

Áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles con *Pinus lawsonii* y dos forrajes en Michoacán, México

Potential areas for establishing silvopastoral systems with *Pinus lawsonii* and two forages in Michoacán, Mexico

Jesús Eduardo Sáenz-Ceja^{1*} ,
J. Trinidad Sáenz-Reyes² ,
Hipólito Jesús Muñoz-Flores² ,
Agustín Rueda-Sánchez³ ,
Francisco Castillo-Reyes⁴ ,
David Castillo-Quiroz⁴ 

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro, No. 8701. Col. Ex Hacienda San José de la Huerta, CP. 58190, Morelia, Michoacán, México.

²Campo Experimental Uruapan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Av. Latinoamericana, No. 1101, Col. Revolución, CP. 60500, Uruapan, Michoacán, México.

³Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México. Carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno km 8, CP. 47600, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

⁴Campo Experimental Saltillo, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera Saltillo-Zacatecas km 342+119, No. 9515, Col. Hacienda de Buenavista, CP. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

*Autor de correspondencia:
castillo.david@inifap.gob.mx

Artículo científico

Recibido: 11 de febrero 2022

Aceptado: 03 de diciembre 2022

Como citar: Sáenz-Ceja JE, Sáenz-Reyes JT, Muñoz-Flores HJ, Rueda-Sánchez A, Castillo-Reyes F, Castillo-Quiroz D (2022) Áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles con *Pinus lawsonii* y dos forrajes en Michoacán, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(3): e3282. DOI: 10.19136/era.a9n3.3282

RESUMEN. Los sistemas silvopastoriles representan una alternativa para la producción de forraje para ganado y leña, la reducción de la degradación del suelo y la diversificación de la producción agropecuaria. El objetivo de este estudio fue identificar las áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles conformados con *Pinus lawsonii* y dos gramíneas forrajeras *Eragrostis curvula* y *Chloris gayana*, en el estado de Michoacán, México, en áreas con suelos degradados. Se modeló la distribución potencial de las tres especies según sus requerimientos de elevación, precipitación media anual, temperatura media anual y tipo de suelo. Posteriormente se intersecaron los polígonos de cada especie para obtener las áreas potenciales. Por último, se intersecaron dichas áreas con la capa de suelos degradados. Las áreas potenciales para sistemas silvopastoriles con *P. lawsonii* y *E. curvula* se concentraron en la porción michoacana del Eje Neovolcánico, sobre una superficie de 190 918 ha en 61 municipios, mientras que con *P. lawsonii* y *C. gayana* se encontraron en el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, sobre una superficie de 329 546 ha de 81 municipios. Además, el 60.8% de la superficie es apta para *P. lawsonii* y *E. curvula*. El 55.4% de *P. lawsonii* con *C. gayana* se encuentran sobre suelos con algún grado de erosión. Los resultados indican potencial alto para establecer sistemas silvopastoriles con estas especies en Michoacán, lo cual podría contribuir a la recuperación de suelos erosionados y a la provisión de forraje para el ganado y leña para habitantes rurales.

Palabras clave: Conservación del suelo, envoltura climática, erosión, ganadería, sistemas de información geográfica.

ABSTRACT. Silvopastoral systems represent an alternative to the production of forage for cattle grazing and firewood, the reduction of soil degradation, and the diversification of agriculture production. This study aimed to identify the potential areas for establishing silvopastoral systems consisting of *Pinus lawsonii* and two forage gramineous *Eragrostis curvula* and *Chloris gayana*, in the state of Michoacán, Mexico, including areas with degraded soils. First, the potential species distribution of the three species was modeled according to their elevation, mean annual precipitation, mean annual temperature, and soil type requirements. Then the polygons of each species were intersected to obtain the potential areas. Finally, such areas were overlapped with the shape of degraded soils. As a result, the potential areas for silvopastoral systems with *P. lawsonii* and *E. curvula* were found in the Michoacan portion of the Neo-volcanic Axis on a surface of 190 918 ha in 61 municipalities. The suitable areas with *P. lawsonii* and *C. gayana* were found in the Neo-volcanic Axis and the Sierra Madre del Sur on a surface of 329 546 ha within 81 municipalities. Furthermore, 60.8% of the suitable area of *P. lawsonii* with *E. curvula* and 55.4% of *P. lawsonii* with *C. gayana* were found on degraded soils. The results show high potential for establishing silvopastoral systems with these species in Michoacán, which can recover degraded soils and provide forage for cattle and firewood for rural inhabitants.

Key words: Soil conservation, climatic envelope, erosion, livestock, geographic information systems.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas silvopastoriles se combinan la producción de forrajes para la alimentación de ganado y la presencia de especies arbóreas en un espacio común, cuyo origen incluye la siembra de gramíneas forrajeras en bosques remanentes, o la plantación de árboles en una unidad de producción pastoril (Kunst *et al.* 2016). El uso de sistemas silvopastoriles se ha extendido mundialmente en regiones tanto tropicales como templadas, con una amplia variedad de prácticas como el ramoneo directo del ganado, cultivo en franjas, árboles intercalados, cortinas rompevientos, árboles multipropósito y sistemas intensivos como los bancos de forraje (Nair 2014). La mayoría de estos sistemas son de producción tradicional de escala baja, en unidades familiares, con fertilización predominantemente orgánica y especies arbóreas nativas o introducidas de rápido crecimiento (Cubbage *et al.* 2012).

La implementación de sistemas silvopastoriles es una alternativa para la recuperación de suelos degradados, ya que la presencia de árboles permite reducir la erosión eólica e hídrica, y promueve la formación de una capa de materia orgánica que contribuye a conservar los nutrientes y las partículas de suelo (McIvor *et al.* 2014). También es una estrategia para incrementar la producción maderable, reducir el déficit de materias primas y disminuir la presión sobre los bosques naturales (García-Cuevas *et al.* 2022, Telles-Antonio *et al.* 2022). En México, los sistemas silvopastoriles son una oportunidad para el sector forestal, debido a las condiciones climáticas y edafológicas que presenta el país (Pérez *et al.* 2021). La combinación de gramíneas y árboles permite reducir la escorrentía superficial de agua pluvial y la desecación de la superficie del suelo, e incrementa la captación y la infiltración de agua al subsuelo (Lunka y Patil 2016). Además, el mantenimiento de la cobertura arbórea promueve la captación y almacenamiento de carbono, comparado con sistemas agrícolas y pastizales o praderas (Albrecht y Kandji 2003).

