$. El porcentaje de error de este estudio fue menor al reportado en los trabajos previamente mencionados a nivel nacional para ecosistemas templados en México (%RMSE = 51.1, Cartus et al. 2014; %RMSE = 49, Rodríguez-Veiga et al. 2016).

Es importante destacar que la zona de estudio presenta un gran número de especies de encinos con distribuciones y estrategias de crecimiento que dependen de condiciones ambientales como la disponibilidad de luz, temperatura y humedad del suelo (López-Mendoza *en prep.*; Aguilar-Romero *et al.* 2017; Cavender-Bares et al. 2018; Arenas-Navarro et al. 2021) y pueden traducirse en una diferenciación en la asignación de recursos a la biomasa aérea entre orientaciones de las laderas (norte y sur) (Gong et al. 2008; Méndez-Toribio et al. 2016; Yang et al. 2020). Por tal motivo, al explorar si la distribución de las especies por orientación de ladera influía en el almacenaje de carbono, encontramos que los sitios con orientación norte, presentan un mayor almacén de carbono, a diferencia de los sitios con orientaciones en las laderas sur. Los filtros ambientales entre las laderas pueden repercutir en la estructura y composición de especies entre laderas y las estrategias funcionales entre especies, juegan un rol muy importante como son los patrones fenológicos.

En las laderas con orientación norte, la radiación podría ser considerada como un recurso limitado, ya que es menor que en las orientaciones sur, lo que obliga a las especies a invertir más recursos en su crecimiento y esto se ve reflejado en las especies que mostraron mayor afinidad a caras norte, presentan las alturas promedio mayores (*Q. rugosa* = 12.6 m y *Q. laurina* = 26.2 m), valores de Huber mayores, considerados como atributos asociados a especies perenes y conservadoras. Por otro lado, las orientaciones sur presentan como recurso limitado el agua y la humedad en el suelo por lo que sugiriendo que las especies invierten más recursos en el desarrollo de raíces más profundas que les garanticen fuentes de agua más estables, las especies con mayor afinidad a las orientaciones sur son las especies (*Q. jonesii* = 5.9 m, *Q. eduardii* = 7.4 m y *Q. deserticola* = 6.5 m), las cuales presentaron menores valores de altura y un menor valor de Huber, atributo asociado a especies caducifolias y adquisitivas en relación a maximizar el uso del agua (López-Mendoza *en prep.*; Arenas-Navarro et al. 2020; Meza-Rico et al. 2021). La media del

coeficiente de variación o sesgo obtenido entre orientaciones de ladera, también presentó diferencias siendo mayor en las orientaciones sur, esto puede ser resultado de la presencia de especies caducifolias en las orientaciones sur.

Conclusión

El sistema de ecuaciones 1, presentó un menor error estándar en los sitios de estudio, este sistema de ecuaciones permitió generar un modelo de densidad de carbono con un mayor poder explicativo del 78% y un %RMSE = 38, el modelo presentó un rango de 45 a 132 Mg/ha. Por otro lado, se obtuvo un mapa de incertidumbre del modelo con valores del 20 al 80%, siendo los sitios en laderas norte, los que presentan mayor biomasa y una menor incertidumbre, en relación a los sitios en laderas sur.

La información recabada en el presente trabajo, puede ser de gran utilidad para los dueños del territorio. Puesto que esta información en conjunto, aporta conocimiento sobre la distribución de los almacenes de carbono para su aprovechamiento forestal y/o conservación e implementación de programas de pago por servicios ecosistémicos. Esta información también es muy relevante para los grupos de investigación que trabajan con la dinámica y los flujos de carbono en bosques templados o en el diseño de estrategias de restauración puntuales, en las zonas con mayor impacto, por el disturbio ocasionado por la extracción de leña y elaboración de carbón vegetal.

