

Potential areas for silvopastoral systems based on the ecological niche of two forage crops and three species of conifers

Áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles a partir del nicho ecológico de dos cultivos forrajeros y tres especies de coníferas

Jesús Eduardo Sáenz-Ceja¹; J. Trinidad Sáenz-Reyes²; David Castillo-Quiroz^{3*}; Francisco Castillo-Reyes³; Hipólito J. Muñoz-Flores²; Agustín Rueda-Sánchez⁴

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, col. Exhacienda San José de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Uruapan. Av. Latinoamericana núm. 1110, col. Revolución. C. P. 60150. Uruapan, Michoacán, México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Saltillo. Carretera Saltillo-Zacatecas km 342+119 núm. 9515, col. Hacienda de Buenavista. C. P. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. km 8 carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno. C. P. 47600. Tepatitlán, Jalisco, México.

*Corresponding author: castillo.david@inifap.gob.mx; tel.: +52 844 667 1624.

Abstract

Introduction: Ecological niche modeling is a fundamental tool to know the areas suitable for the establishment of silvopastoral systems, based on the environmental requirements of the species.

Objectives: To model the ecological niche of the forage species *Chloris gayana* Kunth and *Eragrostis curvula* (Schr.) Nees, and the conifers *Pinus devoniana* Lindley, *Pinus lawsonii* Roehl ex Gordon and *Pinus montezumae* Lambert and to identify potential areas for silvopastoral systems.

Materials and methods: The ecological niche was modeled based on data from georeferenced collection sites in Mexico and 23 environmental variables. Subsequently, areas were identified and the extent, where forage species converge with conifers in both agricultural and forest areas, was estimated.

Results and discussion: Potential areas for silvopastoral systems with the five species were found mainly in the Neovolcanic Axis and the Sierra Madre del Sur, with a greater area suitable for agricultural areas compared to forestry areas. *Pinus devoniana* had the largest potential area to be intercropped with *C. gayana* and *E. curvula*. The ecological niche models had high predictive capacity with an area under the curve values greater than 0.93. Altitude and annual temperature range were the most important variables.

Conclusions: Mexico has the potential to establish silvopastoral systems with the species understudy in the center and south of the country, which could contribute to decreasing soil degradation, provide forage for livestock and maintain tree cover for agricultural and forest areas.

Resumen

Introducción: El modelado del nicho ecológico constituye una herramienta fundamental para conocer las áreas aptas para el establecimiento de sistemas silvopastoriles, con base en los requerimientos ambientales de las especies.

Objetivos: Modelar el nicho ecológico de las especies forrajeras *Chloris gayana* Kunth y *Eragrostis curvula* (Schr.) Nees, y las coníferas *Pinus devoniana* Lindley, *Pinus lawsonii* Roehl ex Gordon y *Pinus montezumae* Lambert e identificar las áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles.

Materiales y métodos: El nicho ecológico se modeló con base en datos de sitios de colecta georreferenciados en México y 23 variables ambientales. Posteriormente se identificaron las áreas y se estimó la superficie donde confluyen las especies forrajeras con las coníferas tanto en zonas agrícolas como en forestales.

Resultados y discusión: Las áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles con las cinco especies se encontraron principalmente en el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, con mayor superficie apta en zonas agrícolas que forestales. La especie *P. devoniana* tuvo la mayor superficie potencial para ser intercalada con *C. gayana* y *E. curvula*. Los modelos de nicho ecológico tuvieron alta capacidad predictiva con valores de área bajo la curva mayores de 0.93. La altitud y el rango anual de la temperatura fueron las variables de mayor importancia.

Conclusiones: En México existe potencial para establecer sistemas silvopastoriles con las especies bajo estudio en el centro y sur del país, lo cual podría contribuir a disminuir la degradación del suelo, proveer forraje para el ganado y mantener la cobertura arbórea en zonas agrícolas y forestales.

Keywords: *Chloris gayana*; *Eragrostis curvula*; *Pinus devoniana*; *Pinus montezumae*; *Pinus lawsonii*.

Palabras clave: *Chloris gayana*; *Eragrostis curvula*; *Pinus devoniana*; *Pinus montezumae*; *Pinus lawsonii*.

Please cite this article as follows (APA 6): Sáenz-Ceja, J. E., Sáenz-Reyes, J. T., Castillo-Quiroz, D., Castillo-Reyes, F., Muñoz-Flores, H. J., & Rueda-Sánchez, A. (2021). Potential areas for silvopastoral systems based on the ecological niche of two forage crops and three species of conifers. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(2), 289-308. doi: 10.5154/r.rchscfa.2020.07.048

Received: June 17, 2020 / Accepted: March 11, 2021.



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

Introduction

Silvopastoral systems consist of plots where forest and forage species are intercropped to produce feed for livestock and maintain tree cover (Mosquera-Losada, McAdam, Romero-Franco, Santiago-Freikanes, & Rigueiro-Rodríguez, 2009). These systems represent an alternative for the recovery of forest vocation of soils converted to agricultural land and provide ecosystem services such as shade for livestock, fruits, seeds, firewood, reduction of soil erosion, increased water infiltration to the subsoil, habitat for fauna, and microclimate regulation (Casanova-Lugo et al., 2015); on a regional scale, silvopastoral systems contribute to the capture of atmospheric pollutants, carbon storage, climate change mitigation, diversification of agricultural production and biodiversity recovery (Montagnini, Ibrahim, & Murgueitio-Restrepo, 2013).

Ecological niche models have been used to understand the natural distribution of species (McKenzie, Peterson, & Peterson, 2003), project the expansion of invasive species (Schussman, Geiger, Mau-Crimmins, & Ward, 2006), identify areas with high biodiversity (Newbold, Gilbert, Zalata, El-Gabbas, & Reader, 2009) and define priority areas for biological conservation (Hirzel, Hausser, Chessel, & Perrin, 2002). In the case of silvopastoral systems, the ideal areas to establish are identified through ecological niche models, because these can cartographically represent the optimal environment for the development of forage and forest species, which is delimited by filters such as temperature, precipitation, altitude, and soil type (Guisan & Zimmermann, 2000).

In the temperate region of Mexico, the establishment of silvopastoral systems is developing. The expansion of the agricultural frontier and soil management practices such as mechanized tillage, excess nitrogen fertilizer, and planting on steep slopes have caused physical and chemical degradation of soils in the center and south of the country (Cotler, Corona, & Galeana-Pizaña, 2020), especially in Estado de México, Mexico City, Michoacán, and Tlaxcala, states with the highest rates of water erosion (Bolaños-González et al., 2016). In this regard, silvopastoral systems with annual or perennial fast-growing forage species and intercropped trees can be a useful tool to stop soil erosion processes in agricultural areas (Pérez-Nieto, Valdés-Valverde, & Ordaz-Chaparro, 2012).

In forested areas of Mexico, a long-established practice is the introduction of livestock for grazing in forests or on sites with secondary vegetation; however, animals can negatively impact the flora and soil (Fuentes-Hernández et al., 2019). These impacts on the forest ecosystem can be minimized through silvopastoral systems, by rotating livestock in natural forests and

Introducción

Los sistemas silvopastoriles están constituidos por parcelas donde se intercalan especies forestales y forrajeras con fines de producción de alimento para el ganado y mantenimiento de la cobertura arbórea (Mosquera-Losada, McAdam, Romero-Franco, Santiago-Freikanes, & Rigueiro-Rodríguez, 2009). Estos sistemas representan una alternativa para la recuperación de la vocación forestal de suelos convertidos a terrenos agrícolas y proporcionan servicios ecosistémicos como sombra para el ganado, frutos, semillas, leña, reducción de la erosión del suelo, incremento de la infiltración del agua al subsuelo, hábitat para la fauna y regulación microclimática (Casanova-Lugo et al., 2015); además, a escala regional, los sistemas silvopastoriles contribuyen a la captura de contaminantes atmosféricos, almacenamiento de carbono, mitigación del cambio climático, diversificación de la producción agropecuaria y recuperación de la biodiversidad (Montagnini, Ibrahim, & Murgueitio-Restrepo, 2013).

Los modelos de nicho ecológico se han utilizado para conocer la distribución natural de especies (McKenzie, Peterson, & Peterson, 2003), proyectar la expansión de especies invasoras (Schussman, Geiger, Mau-Crimmins, & Ward, 2006), distinguir áreas con alta biodiversidad (Newbold, Gilbert, Zalata, El-Gabbas, & Reader, 2009) e identificar áreas prioritarias para la conservación biológica (Hirzel, Hausser, Chessel, & Perrin, 2002). En el caso de los sistemas silvopastoriles, las áreas idóneas para su establecimiento se identifican mediante modelos de nicho ecológico, ya que estos pueden representar cartográficamente el ambiente óptimo para el desarrollo de las especies forrajeras y forestales, el cual es delimitado por filtros como la temperatura, precipitación, altitud y tipo de suelo (Guisan & Zimmermann, 2000).

En la región templada de México, el establecimiento de sistemas silvopastoriles es incipiente. La expansión de la frontera agrícola y prácticas de manejo del suelo como labranza mecanizada, exceso de fertilizantes nitrogenados y siembra en laderas inclinadas han generado la degradación física y química de los suelos del centro y sur del país (Cotler, Corona, & Galeana-Pizaña, 2020), especialmente en el Estado de México, Ciudad de México, Michoacán y Tlaxcala, entidades con las tasas más altas de erosión hídrica (Bolaños-González et al., 2016). En este sentido, los sistemas silvopastoriles con especies forrajeras anuales o perennes de crecimiento rápido y árboles intercalados pueden ser una herramienta útil para detener los procesos de erosión del suelo en zonas agrícolas (Pérez-Nieto, Valdés-Valverde, & Ordaz-Chaparro, 2012).

En las zonas forestales de México, una práctica arraigada es la introducción del ganado para pastoreo

planting forage species preferred by these animals (Ávila-Ramírez et al., 2019).

Chloris gayana Kunth (*Rhodes grass*) and *Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees (weeping love grass) are two forage species native to Africa, introduced in various parts of the world for livestock feeding (palatability and high production value) and soil erosion control (Ponsens, Hanson, Shcellberg, & Moeseler, 2010). These species are adapted to various environments, including humid tropical, arid, and temperate areas (Imaz, Giménez, Grimoldi, & Striker, 2012). Both species are present in Mexico, as forage crops, along roadsides, and on disturbed lands (Valdés-Reyna 2015). Such forages have shown great potential for establishment in silvopastoral systems with timber species in some temperate regions of Mexico (Sáenz-Reyes et al., 2019).

