

CARTOGRAFÍA DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE *Atriplex canescens* EN UNA REGIÓN ÁRIDA DE MÉXICO

MAPPING THE OCCURRENCE PROBABILITY OF *Atriplex canescens* IN AN ARID REGION OF MÉXICO

M. Angel Segura-Castruita^{1*}, Alexis Huerta-García², Manuel Fortis-Hernández¹,
J. Alfredo Montemayor-Trejo¹, Luime Martínez-Corral³, Pablo Yescas-Coronado³

¹DEPI, Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón-San Pedro km 7.5. 27170, Ejido Ana. Torreón, Coahuila. (dmilys5@hotmail.com). ²SAGARPA, Chihuahua 269 Oriente. 35150. Ciudad Lerdo, Durango. ³DEPI, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Avenida Tecnológico 1555 Sur. Periférico Lerdo km 14.5. 35150. Ciudad Lerdo, Durango. México.

RESUMEN

El costilla de vaca (*Atriplex canescens* Pursh, Nutt) es un forraje natural en regiones áridas del mundo y es importante en la alimentación de cabras en esas regiones. Sin embargo, hay poca información de la distribución espacial de esta planta, que considere el conocimiento del suelo y la topografía, para su manejo. Por ello, los objetivos de este estudio fueron diseñar un esquema metodológico para cartografiar la distribución probabilística de *A. canescens* en función de datos edáficos y topográficos reportados en mapas de instancias gubernamentales de México, y verificar la precisión de los mapas temáticos obtenidos. Los datos de vegetación, suelo y topografía fueron relacionados mediante un modelo de regresión logística para estimar la probabilidad de ocurrencia de *A. canescens* y se realizó una interpolación para cartografiar estos valores. Los resultados muestran que el *A. canescens* se encuentra en suelos de los grupos Calcisoles, Solonchaks y Solonets principalmente, y los contenidos de fósforo y potasio influyen de manera significativa en la presencia de esta especie. Así, al considerar a estos dos elementos en el modelo de regresión logística, para la cartografía de la probabilidad de ocurrencia de *A. canescens*, los mapas pueden alcanzar una precisión de 76.2 %. Por ello, se concluye que el esquema metodológico donde se usan datos edáficos y topográficos de cartas oficiales, y regresión logística, es útil para elaborar mapas de distribución de *A. canescens*.

Palabras clave: Costilla de vaca, regresión logística, geo-estadística

ABSTRACT

The four-wing salt bush (*Atriplex canescens* Pursh, Nutt) is a natural forage plant in arid regions of the world and is important for feeding goats in those regions. However, there is little information on its spatial distribution that considers knowledge of soil and topography that would be useful for its management. For this reason, the objectives of this study were to design a methodological scheme to map the probabilistic distribution of *A. canescens* in function of edaphic and topographical data reported on maps published by the Mexican government agencies and to verify the accuracy of the thematic maps obtained. The data on vegetation, soil and topography were related by a logistic regression model to estimate probability of occurrence of *A. canescens*, and these values were interpolated for mapping. The results showed that *A. canescens* is found mainly in soils of the Calcisols, Solonchaks and Solonets groups and that phosphorus and potassium contents significantly influence the presence of this species. Thus, when considering these two elements in the logistic regression model for mapping the probability of *A. canescens* occurrence, the maps can achieve an accuracy of 76.2 %. For this reason, it is concluded that the methodological scheme, in which edaphic and topographical data from government agency maps and logistic regression are used, is useful in constructing *A. canescens* distribution maps.

Key words: Four-wing salt bush, logistic regression, geo-statistics.

INTRODUCTION

The four-wing salt bush (*Atriplex canescens* Pursh Nutt) is an important source of food for domestic and wild fauna of the arid and

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.
Recibido: noviembre, 2013. Aprobado: agosto, 2014.
Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 48: 639-652. 2014.