Bibliografía

- Aguilar, R., Ghilardi, A., Vega, E., Skutsch, M., y Oyama, K. (2012). Sprouting productivity and allometric relationships of two oak species managed for traditional charcoal making in central Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 36, 192–207.
- Aguilar-Romero, R., García-Oliva, F., Pineda-García, F., Torres, I., Peña-Vega, E., Ghilardi, A., y Oyama, K. (2016). Patterns of distribution of nine *Quercus* species along an environmental gradient in a fragmented landscape in central Mexico. *Botanical Sciences*, 94(3), 471–482
- Aguilar-Romero R, Pineda-García F, Paz H, González-Rodríguez y A, Oyama K. (2017). Differentiation in the water-use strategies among oak species from central Mexico. *Tree Physiology* 37:915-25.
- Anderson, J., Martin, M. E., Smith M. L., Dubayah R. O., Hofton, M.A., Hyde, P., Peterson, B. E., Blair, J. B. y Knox, R. G. (2006). The use of waveform lidar to measure northern temperate mixed conifer and deciduous forest structure in New Hampshire, *Remote Sensing of Environment*, 105(3), 248–261.
- Arenas-Navarro, M., García-Oliva, F., Terrazas, T., Torres-Miranda, A., y Oyama, K. (2020). Leaf habit and stem hydraulic traits determine functional segregation of multiple oak species along a water availability gradient. *Forests*, 11(8), 894.
- Arenas-Navarro, M., Oyama, K., García-Oliva, F., Torres-Miranda, A., de la Riva, E. G., y Terrazas, T. (2021). The role of wood anatomical traits in the coexistence of oak species along an environmental gradient. *AoB Plants*, 13(6), plab066.
- Baccini, A., Laporte, N., Goetz, S. J., Sun, M., y Dong, H. (2008). A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environmental Research Letters*, 3(4), 045011.
- Balvanera, P., Cotler, H., Aburto Oropeza, O., Aguilar Contreras, A., Aguilera Peña, M., Aluja, M., y Guevara Sanginés, A. E. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos.
- Bellingham, P. J., y Sparrow, A. D. (2000). Resprouting as a life history strategy in woody plant communities. *Oikos*, 89(2), 409-416.
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45:5-32.
- Cavender-Bares, J. (2016). Diversity, distribution and ecosystem services of the North American oaks. *International oaks*, 27(27), 37-48.
- Cavender-Bares, J. (2018). Diversification, adaptation, and community assembly of the American oaks (*Quercus*), a model clade for integrating ecology and evolution. *New Phytologist*, 221(2), 669-692.
- Cartus, O., Kellndorfer, J., Walker, W., Franco, C., Bishop, J., Santos, L., y Michel Fuentes, J. M. (2014). A national, detailed map of forest aboveground carbon stocks in Mexico. *Remote sensing*, 6(6), 5559-5588.

- Challenger, A., y Soberón, J. (2008). Los ecosistemas terrestres. *Capital natural de México*, 1, 87-108.
- Comisión Nacional Forestal. (2021). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos, Procedimientos de muestreo*. CONAFOR, México
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi N., Kira, T., Lescure, J. P., Nelson B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, H. y Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87-99.
- Cortés-Sánchez, B. G., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M., y Ramírez-Maldonado, H. (2019). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en especies de encino en Guanajuato, México. *Madera y bosques*, 25(2).
- Cuervo-Robayo, A., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M., Venegas-Barrera, C., Manjarrez, J., y Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437.
- De Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., y Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, 7(3), 260-272.
- Fallon, B., y Cavender-Bares, J. (2018). Leaf-level trade-offs between drought avoidance and desiccation recovery drive elevation stratification in arid oaks. *Ecosphere*, 9(3), e02149.
- Fischer, R., Knapp, N., Bohn, F., Shugart, H. H., y Huth, A. (2019). The relevance of forest structure for biomass and productivity in temperate forests: New perspectives for remote sensing. *Surveys in Geophysics*, 40, 709-734.
- Freeman, E., Frescino T. y Moisen (2009). *Model map: An R package for modeling and map production using Random Forest and Stochastic Gradient Boosting*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 507.
- Forrester, D. I., Tachauer, I. H. H., Annughoefer, P., Barbeito, I., Pretzch, H., Ruiz-Peinado, R., y Sileshi, G. W. (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management*, 396, 160–175
- Galicia, L., y Zarco-Arista, A. E. (2014). Multiple ecosystem services, possible trade-offs and synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 10(4), 275-288.
- Gentry A.H. (1988). Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri botanical garden* 75:1–34.