The potential of silvopastoral systems with *C. gayana* and *E. curvula* in temperate areas of Mexico could be increased through the use of commercially important conifer species, widely propagated in forest nurseries and with soil retention and erosion prevention capacity, such as *Pinus devoniana* Lindley (Michoacán pine), *Pinus lawsonii* Roezl ex Gordon (Lawson's pine) and *Pinus montezumae* Lambert (Montezuma pine) (Gómez-Romero et al., 2012; Sáenz-Reyes, Muñoz-Flores, & Rueda-Sánchez, 2011). Therefore, the objectives of this study were to model the distribution area of *C. gayana*, *E. curvula*, *P. devoniana*, *P. lawsonii*, and *P. montezumae* in Mexico and identify potential areas for the establishment of silvopastoral systems with these species in forest and agricultural areas of the country.

Materials and methods

Forage component

C. gayana is a perennial grass (Figure 1a), develops canes that measure between 50 to 130 cm in height, grows in the rainy season, flowers all year round, and is present in 22 states of Mexico (Valdés-Reyna, 2015). The species adapts well to loamy and saline soils, its optimal development is achieved in subtropical and tropical climates and it is shade tolerant when established intercropped with trees (Guevara-Escobar, Cervantes-Jiménez, Suzán-Azpiri, González-Sosa, & Saavedra, 2012). This grass is used for direct grazing and responds to chemical fertilization with diammonium phosphate and urea, organic fertilizers, liquid biofertilizers, and vermicompost (Sáenz-Reyes et al., 2016), achieving yields between 5 and 15 Mg·ha⁻¹ of dry matter in soils of volcanic origin in central Mexico (Imaz et al., 2012).

E. curvula is a perennial grass (Figure 1b), it develops deep roots and tufted canes that measure between 60 and 150 cm in height; it grows in the spring-summer

en los bosques o en sitios con vegetación secundaria; sin embargo, los animales pueden impactar negativamente sobre la flora y el suelo (Fuentes-Hernández et al., 2019). Estos impactos sobre el ecosistema forestal pueden ser minimizados a través de sistemas silvopastoriles, mediante la rotación del ganado en bosques naturales y la siembra de especies forrajeras preferidas por los animales (Ávila-Ramírez et al., 2019).

Chloris gayana Kunth (pasto *rhodes*) y *Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees (pasto llorón) son dos especies forrajeras originarias del continente africano, introducidas en diversas partes del mundo para la alimentación del ganado (palatabilidad y alto valor productivo) y control de la erosión del suelo (Ponsens, Hanson, Shcellberg, & Moeseler, 2010). Estas especies se adaptan a varios ambientes, incluyendo zonas tropicales húmedas, zonas áridas y templadas (Imaz, Giménez, Grimoldi, & Striker, 2012). Ambas especies están presentes en México, como cultivos forrajeros, a orillas de caminos y en terrenos perturbados (Valdés-Reyna 2015). Dichos forrajes han demostrado gran potencial de establecimiento en sistemas silvopastoriles con especies maderables en algunas regiones templadas de México (Sáenz-Reyes et al., 2019).

El potencial de los sistemas silvopastoriles con *C. gayana* y *E. curvula* en zonas templadas de México podría incrementarse mediante el uso de especies de coníferas de importancia comercial, propagadas ampliamente en viveros forestales y con capacidad de retención del suelo y prevención de la erosión, tal como *Pinus devoniana* Lindley (pino lacio), *Pinus lawsonii* Roezl ex Gordon (pino ortiguillo) y *Pinus montezumae* Lambert (pino blanco) (Gómez-Romero et al., 2012; Sáenz-Reyes, Muñoz-Flores, & Rueda-Sánchez, 2011). Por tanto, los objetivos de este estudio fueron modelar el área de distribución de *C. gayana*, *E. curvula*, *P. devoniana*, *P. lawsonii* y *P. montezumae* en México e identificar las áreas potenciales para el establecimiento de sistemas silvopastoriles con estas especies en zonas forestales y agrícolas del país.

Materiales y métodos

Componente forrajero

C. gayana es una gramínea perenne (Figura 1a), desarrolla culmos que miden entre 50 a 130 cm de altura, crece en la estación lluviosa, florece todo el año y está presente en 22 estados de México (Valdés-Reyna, 2015). La especie se adapta bien a suelos francos y salinos, su desarrollo óptimo se logra en climas subtropicales y tropicales y es tolerante a la sombra cuando se establece intercalado con árboles (Guevara-Escobar, Cervantes-Jiménez, Suzán-Azpiri, González-Sosa, & Saavedra,

cycle, flowers in summer and resprouts abundantly after being defoliated by livestock; it adapts well to clay loam, sandy loam soils with low humidity; it responds to chemical fertilization with N, K, Mg, Si, NH_4NO_3 and organic fertilization with manure, fishmeal, and lime (Ward, Kirkman, & Tsvuura, 2017). The species is drought resistant, adapts to temperate climates and is shade tolerant (Ghebrehiwot, Fynn, Morris, & Kirkman, 2006); it can reach up to 15 % crude protein content in the spring-summer cycle, it produces yields of $4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ in sandy soils of western Mexico (Esqueda-Coronado & Carrillo-Romo, 2012) and is present in 10 states of the country (Valdés-Reyna, 2015).

Forest component

P. devoniana (Figure 1c) is a species distributed mainly in the Neovolcanic Axis and Sierra Madre del Sur. Trees can reach 20 to 30 m in height (Farjon, Pérez de la Rosa, & Styles, 1997); they grow in deep, volcanic, sandy-loam soils and form monospecific stands or stands associated with other pine or oak species. This species is used for timber, resin extraction, and pulp for paper (Sáenz-Reyes et al., 2011).

P. lawsonii (Figure 1d) is a conifer restricted to the Neovolcanic Axis and Sierra Madre del Sur. Trees reach up to 30 m in height (Farjon et al., 1997); this species grows in deep, sandy soils with a silty-clay texture and acid pH. This species is used as firewood, for making fence posts, beams, and rustic furniture, and sometimes for resin production (Ramos-Uvilla et al., 2014).

P. montezumae (Figure 1e) is distributed in the Neovolcanic Axis, Sierra Madre del Sur and small portions of the Sierra Madre Oriental. Trees reach 20 to 35 m in height (Farjon et al., 1997). This species grows in well-drained volcanic soils with a clay-loam texture, forming monospecific stands or in co-dominance with other pine and *Abies* species; it is mainly used for timber production and has been widely propagated for commercial forestry plantations (Centre for Agricultural Bioscience International [CABI], 2002; Pérez-Miranda, Moreno-Sánchez, González-Hernández, & Arriola-Padilla, 2014).

Ecological niche modeling

The raster format layers of the 19 bioclimatic variables, at a spatial resolution of 1 km^2 , were obtained from the WorldClim portal (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005); the altitude, slope, and slope orientation layers from the Hydro1k portal (Hydro1k Elevation Derivative Database) (United States Geological Survey [USGS], 2000); and the soil types from the Geoinformation Portal of the National Biodiversity Information System (INEGI, 2014). All layers were cut to the limits of the Mexican territory (Table 1).

Esta gramínea es empleada para pastoreo directo y responde a fertilización química con fosfato diamónico y urea, abonos orgánicos, biofertilizantes líquidos y vermicompostas (Sáenz-Reyes et al., 2016), logrando rendimientos entre 5 y $15 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de materia seca en suelos de origen volcánico del centro de México (Imaz et al., 2012).

E. curvula es una gramínea perenne (Figura 1b), desarrolla raíces profundas y culmos amacollados que miden entre 60 y 150 cm de altura; crece en el ciclo primavera-verano, florece en verano y rebrota abundantemente después de ser defoliado por ganado; se adapta bien a suelos franco-arcillosos, franco-arenosos con poca humedad; responde a fertilización química con N, K, Mg, Si, NH_4NO_3 y orgánica con estiércol, harina de pescado y cal (Ward, Kirkman, & Tsvuura, 2017). La especie es resistente a la sequía, se adapta a climas templados y es tolerante a la sombra (Ghebrehiwot, Fynn, Morris, & Kirkman, 2006); puede alcanzar hasta 15 % de contenido de proteína cruda en el ciclo primavera-verano, produce rendimientos de $4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en suelos arenosos del occidente de México (Esqueda-Coronado & Carrillo-Romo, 2012) y está presente en 10 estados del país (Valdés-Reyna, 2015).

Componente forestal

P. devoniana (Figura 1c) es una especie distribuida principalmente en el Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. Los árboles pueden alcanzar entre 20 a 30 m de altura (Farjon, Pérez de la Rosa, & Styles, 1997); crecen en suelos profundos de textura franco-arenosa, de origen volcánico; y forman rodales mono-específicos o asociados con otras especies de pino o encino. La especie es utilizada con fines maderables, extracción de resina y pulpa para papel (Sáenz-Reyes et al., 2011).

P. lawsonii (Figura 1d) es una conífera restringida al Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. Los árboles alcanzan hasta 30 m de altura (Farjon et al., 1997); se desarrolla en suelos arenosos, profundos, con textura arcillosa-limosa y pH ácido. La especie es utilizada como leña, para la elaboración de postes para cercas, vigas y muebles rústicos y, en ocasiones, para la producción de resina (Ramos-Uvilla et al., 2014).

