

Spatiotemporal characterization of the optimal conditions for the establishment of prickly pear cactus (*Opuntia* spp.) in the Potosi high plateau

Enrique Ibarra Zapata^{1*}
Juan José Silva Gallegos¹
José de Jesús Hernández Ramos²

Abstract

Through the application of geospatial methods and techniques, the optimal requirements that favor the cultivation of prickly pear (*Opuntia* spp.) were evaluated based on the integration of different factors: 1) The soil as an agent that supports the crop, 2) The heat units that allow determining the accumulation of essential heat in the phenological development and 3) The climatic similarity, defined as the potential distribution range of the species. Methodologically, a process of prioritization, standardization and obtaining the degree of affiliation of the factors was carried out, likewise, the assignment of global weights was determined and the Multi Criteria Spatial Evaluation (EEMC) was carried out through Weighted Linear Combination (WLC). Territorially, 16,494 km² were characterized as an optimal area to establish new prickly pear plantations, in the Centro and Altiplano regions of the State of San Luis Potosí in north-central Mexico. The territorial determination of new areas with a certain vocation for prickly pear cactus allowed for strengthening decision-making along three medium- and long-term strategic lines in different locations in the region: food security, soil conservation, and mitigation of the effects of climate change.

Keywords: Regional planning, simulation model, spatial analysis, phytogeography, San Luis Potosí.

Evaluación geoespacial de las condiciones óptimas para el establecimiento de nopal tunero (*Opuntia* spp.) en el Altiplano Potosino

Resumen

Mediante la aplicación de métodos y técnicas geoespaciales se evaluaron los requerimientos óptimos que favorecen al cultivo de nopal tunero (*Opuntia* spp.) con base en la integración de diferentes factores: 1) El suelo como agente que da el soporte al cultivo, 2) Las unidades calor que permiten determinar la acumulación de calor esencial en el desarrollo fenológico y 3) La similitud climática, definida como el rango de distribución potencial de la especie. Metodológicamente se realizó un proceso de priorización, estandarización y la obtención de grado de pertenencia de los factores, asimismo, se determinó la asignación de pesos globales y se realizó la Evaluación Espacial Multi Criterio (EEMC) mediante Combinación Lineal Ponderada (WLC). Territorialmente se caracterizó 16 494 km² como superficie óptima para establecer nuevas plantaciones de nopal tunero, en las regiones Centro y Altiplano del Estado San Luis Potosí en el centro-norte de México. La determinación territorial de nuevas superficies con cierta vocación a favor de nopal tunero permitió fortalecer la toma de decisiones en tres líneas estratégicas a mediano y largo plazo en diferentes localidades de la región: seguridad alimentaria, conservación del suelo y mitigación de efectos del cambio climático.

Palabras clave: Planificación regional, modelo de simulación, análisis espacial, fitogeografía, San Luis Potosí.

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

²Instituto Nacional de Estadística y Geografía, ave. Venustiano Carranza 1138, De Tequisquiapan, C. P. 78250, San Luis Potosí, S. L. P. México.

*Corresponding author: enrique.zapata@uaslp.mx Tel: 5560181341, ORCID ID: 0000-0003-2884-0362

Introduction

The nopal (*Opuntia* spp.), is a plant belonging to the cactus family and, according to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2019), its region of origin is Mexico. However, it is widely found in regions with arid and semi-arid climates in America, from the northern United States to Patagonia (Bravo & Scheinvar, 1999). It is considered a species of commercial importance, highlighting its stems “tender shoots or nopalitos”, fruit (prickly pears) and forage, in addition, it is an essential crop in forestry and agroforestry projects in developing countries (CABI, 2019), in addition, the nopal is considered a species of high agronomic importance worldwide (Kiesling & Metzing, 2018).

Environmentally, species of the *Opuntia* genus maintain a close relationship with the environment in which they grow, therefore, they are largely dependent on the physical environment, which allows us to determine the requirements that favor their growth and adaptability. According to the Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Querétaro (SEDEA, 2017), the prickly pear cactus requires 200 to 750 mm of annual rainfall, with a temperature range between 6 and 36 °C, an optimal temperature of 18 to 20 °C, as well as sandy or sandy/clayey soils with good drainage; all of these aspects are considered determining factors in crop yields.

According to Luna et al., (2008), the nopal was considered a multifaceted crop, since it is a meal with a high nutritional value, since its fruits are a good source of vitamins and amino acids, its tender shoots “nopalitos” provide health benefits, achieving the reduction of glucose and cholesterol levels in the blood, even, in rural areas it is used as a windbreak and natural fence. Therefore, this crop represents a socially viable option for the integral development of regions with arid and semi-arid climates, where there is largely both water scarcity and soils poor in organic matter.

FAO and the International Center for Agricultural Research in Dry Areas (ICARDA) indicate that nopal cultivation is a key element in food safety, highlighting that Mexico is an important center of diversification of the *Opuntia* genus, where at least 93 species are reported, as well as eight of *Nopalea* (Scheinvar, 2007). It has a widespread distribution in almost all of Mexican Republic, from the coast to 2700 (AMSL),

Introducción

El Nopal (*Opuntia* spp.), es una planta perteneciente a la familia de las cactáceas y, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019), tiene su región de origen en México. Sin embargo, se encuentra ampliamente distribuida en las regiones con climas áridos y semiáridos en América, desde el Norte de Estados Unidos hasta la Patagonia (Bravo & Scheinvar, 1999). Es considerada como una especie de importancia comercial, destacando sus tallos “brotes tiernos o nopalitos”, fruto (tunas) y forrajes, además, es un cultivo esencial en proyectos forestales y agroforestales en países en desarrollo (CABI, 2019), aunado a ello, el nopal es señalado como una especie de alta importancia agronómica en el mundo (Kiesling & Metzing, 2018).

Ambientalmente, las especies del género *Opuntia* mantienen una relación estrecha con el ambiente donde se desarrollan, por lo tanto, existe en buena medida una dependencia con el entorno físico, lo que permite determinar los requerimientos que favorecen su crecimiento y adaptabilidad. De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Querétaro (SEDEA, 2017), el nopal requiere de 200 a 750 mm de precipitación anual, con un rango térmico que oscila entre 6 y 36 °C, una temperatura óptima de 18 a 20 °C, así como suelos con textura arenosa o areno-arcillosa con buen drenaje; todos estos aspectos se consideran determinantes en los rendimientos del cultivo.

De acuerdo con Luna et al., (2008), el nopal se consideró un cultivo polifacético, ya que es un alimento con un alto valor nutricional, puesto que sus frutos son una buena fuente de vitaminas y aminoácidos, sus brotes tiernos “nopalitos” proporcionan beneficios a la salud, logrando la reducción de los niveles de glucosa y colesterol en sangre. Incluso, en localidades rurales se utiliza como cortina rompe viento y cerca natural. Por lo tanto, este cultivo representa una opción socialmente viable para el desarrollo integral de las regiones con climas áridos y semiáridos, donde en buena medida existe tanta escasez de agua como suelos pobres en materia orgánica.

La FAO y el Centro Internacional de Investigación Agrícola en las Zonas Secas (ICARDA), señalan que el cultivo de nopal es un elemento clave en la seguridad alimentaria, resaltando que México es un importante centro de diversificación del género *Opuntia* donde

and is generally associated with xerophilous scrub vegetation, whose vegetation is tolerant to water scarcity and extreme temperatures (Gallegos & Mondragón, 2011; Scheinvar et al., 2011).

In arid areas, the benefits of the prickly pear cactus are important for food safety, as it plays a prominent role in subsistence agriculture, contributing significantly to the daily diet (Mora, 2018). Besides, in the livestock sector, it is a valuable forage that provides nutrients, as well as a source of water for livestock (Torres-Ponce et al., 2015). On a global scale, it is a crop that can be considered a real alternative in mitigating climate change (Campos et al., 2015), since it offers ecological benefits due to its high capacity for carbon fixation, which favors soil conservation for the benefit of the environment (Vázquez et al., 2010).

According to the National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO, 2017), from an ecological point of view, the nopal as a species is a dominant element in the Mexican flora, and from an economic point of view it is an important agricultural resource. Nationally there are around 11 000 nopal producers with an annual production of 777 000 tons, it should be noted that the representative states in terms of nopal production are: Mexico City, Morelos and the State of Mexico (Hernández et al., 2020).

In agreement with the Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos (SEDARH, 2020), the state of Potosí had a volume of 17 thousand tons of nopal fruit, which places it as the sixth national producer, and also, it occupies the 17th position in the production of nopalitos with approximately 2,500 tons, nevertheless, there are persistent problems in its production, as well as limited market opportunities, which is mainly associated with the conventional production methods used (Jarquín & Ramírez, 2009), since in general, producers claim traditional processes in the production processes (Negrete et al., 2020), which causes a limitation in the productive crop chain (Roldan & Chavarría, 2020).

Potosí production of nopal vegetables is distributed in 13 municipalities and contributes 2.4% of the national surface area of this crop (Figure 1a), with a very low yield of 45 t·ha⁻¹, lower than the national average, which is estimated at 66.32 t·ha⁻¹. In addition, the state prickly pear cactus contributes 6.3% of the national planted area, this percentage is distributed among 23

se reportan por lo menos 93 especies, así como ocho de *Nopalea* (Scheinvar, 2007). Posee una distribución extendida en casi todo la República Mexicana desde nivel de costa hasta los 2 700 (msnm), y asociados generalmente a la vegetación de matorral xerófilo, cuya vegetación es tolerante a la escasez de agua y temperaturas extremas (Gallegos & Mondragón, 2011; Scheinvar et al., 2011).