- Gil-Pelegrín, E., Peguero-Pina, J. J., y Sancho-Knapik, D. (Eds.). (2017). Oaks physiological ecology. Exploring the functional diversity of genus *Quercus* L.
- Gough, C. M., Curtis, P. S., Hardiman, B. S., Scheuermann, C. M., y Bond-Lamberty, B. (2016). Disturbance, complexity, and succession of net ecosystem production in North America's temperate deciduous forests. *Ecosphere*, 7(6), e01375.
- Gough, C. M., Bohrer, G., Hardiman, B. S., Nave, L. E., Vogel, C. S., Atkins, J. W., y Curtis, P. S. (2021). Disturbance-accelerated succession increases the production of a temperate forest. *Ecological Applications*, 31(7), e02417.
- Gong, X., Brueck, H., Giese, K. M., Zhang, L., Sattelmacher, B. y Lin, S. (2008). Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *Journal of arid environments*, 72(4), 483-493.
- Haralick, R. M., Shanmugan, K. y Dinstein I.H. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (6), 610-621.
- Henry, M., Besnard, A., Asante, W. A., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Bernoux, M., Saint-André L., y Valentini, R. (2010). Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, 260(8), 1375–1388.
- Hernández-Stefanoni, J. L., Reyes-Palomeque, G., Castillo-Santiago, M. Á., George-Chacón, S. P., Huechacona-Ruiz, A. H., Tun-Dzul, F., ... y Dupuy, J. M. (2018). Effects of sample plot size and GPS location errors on aboveground biomass estimates from LiDAR in tropical dry forests. *Remote Sensing*, 10(10), 1586.
- Hernández-Stefanoni, J. L., Castillo-Santiago, M. Á., Mas, J. F., Wheeler, C. E., Andres-Mauricio, J., Tun-Dzul, F., George-Chacón S. P., Reyes-Palomeque, G. Castellanos-Basto, B y Dupuy, J. M. (2020). Improving aboveground biomass maps of tropical dry forests by integrating LiDAR, ALOS PALSAR, climate and field data. *Carbon balance and management*, 15, 1-17.
- Hernández-Stefanoni, J. L., Castillo-Santiago, M. A., Mauricio, J. A., Mas, J. F., Tun-Dzul, F., Dupuy-Rada, J. M. (2021). Mapeo de la biomasa aérea de los bosques mediante datos de sensores remotos y R. *El colegio de la frontera Sur: Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán*, A. C. 127 pp
- Kellndorfer, J. M., Walker, W. S., LaPoint, E., Kirsch, K., Bishop, J., y Fiske, G. (2010). Statistical fusion of Lidar, InSAR, and optical remote sensing data for forest stand height characterization: A regional-scale method based on LVIS, SRTM, Landsat ETM+, and ancillary data sets. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(G2).
- Kumar P. (2010). Valuation of ecosystem services: An assessment of conceptual underpinnings. en Sugimora K Toma T Fujita K, eds. *The Role of Forest Biodiversity in the Sustainable Use of*