P. montezumae (Figura 1e) se distribuye en el Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur y pequeñas porciones de la Sierra Madre Oriental. Los árboles alcanzan entre 20 a 35 m de altura (Farjon et al., 1997). Esta especie se desarrolla en suelos de origen volcánico, textura franco-arcillosa y con buen drenaje, formando rodales mono-específicos o en codominancia con otras especies de pinos y del género *Abies*; es utilizada principalmente para la producción de madera y ha sido propagada ampliamente para plantaciones forestales comerciales (Centre for Agricultural

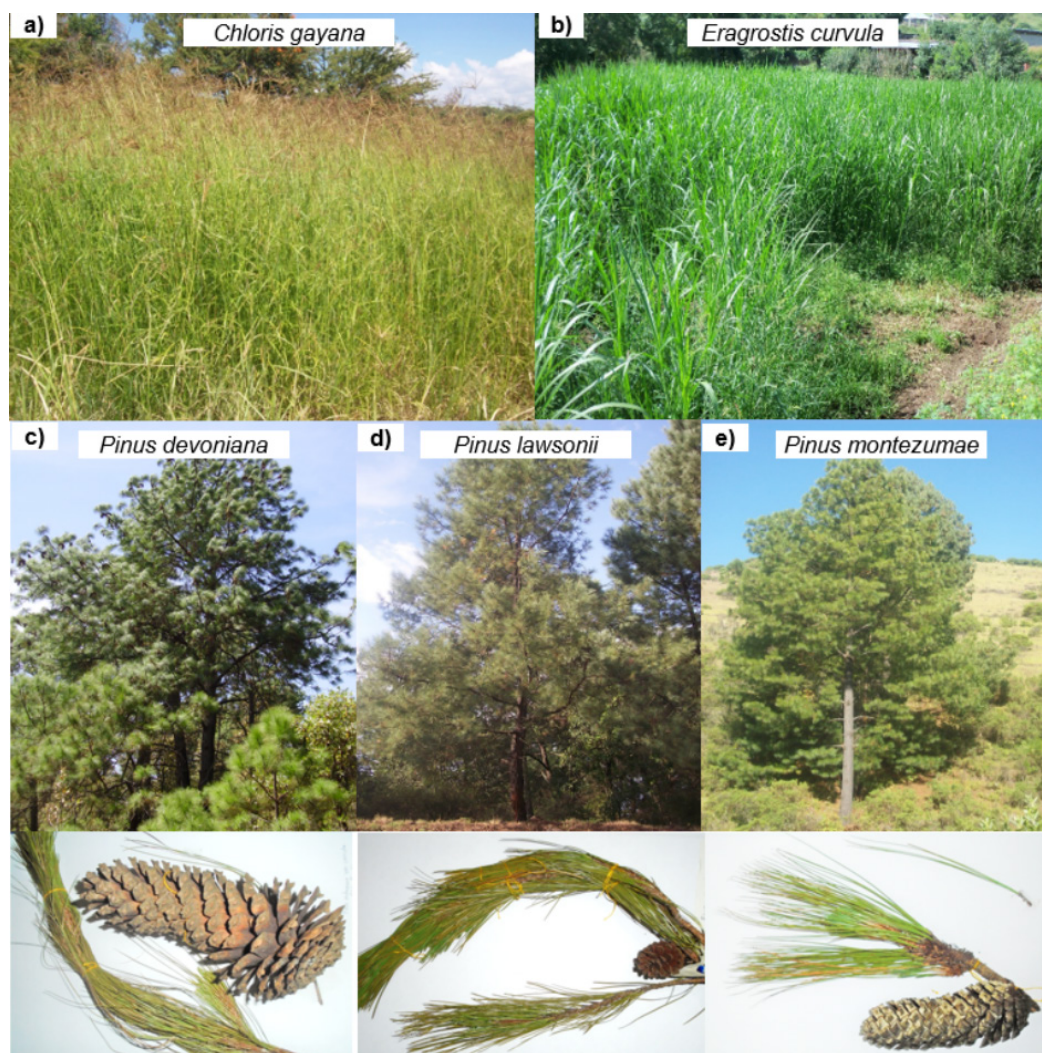


Figure 1. Species proposed for the establishment of silvopastoral systems in Mexico.
Figura 1. Especies propuestas para el establecimiento de sistemas silvopastoriles en México.

The information on the presence of the study species in Mexican territory was downloaded from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2020) database. Data were cleaned by eliminating repeated points and making boxplots to identify outliers according to the bioclimatic and topographic variables evaluated. Principal component analysis (PCA) was then performed to identify the variables that most influence the distribution of collection points for each species, selecting those with the greatest magnitude and easiest to interpret. The boxplots and PCAs were run using the R-3.5.1 program (R-Core Team, 2017).

Once the most important variables for each species were identified, the ecological niche was modeled using Maxent 3.3.3 (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006), using 75 % of the collection points for modeling and the rest as validation points. Models with area under the curve (AUC) values between 7 and 9 were considered acceptable, while those with values greater

Bioscience International [CABI], 2002; Pérez-Miranda, Moreno-Sánchez, González-Hernández, & Arriola-Padilla, 2014).

Modelación del nicho ecológico

Las capas en formato ráster de las 19 variables bioclimáticas, a una resolución espacial de 1 km², se obtuvieron del portal WorldClim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005); las capas de altitud, pendiente y orientación de ladera en el portal Hydro1k (Hydro1k Elevation Derivative Database) (United States Geological Survey [USGS], 2000); y los tipos de suelo en el Portal de Geoinformación del Sistema Nacional de Información sobre la Biodiversidad (INEGI, 2014). Todas las capas fueron recortadas a los límites del territorio mexicano (Cuadro 1).

La información de presencia de las especies de estudio en territorio mexicano se descargó de la base de datos

Table 1. Bioclimatic and topographic variables used to model the ecological niche of *Chloris gayana*, *Eragrostis curvula*, *Pinus devoniana*, *P. lawsonii*, and *P. montezumae* in Mexico.

Cuadro 1. Variables bioclimáticas y topográficas utilizadas para modelar el nicho ecológico de *Chloris gayana*, *Eragrostis curvula*, *Pinus devoniana*, *P. lawsonii* y *P. montezumae* en México.

Key/Clave	Variable
Bio01	Mean anual temperature (°C) / Temperatura media anual (°C)
Bio02	Diurnal temperature range (°C) / Rango diario de la temperatura (°C)
Bio03	Isothermality (°C) / Isotermalidad (°C)
Bio04	Temperature seasonality (%) / Estacionalidad de la temperatura (%)
Bio05	Maximum temperature of the warmest period (°C) / Temperatura máxima del periodo más cálido (°C)
Bio06	Minimum temperature of the coldest period (°C) / Temperatura mínima del periodo más frío (°C)
Bio07	Annual temperature range (°C) / Rango anual de la temperatura (°C)
Bio08	Average temperature of the wettest quarter (°C) / Temperatura promedio del trimestre más húmedo (°C)
Bio09	Average temperature of the driest quarter (°C) / Temperatura promedio del trimestre más seco (°C)
Bio10	Average temperature of the warmest quarter (°C) / Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C)
Bio11	Average temperature of the coldest quarter (°C) / Temperatura promedio del trimestre más frío (°C)
Bio12	Average annual precipitation (mm) / Precipitación media anual (mm)
Bio13	Precipitation of the wettest period (mm) / Precipitación del periodo más húmedo (mm)
Bio14	Precipitation of the driest period (mm) / Precipitación del periodo más seco (mm)
Bio15	Precipitation seasonality (%) / Estacionalidad de la precipitación (%)
Bio16	Precipitation of the wettest quarter (mm) / Precipitación del trimestre más húmedo (mm)
Bio17	Precipitation of the driest quarter (mm) / Precipitación del trimestre más seco (mm)
Bio18	Precipitation of the warmest quarter (mm) / Precipitación del trimestre más cálido (mm)
Bio19	Precipitation of the coldest quarter (mm) / Precipitación del trimestre más frío (mm)
Altitude/Altitud	Meters above sea level (m) / Metros sobre el nivel del mar (m)
Slope/Pendiente	Degrees (°) / Grados (°)
Hillside/Ladera	North, South, West, East / Norte, sur, oeste, este
Type of soil/ Tipo de suelo	FAO nomenclature / Nomenclatura de la FAO

than 9 were considered to have a high predictive capacity (Peterson et al., 2011).

Furthermore, a partial ROC (Receiver Operating Characteristics) analysis was performed in the NicheToolBox program (Osorio-Olvera et al., 2020). This analysis minimizes omission and commission errors of the AUC, using 50 % of the collection points as validation data, 1 000 iterations, and a commission error of 5 %. Partial ROC values were validated by Z-tests to determine if they were different at random (ROC = 1); those close to 2 and statistically significant ($P < 0.05$) indicated models that fit the actual species distribution very well (Slater & Michel, 2012). The maps obtained for each species were reclassified, where cells with a probability of the presence of species lower than the first quartile were discarded (Peterson et al., 2011).

Potential areas for the establishment of silvopastoral systems

Areas with water bodies and urban settlements were eliminated from the distribution maps of each species, according to the Land Use and Vegetation Map Series VI for Mexico, scale 1:250,000 (INEGI, 2017). Subsequently, maps were projected to the Lambert 1992 Conic coordinate system and the potential area of the distribution of each species (km²) was calculated.

The maps of *C. gayana* and *E. curvula* were superimposed with the maps of *P. devoniana*, *P. lawsonii* and *P. montezumae* to obtain the potential areas for the establishment of silvopastoral systems in forest areas, agricultural areas, and by the federal state, according to the distribution of primary forest and agricultural areas of the Land Use and Vegetation Map Series VI. Finally, estimated extent (ha) of potential silvopastoral areas with these species were calculated.

Results

Ecological niche of the study species

According to Table 2, the PCAs showed that altitude and annual temperature range (Bio07) were the most important variables for *Pinus* species. The third most important variable for *P. devoniana* was the average temperature of the warmest period (Bio05), for *P. lawsonii*, mean annual precipitation (Bio12), and for *P. montezumae*, mean annual temperature (Bio01). In general, *C. gayana* and *E. curvula* responded most to altitude, followed by annual temperature range (Bio07) in the case of *E. curvula*, and the average temperature of the wettest quarter (Bio08) for *C. gayana*; for both species, the variable average temperature of the coldest quarter (Bio11) was the third most important. Figure 2 shows the contribution of bioclimatic and topographic variables on species distribution.

del Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2020). Los datos se depuraron eliminando puntos repetidos y realizando gráficos de barras y bigotes para la identificación de valores atípicos de acuerdo con las variables bioclimáticas y topográficas evaluadas. Luego se realizaron análisis de componentes principales (ACP) para identificar las variables que más influyen en la distribución de los puntos de colecta de cada especie, seleccionando las de mayor magnitud y más fáciles de interpretar. Los gráficos de barras y bigotes, así como los ACP se ejecutaron en el programa R versión 3.5.1 (R-Core Team, 2017).

Una vez identificadas las variables más importantes para cada especie, el nicho ecológico se modeló mediante el programa Maxent versión 3.3.3 (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006), utilizando 75 % de los puntos de colecta para la modelación y el resto como puntos de validación. Los modelos con valores de área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) entre 7 y 9 se consideraron aceptables, mientras que aquéllos con valores superiores a 9 se consideraron con alta capacidad predictiva (Peterson et al., 2011).