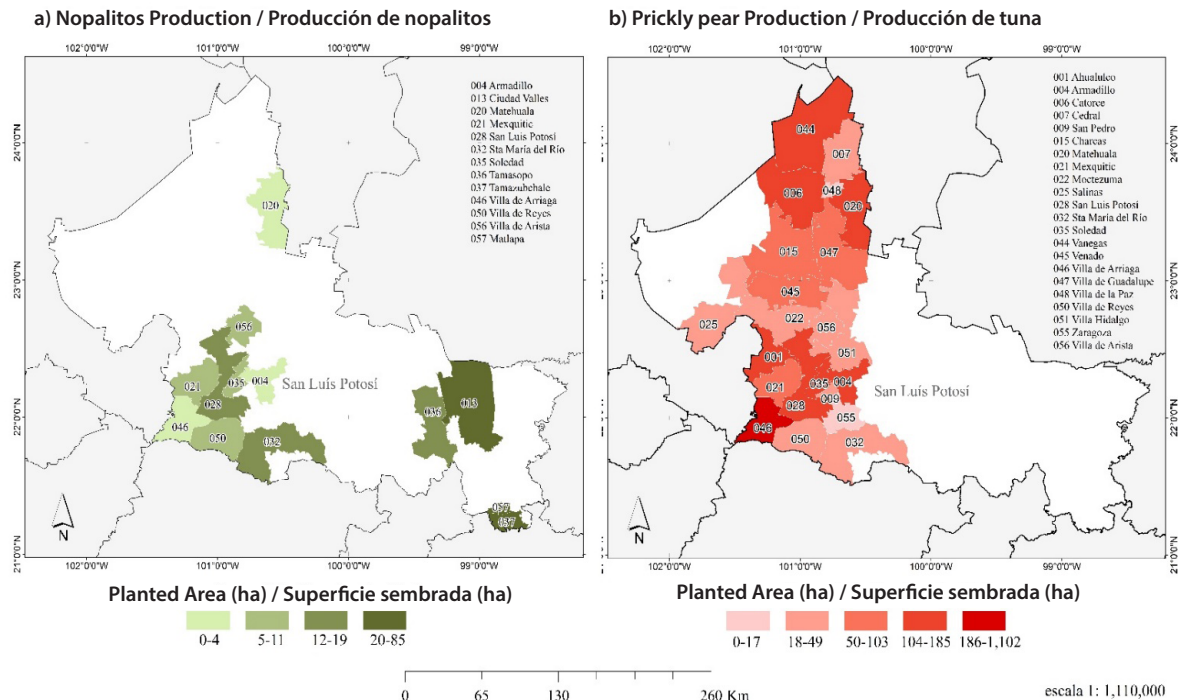
En zonas áridas, los beneficios del nopal son importantes en la seguridad alimentaria, ya que juegan un papel destacado en la agricultura de subsistencia, aportando en buena medida en la dieta diaria (Mora, 2018), además, en el ámbito pecuario, es un forraje valioso que proporciona nutrientes, así como una fuente de agua para el ganado (Torres-Ponce et al., 2015). En una escala global, es un cultivo que puede considerarse como una alternativa real en la mitigación del cambio climático (Campos et al., 2015), ya que ofrece beneficios ecológicos por su alta capacidad en la fijación de carbono, lo que favorece la conservación de suelos en beneficio del ambiente (Vázquez et al., 2010).

De acuerdo con la Comisión Nacional de la Biodiversidad (CONABIO, 2017), desde el punto de vista ecológico, el nopal como especie es un elemento dominante en la flora mexicana, y desde el punto de vista económico es un recurso agropecuario importante. A nivel nacional existen alrededor de 11 000 productores de nopal con una producción de 777 000 toneladas anuales, cabe señalar que los estados representativos en cuanto a la producción de nopal son: Ciudad de México, Morelos y Estado de México (Hernández et al., 2020).

De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos (SEDARH, 2020), el estado potosino contó con un volumen de 17 mil toneladas del fruto de nopal, lo que lo coloca como el sexto productor nacional, y además, ocupa la posición 17 en la producción de nopalitos con aproximadamente 2 500 toneladas, a pesar de ello, existen problemas persistentes en su producción, así como oportunidades de mercado limitadas, lo que se asocia principalmente a las formas de producción convencionales utilizadas (Jarquín & Ramírez, 2009), ya que de manera general, los productores reivindican procesos tradicionales en los procesos de producción (Negrete et al., 2020), lo que propicia una limitante en la cadena productiva del cultivo (Roldan & Chavarría, 2020).

Figure 1. Spatial distribution of Nopal producing municipalities in the state of San Luis Potosí. a) Prickly Pear Nopal, b) Nopal Vegetable.

Figura 1. Distribución espacial de los municipios productores de Nopal en el Estado de San Luis Potosí. a) Nopal Tunero, b) Nopal Verdura.



Source: Planted Area at the municipal level SIAP, 2020.
Fuente: Superficie sembrada a nivel municipal SIAP, 2020.

municipalities (Figure 1b) with a very low yield of 2.27 t·ha⁻¹, equivalent to only a quarter of the national average, estimated at 10.19 t·ha⁻¹. Regarding forage cactus, it is worth highlighting that there are no records of it in the State.

Based on the above, the aim of this research was to estimate a spatial prioritization model that allows defining the optimal areas for the establishment of new prickly pear plantations at the plot level, in the central and highland regions of the State of San Luis Potosí, Mexico.

Materials and Methods

The study region is considered the desert and semi-desert portion of the State of San Luis Potosí, and is made up of 24 municipalities: Ahualulco (001), Armadillo (004), Catorce (006), Cedral (007), Cerro de San Pedro (009), Charcas (015), Guadalcázar (017), Matehuala (020), Mexquitic (021), Moctezuma (022), Salinas (025), San Luis Potosí (024), Santa María del Río (032), Santo Domingo (033), Soledad (035), Vanegas (044), Venado (045), Villa de Arista (056), Villa de Ar-

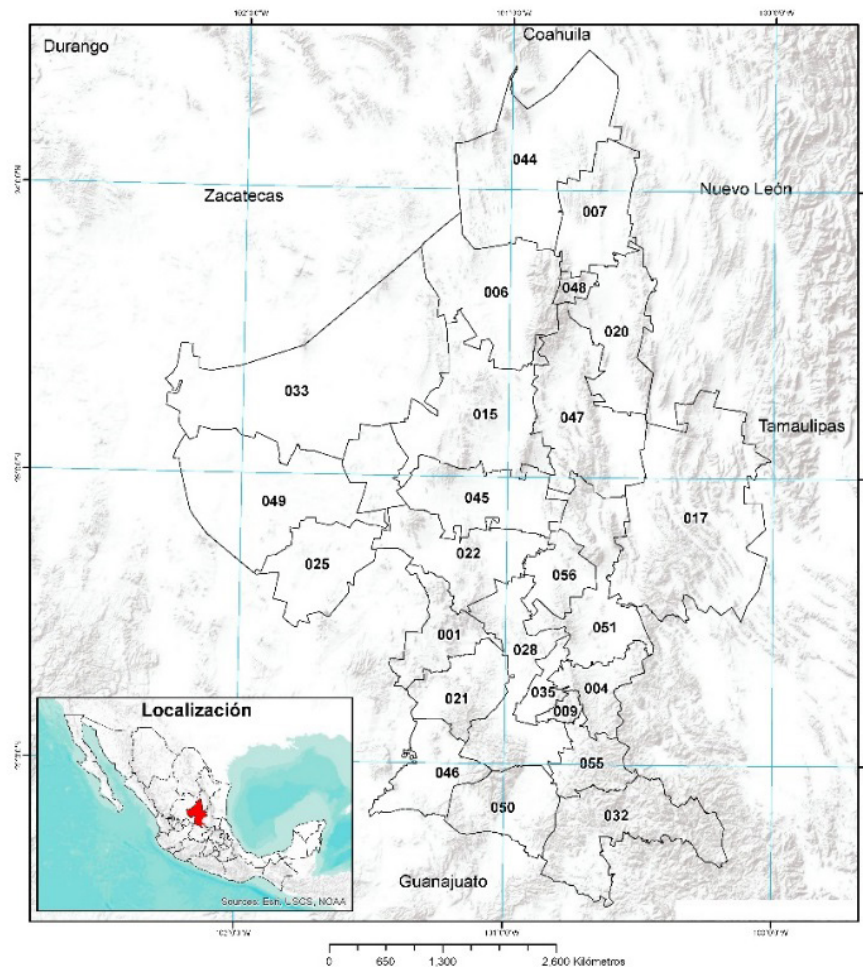
La producción potosina de nopal verdura se distribuye en 13 municipios y aporta el 2.4 % de la superficie nacional de este cultivo (Figura 1a), con un rendimiento muy bajo, 45 t·ha⁻¹, inferior al promedio nacional, que se estima en 66.32 t·ha⁻¹. En complemento, el nopal tunero estatal aporta el 6.3 % de la superficie sembrada nacional, dicho porcentaje se distribuye en 23 municipios (Figura 1b) con un rendimiento muy bajo, 2.27 t·ha⁻¹, equivalente a solo un cuarto del promedio nacional, estimado en 10.19 t·ha⁻¹. En relación con el nopal forrajero, es pertinente resaltar que no existe registro en el Estado.

Derivado de lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue estimar un modelo de priorización espacial que permita definir las áreas óptimas para el establecimiento de nuevas plantaciones de nopal tunero en una escala a nivel parcela, en las regiones centro y altiplano del Estado de San Luis Potosí, México.

Materiales y Métodos

La región de estudio se considera la porción desértica y semidesértica del Estado de San Luis Potosí,

Figure 2. Study region.
Figura 2. Región de estudio.



riaga (046), Villa de Guadalupe (047), Villa de la Paz (048), Villa de Ramos (049), Villa de Reyes (050), Villa Hidalgo (051) and Zaragoza (055), where there are unique characteristics of arid climates with little rain and desert scrub vegetation (Figure 2).

The methodological component was supported by the use of Geographic Information Systems (SIG by its Spanish abbreviation), since they are considered a tool which allows modeling cartographic scenarios that support decision making, in this case with a vocation towards research related to land suitability mapping, through EEMC (Malcewski, 2004; Mendoza & Martínez, 2006; Olivas et al., 2007; Arharya et al., 2019. According to Bustillos et al. (2017), this type of approach allows spatial and non spatial information on different topics to be linked, analyzed and prioritized (environmental,

y se integra por 24 municipios: Ahualulco (001), Armadillo (004), Catorce (006), Cedral (007), Cerro de San Pedro (009), Charcas (015), Guadalcázar (017), Matehuala (020), Mexquitic (021), Moctezuma (022), Salinas (025), San Luis Potosí (024), Santa María del Río (032), Santo Domingo (033), Soledad (035), Vane-gas (044), Venado (045), Villa de Arista (056), Villa de Arriaga (046), Villa de Guadalupe (047), Villa de la Paz (048), Villa de Ramos (049), Villa de Reyes (050), Villa Hidalgo (051) y Zaragoza (055), donde existen características propias de climas áridos con escasas lluvias y vegetación de matorrales desérticos (Figura 2).

El componente metodológico se soportó en el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), debido a que son considerados una herramienta que permite modelar escenarios cartográficos que dan soporte a la toma de decisiones, en este caso

social, epidemiological, among others), providing technical and scientific support for methodological processes.

There are some publications that have addressed the estimation of territories suitable for nopal, (i.e.) Ceballos & Blanco (2011) carry out a characterization of the suitability for planting nopal considering variables such as minimum temperature, maximum temperature, precipitation, soil depth, pH, soil texture, altitude and slope of the land, performing the integration of variables through the Fussy method, managing to identify surfaces suitable for cultivation. The Secretaría de Agricultura and the Universidad Autónoma de Zacatecas (SAGARPA-UAZ, 2015) propose a regional project to diversify the uses of nopal, including the production of prickly pear (tuna), which was based on a comprehensive approach to improving productivity and profitability, based on optimal soil parameters (30 cm depth and at least 300 mm of annual rainfall) and medium soil texture. For their part, Savino et. al. (2019) determined areas suitable for prickly pear cactus, managing to zone the surface according to the potential to host the crop in Santiago del Estero, Argentina. The modeling was carried out through the combination of bioclimatic variables, obtaining cartography with the necessary ranges to guarantee optimal conditions for the crop. Arharya et al. (2019) mapped land suitability for *Opuntia ficus-indica* in India using a process hierarchy analysis (AHP), which integrated climatic and edaphic factors: precipitation, minimum, maximum and average temperature, relative humidity, soil salinity, texture, pH and organic matter, obtaining a variable degree of spatio-temporal suitability under changing conditions of precipitation and aridity, such areas are considered an input to build resilient agro-ecosystems, which provide food and forage, as well as improve ecosystem services.