- Ecosystem Goods and Services in Agro-forestry, Fisheries, and Forestry, Pp 29–35 Proceedings of International Symposium for the Convention on Biological Diversity.
- Laurence W. F. (2010) Habitat destruction death by a thousand cuts. En Sodhi N. y Ehrlich P. (Ed) Conservation Biology for all. pp 73-88 Oxford University Press
- Lembrechts, J. J., van den Hoogen, J., Aalto, J., Ashcroft, M. B., De Frenne, P., Kemppinen, J., y Hik, D. S. (2022). Global maps of soil temperature. *Global Change Biology*, 28(9), 3110-3144.
- Martínez-Cruz, J., Téllez Valdés, O. e Ibarra-Manríquez, G. (2009). Estructura de los encinares de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 80(1), 145-156.
- Mendoza-Ponce, A. y Galicia, L. (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry*, 83(5), 497-506.
- Méndez-Toribio M, Meave J, Zermeño-Hernández I e Ibarra-Manríquez G. (2016). Effects of slope aspect and topographic position on environmental variables, disturbance regime and tree community attributes in a seasonal tropical dry forest. *Journal of Vegetation Science* 27: 1094-1103.
- Meza-Rico, L., Aguilar-Romero, R., Paz, H., Rodríguez-Correa, H., González-Rodríguez, A., Oyama, K., y Pineda-García, F. (2022). Functional differentiation among Mexican oak species is guided by the fast–slow continuum but above and belowground resource use strategies are weakly coordinated. *Trees*, 1-17.
- Nixon, K. C. (2006). Global and neotropical distribution and diversity of oak (genus *Quercus*) and oak forests. In *Ecology and conservation of neotropical montane oak forests* (pp. 3-13). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Padrón, O. A. Q., Alquiza, M. D. J. P. Y., Coronel, J. A. R., Reyes, J. J. M., y González, F. V. (2017). Producción de árboles endémicos en viveros para la reforestación de los bosques aledaños a la ciudad de Guanajuato. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 3(2), 923-927.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips O, L., Shvidenko A., Lewis A. L., Canadell J. G., Ciais P., Jackson R.B., Pacala S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen A., Sitch, S. y Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993.
- Peña-Lara, V. A., Dupuy, J. M., Reyes-García, C., Sanaphre-Villanueva, L., Portillo-Quintero, C. A. y Hernández-Stefanoni, J. L. 2022. Modelling species richness and functional diversity in tropical dry forests using multispectral remotely sensed and topographic data. *Remote Sensing*, 14(23), 5919.
- Picard, N., Saint-André, L. y Henry, M. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción.

- Pietras, J., Stojanović, M., Knott, R., y Pokorný, R. (2016). Oak sprouts grow better than seedlings under drought stress. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 9(4), 529.
- Rodríguez-Veiga, P., Saatchi, S., Tansey, K., y Balzter, H. (2016). Magnitude, spatial distribution and uncertainty of forest biomass stocks in Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 183, 265-281.
- Rojas-García, F., De Jong, B. H., Martínez-Zurimendí, P., y Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of forest science*, 72(6), 835-864.
- Rzedowski, J. (1991). El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: una apreciación analítica preliminar. *Acta Botánica Mexicana*, (15), 47-64.
- Castillo-Santiago, M. Á., Ghilardi, A., Oyama, K., Hernández-Stefanoni, J. L., Torres, I., Flamenco-Sandoval, A., Fernández, A. y Mas, J. F. (2013). Estimating the spatial distribution of woody biomass suitable for charcoal making from remote sensing and geostatistics in central Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 17(2), 177-188.
- Shimada, M. y Ohtaki. (2010) Generating large-scale high-quality SAR mosaic datasets: application to PALSAR data for global monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(4), 637-656.
- Schroeder, P., Brown, S., Mo, J., Birdsey, R., y Cieszewski, C. (1997). Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data. *Forest science*, 43(3), 424-434.
- Sternberg, M. y Shoshany, M. (2001). Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: comparison of a semiarid and an arid site in Israel. *Ecological Research*, 16, 335-345.
- Trabucco, A. y Zomer, R. J. (2019). Global soil water balance geospatial database. CGIAR Consortium for Spatial Information. Figshare. Dataset.
- Turner, M., Beer, C., Santoro, M., Carvalhais, N., Wutzler, T., Schepaschenko, D., Shvidenko A., Komptter E., Ahrens B., Levick S. R. y Schmullius, C. (2014). Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests. *Global Ecology and Biogeography*, 23(3), 297-310.
- Urbazaev, M., Thiel, C., Cremer, F., Dubayah, R., Migliavacca, M., Reichstein, M. y Schmullius, C. (2018). Estimation of forest aboveground biomass and uncertainties by integration of field measurements, airborne LiDAR, and SAR and optical satellite data in Mexico. *Carbon Balance Manage* 13, 5
- Valencia-Avalos, S. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Botanical sciences*, (75), 33-53.
- Vatandaşlar, C., y Abdikan, S. (2020). Carbon stock estimation by dual-polarized synthetic aperture radar (SAR) and forest inventory data in a Mediterranean forest landscape. *Journal of Forestry Research*, 33(3), 827-838.