Los sistemas de información geográfica (SIG) son una herramienta útil para identificar las áreas

potenciales para establecer sistemas silvopastoriles, de acuerdo con los requerimientos agroclimáticos de las especies, como la elevación, temperatura, precipitación y tipo de suelo (Ellis *et al.* 2000, Sáenz-Reyes *et al.* 2019). La identificación de las áreas aptas para sistemas silvopastoriles permite optimizar tiempo y recursos financieros para el establecimiento de las especies (Sáenz-Reyes *et al.* 2019). Además, la elección de especies de rápido crecimiento y alto valor proteico permite obtener mayores rendimientos comparados con cultivos de bajo valor productivo (Hernández-Hernández *et al.* 2020). Estudios recientes sobre áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles se encuentran para el cultivo del hule (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) en Oaxaca (Pérez *et al.* 2021), moringa (*Moringa oleifera* Lam.) en el estado de Veracruz (Carrión *et al.* 2022) y cultivos forrajeros intercalados con especies de coníferas en el estado de Michoacán (Sáenz-Ceja *et al.* 2021).

En el estado de Michoacán, la ganadería para producción de carne y leche es una actividad económica importante, que incluye ganado bovino, caprino, ovino, equino y aves, ocupando el octavo lugar nacional en la producción de carne de bovino y el séptimo en carne de porcino (SIAP 2022). Se estima que el 43% del territorio estatal se dedica a la producción pecuaria, principalmente en las regiones de la Costa, Sierra Madre del Sur, Tierra Caliente y el Bajío, aunque con una presencia importante en el Centro y Oriente del Eje Neovolcánico (Medina-Ramos y Torres-Ortiz 2018). La mayoría del manejo del ganado corresponde al semi-estabulado, con animales pastando en agostaderos naturales en época de lluvias, mientras que, en época de secas, se mantiene estabulado con alimentación de forrajes secos y suplementos sintéticos (Villa-Méndez *et al.* 2008). La ganadería para la producción de carne y leche se caracteriza principalmente por unidades familiares de autoconsumo, pastoreo extensivo de ganado bovino, pero con limitación de forraje verde durante la temporada de estiaje y en invierno (Bacab-Pérez y Solorio-Sánchez 2011).

Aunado a lo anterior, Michoacán destaca como uno de los cuatro estados con mayor grado de erosión

en México, con el 76% de los suelos con algún grado de erosión (Bolaños-González *et al.* 2016); situación causada por la expansión de la frontera agropecuaria, sobrepastoreo y el exceso de labranza (Bravo-Espinosa *et al.* 2009). De continuar con esta tendencia, la pérdida de suelos aptos para el crecimiento de forrajes tendrá efectos negativos sobre la producción agropecuaria (Cotler *et al.* 2020). Por ello, el establecimiento de sistemas silvopastoriles puede contribuir a la producción de forraje para el ganado y a la recuperación de tierras degradadas en esta entidad (Sáenz-Reyes *et al.* 2019).

En la región tropical de Michoacán se han establecido sistemas silvopastoriles para la producción de ganado bovino, principalmente con especies arbóreas como leucaena (*Leucaena leucocephala* [Lam.] de Wit) y pastos introducidos como las variedades comerciales Guinea y Tanzania, ambas de la especie *Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K. Simon & S.W.L. Jacobs (Bacab-Pérez *et al.* 2011, Estrada-López *et al.* 2018). En la región templada del Estado, los pastos perennes rhodes (*Chloris gayana* Kunth) y llorón (*Eragrostis curvula* [Schrad] Nees) han mostrado un potencial amplio para establecerse en sistemas silvopastoriles, asociados con coníferas como el pino michoacano (*Pinus devoniana* Lindley) (Sáenz-Reyes *et al.* 2019). A nivel mundial, ambas especies forrajeras (pastos) han sido utilizadas para la prevención de la erosión hídrica, por su tolerancia al estrés por deficiencia de humedad y suelos con poca materia orgánica (menor al 2%), su abundante producción de biomasa, alto contenido proteico y su capacidad de rebrotar después del pastoreo (Bravo y Silenzi 2002, Moore *et al.* 2014).

El pino ortiguillo (*Pinus lawsonii* Roetzl. ex Gordon & Glend.) se distribuye en zonas serranas del centro y sur de México, incluyendo el estado de Michoacán, donde representa una importante fuente de madera, leña y resina para habitantes rurales (Ramos-Uvilla *et al.* 2014). Esta especie es de rápido crecimiento, con alturas de 27 a 34 m, diámetro normal promedio de 45 cm y 2 m³ a los 50 años en sitios de calidad alta (Aguilar-Ramírez 1997). En países como Brasil, ha demostrado altos rendimientos volumétricos sin fertilización (Carvalho-Mayrink

et al. 2019). Hasta la fecha se desconocen las áreas aptas para establecer sistemas silvopastoriles con *P. lawsonii*, *E. curvula* y *C. gayana* en el estado de Michoacán, incluyendo áreas con suelos degradados. Por tanto, el objetivo del estudio fue identificar las áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles con *P. lawsonii*, *E. curvula* y *C. gayana* en Michoacán, México, en áreas con suelos degradados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estado de Michoacán se localiza en el centro-occidente de México, con una extensión de 59 864 km². El territorio está conformado por cinco regiones (Figura 1): El Eje Neovolcánico, formado por montañas de origen volcánico, donde predomina el clima templado subhúmedo. El Bajío, compuesto por planicies aluviales con clima templado semiseco. La Tierra Caliente, que forma parte de la depresión del Río Balsas, en la región sureste, con clima cálido seco. La Sierra Madre del Sur, con clima cálido subhúmedo y la región Costa, colindante con el océano Pacífico, con clima cálido subhúmedo (Bollo-Manent *et al.* 2019). A nivel estatal, la precipitación media anual varía entre 600 y 1 600 mm, mientras que la temperatura media anual oscila entre 8 y 31 °C (INEGI 2022). Según el mapa de erosión del INEGI (2014), el 39.9% de los suelos del Estado presentan erosión moderada, 2.9% erosión fuerte, y 0.5% erosión extrema. Las áreas con mayor erosión se presentan en porciones de las subregiones Meseta Purépecha, Lacustre y Oriente del Eje Neovolcánico, el Bajo Balsas de la Tierra Caliente y en la Sierra Madre del Sur.