This research, provides the background for the development of suitability maps for nopal cultivation, however, in our investigation a spatial prioritization model was estimated that considered the following criteria in the definition of the suitability of the crop: edaphic criterion (slope, texture and type of soil), accumulated heat units criterion "UCAcum" (base temperature of nopal, minimum temperature and maximum temperature of the location or region of study),

con una vocación hacia la investigación relacionada al mapeo de aptitud del terreno, mediante la EEMC (Malcewski, 2004; Mendoza & Martínez, 2006; Olivas et al., 2007; Arharya et al., 2019). Según Bustillos et al. (2017), este tipo de enfoque permite relacionar, analizar y priorizar información espacial y no espacial de diferentes temas (ambiental, social, epidemiológica, entre otras), otorgando un respaldo técnico y científico en los procesos metodológicos.

Existen algunas publicaciones que han abordado la estimación de territorios aptos para el nopal, (i.e.) Ceballos & Blanco (2011) realizan una caracterización de la aptitud para siembra de nopal considerando variables como temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación, profundidad del suelo, pH, textura de suelo, altitud y pendiente del terreno, realizando la integración de variables por medio del método Fussy, logrando identificar superficies aptas para el cultivo.

La Secretaría de Agricultura y la Universidad Autónoma de Zacatecas (SAGARPA-UAZ, 2015), plantean un proyecto regional para diversificar los usos del nopal, incluyendo la producción de tuna, el cual, se basó en un enfoque integral para mejorar la productividad y rentabilidad, basado en los parámetros suelos óptimos (30 cm de profundidad y al menos 300 mm de precipitación anual) y textura media de suelo. Por su parte Savino et. al. (2019) determinaron áreas aptas para nopal tunero, logrando zonificar la superficie de acuerdo con las potencialidades para albergar al cultivo en Santiago del Estero, Argentina. La modelización se realizó a través de la combinación de variables bioclimáticas obteniendo cartografía con los rangos necesarios para garantizar las condiciones óptimas para el cultivo.

Arharya et al. (2019), realizaron un mapeo de la aptitud de la tierra para *Opuntia ficus-indica* en la India mediante un proceso de análisis jerárquico (AHP), que integró factores de carácter climático y edáfico: precipitación, temperatura mínima, máxima y media, humedad relativa, salinidad del suelo, textura, pH y materia orgánica, obteniendo un grado variable de idoneidad espacio-temporal bajo condiciones cambiantes de precipitación y aridez, dichas áreas se consideran un insumo para construir agro ecosistemas resilientes, que proporcionen alimentos y forraje, así como una mejora a los servicios ecosistémicos.

environmental criteria (associated with precipitation, humidity and temperature) of the global baseWorldClim (2020) and the altitude criterion. This involved 24 variables, which are characterized and described in the Table 1.

Subsequently through the EEMC the areas with potential suitability for nopal cultivation were characterized, using a map algebra process, which involved identifying and analyzing the suitability criteria mentioned above (Table 1). This determination of suitable areas involved zoning the territory according to the optimal potential of the crop. According to Soplas-Mass et al., (2018) and Savino et al., (2019), the EEMC allows to determine the potential areas and identify the places with optimal conditions for the development of a certain species.

For the calculation of the potential distribution model of the crop georeferenced sampling data were used, defined as training points (presence) which were collected in the field with GPS Map 60Csx equipment with a GA 38 antenna, GPS / GLONASS, considering plantations of prickly pear cactus of the red smooth and crystalline variety, in the Ejido La Victoria, in the town of Pinos, Zacatecas, because it will be the region that will provide the plant material for the new plantations in areas identified in this research (according to the Unión Mexicana de Productores Nopal Tuna and Maguey Producers of the State of San Luis Potosí (UMPNTandM SLP).

The estimation of the potential distribution of the prickly pear cactus was carried out by using the MaxEnt algorithm considered as a robust and statistically significant model due to the statistical support of the area under the AUC curve (i.e.). Masocha & Dube, (2017) estimated the potential distribution of *O. fulgida* in Zimbabwe classified as an invasive exotic species, obtaining results that supported decision-making on health issues, similarly Scheinva et al. (2018) modeled the potential distribution of a new species of *Opuntia* (*Cactaceae*) from Coniferous and *Quercus* forests in northern Mexico, obtaining the potential distribution in a well defined environment.

The methodological process involved three strategic stages:

- 1) Standardization of the factors employed by means of the use of membership functions based on their agroecological requirements and the optimal/sub-optimal values of the crop.

Dichas investigaciones, son el antecedente en la elaboración de mapas de aptitud para el cultivo de nopal, sin embargo, en nuestra investigación se estimó un modelo de priorización espacial que consideró los siguientes criterios en la definición de la aptitud del cultivo: criterio edáfico (pendiente, textura y tipo de suelo), criterio unidades calor acumuladas "UCAcum" (temperatura base del nopal, temperatura mínima y temperatura máxima de la localidad o región de estudio), criterios ambientales (asociados a precipitación, humedad y temperatura) de la base global WorldClim (2020) y el criterio de altitud. Lo que involucró 24 variables, las cuales se caracterizan y describen en el Cuadro 1.

Posteriormente a través de la EEMC se caracterizaron las superficies con aptitud potencial para el cultivo de nopal, mediante un proceso de álgebra de mapas, que involucró identificar y analizar los criterios de aptitud antes señalados (Cuadro 1). Dicha determinación de superficies aptas implicó zonificar el territorio conforme a las potencialidades óptimas propias del cultivo. Según Soplas-Mass et al., (2018) y Savino et al., (2019), la EEMC permite determinar las áreas potenciales e identificar los lugares con las condiciones óptimas para el desarrollo de una determinada especie.

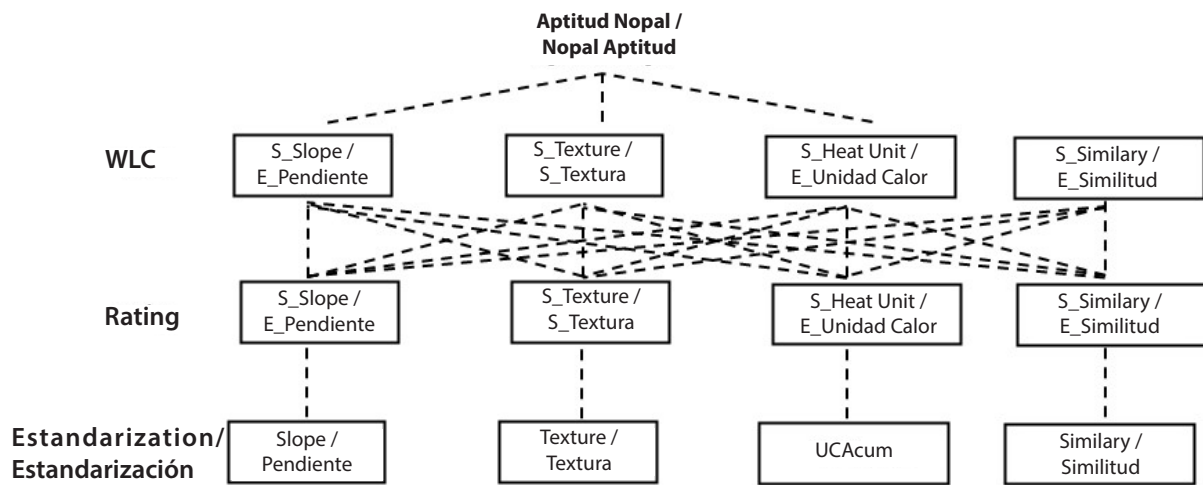
Para el cálculo del modelo de distribución potencial del cultivo se utilizaron datos de muestreo georreferenciados, definidos como puntos de entrenamiento (presencia) los cuales fueron levantados en campo con los equipos GPS Map 60Csx con una antena GA 38, GPS/GLONASS, considerando plantaciones de nopal tunero de la variedad roja lisa y cristalina, en el Ejido La Victoria, en la localidad de Pinos, Zacatecas, debido a que será la región que proveerá el material vegetal para las nuevas plantaciones en zonas identificadas en esta investigación (de acuerdo con la Unión Mexicana de Productores Nopal Tuna y Maguey del Estado de San Luis Potosí (UMPNTyM SLP).

La estimación de la distribución potencial del nopal tunero se realizó por medio del algoritmo MaxEnt considerado un modelo robusto y estadísticamente significativo por contar con el respaldo estadístico del área bajo la curva AUC, (i.e.) Masocha & Dube, (2017) estimaron la distribución potencial de *O. fulgida* en Zimbabwe catalogada como una especie exótica invasora, obteniendo resultados que dieron

Table 1. Operationalization of variables of the spatial prioritization model.
Cuadro 1. Operacionalización de variables del modelo de priorización espacial.

Criteria / Criterios	Conceptual definition / Definición conceptual	Operational definition / Definición operativa	Indicators / Indicadores	Estimate / Estimación	Source/ Fuente
Slope / Pendiente	It's the percentage value obtained from the difference in altitude (INEGI, 2011). / Es el valor porcentual que se obtiene de la diferencia en altitud (INEGI, 2011).	It is the inclination or unevenness of the ground. / Es la inclinación o desnivel del suelo.	It is expressed in percentage (%) / Se expresa en porcentaje (%)	IDW interpolation considering: / $\text{Pendiente} = \frac{(D. \text{Horizontal})}{(D. \text{Reducida})} \times 100$ Interpolación IDW considerando: $\text{Pendiente} = \frac{(D. \text{Horizontal})}{(D. \text{Reducida})} \times 100$	Digital Terrain Model (DTM) (INEGI, 2015) / Modelo Digital del terreno MDT (INEGI, 2015)
Soil Texture / Textura de Suelo	Percentage of sand, silt, and clay particles present in the upper 30 cm in dominant soil. (INEGI, 2010). / Porcentaje de partículas de arena, limo y arcilla presentes en los 30 cm superiores en suelo dominante (INEGI, 2010).	It is the soil's capacity to retain water according to the particles that make up the soil. / Es la capacidad del suelo para retener agua según las partículas que componen el suelo.	It is expressed in three classes: - Fine texture - Medium texture - Thick texture / Se expresa en tres clases: - Textura fina - Textura media - Textura gruesa	Heat map (Hotspot), identifies statistically significant clusters in a spatial context: hot spots and cold spots. / Mapa de calor (Hotspot), identifica cluster estadísticamente significativos en un contexto espacial: puntos calientes y puntos fríos.	Soil map scale 1:250000 (INEGI, 2010). / Carta edafológica escala 1:250000 (INEGI, 2010).
Accumulated Heat Units (UACum) / Unidades Calor Acumuladas (UACum)	Integration of the environmental temperature curve between the maximum and minimum growth temperature, which define the temperature range where the crop grows adequately (INIFAP 2017). / Integración de la curva de temperatura ambiental entre la temperatura máxima y mínima de crecimiento, las cuales definen el rango de temperatura donde el cultivo se desarrolla adecuadamente (INIFAP 2017).	The optimal thermal conditions for cultivation are considered. / Se considera las condiciones térmicas óptimas del cultivo.	Expresses the degree of thermal accumulation from base, minimum and maximum temperatures / Expresa el grado acumulación térmica a partir de temperatura base, mínima y máxima.	Where the following restrictions are considered: $GD = \frac{(T_{MAX} + T_{MIN})}{2} - T_{BASE}$ "TBASE" is the temperature below which plant growth does not progress (McMaster & Wilhelm 1997). / Donde se consideran las siguientes restricciones: $GD = \frac{(T_{MAX} + T_{MIN})}{2} - T_{BASE}$ "TBASE" es la temperatura por debajo de la cual el crecimiento de la planta no progresa (McMaster & Wilhelm 1997).	McMaster and Wilhelm, 1997, INIFAP Meteorological Station Network, 2017. / Mc Master y Wilhelm, 1997, Red de estaciones meteorológicas de INIFAP, 2017.
Climatic similarity / Similitud climática	The ecological niche model or potential distribution species in the geographic space considering known distributions (only presence), spatially associated with the environmental space (CONABIO & University of Kansas, 2017). / El modelo de nicho ecológico o distribución potencial de las especies en el espacio geográfico considerando distribuciones conocidas (solo presencia), asociados espacialmente con el espacio ambiental (CONABIO & University of Kansas, 2017).	It is a model that allows a quantitative evaluation of the possibility of a species occupying a certain location. / Es un modelo que permite evaluar cuantitativamente la posibilidad de que una especie ocupe un determinado lugar.	It uses sampling of the species to be evaluated and 21 macro-environmental variables: / Utiliza muestreo de la especie a evaluar y 21 variables macro ambientales:	Using the Maximum Entropy MaxEnt algorithm and 19 macro-environmental variables associated with precipitation and temperature (shown in Appendix 1). / A través del algoritmo de Máxima Entropía MaxEnt y 19 variables macro ambientales asociadas a precipitación y temperaturas. (expuestas en el anexo 1)	WorldClim 2020 field survey of the species of interest (Prickly pear cactus). / WorldClim 2020 levantamiento en campo de las especies de interés (Nopal tunero).