INTRODUCCIÓN

La costilla de vaca (*Atriplex canescens* Pursh Nutt) es una importante fuente de alimento para la fauna doméstica y silvestre de regiones áridas y semiáridas del mundo (Ortiz *et al.*, 2005), la cual contiene 13 a 16 % de proteína (van Nickerk *et al.*, 2004) y sirve como sustento para bovinos y caprinos (Kessler, 1990). Además se usa para reforestación, así como conservación y recuperación de suelos erosionados (Romero-Paredes y Ramírez, 2003). Hay estudios acerca de su utilización (Le Houérou, 2000), manejo (Baumgartner *et al.*, 2000), medio ambiente en el cual se desarrolla (Sperry y Hacke, 2002), calidad nutrimental (van Nickerk *et al.*, 2004), variabilidad demográfica (Verhulst *et al.*, 2008; Facelli y Springbeth, 2009) y productividad (Echavarría *et al.*, 2009). *Atriplex canescens* se encuentra en varias regiones de México y es la base de la nutrición del ganado caprino en un sistema de producción extensivo (CONAZA, 1993). En el municipio de Tlahualilo, estado de Durango, México, esta planta es importante porque existe el mayor número de rebaños de cabras de diferentes razas en México y Sudamérica (INEGI, 2003). Sin embargo, hay poca información acerca de la distribución espacial de esta especie vegetal en la región, para planear su manejo y una conservación sostenible.

Existen varias alternativas para estimar la distribución espacial de especies de flora y fauna (Pineda *et al.*, 2009; Gasparri, 2010; Ramírez *et al.*, 2010) y una de ellas es utilizar el modelo de regresión logística (MRL). El algoritmo permite asociar variables ambientales con la presencia de la especie para predecir su ocurrencia en el resto del área de estudio (Cingolani *et al.*, 2008). Además se usa cuando las variables dependientes no se ajustan a una distribución normal y se incluyen variables independientes, lo cual determina valores de parámetros desconocidos y maximiza la probabilidad de su ocurrencia (Hosmer y Lemeshow, 2004). La efectividad del modelo se ha probado para establecer la distribución de fauna silvestre (Loyn, *et al.*, 2001), insectos (Fleishman *et al.*, 2001), materia orgánica congelada (Luoto y Seppälä, 2002) y vegetación (Cawsey *et al.*, 2002; van Horssen *et al.*, 2002). Cuando el MRL se combina con modelos geoestadísticos y cartografía asistida por computadora para la elaboración de mapas temáticos de distribución, se obtienen precisiones superiores al

semiarid regions of the world (Ortiz *et al.*, 2005). Because it contains 13 to 16 % protein (van Nickerk *et al.*, 2004), it is highly nourishing for cattle and goats (Kessler, 1990). It is also used for reforestation as well as for conservation and recovery of eroded soils (Romero-Paredes and Ramírez, 2003). There are studies on its use (Le Houérou, 2000), management (Baumgartner *et al.*, 2000), the environment in which it grows (Sperry and Hacke, 2002), nutritional quality (van Nickerk *et al.*, 2004), demographic variability (Verhulst *et al.*, 2008; Facelli and Springbeth, 2009) and productivity (Echavarría *et al.*, 2009). *Atriplex canescens* is found in several regions of Mexico and is the basis for goat feeding in extensive production systems (CONAZA, 1993). Of Mexico and South America, the largest number of goat herds of different breeds is found in the municipality of Tlahualilo, state of Durango, Mexico (INEGI, 2003), for which this plant is of great importance. However, there is not sufficient information on the spatial distribution of this plant species in the region to allow planning of its management and sustainable conservation.

There are several options for estimating spatial distribution of species of flora and fauna (Pineda *et al.*, 2009; Gasparri, 2010; Ramírez *et al.*, 2010), one of them is to use the logistic regression model (LRM). The algorithm permits association of environmental variables with the presence of a species to predict its occurrence in the rest of the study area (Cingolani *et al.*, 2008). Moreover, it is used when the dependent variables do not fit a normal distribution and independent variables are included; this determines the values of unknown parameters and maximizes the likelihood of its occurrence (Hosmer and Lemeshow, 2004). The effectiveness of the model has been proven in establishing the distribution of wild fauna (Loyn, *et al.*, 2001), insects (Fleishman *et al.*, 2001), frozen organic matter (Luoto and Seppälä, 2002) and vegetation (Cawsey *et al.*, 2002; van Horssen *et al.*, 2002). When LRM is combined with geo-statistical models and computer-assisted cartography for constructing thematic distribution maps, accuracy above 80 % is obtained (Fleishman *et al.* 2001; Gross *et al.*, 2002). According to Pärtel (2002), soil and topography influence plant distribution. Therefore, it is possible to establish a relationship between the presence of *A. canescens* and edaphic and topographic characteristics using LRM, which aids in estimating the probability of its presence in a region where some