Modelación de áreas potenciales

Se modeló la distribución potencial de *P. lawsonii*, *E. curvula* y *C. gayana* mediante el método de envoltura bioclimática, que predice la distribución de una especie de acuerdo con sus requerimientos climáticos, topográficos y edáficos que le permiten a dicha especie sobrevivir, crecer y reproducirse

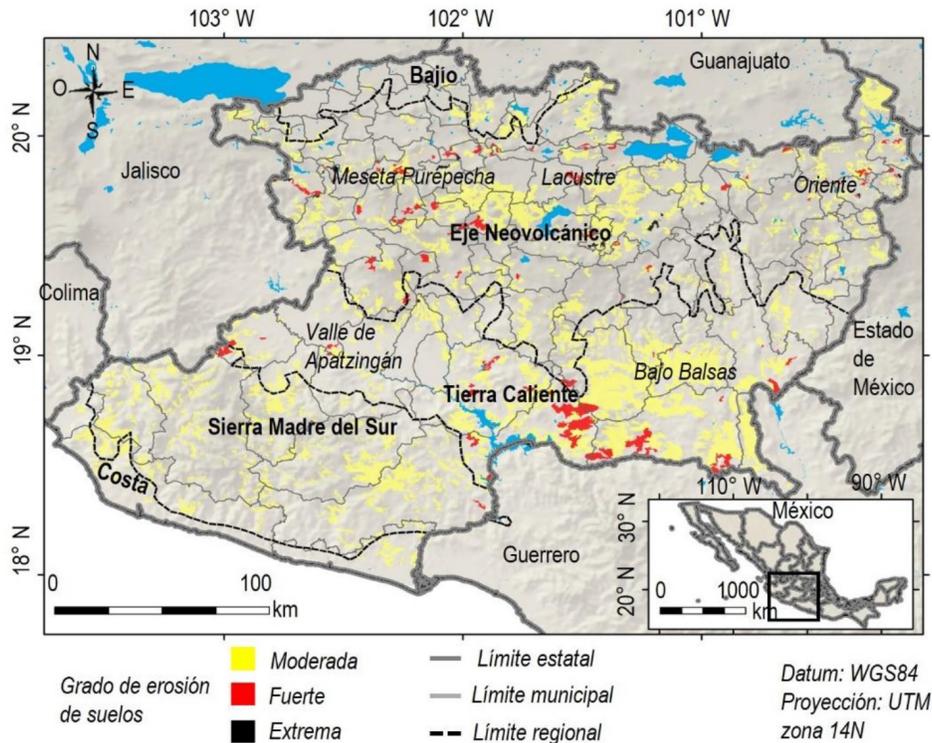


Figura 1. Localización geográfica del estado de Michoacán, regiones, subregiones y grado de erosión de suelos.

(Pearson y Dawson 2003). Los requerimientos óptimos y subóptimos de temperatura media anual, precipitación media anual, elevación y tipo de suelo de las tres especies se obtuvieron de Farjon *et al.* (1997), Medina *et al.* (2001), Oprandi *et al.* (2009), Gucker (2009), Cruz-Cárdenas *et al.* (2016), Beltrán-López *et al.* (2018), Sáenz-Reyes *et al.* (2019), Sáenz-Ceja *et al.* (2021) y Tropical Forages (2021), los cuales se presentan en la Tabla 1. Las capas de temperatura media anual, precipitación media anual, elevación y tipo de suelo de México se obtuvieron de CONABIO (2022), en formato vectorial a escala 1: 250 000, las cuales se recortaron al estado de Michoacán y se clasificaron los valores de la tabla de atributos como “óptimos” (valor = 2) o “subóptimos” (valor = 1), según los valores de la Tabla 1.

Posteriormente, las capas por especie se transformaron a formato ráster con una resolución de 12 100 m² por pixel y se realizó una suma de rásters de las capas para obtener la distribución de cada especie. Pixeles con valores de 7

y 8 fueron considerados como distribución “óptima”, valores de 5 y 6 como “subóptima”, y valores menores de 5 como “no apta”. Los modelos de distribución se evaluaron mediante un análisis de área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés), utilizando datos georreferenciados de presencia de las especies en el estado de Michoacán, obtenidos del portal Global Biodiversity Information Facility (GBIF 2021), donde 25% de los datos se manejaron como puntos de validación. Modelos con valores mayores a 7 se consideraron como “aceptables” (Peterson *et al.* 2011).

Además, se realizó un análisis ROC-parcial, utilizando el 50% de los datos de colecta como puntos de validación y 1000 iteraciones, donde modelos con valores cercanos a 2 se consideraron de alta capacidad predictiva (Slater y Michel 2012). Los valores del ROC-parcial se evaluaron mediante análisis de Z, considerando valores de $P < 0.05$ como modelos no definidos por el azar. Los análisis de AUC y ROC-parcial se realizaron en el programa Niche Tool Box

Tabla 1. Requerimientos agroclimáticos de *Pinus lawsonii*, *Eragrostis curvula* y *Chloris gayana*

Variable	Rango	<i>Pinus lawsonii</i>	<i>Eragrostis curvula</i>	<i>Chloris gayana</i>
Elevación (msnm)	Óptimo	1 900-2 200	2 100-2 400	1 600-2 100
	Subóptimo	1 500-1 900, 2 200-2 600	1 600-2 100, 2 400-2 600	1 000-1 600, 2 100-2 600
Precipitación (mm)	Óptimo	800-1 200	450-800	800-1500
	Subóptimo	600-800, 1 200-1 500	300-450, 800-1 500	600-800, 1 500-2 000
Temperatura (°C)	Óptimo	16-20	15-17	17-20
	Subóptimo	10-16, 20-24	6-15, 17-22	12-17, 20-26
Tipo de suelo	Óptimo	Acrisol	Acrisol	Luvisol
	Subóptimo	Andosol	Andosol	Andosol, Acrisol

Claves: msnm: metros sobre el nivel del mar; mm: volumen en milímetros; °C: grados Celsius.

(Osorio-Olvera *et al.* 2020) y el análisis de Z en el programa R versión 3.5.1 (R-Core Team 2017).

Los modelos ráster de las especies se reclasificaron según su grado de aptitud con valores de 0 para no apto, 1 para subóptimo y 2 para óptimo. Se hizo una suma de rásters de los modelos reclasificados de *P. lawsonii* y *E. curvula*, y a su vez de *P. lawsonii* y *C. gayana*, donde pixeles con valores de 3 (óptimo + subóptimo) y 4 (óptimo + óptimo) fueron considerados como aptos para establecer sistemas silvopastoriles. Los nuevos modelos se transformaron a formato vectorial y se eliminaron las porciones con vegetación forestal, plantaciones forestales, zonas urbanas, cultivos permanentes y cuerpos de agua, tomando como referencia la capa de Vegetación y Uso del Suelo Serie VII, escala 1: 250 000 de México (CONABIO 2022). Luego se intersectó la capa de distribución de cada combinación de especies con la capa de erosión de suelos de México, escala 1:250 000 (INEGI 2014). Por último, se estimó la superficie total en el estado, por municipios y por suelos degradados de las áreas potenciales.