Figure 3. Factors Standardization
Figura 3. Estandarización de factores



Source: Authors' self-made.
Fuente: Elaboración propia.

2) Obtaining the importance of the factors through the opinion of crop experts and the rating method, to assess the information of each variable (Collins et al., 2016; Saqib Khan et al., 2016), and

3) The calculation of areas with potential suitability by weighted linear combination (WLC), which is a procedure by which continuous criteria (factors) are standardized in a numerical range and combined by means of weighted average (Salcedo et al., 2017) (Figure 3).

Membership functions allow to define the degree of belonging of a factor for a particular objective, through standardization based on the requirements of the analysis crop. Standardization was defined on a byte scale, with values ranging from 0 to 255, as it was considered the most recommended for a high suitability rating. This procedure has been used and recommended by varied researchers (Bustillos et al., 2007; Delgado et al., 2010; Aguirre et al., 2015), that is a value of 255 or close to it was assigned to the optimal requirements for development, and values of 0 or close to it were assigned to those that were outside the requirements (Table 2).

The rating method is a procedure for estimating weights that requires a decision-maker. The data is expressed in a valuation matrix X_{ij} , so that each alternative, is evaluated in terms of its degree of compliance with the criteria. It is obtained from the assessment or judgment with which the group of n

soporte en la toma de decisiones en cuestiones sanitarias, de igual forma Scheinva et al. (2018), modelaron la distribución potencial de una nueva especie de *Opuntia* (*Cactaceae*) de Bosques de Coníferas y *Quercus* en el norte de México, obteniendo la distribución potencial en un entorno bien definido.

El proceso metodológico involucró tres etapas estratégicas:

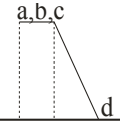
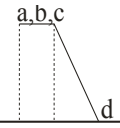
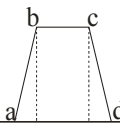
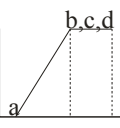
1) La estandarización de los factores empleados por medio de la utilización de funciones de membresía fundamentadas en sus requerimientos agroecológicos y los valores óptimos/subóptimos del cultivo.

2) La obtención de la importancia de los factores mediante el dictamen de expertos del cultivo y el método rating, para valorar la información de cada variable (Collins et al., 2016; Saqib Khan et al., 2016), y

3) El cálculo de las áreas con aptitud potencial mediante combinación lineal ponderada (WLC), que es un procedimiento por medio del cual los criterios continuos (factores) se estandarizan en un rango numérico y se combinan por medio de promedio ponderado (Salcedo et al., 2017) (Figura 3).

Las funciones de membresía permiten definir el grado de pertenencia de un factor para un objetivo en particular, mediante la estandarización a partir

Table 2. Diffuse membership functions
Cuadro 2. Funciones de menbresía difusa

Factor	Membership functions / Función de membresía	Graphic / Gráfico	Parameters used / Parámetros utilizados
Slope (%) / Pendiente	Monotonically decreasing / Monotónicamente decreciente		a: 0; b: 8; c: 8 and d 16 / a: 0; b: 8; c: 8 y d 16
Texture / Textura	Monotonically decreasing / Monotónicamente decreciente		a: Average, b: Average, c: Thick and d: Fine / a: Media, b: Media, c: Gruesa y d: Fina
UCAcum	Symmetrical / Simétrica		a: 0, b: 40,000, c: 68,862 and d: 10,4724 / a: 0, b: 40,000, c: 68,862 y d: 10,4724
Climate Similarity/ Similitud climática	Monotonically increasing / Monotónicamente creciente		a: 0, b: 1, c: 1 and d: 1 / a: 0, b: 1, c: 1 y d: 1

Source: Authors' self-made.
Fuente: Elaboración propia

experts, evaluates each alternative on a scale of real values that can range from 1-5, 1-7, 1-10, or 1-100, to indicate the degree of importance of the criterion indicated (Patidar, 2007; Malczewski et al., 2010; Zardari et al., 2014). Once the assessment matrix was obtained, each variable was normalized using the following formula:

$$Wn_{j0} = \frac{R_j}{\sum_{j=1}^c R_j}$$

Where Wn = weight of the normalized attribute;
 R = qualified attribute.

The weighted linear combination (WLC) multicriteria evaluation technique, is a method used to combine each of the factors in a weighted manner to generate a map showing the degree of suitability (S) for establishing a crop (Olivas-Gallegos et al., 2007; Delgado et al., 2010; Aguirre et al., 2015; Paty-Limanchi & Ramos, 2021; Koull et al., 2022). This was estimated using the formula described below:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

de los requerimientos del cultivo de análisis. La estandarización se definió en una escala byte, con valores oscilantes entre 0 y 255, al ser considerada como la más recomendada para una calificación alta de conveniencia. Este procedimiento ha sido utilizada y recomendada por diversos investigadores (Bustillos et al., 2007; Delgado et al., 2010; Aguirre et al., 2015), es decir el valor de 255 o próximo fue asignado a los requerimientos óptimos para el desarrollo y valores de 0 o próximos a los que estuvieran fuera de los requerimientos (Cuadro 2).

El método rating es un procedimiento para la estimación de pesos el cual requiere un tomador de decisiones. Los datos son expresados en una matriz de valoración X_{ij} , de forma que se evalúe, para cada alternativa, en el grado de cumplimiento para el desarrollo del criterio. Se obtiene a partir de la valoración o juicio con el que evalúan cada alternativa el grupo de n expertos, sobre una escala de valores reales que puede ir de 1-5, 1-7, 1-10 o 1 – 100, para indicar el grado de importancia del criterio señalado (Patidar, 2007; Malczewski et al., 2010; Zardari et al., 2014). Una vez obtenida la matriz de valoración, fue normalizada cada variable mediante la siguiente fórmula:

Where S = Land suitability for establishment on a scale of 0 to 255, w_i = importance value of factor//subfactors i , x_i = factor i standardized with the membership functions

In this sense the variables were classified according to the expert's judgment, characterizing five ranges for the spatial prioritization model for the potential areas of *Opuntia* spp in the state of San Luis Potosí (Table 3)

Data was then processed using the WLC method, which generated results on a scale of 0-255 (byte). Subsequently, for optimal interpretation of results, the resulting cartographic model was reclassified into five classes of land suitability: 1.- very low (0 to 51), 2.- low (51 to 102), 3.- average (102 to 153), 4.- high (153 to 204) and 5.- very high (204 to 255); this made it possible to identify the area suitable for cultivation.

It is worth mentioning that the developed methodological process is used as the technical/scientific basis for supporting strategic decision-making in the definition and selection of potential areas for the establishment of new prickly pear plantations in the Potosino plateau by the UMPNT and M SLP, since, although the cultivation of *Opuntia* spp. thrives in any type of soil, the region has poor soils and suboptimal conditions that, according to Luna et al. (2012), generate slow development and low productivity. In addition, the presented model considered the physical conditions of the soil, the altitudinal profile and, very important, the optimal temperature requirements

$$Wn_{j0} = \frac{R_j}{\sum_{j=1}^c R_j}$$

Donde Wn = peso del atributo normalizado; R = atributo calificado.

La técnica de evaluación multicriterio por combinación lineal ponderada (WLC), es un método utilizado para combinar ponderadamente cada uno de los factores para generar un mapa con el grado de aptitud (S) para el establecimiento de un cultivo (Olivas-Gallegos et al., 2007; Delgado et al., 2010; Aguirre et al., 2015; Paty-Limanchi & Ramos, 2021; Koull et al., 2022). Lo cual fue estimado bajo la fórmula que se describe a continuación:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

Donde S = Aptitud del terreno para el establecimiento en una escala de 0 a 255, w_i = valor de importancia del factor//subfactores i , x_i = factor i estandarizado con las funciones de membresía.

En este sentido las variables se clasificaron de acuerdo con el juicio del experto, caracterizando cinco rangos para el modelo de priorización espacial para las áreas potenciales de *Opuntia* spp en el estado de San Luis Potosí (Cuadro 3).

Posteriormente se procesó la información mediante el método WLC, el cual generó resultados de valores en escala 0-255 (byte). Posteriormente, para

Table 3. Rank assignment for the spatial prioritization model for potential *Opuntia* spp. areas in the state of San Luis Potosí

Cuadro 3. Asignación de rangos para el modelo de priorización espacial para las áreas potenciales de *Opuntia* spp. en el estado de San Luis Potosí

Variable	Very high /Muy alta	High / alta	Average / Media	Low / Baja	Very low / Muy baja
Slope / Pendiente	0 a 6°	0 a 6°	0 a 6°	0 a 6°	0 a 6°
Soil texture / Textura de suelo	Average / Media	Average / Media	Thick / Gruesa	Thick / Gruesa	Fine / Fina
UCAcum	45 054 to 60 423	60 424 to 72 176	72 177 to 75 491	71 492 to 88 449	88 450 to 104 724
Climate similarity / Similitud climática	0.93 - 0.67	0.66 - 0.44	0.45 - 0.26	0.25 - 0.10	>0.9

Source: Authors' self-made based on geospatial analysis of the variables data

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con el análisis geoespacial de las variables

Table 4. Weight assignment using the rating method for the spatial prioritization model for potential areas of *Opuntia* spp. in the state of San Luis Potosí.