- Yang, J., El-Kassaby, Y. A., y Guan, W. (2020). The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, Southwest China. Scientific reports, 10(1), 16465.
- Zvoleff, A. (2016). GLCM: calculate textures from grey-level co-occurrence matrices (GLCMs). R package version, 1(1). <https://github.com/azvoleff/glcml>

Discusión y conclusiones generales

Al caracterizar las condiciones ambientales por orientación de ladera, se encontró que laderas con orientación sur presentan mayor radiación solar y temperatura, a diferencia de las laderas con orientación norte. Estos cambios funcionan como filtros ambientales determinando así los patrones de distribución de las especies de encinos. Promoviendo la afinidad y la coexistencia de ciertas especies por orientación de ladera (norte o sur). Por ejemplo, las especies *Q. rugosa*, *Q. lauirna* y *Q. Scytophylla* se encuentran únicamente en orientaciones de ladera norte y en pisos altitudinales que pueden oscilar en los 3000 msnm, encontrándose en bosques mixtos de pino y encino y en condiciones de mayor humedad y menor temperatura. Por otro lado, las especies que solamente están presentes en laderas con orientación sur son *Q. jonessi*, *Q. eduardii* y *Q. deserticola* su distribución puede asociarse a condiciones semiáridas en bosques secos que experimentan mayor temperatura y menor humedad en el suelo.

Además, se probó que los rasgos funcionales cambian en función a la orientación de ladera. Las especies presentes en las orientaciones sur tienen una mayor área foliar específica, valores de Huber menores y son caducifolias (pierden sus hojas en temporada de secas), estos rasgos están asociados a estrategias adquisitivas de recursos, aprovechando la temporada de disponibilidad de agua para maximizar la ganancia del carbono y con una fenología caducifolia previenen el fallo hidráulico del xilema. Por otro lado, los atributos funcionales de las especies en las orientaciones norte presentan menor área foliar, y valores de Huber mayores, asociados a estrategias de conservación de recursos y tolerancia a la temporada de sequía, ya que presentan una fenología perennifolia.

La diversidad funcional presente en las distintas especies de encino, determinan patrones de distribución y la afinidad en las diferentes laderas, así como la productividad primaria de los bosques de encinos. Para evaluar la estimación de la biomasa se compararon tres sistemas de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa en rebrotes de encinos. Se encontró que el sistema 1, el cual solo considera como variable dependiente el diámetro a la altura de pecho (DAP) presentó una diferencia significativa en la estimación de la biomasa y un menor error estándar a la media con respecto a los dos sistemas e ecuaciones restantes, sugiriendo ser un sistema de ecuaciones con mejor ajuste y por lo que se decidió integrar al modelo de densidad de carbono.