RESULTADOS

Los modelos de distribución de *P. lawsonii*, *C. gayana* y *E. curvula* lograron valores de AUC superiores a 0.73 y de ROC-parcial entre 1.47 y 1.49. Además, los modelos fueron independientes a una distribución al azar ($P < 0.05$) (Tabla 2). La especie con mayor distribución potencial fue *E. curvula*, con una superficie total de 33 858 km², del cual el 28.5% presenta condiciones óptimas, seguido por *P. lawsonii*, con 20 847 km², aunque con apenas 7.52% como superficie óptima, mientras que *C. gayana* tuvo

una superficie total de 19 637 km², del cual 31.3% corresponde a superficie óptima.

El 80% de la distribución potencial de *P. lawsonii* se encontró en el Eje Neovolcánico, con condiciones óptimas en su porción central y oriental, mientras que porciones con condiciones subóptimas se encontraron en el Bajío y Sierra Madre del Sur (Figura 2a). El 95% de las zonas aptas para *E. curvula* se localizó en el Eje Neovolcánico, cuya distribución óptima se acotó principalmente a las laderas altas de dicha sierra (Figura 2b). La distribución óptima de *C. gayana* se encontró en la porción sur del Eje Neovolcánico y zonas altas de la Sierra Madre del Sur (Figura 2c).

Las áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles con *P. lawsonii* y *E. curvula* se ajustaron en su totalidad a porciones del Eje Neovolcánico (Figura 3a), alcanzando una superficie potencial de 190 918 ha. Por su parte, las áreas potenciales con *P. lawsonii* y *C. gayana* sumaron 329 546 ha, de las cuales el 83% se encontró en el Eje Neovolcánico, con los fragmentos más grandes en la porción occidental, mientras que 15% del área total se ubicó en la Sierra Madre del Sur y 2% en la Tierra Caliente (Figura 3b).

A nivel municipal, las áreas potenciales para *P. lawsonii* asociado con *E. curvula* se encontraron en 61 municipios, donde Morelia, Madero, Paracho, Hidalgo, Pátzcuaro, Chichota, Coeneo, Charapan, Charo y Zacapu concentraron el 47% de la superficie total. Las áreas aptas para *P. lawsonii* asociado con *C. gayana* se localizaron en 81 municipios, donde Tumbiscatío, Morelia, Cotija, Madero, Coalcomán, Tocumbo, Hidalgo, Chilchota, Ario y Charo concentraron el 48% de la superficie total (Tabla 3).

Tabla 2. Estadísticos descriptivos y superficie potencial de *Pinus lawsonii*, *Eragrostis curvula* y *Chloris gayana* en Michoacán, México.

Descriptor	<i>Pinus lawsonii</i>	<i>Eragrostis curvula</i>	<i>Chloris gayana</i>
Área bajo la curva (AUC)	0.7396	0.7401	0.7466
ROC parcial	1.4796	1.4808	1.4946
Desviación estándar	0.15	0.18	0.15
Coefficiente de asimetría	0.41	-0.32	1.25
Curtosis	-0.11	-0.35	0.47
Valor de Z	213.92	183.3	218.44
Valor de P	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Superficie subóptima (km ²)	19 279	24 178	13 481
Superficie óptima (km ²)	1 568	9 680	6 156
Superficie total (km ²)	20 847	33 858	19 637

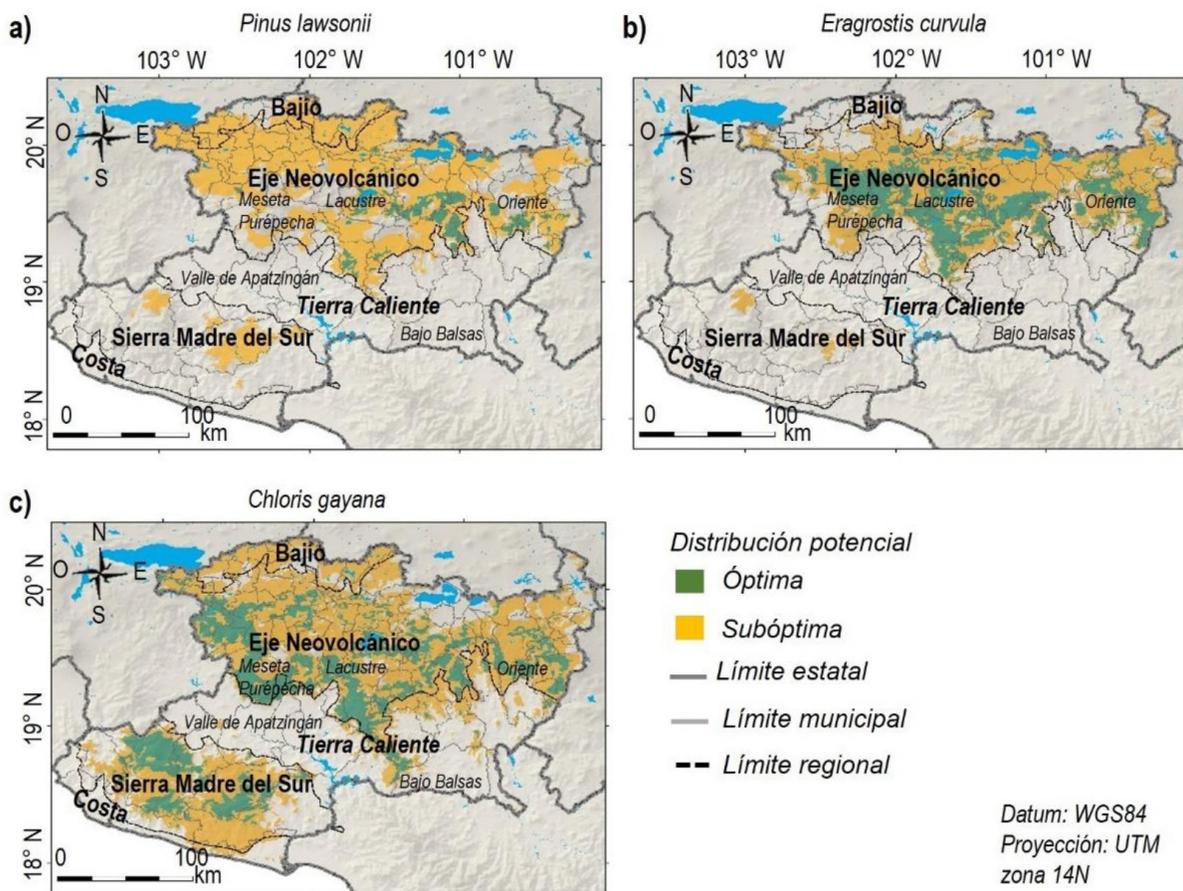


Figura 2. Distribución potencial óptima y subóptima de a) *Pinus lawsonii*, b) *Eragrostis curvula* y c) *Chloris gayana* en el estado de Michoacán, México.