Cuadro 4. Asignación de pesos por el método rating para el modelo de priorización espacial para las áreas potenciales de *Opuntia* spp. en el estado de San Luis Potosí.

Variable	Weight / Peso
Slope / Pendiente	0.20
Soil texture / Textura de suelo	0.15
Accumulated Heat Units / Unidades Calor Acumuladas	0.25
Climatic similarity / Similitud climática	0.40

(UCAcum) for the phenological development of the crop.

Results

The reclassification of the soil slope variable was carried out into 5 classes, based on the characteristics which favor the cultivation of prickly pear cactus: 1) Very low slope, which has flat to slightly inclined characteristics (from 0 to 6 °), 2) Low and average slope considered moderately to strongly flat (from 6.1 to 18 °), 3) High slope considered moderately steep (from 21.1 to 24 °) and 5) very high slope with a very and extremely steep territorial characteristic (from 24.1 to 98.2 °), these slope ranges are taken from the classification of the Agustín Codazzi Geographic Institute (POMCA, 2014). In this regard, it is pertinent to note that the very low slope was considered the most appropriate for the establishment of prickly pear cactus, which implies greater water conservation through runoff, given that the study region has dry climate characteristics (Figure 3a).

Texture, as an analysis variable, was reclassified according to the physical characteristics depending on the size of the particles that make up soil: 1) thick texture, contains more than 65% of sand with less water retention capacity, 2) average texture, are the balanced soils in sand, clay and silt finally 3) fine texture, represents the clayey soils, with 35% of clay, are generally floodable soils and the least favorable in an agricultural vocation (INEGI, 2015). For this variable, the favorable criteria for the establishment of new plantations of prickly pear cactus were average textured soils, considered with high potential and soils with thick texture a potential of average suitability (Figure 3b).

una óptima interpretación de los resultados, se re-clasificó el modelo cartográfico resultante en cinco clases de aptitud del terreno: 1.- muy bajo (0 a 51), 2.- bajo (51 a 102), 3.- medio (102 a 153), 4.- alto (153 a 204) y 5.- muy alto (204 a 255); lo que permitió identificar la superficie apta para el cultivo.

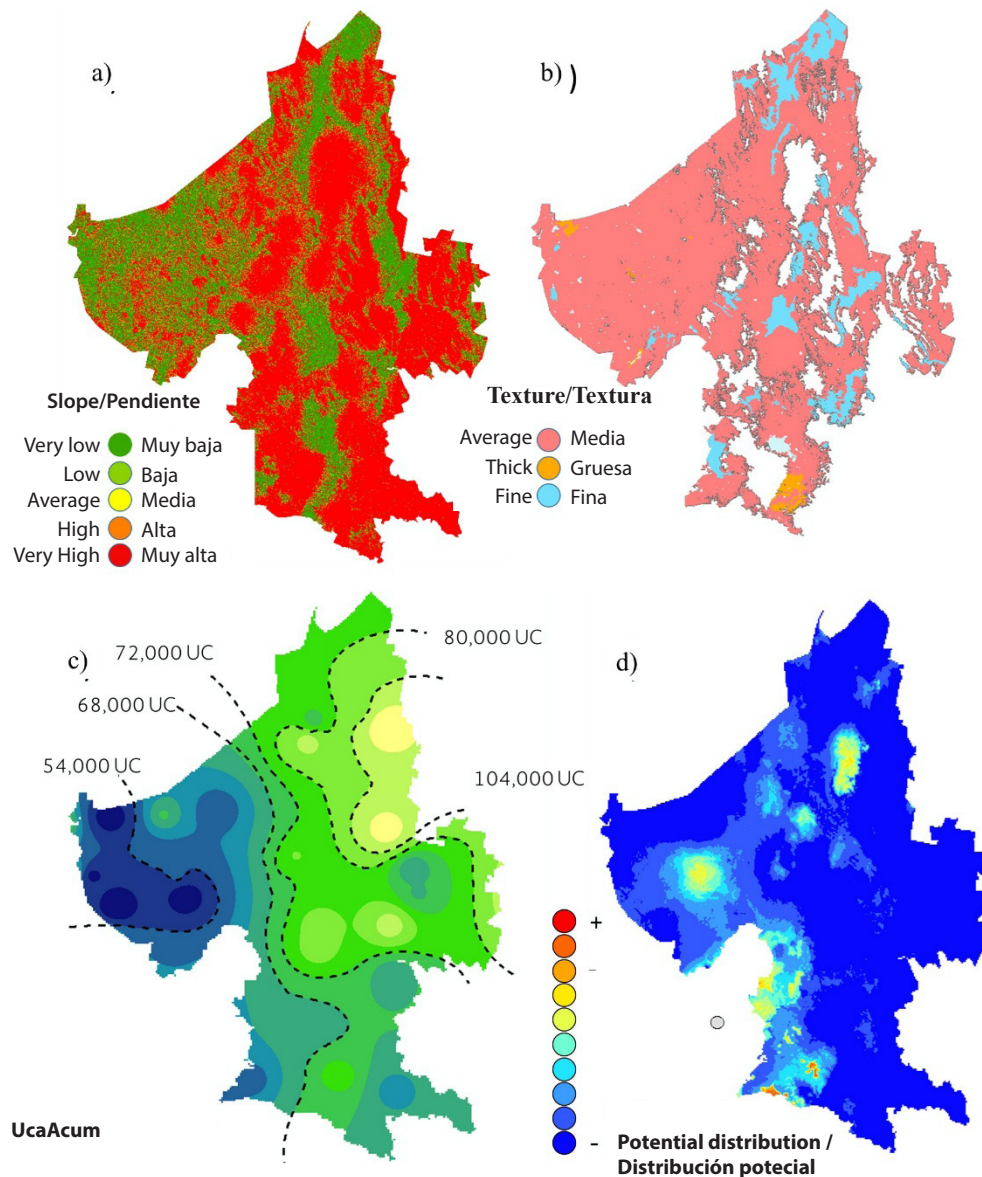
Cabe mencionar que el proceso metodológico desarrollado se utiliza como el sustento técnico/científico en el apoyo a la toma de decisiones estratégicas en la definición y selección de zonas potenciales para el establecimiento de nuevas plantaciones de nopal tunero en el altiplano potosino por parte de la UMPNTyM SLP, ya que, aunque el cultivo de *Opuntia* spp. prospera en cualquier tipo de suelo, en la región existen suelos pobres y condiciones no óptimas que, según Luna et al. (2012), generan un desarrollo lento y baja productividad. Además, el modelo expuesto consideró condiciones físicas del suelo, perfil altitudinal y, muy importante, los requerimientos de temperatura óptima (UCAcum) para el desarrollo fenológico del cultivo.

Resultados

La reclasificación de la variable pendiente del suelo se realizó en 5 clases, en virtud de las características que favorecen al cultivo de nopal tunero: 1) Pendiente muy baja, que posee características de plana a ligeramente inclinada (de 0 a 6°), 2) Pendiente baja y media considerada de moderada a fuertemente plana (de 6.1 a 18°), 3) Pendiente alta considerada moderadamente empinada (de 21.1 a 24°) y 5) pendiente muy alta con una característica territorial muy empinada y extremadamente empinada (de 24.1

Figure 3. Variables to estimate the model spatial prioritization for potential *Opuntia* spp. areas in the state of San Luis Potosí, Mexico. a) Slope, b) Soil texture, c) Accumulated Heat Units “UCAcum” and d) Potential distribution of prickly pear nopal by climatic similarity “Maxent”.

Figura 3. Variables para estimar el modelo de priorización espacial para las áreas potenciales de *Opuntia* spp. en el estado de San Luis Potosí, México. a) Pendiente, b) Textura de suelo, c) Unidades Calor Acumuladas “UCAcum” y d) Distribución potencial de Nopal tunero estimado por similitud climática “Maxent”.



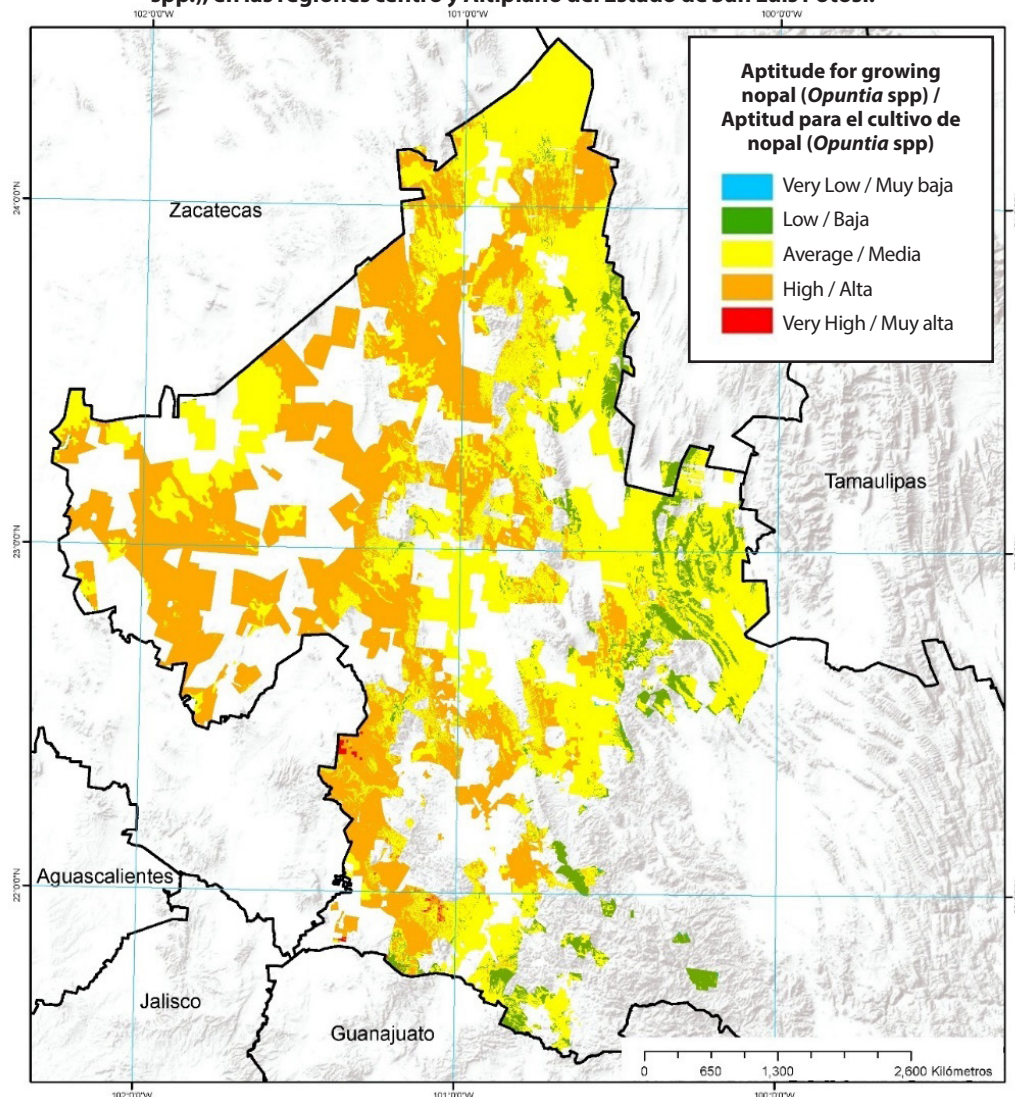
Source: Authors' self-made with data expressed in the research methodology.
Fuente: Elaboración propia con datos expresados en la metodología de la investigación.