El modelo de densidad tuvo una estimación con un rango de 40 a 135 Mg/ha. Los resultados del presente estudio sugieren que las estimaciones están por encima de los valores reportados en la literatura y esto puede ser producto del manejo intensivo en la zona y la capacidad de desarrollo vegetativo que tienen los bosques de encinos, representando una ventaja el hecho de que el tocón remanente presenta un sistema radicular totalmente desarrollado y la asignación de recursos se enfoca a la parte aérea

Se comparó la cantidad de biomasa entre orientaciones y encontramos que la biomasa en laderas con orientación norte, es mayor que en laderas con orientación sur siendo consistente con las estrategias adquisitivas y de conservación de carbono, la diferenciación de los rasgos funcionales y la fenología que tienen las diferentes especies en la zona.

El presente estudio ha demostrado que las condiciones ambientales y la orientación de la ladera influyen en la distribución y en los rasgos funcionales de las especies de encinos en una región semiárida del centro de México, se identificaron: estrategias para aprovechamiento de recursos para las especies de manera diferenciadas por la orientación de las laderas, se identificó que existen especies con afinidad a las laderas orientación sur *Q. deserticola* *Q. eduardii* y *Q. jonessi* mientras que las especies con mayor afinidad a las laderas orientación norte son *Q. rugosa*, *Q. laurina* y *Q. scytophylla*. Se identificó que las especies presentes en la orientación sur, evitan la sequía tirando su follaje, a diferencia de las especies en laderas con orientación norte, que toleran la sequía. Con el modelo de la distribución de la densidad estimamos hasta 132 Mg/ha y se determinó que la biomasa aérea en es mayor en las laderas norte que en las laderas sur.

Los resultados encontrados son relevantes para tener mayor claridad en los patrones de distribución de las especies, sus estrategias de tolerar-evitar la sequía y la distribución potencial en el espacio de los almacenes de carbono. Además, este trabajo puede ser de gran utilidad en el contexto de manejo y conservación de los ecosistemas, al brindarle a los actores directos del territorio, información detallada para el aprovechamiento forestal que mantiene la Sierra de Santa Rosa de manera histórica, la restauración del área con información detallada de las especies y los sitios más adecuados para su establecimiento o la conservación forestal, gestionando programas de pagos por servicios ecosistémicos con la información de los almacenes de carbono en la zona.

Referencias

- Arenas-Navarro, M., García-Oliva, F., Terrazas, T., Torres-Miranda, A., y Oyama, K. (2020). Leaf habit and stem hydraulic traits determine functional segregation of multiple oak species along a water availability gradient. *Forests*, 11(8), 894.
- Armesto J, y Martínez J. (1978). Relations between vegetation structure and slope aspect in the Mediterranean region of Chile. *Journal of Ecology* 66, 881-889
- Cartus, O., Kellndorfer, J., Walker, W., Franco, C., Bishop, J., Santos, L., y Michel Fuentes, J. M. (2014). A national, detailed map of forest aboveground carbon stocks in Mexico. *Remote sensing*, 6(6), 5559-5588.
- Cavender-Bares J. (2016). Diversity, distribution, and ecosystem services of the North American Oaks. *International Oaks* 27:37-48
- Cavender-Bares, J. (2019). Diversification, adaptation, and community assembly of the American oaks (*Quercus*), a model clade for integrating ecology and evolution. *New Phytologist*, 221(2), 669-692.
- Gallardo-Cruz J, Pérez-García E y Meave JA. (2009). B-diversity and vegetation structure as influenced by slope aspect and altitude in a seasonally dry tropical landscape. *Landscape Ecology* 24, 473-482.
- Hernández-Stefanoni, J. L., Castillo-Santiago, M. A., Mauricio, J. A., Mas, J. F., Tun-Dzul y F.. Dupuy-Rada, J. M. (2021) Mapeo de la biomasa aérea de los bosques mediante datos de sensores remotos y R. *El colegio de la frontera Sur: Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán*, A. C. 127.
- Méndez-Toribio M, Meave J, Zermeño-Hernández I, e Ibarra-Manríquez G. (2016). Effects of slope aspect and topographic position on environmental variables, disturbance regime and tree community attributes in a seasonal tropical dry forest. *Journal of Vegetation Science* 27, 1094-1103
- Meza-Rico, L., Aguilar-Romero, R., Paz, H., Rodríguez-Correa, H., González-Rodríguez, A., Oyama, K., y Pineda-García, F. (2022). Functional differentiation among Mexican oak

species is guided by the fast–slow continuum but above and belowground resource use strategies are weakly coordinated. *Trees*, 1-17.