El 60.8% de las áreas potenciales con *P. lawsonii* y *E. curvula* se encontró sobre superficies con erosión, principalmente con un grado leve y moderado (Tabla 4); dicha superficie se encontró en 57 municipios, principalmente en el Eje Neovol-

cánico, específicamente en las subregiones Meseta Purépecha, Lacustre y la Oriente (Figura 3a). Los municipios con mayor superficie apta fueron Morelia, Paracho, Charapan, Hidalgo y Chilchota, que concentraron el 32.8% del total. Por su parte, el 55.4%

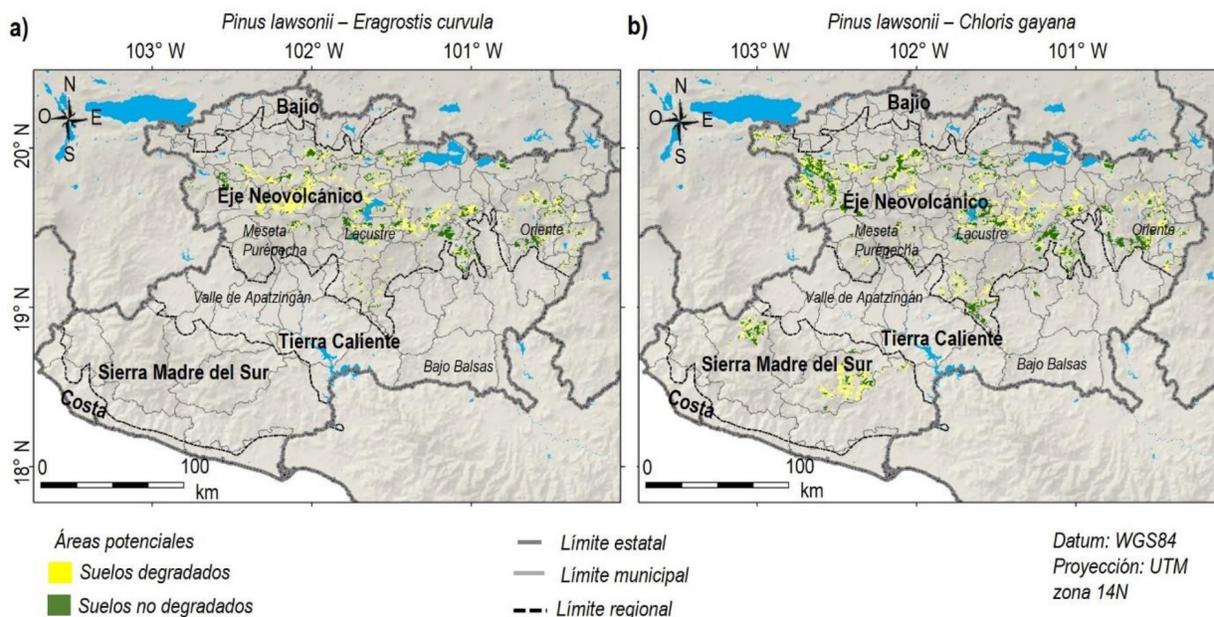


Figura 3. Áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles con *Pinus lawsonii* asociado con a) *Eragrostis curvula* y b) *Chloris gayana* en Michoacán, México.

de la superficie apta con *P. lawsonii* y *C. gayana* se encontró sobre suelos erosionados, también con grados leve y moderado, en 76 municipios del occidente y el oriente del Eje Neovolcánico, así como en porciones de la Sierra Madre del Sur (Figura 3b). Los municipios con mayor potencial fueron Tumbiscatío, Morelia, Cotija, Coalcomán y Charo, que concentraron el 36.3% de la superficie.

DISCUSIÓN

De acuerdo con sus requerimientos de precipitación, temperatura, elevación y tipo de suelo, las especies *P. lawsonii*, *E. curvula* y *C. gayana* tienen potencial amplio para ser establecidas en el estado de Michoacán. Los modelos de distribución potencial de las tres especies superaron un AUC de 0.7, por lo que se consideran como aceptables, con una distribución no definida por el azar (Peterson *et al.* 2011). Para el caso de *C. gayana*, el AUC fue similar al encontrado por Lastiri-Hernández *et al.* (2020) (AUC = 0.74) en el occidente de Michoacán, mientras que para *E. curvula*, el AUC fue menor al reportado por Sáenz-Ceja *et al.* (2020) (AUC = 0.94) en el centro de

México. El AUC de *P. lawsonii* también fue menor al encontrado por Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) (AUC = 0.854), posiblemente porque se incluyeron menores variables ambientales, pero la distribución potencial del presente estudio se ajustó mejor a la reportada por Farjon *et al.* (1997) en el estado de Michoacán.

Las zonas templadas del estado de Michoacán presentaron el mayor potencial para establecer sistemas silvopastoriles con las especies evaluadas, particularmente en el Eje Neovolcánico y porciones de la Sierra Madre del Sur, regiones que han experimentado procesos severos de degradación de suelos y deforestación (Bolaños-González *et al.* 2016). Por ejemplo, en la región Lacustre, la formación de cárcavas se asocia con prácticas agrícolas como el año y vez (siembra durante un año y descanso en el siguiente, con pastoreo de ganado) sobre suelos altamente erosionables, como el Andosol y Acrisol (Bravo-Espinosa *et al.* 2009, Bedolla-Ochoa *et al.* 2012). En la región Oriente, la tala ilegal, recurrentes incendios forestales y el cambio de uso de suelo para establecer cultivos de temporal y forrajes inducen la erosión de suelos susceptibles a deslaves (López-García y Alcántara Ayala 2012,

Tabla 3. Superficie potencial por municipios de sistemas silvopastoriles con *Pinus lawsonii* y *Eragrostis curvula* o *Chloris gayana* en Michoacán, México.