Adicionalmente, se ejecutó un análisis ROC parcial (Receiver Operating Characteristics, por sus siglas en inglés) en el programa NicheToolBox (Osorio-Olvera et al., 2020). Este análisis minimiza los errores de omisión y comisión del AUC, empleando 50 % de los puntos de colecta como datos de validación, 1 000 iteraciones y error de comisión del 5 %. Los valores del ROC parcial se validaron mediante pruebas de Z para determinar si eran diferentes al azar (ROC = 1); los cercanos a 2 y estadísticamente significativos ($P < 0.05$) indicaron modelos que se ajustan muy bien a la distribución real de las especies (Slater & Michel, 2012). Los mapas obtenidos de cada especie fueron reclasificados, donde las celdas con probabilidad de presencia de las especies menores al primer cuartil fueron descartadas (Peterson et al., 2011).

Áreas potenciales para el establecimiento de sistemas silvopastoriles

Las áreas con cuerpos de agua y asentamientos urbanos se eliminaron de los mapas de distribución de cada especie, de acuerdo con el mapa de Uso de Suelo y Vegetación Serie VI para México, escala 1:250,000 (INEGI, 2017). Posteriormente, los mapas se proyectaron al sistema de coordenadas Cónico de Lambert 1992 y se calculó la superficie potencial de la distribución de cada especie (km²).

Los mapas de *C. gayana* y *E. curvula* fueron superpuestos con los mapas de *P. devoniana*, *P. lawsonii* y *P. montezumae* con el fin de obtener las áreas potenciales para el establecimiento de sistemas silvopastoriles en zonas forestales, zonas agrícolas y por entidad

Table 2. Contribution of environmental variables in the potential distribution models of two forage species and three pine species in Mexico.**Cuadro 2. Contribución de las variables ambientales en los modelos de distribución potencial de dos especies forrajeras y tres especies de pino en México.**

Environmental variable/ Variable ambiental	Contribution to distribution models (%) / Contribución en los modelos de distribución (%)				
	<i>Chloris gayana</i>	<i>Eragrostis curvula</i>	<i>Pinus devoniana</i>	<i>Pinus lawsonii</i>	<i>Pinus montezumae</i>
Altitude / Altitud	44.9	62.9	32.3	36.8	58.2
Mean annual temperature (Bio01) / Temperatura media anual (Bio01)	0.1	0.1	2.3	6.2	6.8
Isothermality (Bio03) / Isotermalidad (Bio03)	1.7	2.7	-	-	-
Maximum temperature of the warmest period (Bio05) / Temperatura máxima del periodo más cálido (Bio05)	1.2	0.1	15.9	-	-
Annual temperature range (Bio07) / Rango anual de la temperatura (Bio07)	-	27.0	39.7	35.3	31.2
Average temperature of the wettest quarter (Bio08) / Temperatura promedio del trimestre más húmedo (Bio08)	34.8	-	-	5.3	-
Average temperature of the coldest quarter (Bio11) / Temperatura promedio del trimestre más frío (Bio11)	9.0	5.4	8.1	-	1.8
Average annual precipitation (Bio12) / Precipitación media anual (Bio12)	2.7	0.3	-	14.8	-
Precipitation of the driest period (Bio14) / Precipitación del periodo más seco (Bio14)	5.7	-	2.4	-	2.0
Precipitation of the driest quarter (Bio17) / Precipitación del trimestre más seco (Bio17)	-	1.5	-	1.5	-

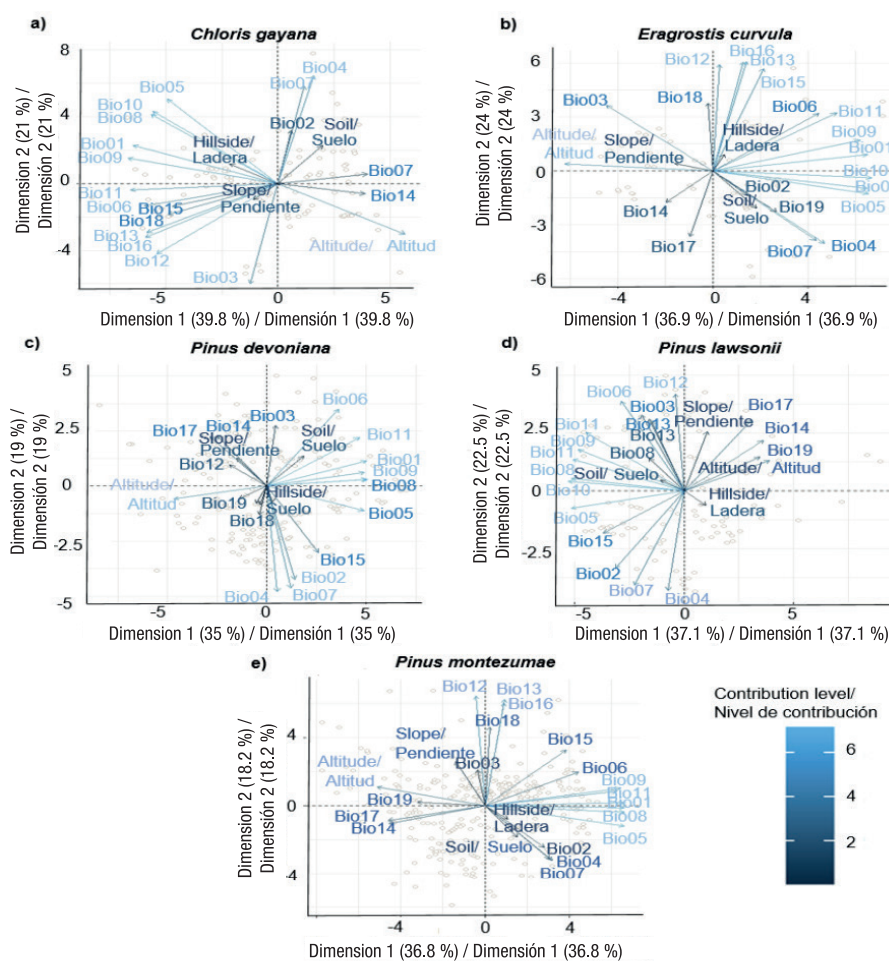


Figure 2. Principal component analysis showing the contribution of bioclimatic and topographic variables on the distribution of two forage species and three *Pinus* species in Mexico. The keys of the variables are described in Table 1.

Figura 2. Análisis de componentes principales que muestra la contribución de las variables bioclimáticas y topográficas sobre la distribución de dos especies forrajeras y tres especies de *Pinus* en México. Las claves de las variables son descritas en el Cuadro 1.

Ecological niche models had high predictive capacity with AUC values greater than 0.93, while partial ROC values were very close to 2, as shown in Table 3. Species distribution areas were located at altitudes between 1 620 and 2 940 m, corresponding to temperate regions, with mean annual temperature between 12.2 and 19.5 °C and mean annual precipitation between 450 and 1200 mm. The grass *E. curvula* occupied higher elevations and with lower mean annual temperature compared to *C. gayana*. On the other hand, *P. montezumae* was found on higher slopes and sites with lower mean annual temperature compared to *P. devoniana* and *P. lawsonii*, species that shared elevation and mean annual temperature ranges.

Figure 3 illustrates the potential distribution of the species evaluated. *Chloris gayana* was found in an area of 302 400 km², occupying extensive areas of the Neovolcanic Axis, of the Mexican Plateau and

federativa, de acuerdo con la distribución de bosque primario y áreas de agricultura del mapa de Uso de Suelo y Vegetación Serie VI. Por último, se calcularon las superficies estimadas (ha) de las áreas potenciales silvopastoriles con estas especies.

Resultados

Nicho ecológico de las especies de estudio

Acorde con el Cuadro 2, los ACP mostraron que la altitud y el rango anual de temperatura (Bio07) fueron las variables de mayor importancia para las especies de *Pinus*. La tercera variable más importante para *P. devoniana* fue la temperatura promedio del periodo más cálido (Bio05), para *P. lawsonii*, la precipitación media anual (Bio12), y para *P. montezumae*, la temperatura media anual (Bio01). En general, *C. gayana* y *E. curvula* respondieron más a la altitud, seguida del rango anual de temperatura (Bio07) en el caso de

some portions of the Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, and Sierra Madre del Sur; while the distribution area of *E. curvula* was smaller, occupying 85 720 km², especially located in the Neovolcanic Axis and the southern portion of the Mexican Plateau. In the case of conifers, *P. devoniana* occupied a larger area (103 900 km²) compared to the other two species along the Neovolcanic Axis, Sierra Madre del Sur, and the Chiapas highlands; *P. montezumae* (46 580 km²) was found mainly in the eastern portion of the Neovolcanic Axis and some portions of the Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, and Chiapas; while *P. lawsonii* had a more restricted distribution (27 340 km²), mainly in the Neovolcanic Axis and Sierra Madre del Sur.

E. curvula, y la temperatura promedio del trimestre más húmedo (Bio08) para *C. gayana*; para ambas especies, la variable temperatura promedio del trimestre más frío (Bio11) fue la tercera en importancia. La Figura 2 muestra la contribución de las variables bioclimáticas y topográficas sobre la distribución de las especies.

Los modelos de nicho ecológico tuvieron alta capacidad predictiva con valores de AUC mayores de 0.93, mientras que los valores del ROC parcial fueron muy cercanos a 2, tal como se observa en el Cuadro 3. Las áreas de distribución de las especies se localizaron en altitudes entre 1 620 y 2 940 m, que corresponden con regiones templadas, con temperatura media anual entre 12.2

Table 3. Ecological niche values of species evaluated for the establishment of silvopastoral systems in Mexico.
Cuadro 3. Valores del nicho ecológico de las especies evaluadas para el establecimiento de sistemas silvopastoriles en México.