Moeslund, J. E., Arge, L., Bøcher, P. K., Dalgaard, T., y Svenning, J. C. (2013). Topography as a driver of local terrestrial vascular plant diversity patterns. *Nordic Journal of Botany*, 31(2), 129-144.

Nixon KC (1997) Fagaceae. In: Flora of North America Editorial Committee (eds) Flora of North-America, North of Mexico, vol 3. Oxford University Press, New York, 436–437

Pineda-García, F., Paz, H., Meinzer, F. C., y Angeles, G. (2016). Exploiting water versus tolerating drought: water-use strategies of trees in a secondary successional tropical dry forest. *Tree Physiology*, 36(2), 208-217.

Quisehuatl-Medina, A., Webb, C. O., Méndez-Toribio, M., González, C., Hubbell, S. P., y López-Toledo, L. (2023). Topography drives tree–habitat association and functional and phylogenetic structure in the northernmost tropical dry forest of the Americas. *Plant Ecology & Diversity*, 16(5-6), 203-220.

Shrestha, N., Kolarik, N. E., y Brandt, J. S. (2024). Mesic vegetation persistence: A new approach for monitoring spatial and temporal changes in water availability in dryland regions using cloud computing and the sentinel and Landsat constellations. *Science of The Total Environment*, 917, 170-491.

Singh S. (2018). Understanding the role of slope aspect in shaping the vegetation attributes and soil properties in Montane ecosystems. *Tropical Ecology* 59; 417-430.

Slot, M., Janse-ten Klooster, S. H., Sterck, F. J., Sass-Klaassen, U., y Zweifel, R. (2012). A lifetime perspective of biomass allocation in *Quercus pubescens* trees in a dry, alpine valley. *Trees*, 26, 1661-1668.

Sternberg M, y Shoshany M. (2001). Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: Comparison of a semiarid and an arid site in Israel. *Ecological Research* 16, 335-345.

Valencia S. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 75, 33-53.

Yang J, El-Kassaby Y, Guan W. (2020). The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountain dry valley Southwest China. *Scientific Reports* 10, 16465.

Anexos.

Identificación de reporte de similitud: oid:3117:363297052

NOMBRE DEL TRABAJO	AUTOR
Estimación de almacenes de carbono en un bosque manejado de encino en la Sierra de Santa Rosa de Lim	Alejandro López Mendoza

RECuento DE PALABRAS	RECuento DE CARACTERES
17400 Words	97833 Characters

RECuento DE PÁGINAS	TAMAÑO DEL ARCHIVO
67 Pages	1.6MB

FECHA DE ENTREGA	FECHA DEL INFORME
Jun 27, 2024 10:48 AM CST	Jun 27, 2024 10:50 AM CST

● **43% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 41% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 36% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

Resumen

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Programa Institucional de Maestría en Ciencias Biológicas	
Título del trabajo	ESTIMACIÓN DE ALMACENES DE CARBONO EN UN BOSQUE MANEJADO DE ENCINO EN LA SIERRA DE SANTA ROSA DE LIMA, GUANAJUATO	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Alejandro López Mendoza	2251446d@umich.mx
Director	Dra. Mariela Gómez Romero	mariela.gomez@umich.mx
Codirector	Dr. Rafael Aguilar Romero	raguilar@enesmorelia.unam.mx
Coordinador del programa	Dra. Martha Elena Pedraza Santos	mae.ciencias.biologicas@umich.mx

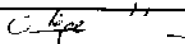
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	 Alejandro López Mendoza.
Lugar y fecha	Morelia Michoacán, 26 de junio 2024.