Thermal suitability was estimated by integrating the values that favor the crop through the calculation of UCAcum, which characterizes the surfaces according to the integration of the environmental temperature curve (isotherms), and five thermal ranges were obtained: with very high suitability for cultivation the

hasta 98.2°), dichos rangos de pendiente se toman de la clasificación del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (POMCA, 2014). Al respecto, es pertinente señalar que la pendiente muy baja se consideró la más apropiada para el establecimiento del nopal tunero, que implica mayor conservación de agua por

Figure 4. Suitability model for the establishment of nopal (*Opuntia* spp.) cultivation in the central and Altiplano regions of the State of San Luis Potosí.

Figura 4. Modelo de aptitud para el establecimiento del cultivo de nopal (*Opuntia* spp.), en las regiones centro y Altiplano del Estado de San Luis Potosí.



Source: Authors' self-made with the outlined methodology data.

Fuente: Elaboración propia con la metodología expuesta.

thermal range oscillated between 45 054 and 60 423 UCAcum, with high suitability the oscillation was determined between 60 424 and 72,176 UCAcum, with medium suitability it oscillated between UCAcum values of 72,17 to 75 491, with low suitability it was from 75 492 to 88 449 UCAcum and finally, with very low suitability from 88 450 to 104 724 UCA (Figure 3c).

In addition, the potential distribution model of prickly pear nopal was considered a robust model since it presented an area under the curve (AUC: 0.994), higher than the critical point for this model (AUC 0.700), according to the parameters indicated

escurrimiento, dado que la región de estudio cuenta con características de clima seco (Figura 3a).

La textura, como variable de análisis, se reclasificó conforme a las características físicas según el tamaño de las partículas que conforman el suelo: 1) textura gruesa, contiene más de 65 % de arena con menor capacidad de retención de agua, 2) textura media, son los suelos equilibrados en arena, arcilla y limo finalmente 3) textura fina, representa los suelos arcillosos, con 35 % de arcilla, generalmente son suelos inundables y los menos favorables en una vocación agrícola (INEGI, 2015). Para esta variable, los criterios

by Keiko et al. (2015). In addition, the variables that support the modeling are altitude (BIO:20) with a contribution of 31.8%, precipitation of the rainiest month (BIO:13) with a contribution of 25.4%, seasonality of temperature (BIO:4) with 9.7%, average temperature of the driest quarter (BIO:9) with 8.2%, annual precipitation (BIO:12) with 7.3%, seasonal precipitation (BIO:17) with 7%, precipitation of the driest quarter (BIO:15) with 5.5%, precipitation of the wettest quarter (BIO:16) with 2.3%, seven variables with a contribution of 2.8% (Figure 3d).

The spatial association and interaction through the EEMC of the 24 variables that determined the suitability for the establishment of the cultivation of prickly pear (*Opuntia* spp.) in the study region, allow us to show that 16 494 km² are suitable for the establishment of the crop, that is, 45.31% of the study region has optimal conditions for the establishment of the crop, of which: 824 190 ha have a high suitability, 780 763 ha with average suitability and 41 432 ha have a low suitability and it is pertinent to note that 2,411 ha have a very high suitability and on the contrary 639 ha have a very low suitability, the above considering as a territorial basis the register of the surface of the Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares, PROCEDE (Figure 4).

The suitability for the establishment of the cultivation of prickly pear nopal (*Opuntia* spp) at the municipal level had its greatest territorial extension in Vanegas with 215 170 ha, followed by Santo Domingo with 207 371 ha, Catorce with 153 985 ha, Villa de Ramos with 148 371 ha, Charcas with 132 155 ha, Villa de Guadalupe with 116 212 ha, Cedral with 106 644 ha, Venado with 96 953 ha, Matehuala with 88 559 ha, Villa de Reyes with 78 705 ha, Moctezuma with 73 511 ha, Salinas with 65 379 ha, Ahualulco with 55 822 ha, Villa de Arriaga with 42 189 ha, Mexquitic with 38 675 ha, Villa de Arista with 16 074 ha and Villa de la Paz with 13 660 ha. In addition, the table shows the percentage in each category level: very high, high, medium, low and very low (Table 5)

Discussion

The transdisciplinary approach of spatial methodologies as a support for the evaluation of agricultural comfort conditions allows to strengthen strategic decision-making, since it enables the integration and analysis of variables that identify territorial surfaces

favorables para el establecimiento de nuevas plantaciones de nopal tunero fueron los suelos de textura media, considerados con un potencial alto y los suelos con textura gruesa un potencial de aptitud media (Figura 3b).

La aptitud térmica se estimó con la integración de los valores que favorecen al cultivo a través del cálculo de UCAcum, lo que caracteriza las superficies de acuerdo a la integración de la curva de temperatura ambiental (isotermas), y se obtuvieron cinco rangos térmicos: con muy alta aptitud para el cultivo el rango térmico osciló entre las 45 054 y 60 423 UCAcum, con alta aptitud la oscilación se determinó entre las 60 424 a 72 176 UCAcum, con aptitud media osciló entre los valores UCAcum de 72 177 a 75 491, con baja aptitud fue de 75 492 a 88 449 UCAcum y finalmente, con muy baja aptitud de 88 450 a 104 724 UCA (Figura 3c).

En complemento, el modelo de distribución potencial de nopal tunero se consideró un modelo robusto pues presentó un área bajo la curva (AUC: 0.994), superior al punto crítico para este modelo (AUC 0.700), conforme a los parámetros señalados por Keiko et al. (2015). Además, las variables que soportan el modelado son la altitud (BIO:20) con una contribución del 31.8 %, precipitación del mes más lluvioso, (BIO:13) con aporte del 25.4 %, estacionalidad de la temperatura (BIO:4) con el 9.7 %, temperatura media del trimestre más seco (BIO:9) con el 8.2 %, precipitación anual (BIO:12) con el 7.3 %, precipitación estacional (BIO:17) con el 7 %, precipitación del trimestre más seco (BIO:15) con el 5.5 %, precipitación del trimestre más húmedo (BIO:16) con el 2.3 %, siete variables con un aporte del 2.8 % (Figura 3d).

La asociación e interacción espacial a través de la EEMC de las 24 variables que determinaron la aptitud para el establecimiento del cultivo de nopal tunero (*Opuntia* spp.) en la región de estudio, permiten evidenciar que 16 494 km² cuentan con aptitud para el establecimiento del cultivo, es decir, el 45.31 % de la región de estudio cuenta con óptimas condiciones para el establecimiento del cultivo, de las cuales: 824 190 ha poseen una aptitud alta, 780 763 ha con aptitud media y 41 432 ha cuentan con una aptitud baja y es pertinente señalar que 2 411 ha cuentan con muy alta aptitud y por el contrario 639 ha cuen-

Table 5. Estimated area by degree of suitability of nopal (*Opuntia spp*), broken down by the municipalities which make up the study region.**Cuadro 5. Superficie estimada por grado de aptitud de nopal (*Opuntia spp*), desglosado por los municipios que integran la región de estudio.**

Municipality / Municipio	Code / Clave	Surface (ha) / Superficie (ha)	(%) Percentage of surface área / (%) Porcentaje de superficie				
			Very low / Muy baja	Low / Baja	Average / Media	High /Alta	Very High / Muy alta
Ahualulco	001	55 822	0.12	1.37	26.93	69.23	2.35
Catorce	006	153 985	0.01	0.31	23.53	76.15	
Cedral	007	106 644	0.07	1.62	60.15	38.16	
Charcas	015	132 155		0.73	39.66	59.61	
Matehuala	020	88 559	0.30	17.76	81.32	0.62	
Mexquitic	021	38 675		0.24	25.10	74.52	0.15
Moctezuma	022	73 511		1.05	40.80	58.14	
Salinas	025	65 379	0.07	0.50	14.29	85.13	
Santo Domingo	033	207 371	0.00	0.66	42.61	56.73	
Vanegas	044	215 170	0.03	1.50	71.78	26.69	
Venado	045	96 953		1.19	60.63	38.18	
Villa de Arista	056	16 074		3.53	82.00	14.47	
Villa de Arriaga	046	42 189	0.01	0.12	22.05	76.29	1.52
Villa de Guadalupe	047	116 212		5.70	78.89	18.41	
Villa de la Paz	048	13 660		1.43	80.41	17.99	0.17
Villa de Ramos	049	148 371		0.13	9.60	90.72	
Villa de Reyes	050	78 705	0.14	9.12	69.12	21.15	0.48
Total (ha)		1 649 435	639	41 432	780 763	824 190	2 411

Source: Authors' self-made with the outlined methodology data.**Fuente:** Elaboración propia con la metodología expuesta.

in which the ideal conditions exist to sustain the crop and to a certain extent guarantee effective development of the plants. That is, they allow that through a technical-scientific support an optimal placement of new plantations of prickly pear nopal is carried out in territories with differentiated characteristics in ranges of suitability (very high, high, medium, low and very low), seen as a gradual transition of space by virtue of the suitability that benefits the crop (Romano et al., 2015), which promotes beneficial impacts on the environment as pointed out by SAGARPA-UAZ (2015), based on territorial planning (Trabichet, 2022), with a contribution to the economic context and food security in the semi-desert area of the Potosino state.

Geotechnologies such as spatial analysis, EEMC and UCAcum, allow the characterization of a given territory with a desired vocation, which allows estimating resilient scenarios as pointed out by Arharya et al. (2019), contributing to the improvement in the

tan con muy baja aptitud, lo anterior considerando como base territorial el padrón de la superficie de El Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares, PROCEDE (Figura 4).

La aptitud para el establecimiento del cultivo de nopal tunero (*Opuntia spp*) a nivel municipal tuvo su mayor extensión territorial en Vanegas con 215 170 ha, seguido de Santo Domingo con 207 371 ha, Catorce con 153 985 ha, Villa de Ramos con 148 371 ha, Charcas con 132 155 ha, Villa de Guadalupe con 116 212 ha, Cedral con 106 644 ha, Venado con 96 953 ha, Matehuala con 88 559 ha, Villa de Reyes con 78 705 ha, Moctezuma con 73 511 ha, Salinas con 65 379 ha, Ahualulco con 55 822 ha, Villa de Arriaga con 42 189 ha, Mexquitic con 38 675 ha, Villa de Arista con 16 074 ha y Villa de la Paz con 13 660 ha. Además, en la tabla se evidencia por nivel de aptitud cuanto porcentaje está en las categorías de muy alta, alta, media, baja y muy baja (Cuadro 5).

socio-environmental context of the region, with contributions to the economy, food safety and favoring ecosystem services, which brings with it positive impacts on the social environment as pointed out by Savino et al. (2019). Our research allows to support and strengthen strategic decision-making in agricultural matters, with direct implications for the social network, since the UMPNT and M SLP uses these inputs to direct and implement new plantations of the crop in the semi-desert portion of the state of Potosí.