Descriptor	<i>Chloris gayana</i>	<i>Eragrostis curvula</i>	<i>Pinus devoniana</i>	<i>Pinus lawsonii</i>	<i>Pinus montezumae</i>
Area under the curve (AUC)/ Área bajo la curva (AUC)	0.9345	0.9418	0.9577	0.9901	0.9814
Partial ROC/ROC parcial	1.8691	1.8836	1.9156	1.9802	1.9628
Standard deviation/ Desviación estándar	0.0201	0.0415	0.0096	0.0017	0.0053
Z value/Valor de Z	2 939.1	1 432.1	6 270.3	34 836	11 599
P value/Valor de P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Altitude (m)/Altitud (m)	1 620-2 070	2 082-2 385	1 720-2 340	1 930-2 220	2 340-2 940
Mean annual temperatura (°C)/ Temperatura media anual (°C)	16.7-19.5	14.9-16.8	15.6-18.7	16.4-19.1	12.2-15.5
Mean annual precipitation(mm)/ Precipitación media anual (mm)	567-840	450-813	957-1 164	876-1 153	965-1 200
Estimated surface área (km ²)/ Superficie estimada (km ²)	302 400	85 720	103 900	27 340	46 580

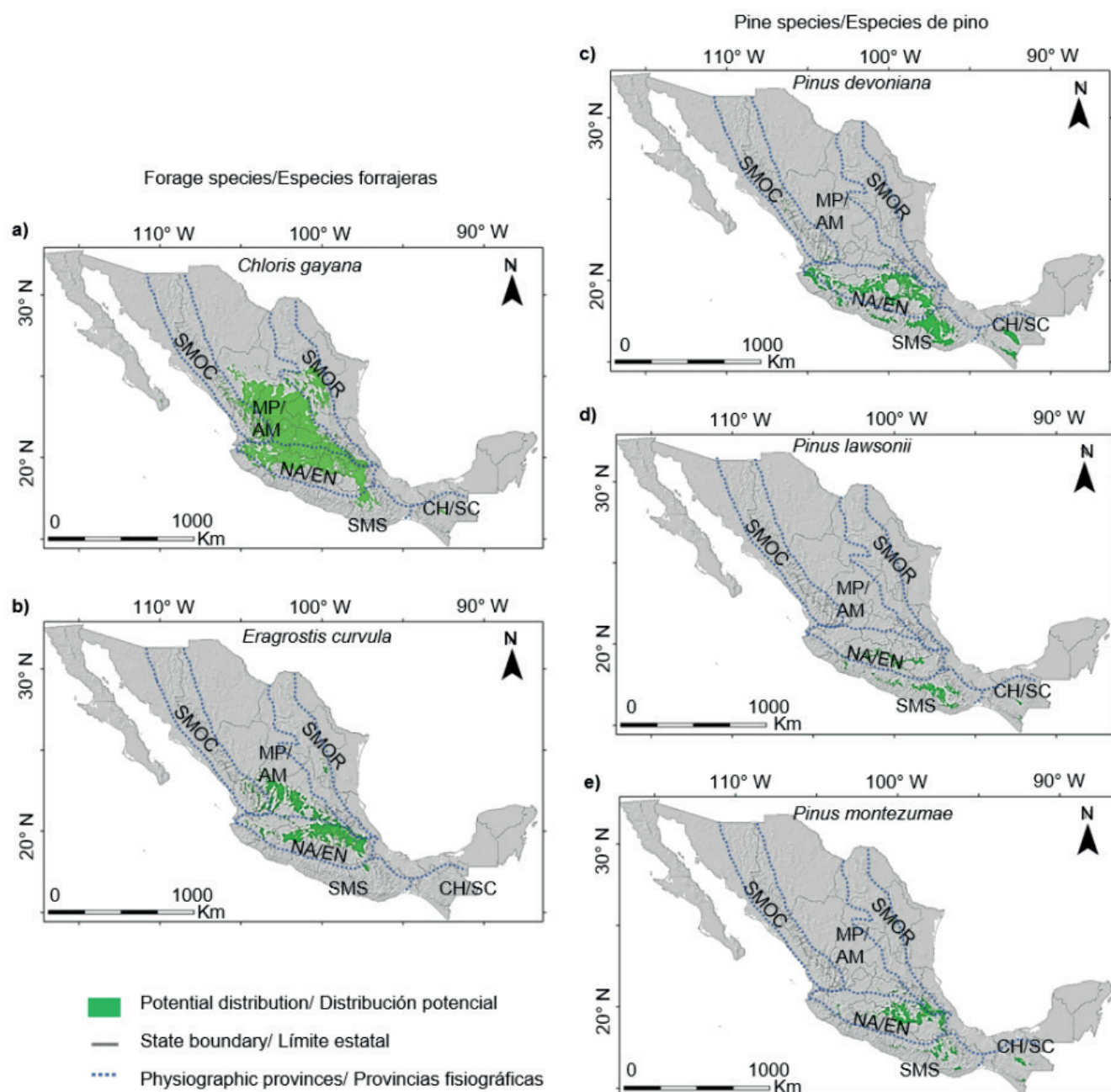


Figure 3. Potential distribution of two forage species and three pine species in Mexico. Physiographic provinces: SMOC = Sierra Madre Occidental, SMOR = Sierra Madre Oriental, MP = Mexican Plateau, NA = Neovolcanic Axis, SMS = Sierra Madre del Sur, CH = Chiapas highlands.

Figura 3. Distribución potencial de dos especies forrajeras y tres especies de pino en México. Provincias fisiográficas: SMOC = Sierra Madre Occidental, SMOR = Sierra Madre Oriental, AM = Altiplanicie Mexicana, EN = Eje Neovolcánico, SMS = Sierra Madre del Sur, SC = Sierra de Chiapas.

Potential areas for silvopastoral systems

According to Figure 4, potential areas were located mainly in the Neovolcanic Axis and Sierra Madre del Sur. With *C. gayana* and *P. devoniana*, potential areas in forest zones were found mostly in the western portion of the Neovolcanic Axis (4 730 024 ha), while in agricultural areas they were found in the eastern portion of this mountain range (1559539 ha). The distribution of *P. lawsonii* was more discontinuous with portions mainly in agricultural areas of Michoacán, Puebla, and Guerrero (635 154 ha), while potential areas with *P. montezumae* were concentrated in agricultural areas in the central states of the country (2 536 042 ha). On average, the area in forest zones represented 25 % of the total area for each species.

The distribution of areas suitable for silvopastoral systems with *E. curvula* and *P. devoniana* had a pattern similar to that of *C. gayana*, with areas of preserved forest in the western portion of the Neovolcanic Axis (676 321 ha), while agricultural areas were located in the eastern portion of this mountain range (2 761 068 ha). The areas for silvopastoral systems with *P. lawsonii* were smaller (128 344 ha), with small portions in agricultural areas of the Neovolcanic Axis. Suitable areas with *P. montezumae* were also concentrated in the Neovolcanic Axis, with forest areas (432 801 ha) in Jalisco, Michoacán, Guanajuato and Querétaro, while agricultural areas (1 228 405 ha) were located in Estado de México, Mexico City, Hidalgo, Tlaxcala and Puebla.

As for the distribution by state, Table 4 shows that potential areas with *C. gayana* and at least one pine species were found in 20 states. For agricultural areas, 48.5 % of the suitable area with *P. devoniana* and 84.6 % of the area with *P. lawsonii* were concentrated in Michoacán, Puebla and Oaxaca, while 56.7 % of the area with *P. montezumae* was located in Puebla, Oaxaca and Estado de México. In the case of forested areas, Michoacán was first in the area with *P. lawsonii* and *P. montezumae*, and second with *P. devoniana*. Jalisco, Michoacán and Oaxaca concentrated 67.2 % of the area with *P. devoniana* and 87.4 % with *P. lawsonii*, while Michoacán, Oaxaca and Estado de México had 55.8 % of the area with *P. montezumae*.

In the case of *E. curvula*, potential areas were found in 15 states (Table 5). The states with the largest areas suitable for *P. devoniana* in agricultural areas were Hidalgo, Michoacán, and Oaxaca (39.5 % of the total), while in forest areas were Michoacán, Jalisco, and Guanajuato (70.5 %). Only five states were suitable for *P. lawsonii*, of which Puebla, Estado de México, and Michoacán concentrated 95.7 % of the potential area in agricultural areas, while in forest areas were Michoacán, Guanajuato, and Puebla with 97.7 % of

19.5 °C y precipitación media anual entre 450 y 1 200 mm. La gramínea *E. curvula* ocupó áreas más elevadas y con temperatura media anual menor que *C. gayana*. Por otra parte, *P. montezumae* se encontró en laderas más altas y sitios con temperatura media anual menor que *P. devoniana* y *P. lawsonii*, especies que compartieron cotas de elevación y rangos de temperatura media anual.

La Figura 3 ilustra la distribución potencial de las especies evaluadas. El pasto *C. gayana* se encontró en una superficie de 302 400 km², ocupando áreas extensas del Eje Neovolcánico, de la Altiplanicie Mexicana y algunas porciones de la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y Sierra Madre del Sur; mientras que el área de distribución de *E. curvula* fue más reducida, ocupando 85 720 km², especialmente en el Eje Neovolcánico y la porción sur de la Altiplanicie Mexicana. En el caso de las coníferas, *P. devoniana* ocupó mayor superficie (103 900 km²) que las otras dos especies a lo largo del Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur y las sierras de Chiapas; *P. montezumae* (46 580 km²) se encontró principalmente en la porción oriental del Eje Neovolcánico y en algunas porciones de la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur y Chiapas; mientras que *P. lawsonii* tuvo una distribución más restringida (27 340 km²), principalmente en el Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur.

Áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles

De acuerdo con la Figura 4, las áreas potenciales se localizaron principalmente en el Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. Con *C. gayana* y *P. devoniana*, las áreas potenciales en zonas forestales se encontraron mayoritariamente en la porción occidental del Eje Neovolcánico (4 730 024 ha), mientras que en áreas agrícolas se encontraron en la porción oriental de esta cordillera (1 559 539 ha). La distribución de *P. lawsonii* fue más discontinua con porciones principalmente en zonas agrícolas de Michoacán, Puebla y Guerrero (635 154 ha), mientras que las áreas potenciales con *P. montezumae* se concentraron en zonas agrícolas de los estados del centro del país (2 536 042 ha). En promedio, la superficie en zonas forestales ocupó 25 % del área total para cada especie.