Municipio	Área (ha)	Municipio	Área (ha)	Municipio	Área (ha)	Municipio	Área (ha)
<i>Pinus lawsonii</i> y <i>Eragrostis curvula</i>							
Morelia	16 485	Jungapeo	4 598	Huaniqueo	2 742	Tingambato	1 442
Madero	11 311	Los Reyes	4 493	Tangamandapio	2 720	Ocampo	1 344
Paracho	9 709	Zitácuaro	4 065	Tinguindín	2 533	Maravatío	1 181
Hidalgo	9 312	Acuitzio	3 883	Chucándiro	2 519	Panindícuaro	1 161
Pátzcuaro	8 358	Tuxpan	3 564	Irimbo	2 475	Susupuato	1 076
Chilchota	7 892	Quiroga	3 487	Jiménez	2 358	Tacámbaro	1 065
Coeneo	7 664	Erongarícuaro	3 455	Tlazazalca	2 327	Cotija	1 050
Charapan	6 492	Purépero	3 416	Morelos	2 298	Tiquicheo	940
Charo	5 856	Huiramba	3 360	Tocumbo	2 265	Penjamillo	460
Zacapu	5 677	Tangancícuaro	3 285	Lagunillas	2 217	Aporo	378
Uruapan	5 344	Ario	3 214	Turicato	1 897	Parangaricutiro	298
Cherán	4 924	Tuzantla	3 170	Tzitzio	1 651	Juárez	280
Salvador Escalante	4 599	Zinapécuaro	2 799	Tzintzuntzan	1 464		
<i>Pinus lawsonii</i> y <i>Chloris gayana</i>							
Tumbiscatío	31 093	Jiquilpan	6 229	Erongarícuaro	2 779	Charapan	1 135
Morelia	23 952	Tuxpan	5 993	Salvador Escalante	2 619	Tiquicheo	941
Cotija	18 688	Tangamandapio	5 434	Cherán	2 616	Morelos	880
Madero	16 045	Tuzantla	5 243	Arteaga	2 567	Jacona	869
Coalcomán	15 112	Tzintzuntzan	5 124	Zacapu	2 433	Parangaricutiro	865
Tocumbo	12 888	Purépero	5 058	Tzitzio	2 347	Churumuco	863
Hidalgo	11 087	Los Reyes	4 747	Nocupétaro	2 198	Panindícuaro	758
Chilchota	10 830	Villamar	4 440	Irimbo	1 907	Ziracuaretiro	652
Ario	9 549	Uruapan	4 218	Maravatío	1 876	Juárez	630
Charo	8 499	Acuitzio	4 176	Queréndaro	1 822	Chucándiro	618
Tangancícuaro	8 297	Zinapécuaro	4 016	Susupuato	1 782	Indaparapeo	552
Turicato	7 613	Tlazazalca	3 793	Tancítaro	1 763	Gabriel Zamora	453
Marcos Castellanos	7 556	Quiroga	3 755	Jiménez	1 741	La Huacana	447
Jungapeo	7 238	Huaniqueo	3 677	Tacámbaro	1 692	Apatzingán	335
Coeneo	6 827	Huiramba	3 652	Sahuayo	1 400	Peribán	281
Pátzcuaro	6 618	Zitácuaro	3 250	Nuevo Urecho	1 365	Huetamo	242
Tinguindín	6 310	Lagunillas	2 789	Cojumatlán	1 149	Senguio	233

Tabla 4. Porcentaje del área potencial para sistemas silvopastoriles con *Pinus lawsonii* y *Eragrostis curvula* o *Chloris gayana*, según el grado de erosión de suelos en Michoacán, México.

Sistema silvopastoril /Grado de erosión	<i>P. lawsonii</i> y <i>E. curvula</i>		<i>P. lawsonii</i> y <i>C. gayana</i>	
	Superficie potencial (ha)	(%)	Superficie potencial (ha)	(%)
Leve	101 377.5	53.1	161 477.5	49.0
Moderada	78 085.5	40.9	151 261.6	45.9
Fuerte	7 636.7	4.0	8 897.7	2.7
Extrema	3 818.3	2.0	7 909.2	2.4

Pérez-Ramírez et al. 2013). En el caso de la Sierra Madre del Sur, la degradación de los suelos se relaciona con la sustitución de bosques tropicales y templados por pastizales para el pastoreo extensivo de ganado (Mas et al. 2017). Por tanto, la reintroducción de cobertura arbórea, en este caso de *P. lawsonii*, en asociación con pastizales perennes como *E. curvula* y *C. gayana*, podría contribuir a la retención de los suelos y la disminución de la erosión en estas regiones.

Además, la implementación de sistemas silvopastoriles con las especies propuestas podría mitigar la falta de forraje durante la temporada de estiaje, situación común en los sistemas pecuarios de Michoacán (Bacab-Pérez y Solorio-Sánchez 2011). Por ejemplo, la producción de forraje con *C. gayana* asociado con *P. devoniana* con fertilización orgánica en Michoacán logró rendimientos de 11.2 t ha⁻¹ de materia seca (Sáenz-Reyes et al. 2016), mientras que asociado con eucalipto (*Eucalyptus globulus* La-

bill.) sin fertilización en Jalisco alcanzó rendimientos de materia seca de hasta 4.7 t ha^{-1} (Guevara-Escobar *et al.* 2012). Por su parte, *E. curvula* produjo hasta 4.9 t ha^{-1} en condiciones semiáridas en San Luis Potosí (Beltrán-López *et al.* 2018). Estos rendimientos son sustancialmente mayores a la oferta de forrajes en áreas subtropicales de Michoacán, por ejemplo, con *M. maximus*, entre 1.2 y 1.3 t ha^{-1} (Bacab-Pérez y Solorio-Sánchez 2011).

El establecimiento de sistemas silvopastoriles con las especies propuestas también podría traer beneficios económicos para los productores ganaderos; por un lado, la disponibilidad de forraje en las unidades productivas evitaría trasladar al ganado hacia agostaderos lejanos, inaccesibles por su topografía y con vegetación natural, como comúnmente sucede en época de estiaje (Villa-Méndez *et al.* 2008). Además, reduciría la compra de insumos externos como suplementos alimenticios concentrados, los cuales representan un costo de producción alto (Bacab-Pérez y Solorio-Sánchez 2011). También, la presencia de árboles como *P. lawsonii* implicaría la oferta de leña para fines energéticos, sombra para el ganado, reducción de la erosión eólica, e incluso la producción de resina (Ramos-Uvilla *et al.* 2014, Alba y González-Esquivel 2016).