An appropriate selection of prickly pear nopal plots, makes it possible to trigger the priority axes of the UMPNT and M SLP, improve crop production and productivity, mitigate the effects of climate change and promote soil conservation for the benefit of biodiversity, as well as trigger social impact on nopal, prickly pear (tuna) and maguey producers in the Potosí highlands. Seen from the perspective of an emerging approach authors such as Riba et al. (2021), point out that they promote food safety and sustainability, encourage resource conservation and contribute to a profitable economy in arid areas. It is even an essential territorial prioritization strategy in the agricultural context (Cantos et al., 2022).

Conclusions

Spatial assessment of suitability for establishing nopal (*Opuntia* spp.) cultivation in the central and Altiplano regions of San Luis Potosí is a novel decision-making strategy for projecting the nopal as a strategic crop in the region. The potential of the model lies in its ability to locate perfectly defined (georeferenced) areas classified according to their suitability, defined and characterized using technical and scientific evidence that facilitates strategic land selection, allowing for the consolidation of the strategic axes of the UMPNT and M SLP, promoting food safety, the local and regional economy, benefits in climate change mitigation and soil conservation, as well as preserving the region's biodiversity.

Acknowledgements

To the Unión Mexicana de Productores de Nopal Tuna y Maguey of the state of San Luis Potosí, to Impulsora del Gran Tunal, as well as to the leader of these projects, Engr. Arturo Tello López for his support and advice during the research, likewise to the

Discusión

El enfoque transdisciplinario de las metodologías de índole espacial como respaldo a la evaluación de condiciones de confort agrícolas permite fortalecer la toma de decisiones estratégicas, ya que posibilita la integración y análisis de variables que identifican superficies territoriales en las que existen las condiciones idóneas para sustentar al cultivo y en cierta medida garantizar un desarrollo efectivo de las plantas. Es decir, permiten que a través de un sustento técnico-científico se realiza una colocación óptima de nuevas plantaciones de nopal tunero en territorios con características diferenciadas en rangos de aptitud (muy alta, alta, media, baja y muy baja), visto como una transición gradual del espacio en virtud de la aptitud que beneficia al cultivo (Romano et al., 2015), lo que promueve impactos benéficos al ambiente como señalan SAGARPA-UAZ (2015), basados en una planificación territorial (Trabichet, 2022), con un aporte al contexto económico y a la seguridad alimentaria en la zona semidesértica del estado Potosino.

Geotecnologías como el análisis espacial, la EEMC y las UCACum, permite la caracterización de un territorio determinado con una vocación deseada, lo que permite, estimar escenarios resilientes como señala Arharya et al. (2019), aportando a la mejora en el contexto socioambiental de la región, con aportes a la económica, seguridad alimentaria y favoreciendo los servicios ecosistémicos, lo que trae consigo impactos positivos en el entorno social como señalan Savino et al. (2019). Nuestra investigación permite dar soporte y fortalecer en la toma de decisiones estratégica en materia agropecuaria, con implicaciones directas al tejido social, ya que, la UMPNTyM SLP, utiliza estos insumos para direccionar e implementar nuevas plantaciones del cultivo en la porción semidesértica del estado potosino.

Una selección adecuada de parcelas de nopal tunero, hace factible detonar los ejes prioritarios de la UMPNTyM SLP, mejorar la producción y productividad del cultivo, mitigar los efectos del cambio climático y promover la conservación del suelo en beneficio de la biodiversidad, así como detonar la incidencia social en productores de nopal, tuna y maguey en el altiplano potosino. Visto desde la perspectiva de un enfoque emergente autores como Riba et al. (2021), señalan que promueven la seguridad y

national leader Engr. Omar Carpio Flores and all the members of the UMPNTand M SLP especially those from the Álvaro Obregón and Miguel Hidalgo ejidos in Mexquitic de Carmona S.P.

End of English version

References / Referencias

- Acharya, P., Biradar, C., Louhaichi, M., Ghosh, S., Hassan, S., Moyo, H., & Sarker, A. (2019) Finding a Suitable Niche for Cultivating Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica*) as an Integrated Crop in Resilient Dryland Agroecosystems of India. *Sustainability*, 11(21), 5897; <https://doi.org/10.3390/su11215897>
- Aguirre-Salado, C., Valdez-Lazalde, J., Sánchez-Díaz, G., Miranda-Aragón, L., & Aguirre Salado, A. (2015). Modelling site selection for tree plantation establishment considering different decision scenarios. *Journal of Tropical Forest Science*. 27(3): 298-313.
- Bravo, H., & Scheinvar, L. (1999). El interesante mundo de las cactáceas. 2a ed. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 233 p.
- Bustillos-Herrera, J., Valdez-Lazalde, R., Aldrete, A., & Gonzáles-Guillén, M. (2007). Aptitud de terrenos para plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden): definición mediante el Proceso de Análisis Jerarquizado y SIG. *Agrociencia*. 41: 787-796.
- CABI. (2019). *Opuntia ficus-indica* (prickly pear). (On line consultado August 25 2019) <https://www.cabi.org/isc/datasheet/37714#tosummaryOfInvasiveness>
- Campos, H., Lazarte, L., Ramírez, K., Meneses, R., Espinoza, J., & Acha, N. (2016). Recuperación y valorización de cactáceas, para uso forrajero, como una forma de adaptación al cambio climático para apoyar la producción animal en zonas áridas y semiáridas de Bolivia. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*. 13(14): 815-826.
- Cantos Sánchez, E. A., Inga Campoverde, J. A., Macías Hernández, D. J., & Martínez Carriel, T.F. (2022) Los sistemas de Información Geográfica aplicados a la agricultura de precisión. *PEN-TACIENCIAS*. Vol 4(3). <https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/131/182>
- Ceballos Silva, A. P., & Lopez Blanco, J. (2011). Delimitación de áreas adecuadas para cultivos de alternativa una evaluación multicriterio SIG. *CAB International*, <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20113252661>
- Colins, J., Sashikumar, M. C., Anas, P. A., & Kirubakaran, M. (2016). GIS-based assessment of aquifer vulnerability using DRAS-

sostenibilidad alimentaria, fomenta el cuidado de recursos y aporta en una economía rentable en zonas áridas. Incluso, resulta una estrategia de priorización territorial esencial en el contexto agropecuario (Cantos et al., 2022).

Conclusiones

La evaluación espacial de aptitud para el establecimiento del cultivo de nopal (*Opuntia* spp.), en las regiones centro y Altiplano del estado potosino, resulta una estrategia novedosa en la toma de decisiones para proyectar al nopal como un cultivo estratégico en la región. Las potencialidades del modelo radican en que posibilita ubicar áreas perfectamente definidas (georreferenciadas) catalogadas en un nivel de aptitud, definidas y caracterizadas mediante un sustento técnico-científico que potencializa una selección parcelaria estratégica, que permite consolidar los ejes estratégicos de la UMPNTyMSLP, favoreciendo la seguridad alimentaria, la economía local y regional, beneficios en la mitigación del cambio climático y la conservación de suelos, así como a preservar la biodiversidad de la región.

Agradecimientos

A la Unión Mexicana de Productores de Nopal Tuna y Maguey del estado de San Luis Potosí, a la Impulsora del Gran Tunal, así como a líder de estos proyectos Ing. Arturo Tello López por el acompañamiento y asesoría durante la investigación, de igual manera al líder nacional Ing. Omar Carpio Flores y todos los agremiados de la UMPNTyM SLP especialmente de los ejidos Álvaro Obregón y Miguel Hidalgo en Mexquitic de Carmona S.L.P.

Fin de la versión en español

- TIC Model: A case study on Kodaganar basin. *Earth Science Research Journal*. 20(1). <http://dx.doi.org/10.15446/esrj.v20n1.52469>
- CONABIO & University of Kansas. (2017). Nichos y áreas de distribución. [En línea] disponible en el sitio <http://nicho.conabio.gob.mx/la-calibracion-del-modelo/maxent>
- Delgado-Caballero, C., Valdez-Lazalde, J., Fierros-González, A., Santos-Posadas, H., & Gómez-Guerrero, A. (2010). Aptitud de áreas para plantaciones de eucalipto en Oaxaca y Veracruz: proceso de análisis jerarquizado vs álgebra. *Revista*

- Mexicana de Ciencias Forestales*. 1: 123-133.
- FAO. (2019). Cultivos tradicionales, (On line consultado September 04 2019) <http://www.fao.org/traditional-crops/cactuspear/es/>
- Gallegos, V. C., & Mondragón, C. J. (2011). Cultivares selectos de tuna, de México al mundo. SNICS-SAGARPA-UACH. Chapingo, México. 159 p.
- Hernández-Bonilla, B. E., Ruiz-Reynoso, A. M., Ramírez-Cortés, V., Sandoval-Trujillo, S. J., & **Dávila-Hernández, M. (2020). Análisis económico de productores y comercializadores de nopal en el Valle de Teotihuacán. Revista Iberoamericana de Contaduría, Economía y Administración.** RICEA. 9 (7). DOI: <https://doi.org/10.23913/ricea.v9i17.147>
- INEGI. (2010). Guía de interpretación de cartografía edafológica. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [En línea] disponible en el sitio: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf>
- INEGI. (2011). Diccionario de Datos de Erosión del Suelo Escala 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [En línea] disponible en el sitio: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/edafologia/metadatos/dicc_erosion.pdf
- INEGI. (2015). Guía para la Interpretación de Cartografía Edafológica <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/default.aspx>
- INIFAP. (2017). Cálculo de Grados Día. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. [En línea] disponible en el sitio: <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/aplicaciones/ucalor.aspx>
- Jarquín, G. R., & Ramírez, H. M. (2009). Avances en la Producción y Certificación Participativa de Nopal Orgánico en el Altiplano Potosino. Agricultura Orgánica. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/63617096/agricultura-organica>
- Kiesling, R., & Metzger, D. (2018). Origen and taxonomía de *Opuntia ficus-indica*. En Ecología del Cultivo, Manejo Y Usos del Nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. Roma, 2018. <http://www.fao.org/3/i7628es/i7628ES.pdf>
- Keiko, A.H., Falk, H., Lindgren, M.A. (2013). A global model of avian influenza prediction in wild birds: the importance of northern regions. [Acceso el 02 de mayo de 2024]; *Vet Res.* 44:(42). <https://doi.org/10.1186/1297-9716-44-42>
- Koull, N., Helimi, S., Mihoub, A., Mokhtari, S., Kherraze, M. E., & Aouissi, Hani A. (2022). Developing a Land Suitability Model for Cereals in the Algerian Sahara Using GIS and Hierarchical Multicriteria Analysis. *International journal of agriculture and natural resources*, 49(1), 36-50. <https://dx.doi.org/10.7764/ijanr.v49i1.2323>
- Luna-Vázquez, J., Zegb-Domínguez, J. A., Mena-Covarrubias, J., & Rivera-Lozano, M. T. (2012) Manejo de Plantaciones de Nopal Tunero en el Altiplano Potosino. Centro de Investigación Regional del Noreste; Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. [En línea] ISBN 978-607-425-884-4 Clave INIFAP/CIRNE/A-502 Primera edición 2012 [Consultado el 12 de noviembre de 2019] <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/planNopTun.pdf>
- Malcewski, J. (2004). GIS based land use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*. 62:3-65.
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2010). Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science. *Springer Berlin*. 331 p.
- Masocha, M., & Dube, T. (2017). Modelling *Opuntia fulgida* invasion in Zimbabwe. *Transactions of the Royal Society of South Africa*. 72(3). <https://doi.org/10.1080/0035919X.2017.1301593>
- McMaster, G.S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4), pp.291-300.
- Mendoza, G. A., & Martins, H. (2006). Multicriteria decision analysis in natural resource management: a critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest, Ecology and Management*. 230:1-22.
- Mora, M. (2018). Mercado, estrategias y limitaciones de comunicación. En Ecología del Cultivo, Manejo y Usos del Nopal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. Roma, 2018. <http://www.fao.org/3/i7628es/i7628ES.pdf>
- Negrete Mundo, A. L., Montiel Huerta, M. E., Vargas Matamoros K. L., & Torres López, A. (2020). Plan de negocios para la comercialización de nopal cumpliendo con el sello orgánico SAGARPA en *Miscelánea Científica en México* Tomo VI: Ingeniería, Temacilli EDITORIAL Lagos de Moreno, Jalisco. Centro de Investigaciones en Óptica, A. C. ISBN 978-607-8358-92-2.
- SEDARH (2020) Sistema Estatal de Información Agropecuaria. Cierre Agrícola. Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos. [En línea] <https://sedarh.gob.mx/seia/cultivos/nopalitos>
- SIAP (2020). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Acciones y Programas. Cierre de Producción Agrícola. [En línea] https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Olivas-Gallegos, U., Valdez-Lazalde, J., Aldrete, A., González-Guillén, M., & Vera-Castillo, G. (2007). Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: definición mediante análisis multicriterio y SIG. *Revista Fitotecnica Mexicana*. 30(4): 441-419.