La distribución de áreas aptas para sistemas silvopastoriles con *E. curvula* y *P. devoniana* presentó un patrón similar al de *C. gayana*, con zonas de bosque conservado en la porción occidental del Eje Neovolcánico (676 321 ha), mientras que las zonas agrícolas se ubicaron en la porción oriental de esta cordillera (2 761 068 ha). Las áreas para sistemas silvopastoriles con *P. lawsonii* fueron más reducidas (128 344 ha), con pequeñas porciones en zonas agrícolas

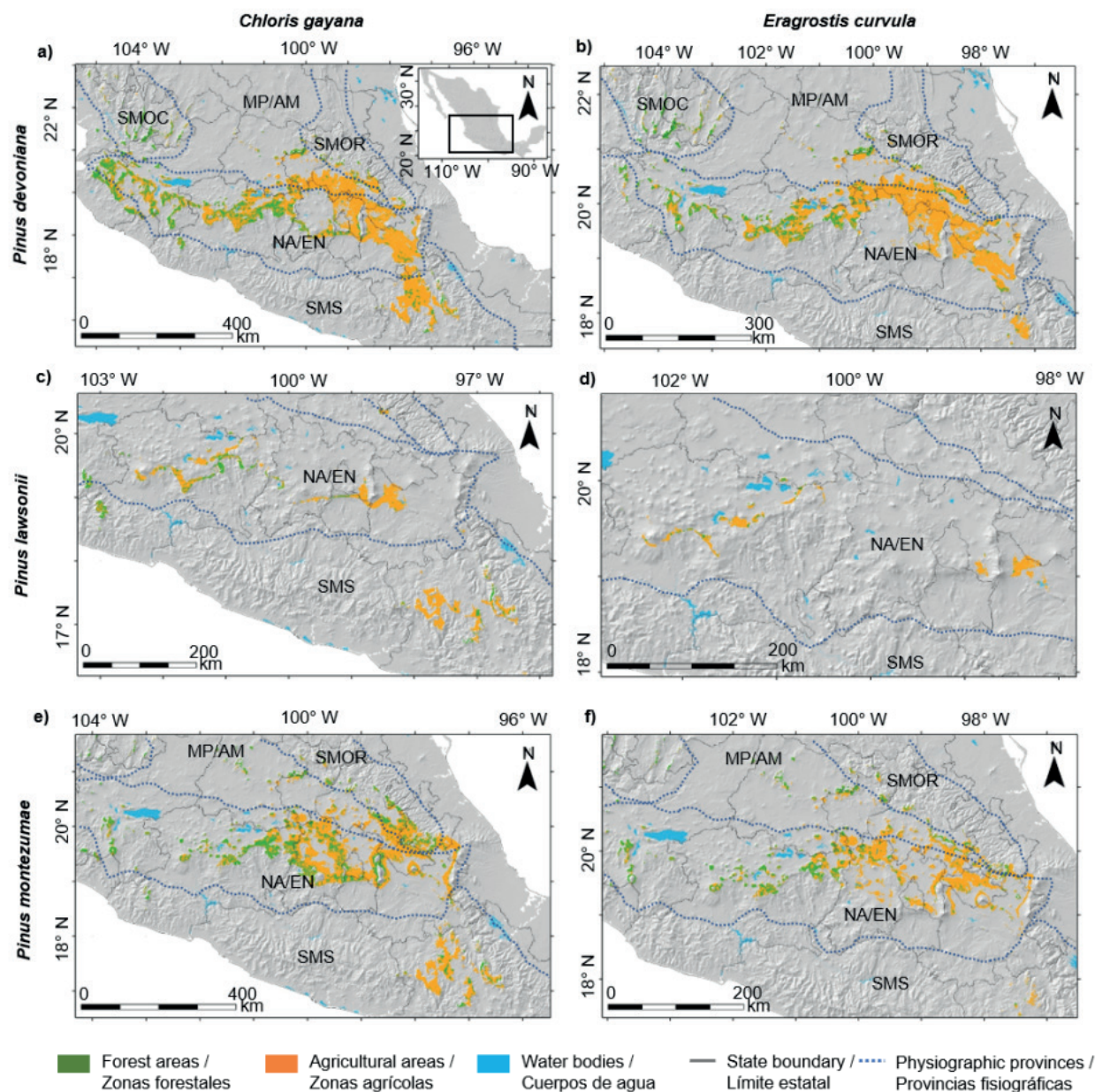


Figure 4. Potential areas for the establishment of silvopastoral systems of two forage species and three pine species in forest and agricultural areas of Mexico. Physiographic provinces: SMOC = Sierra Madre Occidental, SMOR = Sierra Madre Oriental, MP = Mexican Plateau, NA = Neovolcanic Axis, SMS = Sierra Madre del Sur.

Figura 4. Áreas potenciales para el establecimiento de sistemas silvopastoriles de dos especies forrajeras y tres especies de pino en zonas forestales y agrícolas de México. Provincias fisiográficas: SMOC = Sierra Madre Occidental, SMOR = Sierra Madre Oriental, AM = Altiplanicie Mexicana, EN = Eje Neovolcánico, SMS = Sierra Madre del Sur.

Table 4. Potential area for silvopastoral systems with *Chloris gayana* and three pine species in Mexico.
Cuadro 4. Superficie potencial para establecer sistemas silvopastoriles con *Chloris gayana* y tres especies de pino en México.

State/Estado	<i>Pinus devoniana</i>		<i>Pinus lawsonii</i>		<i>Pinus montezumae</i>	
	Agricultural area (ha)/ Agrícola (ha)	Forest (ha)/ Bosque (ha)	Agricultural area (ha)/ Agrícola (ha)	Forest (ha)/ Bosque (ha)	Agricultural area (ha)/ Agrícola (ha)	Forest (ha)/ Bosque (ha)
Chiapas	67 370	21 800	8 737	1 433	66 040	22 070
Coahuila	236	21	-	-	15 590	6 020
Colima	8 037	6 633	255	-	2 292	2 288
Mexico city/ Ciudad de México	35 840	4 550	416	-	56 470	12 790
Durango	8 241	30 169	-	-	679	7 051
Guanajuato	130 600	51 500	1 571	1 732	36 300	42 020
Hidalgo	684 400	50 600	6 161	1 392	286 500	88 500
Jalisco	508 900	549 100	2 970	18 620	24 990	80 310
Estado de México	523 600	79 000	52 700	7 770	660 300	212 900
Michoacán	734 800	402 200	157 500	91 200	226 600	257 500
Morelos	29 330	18 080	18 050	5 730	22 800	20 970
Nayarit	24 030	79 570	-	-	356	5 350
Nuevo León	5 063	8 897	-	-	40 070	24 680
Oaxaca	760 700	97 500	261 700	33 000	421 400	68 500
Puebla	797 600	61 600	118 100	2 100	355 800	110 700
Querétaro	166 900	35 800	3 191	-	62 850	31 150
Sinaloa	977	15 573	-	-	-	-
Tlaxcala	198 900	10 500	-	-	193 700	22 600
Veracruz	19 050	5 450	-	-	57 930	14 660
Zacatecas	21 940	28 030	-	-	1 763	8 477
Total	4 726 515	1 556 572	631 351	162 977	2 532 430	1 038 536

Table 5. Potential area for silvopastoral systems with *Eragrostis curvula* and three pine species in Mexico.Cuadro 5. Superficie potencial para establecer sistemas silvopastoriles con *Eragrostis curvula* y tres especies de pino en México

State / Estado	<i>Pinus devoniana</i>		<i>Pinus lawsonii</i>		<i>Pinus montezumae</i>	
	Agricultural area (ha) / Agrícola (ha)	Forest (ha) / Bosque (ha)	Agricultural area (ha) / Agrícola (ha)	Forest (ha) / Bosque (ha)	Agricultural area (ha) / Agrícola (ha)	Forest (ha) / Bosque (ha)
Mexico city / Ciudad de México	29 280	1 770	-	-	24 440	2 600
Durango	3 443	4 360	-	-	410	1 558
Guanajuato	128 800	51 100	1 571	1 732	36 240	41 960
Hidalgo	657 100	36 600	-	-	230 800	39 200
Jalisco	113 300	186 100	-	-	19 900	59 270
Estado de México	385 600	9 800	11 200	280	301 300	34 800
Michoacán	511 400	239 900	59 650	9 480	184 500	161 200
Nayarit	9 181	40 939	-	-	273	4 982
Nuevo León	-	-	-	-	6 702	4 318
Oaxaca	99 430	4 870	-	-	26 140	2 330
Puebla	435 600	27 800	40 530	710	150 900	31 300
Querétaro	166 300	35 600	-	-	62 580	30 900
Tlaxcala	188 400	7 300	3 191	-	160 200	8 600
Veracruz	9 592	99	-	-	19 280	100
Zacatecas	20 320	27 550	-	-	1 746	7 676
Total	2 757 746	673 789	116 142	12 202	1 225 411	430 795

the area. Estado de México, Hidalgo and Michoacán accounted for 58.3 % of the potential area with *P. montezumae* in agricultural areas, while in forest areas were Michoacán, Jalisco and Guanajuato, with 60.6 % of the total.

Discussion

Ecological niche models had high predictive power and were better than random modeling in both AUC and partial ROC values, indicating that these models fit the actual distribution of the species (Slater & Michel, 2012). AUC values were higher (0.93) compared to other studies on potential distribution of *C. gayana* (0.62) (Lastiri-Hernández, Cruz-Cárdenas, Álvarez-Bernal, Vázquez-Sánchez, & Bermúdez-Torres, 2020), as well as *P. devoniana*, *P. lawsonii*, and *P. montezumae* (Cruz-Cárdenas et al., 2016).

del Eje Neovolcánico. Las áreas aptas con *P. montezumae* también se concentraron en el Eje Neovolcánico, con zonas forestales (432 801 ha) en Jalisco, Michoacán, Guanajuato y Querétaro, mientras que las zonas agrícolas (1 228 405 ha) se localizaron en Estado de México, Ciudad de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla.

En cuanto a la distribución por estados, el Cuadro 4 muestra que las áreas potenciales con *C. gayana* y al menos una especie de pino se encontraron en 20 estados. En zonas agrícolas, 48.5 % de la superficie apta con *P. devoniana* y 84.6 % del área con *P. lawsonii* se concentraron en Michoacán, Puebla y Oaxaca, mientras que 56.7 % del área con *P. montezumae* se ubicó en Puebla, Oaxaca y Estado de México. En zonas forestales, Michoacán fue el primer lugar en área con *P. lawsonii* y *P. montezumae*, y segundo lugar con *P. devoniana*. Jalisco, Michoacán y Oaxaca concentraron 67.2 % de

The distribution of the five species was correlated with altitude and annual temperature range (Bio07), interrelated variables because temperature conditions change rapidly concerning altitude; the annual temperature range is more marked in mountainous areas (Winkler, Lin, Delgadillo, Chapin, & Huxman, 2019). The tropical species *C. gayana* and *E. curvula* have adapted to the temperate conditions of the Neovolcanic Axis, Sierra Madre del Sur, and the Mexican Plateau, due to high capacity for acclimatization in ruderal and degraded environments, which has allowed their expansion in these regions of Mexico (Imaz et al., 2005), while *E. curvula* has shown the ability to adapt to higher slopes and lower temperatures (Schussman et al., 2006).