Es importante destacar que tanto la investigación, como el uso de sistemas silvopastoriles con especies forestales de clima templado son muy limitados. Por ello, la necesidad de evaluar el potencial de otras especies arbóreas y forrajeras en las zonas templadas de Michoacán y del centro de México. En particular, se requiere examinar los rendimientos

que pueden generar este tipo de forrajes bajo las condiciones climáticas de estas regiones, la retención de suelos y disminución de la erosión con estos sistemas silvopastoriles, y la capacidad de estas especies para establecerse sobre suelos erosionados como el Andosol y Acrisol. Para ello, conocer las áreas donde se pueden establecer las especies constituye un primer paso, para lo cual, el modelado espacial de su distribución potencial constituye una herramienta de gran relevancia.

CONCLUSIONES

Las áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles con *P. lawsonii* y *E. curvula* o *C. gayana*, se localizaron principalmente en el Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur del estado de Michoacán, en 51 municipios con *P. lawsonii* y *E. curvula* y 68 municipios para *P. lawsonii* y *C. gayana*. Además, el 60% del área apta con *E. curvula* y el 55% con *C. gayana* se encontró sobre suelos degradados, lo cual indica que la implementación de sistemas silvopastoriles con estas especies podría contribuir a la recuperación de suelos en áreas que han experimentado severos procesos de degradación como la región Lacustre, el Oriente y la Sierra Madre del Sur. Es importante, en futuras investigaciones, evaluar los rendimientos de estos cultivos en sistemas silvopastoriles bajo las condiciones agroambientales de las áreas aptas identificadas, así como examinar su contribución a la reducción de la erosión.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Ramírez M (1997) Estudio del crecimiento de *Pinus douglasiana* Martínez y *Pinus lawsonii* Roehl en la región central de Michoacán. *Revista Ciencia Forestal en México* 22: 41-70.
- Alba B, González-Esquivel C (2016) Sistemas silvopastoriles tradicionales en México. In: Moreno-Calles AI, Casas A, Toledo VM, Vallejo-Ramos M (ed) *Etnoagroforestería en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, México. pp: 239-261.
- Albrecht A, Kandji ST (2003) Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99: 15-27.
- Bacab-Pérez HM, Solorio-Sánchez FJ (2011) Oferta y consumo de forraje y producción de leche en ganado de

- doble propósito manejado en sistemas silvopastoriles en Tepalcatepec, Michoacán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13: 271-278.
- Bolaños-González MA, Paz-Pellat F, Cruz-Gaistado CO, Argumedo-Espinoza JA, Romero-Benítez VM, de la Cruz-Cabrera JC (2016) Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 271-288.
- Bedolla-Ochoa C, Cabrera-González A, Prat C, Medina-Orozco LE (2012) Dinámica de la erosión en una cárcava en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán, México. En: Bravo-Espinosa M, Barrera-Camacho G, Mendoza ME, Sáenz-Reyes JT, Bahena-Juárez F, Sánchez-Martínez R (ed) Contribuciones para el desarrollo sostenible de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Morelia, Michoacán, México. pp: 151-159.
- Beltrán-López S, García-Díaz CA, Loredó-Osti C, Urrutia-Morales J, Hernández-Alatorre JA, Gámez-Vázquez HG (2018) Llorón imperial, *Eragrostis curvula* (Schrad) Nees, variedad de pasto para zonas áridas y semiáridas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 9: 400-407.
- Bollo-Manent M, Espinoza-Maya A, Hernández-Cendejas G, Hernández-Santana JR (2019) Las regiones físico-geográficas de Michoacán de Ocampo. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Morelia, México. 179p.
- Bravo-Espinosa M, Mendoza-Cantú ME, Medina-Orozco LE (2009) Escenarios de erosión bajo diferentes manejos agrícolas en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas* 68: 73-84.
- Bravo O, Silenzi JC (2002) Strip cropping in the semi-arid región of Argentina: Control of wind erosion and soil water accumulation. *Soil Science* 167: 346-352.
- Carrión DJM, Valdés ROA, Gallardo LF, Palacios WOM (2022) Potencial agroecológico de *Moringa oleífera* Lam. para el estado de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13: 42-63
- Carvalho-Mayrinck R, Rodrigues-Roque VG, Ferraz-Filho AC, Machalowski-Filho E, Arias-King F, Ribeiro A. (2019) Height and volume functions for *Pinus lawsonii*, *Pinus leiophylla*, *Pinus oocarpa* and *Pinus pringlei* plantations in Guareí, Sao Paulo, Brazil. *Southern Forests: A Journal of Forest Science* 81: 325-334.
- CONABIO (2020) Portal de Geoinformación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. Fecha de consulta: 27 de enero de 2022.
- Cotler H, Corona JA, Galeana-Pizaña JM (2020) Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: Una primera aproximación. *Investigaciones Geográficas* 101: e599976. DOI: 10.14350/ig.599976.
- Cruz-Cárdenas G, López-Mata L, Silva JT, Bernal-Santana N, Estrada-Godoy F, López-Sandoval JA (2016) Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22: 135-148.
- Cubbage F, Balmelli G, Bussoni A, Noellemeyer E, Pachas AN, Fassola H (2012) Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems* 86: 303-314.
- Ellis EA, Nair PKR, Linehan PE, Beck HW, Blanche CA (2000) A GIS-based database management application for agroforestry planning and tree selection. *Computers and Electronics in Agriculture* 27: 41-55.
- Estrada-López I, Esparza-Jiménez S, Albarrán-Portillo B, Yong-Angel G, Rayas-Amor AA, García-Martínez A (2018) Evaluación productiva y económica de un sistema silvopastoril intensivo en bovinos doble propósito en Michoacán, México. *Ciencia Ergo-Sum* 25: e29. DOI: 10.30878/ces.v25n3a7.