- Pati Limachi, A., & Ramos Flores, M. E. (2021). Análisis multicriterio para la identificación de áreas agroecológicas para el centro experimental Cota Cota, Ciudad de La Paz-Bolivia. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(2), 102-112. <https://doi.org/10.53287/ehoi6370fd86e>
- Patidar, V. (2007). Multi-objective optimization for bridge management systems. *Transportation Research Board*. 67: 90 p.
- POMCA (2014). Pendientes. Fase de Diagnóstico POMCA-RL0D (Código 2118). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica*. https://cortolima.gov.co/images/POMCA/Rio_Luisa/IIIFase_de_Diagnostico/3.6%20PENDIENTES.pdf
- Riba, A. E., Carmona, F. B., Tejada, J. D., Portugal-Murcia, E. A., Pérez, M. A., Ríos, C. E., & Riperto, A. A. (2021). Tecnologías emergentes aplicadas a problemas agrícolas en regiones áridas. Red de Universidades con Carreras en Informática (RedUNCI). <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/120283>
- Roldan-Cruz, E. I., & Chavarría Miranda, H. (2020). Nopal/tuna, mercado y territorio en México: un enfoque de capacidades. *Eutopía, Revista de Desarrollo Económico Territorial*. DOI 10.17141/eutopia.21.2022.5435
- Romano, G., Dal Sasso, P., Trisorio Liuzzi, G., & Gentile, F. (2015). Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of Southern Italy. *Land Use Policy*, 48, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.013>
- SAGARPA. (2015). Estudio de factibilidad para el establecimiento de cultivo de nopal (Opuntia) en tierras ociosas en los estados de Aguascalientes, Guanajuato y Zacatecas, integrando un catálogo de paquetes tecnológicos con fines alimenticios, energéticos y ambientales. Promoción de Proyectos Mapa De Proyectos "Nopal". http://www.sagarpa.gob.mx/ProgramasSAGARPA/2015/Productividad_y_competitividad_agroalimentaria/Programa_regional_de_desarrollo_previsto_en_el_PND.pdf
- SAGARPA-UAZ. (2015). Estudio de factibilidad para el establecimiento de cultivo de nopal (Opuntia) en tierras ociosas en los estados de Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas con fines alimenticios, energéticos y ambientales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346982/Nopal_Detallado.pdf
- Salcedo, D., Padilla, O., Morales, B., & Toulkeridis, T. (2017). Landslide Susceptibility Mapping Using Fuzzy Logic And Multicriteria Evaluation Techniques On Simón Bolívar Highway, Quito. *Revista GEOESPACIAL*. 14 (2): 1-20. ISSN: 2600-5921. <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-geoespacial>
- Salvatore, M., Kassam, A., Gutiérrez, A. C., Bloise, M., & Marinelli, M. (2017). Metodología de Evaluación de Aptitud de Tierras. FAO. [En línea] consultado el 25 de noviembre de 2018: <http://www.fao.org/docrep/013/i1708s/i1708s02.pdf>
- Saqib-Khan, M., Qadir, A., Javed, A., Mahmood, K., Raiees-Amjad, M., & Shehzad, S. (2016). Assessment of aquifer intrinsic vulnerability using GIS based Drastic model in Sialkot area, Pakistan. *International Journal Economic and Environment Geological*. 7(1): 73-84. <http://econ-environ-geol.org/index.php/ojs/article/view/134>
- Savino, C. D., Zerda, H. R., & Diodato, L. (2019). **Áreas aptas para producción sustentable de *Dactylopius coccus* costa y *Opuntia ficus-indica*** en Santiago del Estero, Argentina. *Anales Científicos*, Vol. 80: (1) <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=25669>
- Savino, C. D., Zerda, H. R., & Diodato, L. (2019). Áreas aptas para producción sustentable de *Dactylopius coccus* costa y *Opuntia ficus-indica* en Santiago del Estero, Argentina. *Anales Científicos*. ISSN-e 2519-7398. 80 (1): 122-131
- Scheinvar, L., Olalde, G., & D. Sule. (2011). Especies silvestres de nopales mexicanos. Universidad Nacional. Autónoma de México. Instituto de Biología. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. GE005. México D.F.
- Scheinvar, L., Olalde, G., Gámez, N., Sánchez-Cordero, V., Linaje, M., Segura, S., Gallegos, C., Filardo, S., & Olvera, D. (2007). Biodiversidad de las especies silvestres mexicanas de *Opuntia* spp. y *Nopalea* spp. (cactaceae). In: Recursos Fitogenéticos de Nopal (*Opuntia* spp.) en México:2002-2005. C. Gallegos V. (Compilador). SNICS-SAGARPA-UACH. Chapingo, México. 36-59 pp.
- Scheinvar, L., Olalde-Parra, G., Gallegos-Vazquez, C., & Morales-Sandoval J. (2018). A new species of *Opuntia* (Cactaceae) from Coniferous and *Quercus* Forest of northern Mexico. *Bradleya*, 36:25-32. *British Cactus and Succulent Society*. <https://doi.org/10.25223/brad.n36.2018.a4>
- SEDEA. (2017). Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Querétaro. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Características descriptivas de nopal. [En línea] <http://sedea.queretaro.gob.mx/sites/sedea.queretaro.gob.mx/files/NOPAL.pdf>
- Sopla-Mas J., Rojas-Briceño, N. B., Meza-Mori, G., & Salas-López, R. (2018). Zoning of potential areas for the development of silvopastoral systems in the microbasin Lluhca, Chachapoyas, Amazonas. *Revista de investigaciones. Agroproducción sustentable* 2(3): 69-76. ISSN: 2520-9760. DOI:10.25127/aps.20183.406
- Torres-Ponce, R. L., Morales-Corral, D., Ballinas-Casarrubias, M. L., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2015). Nopal: semi-desert plant with applications in pharmaceuticals, food and animal nutrition. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 6, núm. 5, junio-agosto, 2015, pp. 1129- 1142. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263139893015>

- Trabichet, F. C. (2022). Construcción cuantitativa de mapas de aptitud climática mediante evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. Dossier: Análisis espacial e investigación cuantitativa con Tecnologías de la Información Geográfica, <https://posicion-inigeo.unlu.edu.ar/posicion/article/view/18>
- Vázquez-Alvarado, R. E., Blanco-Macías, F., Ojeda-Zacarías, M. C., Martínez-López, J. R., Valdez-Cepeda, R. D., Santos-Haliscak, A., & Háuad-Marroquín, L. A. (2010). Reforestación a base de nopal y maguey para la conservación de suelo y agua. *Revista de Salud Pública y Nutrición*.
- WorldClim (2020) Bioclimatic variables. [En línea] <https://www.worldclim.org/data/bioclim.html>
- Zardari, N., Ahmed, K., Shirazi, S., & Yusop, Z. (2014). Weighting Methods and Their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management. *Springer*. 166.

APPENDICES / ANEXOS

Appendix 1. Macroenvironmental variables of the Bioclim global database.

Anexo 1. Variables macro ambientales de la base global Bioclim.

Variable	Units/ Unidades
BIO1 = Average annual temperature / BIO1 = Temperatura media anual	
BIO2 = Average diurnal range (Monthly average (maximum temp - minimum temp) / BIO2 = Rango medio diurno (Media mensual (temp máxima - temp mínima)	
BIO3 = Isothermality (BIO2/BIO7) (×100) / BIO3 = Isotermalidad (BIO2/BIO7) (×100)	
BIO4 = Seasonality of temperature (standard deviation ×100) / BIO4 = Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar ×100)	
BIO5 = Maximum temperature of the warmest month / BIO5 = Temperatura máxima del mes más cálido	°C
BIO6 = Minimum temperature of the coldest month / BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío	
BIO7 = Annual temperature range (BIO5-BIO6) / BIO7 = Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	
BIO8 = Average temperature of the wettest quarter / BIO8 = Temperatura media del trimestre más húmedo	
BIO9 = Average temperature of the driest quarter / BIO9 = Temperatura media del trimestre más seco	
BIO10 = Average temperature of the warmest quarter / BIO10 = Temperatura media del trimestre más cálido	
BIO11 = Average temperature of the coldest quarter / BIO11 = Temperatura media del trimestre más frío	
BIO12 = Annual precipitation / BIO12 = Precipitación anual	
BIO13 = Rainfall of the wettest month / BIO13 = Precipitación del mes más lluvioso	
BIO14 = Precipitation of the driest month / BIO14 = Precipitación del mes más seco	
BIO15 = Seasonality of precipitation (coefficient of variation) / BIO15 = Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	mm
BIO16 = Precipitation of the wettest quarter / BIO16 = Precipitación del trimestre más húmedo	
BIO17 = Precipitation of the driest quarter / BIO17 = Precipitación del trimestre más seco	
BIO18 = Precipitation of the warmest quarter / BIO18 = Precipitación del trimestre más cálido	
BIO19 = Precipitation of the coldest quarter / BIO19 = Precipitación del trimestre más frío	
BIO20 = Altitude / BIO 20 = Altitud	m.s.n.m