In the case of pines, the ecological niche was adjusted to temperate mountain areas, where *P. devoniana* had the largest potential area, followed by *P. montezumae*, while *P. lawsonii* recorded a more restricted distribution, which coincides with the previous modeling for these species (Aceves-Rangel, Méndez-González, García-Aranda, & Nájera-Luna, 2018). The conifers *P. devoniana* and *P. lawsonii* shared elevations, while *P. montezumae* was found on higher slopes, where it can even form co-dominant stands with species more akin to cold conditions, such as *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham (Pérez-Miranda et al., 2014), which confirms that *P. montezumae* has a distinct altitudinal ecological niche.

In the present study, the great potential was noted for the establishment of silvopastoral systems using *C. gayana* and *E. curvula* with the conifer species evaluated, mainly in the temperate region of the center and south of the country, which coincides with the high potential found for these two forage species on a regional scale (Sáenz-Reyes et al., 2019). Michoacán, Jalisco, Puebla, Oaxaca, Estado de México, Guanajuato, and Hidalgo had the largest suitable area, mainly in agricultural areas, where it is feasible to intercrop forage crops with conifers widely propagated in forest nurseries (Rueda-Sánchez et al., 2010), which increases the potential of silvopastoral systems with these species; in addition, different altitudinal zones could be covered, because *P. devoniana* and *P. lawsonii* occupy low slopes with warmer temperatures, while *P. montezumae* inhabits colder zones.

It is important to highlight that the use of these species in silvopastoral systems has been evaluated in localities of Michoacán, with chemical and organic fertilization, having forage production of 11.9 Mg·ha⁻¹, sufficient to feed up to 6 animal units·ha⁻¹·year⁻¹, and with an adequate development in height for conifers (Sáenz-Reyes et al., 2016). Therefore, it is feasible to implement this technology in regions whose soils have been severely degraded and have a large

la superficie con *P. devoniana* y 87.4 % con *P. lawsonii*, mientras que Michoacán, Oaxaca y Estado de México reunieron 55.8 % del área con *P. montezumae*.

En el caso de *E. curvula* se encontraron áreas potenciales en 15 entidades (Cuadro 5). Los estados con mayor superficie apta con *P. devoniana* en zonas agrícolas fueron Hidalgo, Michoacán y Oaxaca (39.5 % del total), mientras que en zonas forestales fueron Michoacán, Jalisco y Guanajuato (70.5 %). Solo cinco estados fueron aptos para *P. lawsonii*, de los cuales Puebla, Estado de México y Michoacán concentraron 95.7 % del área potencial en zonas agrícolas, mientras que en zonas forestales fueron Michoacán, Guanajuato y Puebla con 97.7 % del área. El Estado de México, Hidalgo y Michoacán reunieron 58.3 % de la superficie potencial con *P. montezumae* en zonas agrícolas, mientras que en zonas forestales fueron Michoacán, Jalisco y Guanajuato, con 60.6 % del total.

Discusión

Los modelos de nicho ecológico tuvieron alto poder predictivo y fueron mejores que una modelación al azar, tanto en los valores de AUC como los del ROC parcial, lo cual indica que dichos modelos se ajustan bien a la distribución real de las especies (Slater & Michel, 2012). Los valores de AUC fueron mayores (0.93) que en otros estudios sobre distribución potencial de *C. gayana* (0.62) (Lastiri-Hernández, Cruz-Cárdenas, Álvarez-Bernal, Vázquez-Sánchez, & Bermúdez-Torres, 2020), así como de *P. devoniana*, *P. lawsonii* y *P. montezumae* (Cruz-Cárdenas et al., 2016).

La distribución de las cinco especies se correlacionó con la altitud y el rango anual de la temperatura (Bio07), variables interrelacionadas debido a que las condiciones de temperatura cambian rápidamente con respecto a la altitud; el rango anual de temperatura es más marcado en zonas montañosas (Winkler, Lin, Delgadillo, Chapin, & Huxman, 2019). Las especies tropicales *C. gayana* y *E. curvula*, aparentemente, se han adaptado a las condiciones templadas del Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur y la Altiplanicie Mexicana, debido a la alta capacidad de aclimatación en ambientes ruderales y degradados, lo cual ha permitido su expansión en estas regiones de México (Imaz et al., 2005), mientras que *E. curvula* ha mostrado su capacidad de adaptación a laderas más altas y temperaturas más bajas (Schussman et al., 2006).

En el caso de los pinos, el nicho ecológico se ajustó a zonas templadas de montaña, donde *P. devoniana* tuvo la mayor superficie potencial, seguido por *P. montezumae*, mientras que *P. lawsonii* registró una distribución más restringida, lo cual coincide con una modelación previa para estas especies (Aceves-Rangel, Méndez-González, García-Aranda, & Nájera-Luna, 2018). Las coníferas *P.*

livestock production, such as the Morelia-Queréndaro valley, the Bajío region, and the Cuitzeo lake basin (Mendoza, López-Granados, Geneletti, Pérez-Salicrup, & Salinas, 2011).

The temperate region of central and southern Mexico had the greatest potential for silvopastoral systems with the species studied, because, in the case of conifers, they represent the regions of their natural distribution (Farjon et al., 1997). Forages have a great capacity for acclimatization to Mexican soils (Beltrán-López et al., 2018), but could also be suitable for use with other forest species, for which the modeling of the ecological niche of the species represents a useful tool to identify potential areas.

Conclusions

Mexico has a high potential for silvopastoral systems with forage crops *C. gayana* and *E. curvula* and conifers *P. lawsonii*, *P. devoniana*, and *P. montezumae*, mainly in the central and southern regions of the country. Most of the potential areas were located in agricultural areas, where the implementation of these systems could contribute to the recovery of forest cover and prevent soil erosion, while in forest areas they could generate a continuous source of food for livestock and prevent animal damage to the ecosystem. Ecological niche modeling is recommended to know the potential areas for establishing silvopastoral systems with forage and forest species.

Acknowledgments

The first author thanks the Graduate Program in Biological Sciences of UNAM and the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the scholarship received during his graduate studies.

End of English version

References / Referencias

- Aceves-Rangel, L. D., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A., & Nájera-Luna, J. A. (2018). Potential distribution of 20 pine species in Mexico. *Agrociencia*, 52(7), 1043–1057. Retrieved from <https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2018/oct-nov/art-9.pdf>
- Ávila-Ramírez, D. N., Lara-Bueno, A., Krishnamurthy, L., Espinosa-Aviña, F., Escutia-Sánchez, J. A., & Uribe-Gómez, M. (2019). Seasonal silvopastoral system with sheep in pine-oak forest: effects on soil and vegetation. *Agroforestry Systems*, 93, 1637–1645. doi: 10.1007/s10457-019-00379-3
- Beltrán-López, S., García-Díaz, C. A., Loredó-Osti, C., Urrutia-Morales, J., Hernández-Alatorre, J. A., & Gámez-devoniana y *P. lawsonii* compartieron cotas de elevación, mientras que *P. montezumae* se encontró en laderas más altas, donde incluso puede formar rodales codominantes con especies más afines a condiciones frías, como *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham (Pérez-Miranda et al., 2014), lo cual confirma que *P. montezumae* tiene un nicho ecológico altitudinal distinto.
- En el presente estudio se notó gran potencial para el establecimiento de sistemas silvopastoriles utilizando *C. gayana* y *E. curvula* con las especies de coníferas evaluadas, principalmente en la región templada del centro y sur del país, lo cual coincide con el alto potencial encontrado para estas dos especies forrajeras a escala regional (Sáenz-Reyes et al., 2019). Michoacán, Jalisco, Puebla, Oaxaca, Estado de México, Guanajuato e Hidalgo tuvieron la mayor superficie apta, principalmente en zonas agrícolas, donde es factible intercalar los cultivos forrajeros con coníferas propagadas ampliamente en viveros forestales (Rueda-Sánchez et al., 2010), lo cual incrementa el potencial de los sistemas silvopastoriles con estas especies; además, se podrían cubrir distintas zonas altitudinales, pues *P. devoniana* y *P. lawsonii* ocupan laderas bajas con temperaturas más cálidas, mientras que *P. montezumae* habita en zonas más frías.
- Es importante destacar que el uso de estas especies en sistemas silvopastoriles ha sido evaluado en localidades de Michoacán, con fertilización química y orgánica, obteniendo producción de forraje de 11.9 Mg·ha⁻¹, suficiente para la alimentación de hasta 6 unidades animal·ha⁻¹·año⁻¹, y con un desarrollo adecuado en altura de las coníferas (Sáenz-Reyes et al., 2016). Por ello, es factible implementar esta tecnología en regiones cuyos suelos han sido degradados severamente y que tienen una gran producción ganadera, como el valle Morelia-Queréndaro, la región Bajío y la cuenca del lago de Cuitzeo (Mendoza, López-Granados, Geneletti, Pérez-Salicrup, & Salinas, 2011).
- La región templada del centro y sur de México presentó el mayor potencial para establecer sistemas silvopastoriles con las especies estudiadas, ya que, en el caso de las coníferas, representan las regiones de su distribución natural (Farjon et al., 1997). Los forrajes, por su parte, tienen gran capacidad de aclimatación a los suelos de México (Beltrán-López et al., 2018), pero también podrían ser aptos para el uso con otras especies forestales, para lo cual el modelado del nicho ecológico de las especies representa una herramienta útil para la identificación de áreas potenciales.