- Farjon A, Pérez de la Rosa JA, Styles TB (1997) Field guide of the pines of Mexico and Central America. Kew Publishing. Oxford, Inglaterra. 147p.
- García-Cuevas X, Sáenz-Reyes JT, Muñoz-Flores HJ, Hernández-Ramos A, Rueda-Sánchez A, Hernández-Ramos J, Orozco-Gutiérrez G (2022) Aportaciones científicas del Programa de Plantaciones Forestales en el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13: 3-40
- GBIF (2021) Global Biodiversity Information Facility. <https://www.gbif.org/es/>. Fecha de consulta: 27 de enero de 2022.
- Gucker CL (2009) Fire Effects Information System. USDA Forest Service. <https://www.fs.fed.us/database/feis/plants/graminoid/eracur/all.html>. Fecha de consulta: 27 de enero de 2022.
- 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: 175-188.
- Hernández-Hernández M, López-Ortiz S, Jarillo-Rodríguez J, Ortega-Jiménez E, Pérez-Elizalde S, Díaz-Rivera P (2020) Rendimiento y calidad nutritiva del forraje en un sistema silvopastoril intensivo con *Leucaena leucocephala* y *Megathyrus maximus* cv. Tanzania. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 11: 53-69.
- INEGI (2014) Conjunto de datos de erosión del suelo, escala 1:250 000 Serie I Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825004223>. Fecha de consulta: 27 de enero de 2022.
- INEGI (2022) Información por entidad. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mich/default.aspx?tema=me&e=16>. Fecha de consulta: 27 de enero de 2022.
- Kunst C, Navall M, Ledesma R, Silberman J, Anríquez A, Coria D (2016) Silvopastoral systems in the western Chaco region, Argentina. En: Peri PL, Dube F, Varella A (ed) *Silvopastoral systems in southern South America*. Springer. Basel, Suiza. pp: 63-87.
- Lastiri-Hernández MA, 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* 24: 429-440.
- López-García, J, Alcántara-Ayala I (2012) Land-use change and hillslope instability in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, central Mexico. *Land Degradation and Development* 23: 384-397.
- Lunka P, Patil SD (2016) Impact of tree planting configuration and grazing restriction on canopy restrictions and soil hydrological properties: Implications for flood mitigation in silvopastoral systems. *Hydrological Processes* 30: 945-958.
- Mas JF, Lemoine-Rodríguez R, González R, López-Sánchez J, Piña-Garduño A, Herrera-Flores E (2017) Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT. *Madera y Bosques* 23: 119-131.
- Mclvor I, Youjun H, Daoping L, Eyles G, Pu Z (2014) Agroforestry: Conservation trees and erosion prevention. En: Van Alfen NK (ed) *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, Vol.1. San Diego, California, E. U. pp: 208-221.
- Medina GG, Salinas GH, Rubio AFA (2001) Potencial productivo de especies forrajeras en el estado de Zacatecas. Libro Técnico No. 1. INIFAP, Centro de Investigación Regional Norte Centro. C. E. Zacatecas. Calera, Zacatecas, México. 145p.

- Medina-Ramos E, Torres-Ortiz JR (2018) La producción pecuaria en la región Sierra-Costa del estado de Michoacán: La exportación como alternativa ante las fisuras del mercado interno. *Realidad Económica* 54: 126-135.
- Moore GA, Albertsen TO, Ramankutty P, Nichols PGH, Titterton JW, Barrett-Lennard P (2014) Production and persistence of subtropical grasses in environments with Mediterranean climates. *Crop and Pasture Science* 65: 798-816.
- Nair PKR (2014) Agroforestry: Practices and systems. In: Van Alfen NK (ed) *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, Vol.1. San Diego, California, E. U. pp: 270-282.
- Oprandi G, Colombo F, Parodi MI (2009) Grama Rhodes, una alternativa productiva para los sistemas ganaderos del norte de Santa Fe. *Voces y Ecos* 31: 26-27.
- Osorio-Olvera L, Lira-Noriega A, Soberón J, Peterson AT, Falconi M, Contreras-Díaz RG (2020) Ntbox: an R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution* 11: 1199-1206.
- Pearson RG, Dawson TP (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species. Are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12: 361-371.
- Pérez MR, Romero SM E, González HA, Velasco BE, Ramírez GAG (2021) Áreas potenciales para establecer plantaciones de hule [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss) Müll. Arg.] en Oaxaca, México. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical* 1: 25-40.
- Pérez-Ramírez S, Ramírez I, Jaramillo-López PF, Bautista F (2013) Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19: 157-173.
- Peterson AT, Soberón J, Pearson RG, Anderson RP, Martínez-Meyer E, Nakamura M (2011) *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton University Press. New Jersey, USA. 316p.
- R Core Team (2017) R-project. <http://www.R-project.org/>. Fecha de consulta: 27 de enero de 2022.
- Ramos-Uvilla JA, García-Magaña JJ, Hernández-Ramos J, García-Cuevas X, Velarde-Ramírez JC, Muñoz-Flores HJ (2014) Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5: 92-108.
- Sáenz-Reyes JT, Jiménez-Ochoa J, Muñoz-Flores HJ, Rueda-Sánchez A, Sáenz-Ceja JE, 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: 178-187.
- Sáenz-Reyes JT, Castillo-Quiroz D, Ávila-Flores DY, Castillo-Reyes F, Muñoz-Flores HJ, Rueda-Sánchez A (2019) Potential areas for silvopastoral systems with pino lacio (*Pinus devoniana* Lind.) and introduced grasses (*Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees or *Chloris gayana* Kunth) in Michoacán, México. *Revista Biociencias* 6: e494. DOI: 10.15741/revbio.06.e494.
- Sáenz-Ceja JE, Sáenz-Reyes JT, Castillo-Quiroz D, Castillo-Reyes F, Muñoz-Flores HJ, Rueda-Sánchez A (2021) Áreas potenciales para establecer sistemas silvopastoriles a partir del nicho ecológico de dos cultivos forrajeros y tres especies de coníferas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 27: 289-308.
- SIAP (2022) Avance de la producción pecuaria. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://info.siap.siap.gob.mx/repoAvance_siap_gb/pecAvanceProd.jsp. Fecha de consulta: 27 de enero de 2022.

- 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: e32202. DOI: 10.1371/journal.pone.0032202.
- Telles-Antonio R, Jiménez-Pérez J, Alanís-Rodríguez E, Aguirre-Calderón OA, Treviño-Garza EJ (2022) Crecimiento y rendimiento de plantaciones forestales: un análisis del estado actual de las tendencias mundiales. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 19: 126-140.
- Tropical Forages (2021) Fact Sheet Index. https://www.tropicalforages.info/text/entities/eragrostis_curvula.htm.
Fecha de consulta: 27 de enero de 2022.
- Villa-Méndez CI, Tena MJ, Tzintzun R, Val D (2008) Caracterización de los sistemas ganaderos en dos comunidades del municipio de Tuzantla de la región de Tierra Caliente, Michoacán. *Avances en Investigación Agropecuaria* 12: 45-57.