Conclusiones

En México existe alto potencial para establecer sistemas silvopastoriles con los cultivos forrajeros *C. gayana* y *E. curvula* y con las coníferas *P. lawsonii*, *P. devoniana* y

- Vázquez, H. G. (2018). "Llorón Imperial", *Eragrostis curvula* (Schrad) Nees, variedad de pasto para zonas áridas y semiáridas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(2), 400–407. doi: 10.22319/rmcp.v9i2.4532
- Bolaños-González, M. A., Paz-Pellat, F., Cruz-Gaistardo, C. O., Argumedo-Espinoza, J. A., Romero-Benítez, V. M., & de la Cruz-Cabrera, J. C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271–288. Retrieved from <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/149>
- Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Parsons, D., Caamal-Maldonado, A., Piñeiro-Vázquez, A. T., & Díaz-Echeverría, V. (2015). Environmental services from tropical agroforestry systems. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 269–284. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.06.029
- Centre for Agricultural Bioscience International (CABI). (2002). *Pines of silvicultural importance*. Wallingford, Inglaterra: Author.
- Cotler, H., Corona, J. A., & Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: Una primera aproximación. *Investigaciones Geográficas*, 101, e59976. doi: 10.14350/ig.59976
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F., & López-Sandoval, J. A. (2016). Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacan. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 135–148. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.06.027
- Esqueda-Coronado, M. H., & Carrillo-Romo, R. L. (2012). Producción de forraje y carne en pastizales sembrados con gramíneas introducidas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 39(2), 139–152. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/613/61339205.pdf>
- Farjon, A., Pérez de la Rosa, J. A., & Styles, T. B. (1997). *Field guide of the pines of Mexico and Central America*. Oxford, Inglaterra: Kew Publishing.
- Fuentes-Hernández, A., Mendoza-Orozco, M., Ríos-Casanova, L., Soler-Aburto, A., Muñoz-Iniestra, D., & Godínez-Álvarez, H. (2019). Impacto de la agricultura y ganadería sobre el bosque tropical seco de Zirándaro, Guerrero: Una evaluación con indicadores ecológicos. *Botanical Sciences*, 97(2), 148–154. doi: 10.17129/botsci.2043
- Ghebrehiwot, H. M., Fynn, R. W. S., Morris, C. D., & Kirkman, K. P. (2006). Shoot and root biomass allocation and competitive hierarchies of four South African grass species on light, soil resources and cutting gradients. *African Journal of Range and Forage Science*, 23(2), 113–122. doi: 10.2989/10220110609485894
- Global Biodiversity Information Facility (GBIF). (2018). Retrieved December 20, 2019 from https://www.gbif.org/occurrence/search?country=MX&taxon_key=2684241
- Gómez-Romero, M., Soto-Correa, J. C., Blanco-García, J. A., Sáenz-Romero, C., Villegas, J., & Lindig-Cisneros, R. (2012). Testing of pine species for restoration of *P. montezumae*, principalmente en las regiones centro y sur del país. La mayoría de las áreas potenciales se localizaron en zonas agrícolas, donde la implementación de estos sistemas podría contribuir a la recuperación de la cubierta forestal y prevenir la erosión del suelo, mientras que en zonas forestales podrían generar una fuente continua de alimento para el ganado y prevenir el daño de los animales al ecosistema. El modelado del nicho ecológico es recomendable con el fin de conocer las áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles con especies forrajeras y forestales.
- Agradecimientos**
- El primer autor agradece al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida durante sus estudios de posgrado.
- Fin de la versión en español**
-
- degraded sites. *Agrociencia*, 46, 795–807. Retrieved from <https://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2012/nov-dic/art-5.pdf>
- Guevara-Escobar, A., Cervantes-Jiménez, M., Suzán-Azpiri, H., González-Sosa, E., & Saavedra, I. (2012). Producción de pasto Rhodes en una plantación de eucalipto. *Agrociencia*, 46(2), 175–188. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v46n2/v46n2a7.pdf>
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3), 147–186. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00354-9
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. doi: 10.1002/joc.1276
- Hirzel, A. H., Hausser, J., Chessel, D., & Perrin, N. (2002). Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology*, 83(7), 2027–2036. doi: 10.1890/0012-9658(2002)083[2027:ENFAHT]2.0.CO;2
- Imaz, J. A., Giménez, D. O., Grimoldi, A. A., & Striker, G. G. (2012). The effects of submergence on anatomical, morphological and biomass allocation responses of tropical grasses *Chloris gayana* and *Panicum coloratum* at seedling stage. *Crop and Pasture Science*, 63, 1145–1155. doi: 10.1071/CP12335
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Retrieved November 15, 2019 from <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). Retrieved November 15, 2019 from <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- Lastiri-Hernández, M. A., Cruz-Cárdenas, G., Álvarez-Bernal, D., Vázquez-Sánchez, M., & Bermúdez-Torres, K. (2020). Ecological niche modeling for halophyte species with

- possible anthropogenic use in agricultural saline soils. *Environmental Modeling and Assessment*, 25, 429–440. doi: 10.1007/s10666-020-09690-1
- McKenzie, D., Peterson, D. W., & Peterson, D. L. (2003). Modelling conifer species distributions in mountain forests of Washington State, USA. *The Forestry Chronicle*, 79(2), 253–258. doi: 10.5558/tfc79253-2
- Mendoza, M. E., López-Granados, E., Geneletti, D., Pérez-Salicrup, D. R., & Salinas, V. (2011). Analyzing land cover and land use change processes at watershed level: a multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975–2003). *Applied Geography*, 31, 237–250. doi: 10.1016/j.apgeog.2010.05.010
- Montagnini, F., Ibrahim, M., & Murgueitio-Restrepo, E. (2013). Silvopastoral systems and climate change mitigation in Latin America. *Bois et Forêts des Tropiques*, 316(2), 3–16. doi: 10.19182/bft2013.316.a20528
- Mosquera-Losada, M. R., McAdam, J. H., Romero-Franco, R., Santiago-Freijanes, J. J., & Rigueiro-Rodríguez, A. (2009). Definitions and components of agroforestry practices in Europe. In A. Rigueiro-Rodríguez, J. McAdam, & M. R. Mosquera-Losada (Eds.), *Agroforestry in Europe* (pp. 3–19). Dordrecht, Alemania: Springer.
- Newbold, T., Gilbert, F., Zalut, S., El-Gabbas, A., & Reader, T. (2009). Climate-based models of spatial patterns of species richness in Egypt's butterfly and mammal fauna. *Journal of Biogeography*, 36(11), 2085–2095. doi: 10.1111/j.1365-2699.2009.02140.x
- Osorio-Olvera L., Lira-Noriega, A., Soberón, J., Townsend Peterson, A., Falconi, M., Contreras-Díaz, R. G., Martínez-Meyer, E., ... Barve, N. (2020). ntbox: An R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(10), 1199–1206. doi: 10.1111/2041-210X.13452
- Pérez-Miranda, R., Moreno-Sánchez, F., González-Hernández, A., & Arriola-Padilla, V. J. (2014). Distribution of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. and *Pinus montezumae* Lamb. in the face of climate change. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 18–33. doi: 10.29298/rmcf.v5i25.301
- Pérez-Nieto, J., Valdés-Velarde, E., & Ordaz-Chaparro, V. M. (2012). Cobertura vegetal y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Terra Latinoamericana*, 30(3), 249–259. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57325509001>
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Bastos-Araújo, M. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. New Jersey, USA: Princeton University Press.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026
- Ponsens, J., Hanson, J., Schellberg, J., & Moeseler, B. M. (2010). Characterization of phenotypic diversity, yield and response to drought stress in a collection of Rhodes grass (*Chloris gayana* Kunth) accessions. *Field Crops Research*, 118(1), 57–72. doi: 10.1016/j.fcr.2010.04.008
- R Core Team. (2017). A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved October 14, 2018 from <http://www.R-project.org/>
- Ramos-Uvilla, J. A., García-Magaña, J. J., Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Velarde-Ramírez, J. C., Muñoz-Flores, H. J., & García-Espinoza, G. G. (2014). Equations and volume tables for two *Pinus* species of la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 92–109. doi: 10.29298/rmcf.v5i23.344
- Rueda-Sánchez, A., Benavides-Solorio, J. D., Prieto-Ruiz, J. A., Sáenz-Reyes, J. T., Orozco-Gutiérrez, G., & Molina-Castañeda, A. (2012). Quality of plants produced in forest nurseries in Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(14), 69–82. doi: 10.29298/rmcf.v3i14.475
- Sáenz-Reyes, J. T., Castillo-Quiroz, D., Ávila-Flores, D. Y., Castillo-Reyes, F., Muñoz-Flores, H. J., & Rueda-Sánchez, A. (2019). Potential areas for silvopastoral systems with pine lacio (*Pinus devoniana* Lind.) and introduced grasses (*Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees or *Chloris gayana* Kunth) in Michoacán, México. *Revista Bio Ciencias*, 6:e494. doi: 10.15741/revbio.06.e494
- Sáenz-Reyes, J. T., Jiménez-Ochoa, J., Muñoz-Flores, H. J., Rueda-Sánchez, A., Sáenz-Ceja, J. E., & Hernández-Ramos, J. (2016). Fertilización en sistema silvopastoril en la cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán. *Revista Mitigación del Daño Ambiental, Agroalimentario y Forestal de México*, 2(2), 178–187. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/327881246_Fertilizacion_en_sistema_silvopastoril_en_la_cuenca_del_Lago_de_Patzcuaro_Michoacan
- Sáenz-Reyes, J. T., Muñoz-Flores, H. J., & Rueda-Sánchez, A. (2011). *Especies promisorias de clima templado para plantaciones forestales comerciales en Michoacán*. México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Uruapan.
- Schussman, H., Geiger, E., Mau-Crimmins, T., & Ward, J. (2006). Spread and current potential distribution of an alien grass, *Eragrostis lehmanniana* Nees, in the southwestern USA: Comparing historical data and ecological niche models. *Diversity and Distributions*, 12, 582–592. doi: 10.1111/j.1366-9516.2006.00268.x
- Slater, H., & Michael, E. (2012). Predicting the current and future potential distributions of lymphatic filariasis in Africa using maximum entropy ecological niche modelling. *PLoS ONE*, 7(2), e32202. doi: 10.1371/journal.pone.0032202
- United States Geological Survey (USGS). (2000). Retrieved December 9, 2018 from https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects
- Valdés-Reyna, J. (2015). *Gramíneas de Coahuila*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

- Ward, D., Kirkman, K., & Tsvuura, Z. (2017). An African grassland responds similarly to long-term fertilization to the Park Grass experiment. *PLoS ONE*, 12(5), e01177208. doi: 10.1371/journal.pone.0177208
- Winkler, D. E., Lin, M. Y., Delgadillo, J., Chapin, K. J., & Huxman, T. E. (2019). Early life history responses and phenotypic shifts in a rare endemic plant responding to climate change. *Conservation Physiology*, 7(1), coz076. doi: 10.1093/conphys/coz076