80 % (Fleishman *et al.* 2001; Gross *et al.*, 2002). Según Pärtel (2002), el suelo y la topografía influyen en la distribución de las plantas. Por lo tanto, es posible establecer una relación entre la presencia de *A. canescens* y las características edáficas y de topografía mediante el MRL, que ayude a estimar la probabilidad de su presencia en una región donde algunas de estas características tenga mayor influencia y no todas. Sin embargo, no existe un esquema metodológico para el establecimiento de este tipo de relaciones a partir de información de gabinete y el uso de la geoestadísticas.

Con base en lo anterior, los objetivos de este estudio fueron diseñar un esquema metodológico para establecer la distribución probabilística del *A. canescens* a partir de datos de vegetación, edáficos y topográficos de mapas oficiales, mediante el modelo de regresión logística y cartografía asistida por computadora; así como verificar la precisión del mapa temático de distribución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó entre 26° 45.5' 25° 49.5' N y 104° 02.6' y 103° 15.3' O, a una altitud de 1050 m, en el municipio de Tlahualilo, Durango (Figura 1). El clima es BW hw" (e'), muy seco o desértico, semi-cálido con invierno fresco, temperatura media anual de 18 a 22 °C y la del mes más frío menor de 18 °C; con lluvias en verano y variabilidad extremosa, la precipitación total anual promedio es 240 mm, concentrados de junio a septiembre, y un promedio de evaporación anual de 2400 mm (García, 1988). La topografía es principalmente plana. En la región hay seis tipos de vegetación: matorral desértico micrófilo, vegetación halófila y gipsófila, matorral rosetófilo, pastizal natural, mezquites y huizaches (CONABIO, 1999).

Métodos

El estudio se dividió en cuatro etapas: 1) obtención de datos cartográficos, 2) modelación de datos edáficos y topográficos, 3) generación de mapas de distribución de *Atriplex*, 4) verificación de la precisión de mapas, como se describe a continuación.

Obtención de datos cartográficos

Mapas digitales de vegetación, suelos y topográfica escala 1:50,000 (INEGI, 2007) se usaron para establecer puntos de georreferencia, mediante el programa ArcGis 9.2® (ESRI, 2006).

of these characteristics exert greater influence, and not all. However, there is no methodological scheme for establishing this type of relationships using cabinet information and using geo-statistics.

Based on the above, the objectives of this study were to design a methodological scheme to establish the probabilistic distribution of *A. canescens* using data on vegetation, soil and topography from government agency maps by means of the logistic regression model and computer-assisted cartography, as well as to verify the accuracy of the thematic distribution map.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The study was conducted in the municipality of Tlahualilo, Durango, located within the coordinates 26° 45.5'-25° 49.5' N and 104° 02.6'-103° 15.3' W, at an altitude of 1950 m (Figure 1). The climate is BW hw" (e'), very dry or desert, warm with cool winter, mean annual temperature 18 to 22 °C and that of the coldest month is lower than 18 °C; rains in the summer are extremely variable; average total yearly precipitation is 240 mm concentrated from June to September, and average annual evaporation is 2400 mm (García, 1988). Topography is mostly flat. There are six vegetation types in the region: microphyll desert scrub, halophilous and gypsiferous vegetation, rosetophilous scrub, natural grasses, mezquites and huizaches (CONABIO, 1999).

Methods

The study was divided into four stages: 1) procurement of cartographic data, 2) soil and topographic data modelling, 3) generation of *Atriplex* distribution maps, 4) verification of map accuracy. These stages are described below.

Procurement of cartographic data

Digital maps of vegetation, soil and topography, scale 1:50,000 (INEGI, 2007), were used to establish geo-reference points using the software ArcGis 9.2® (ESRI, 2006). First, 229 verification points were located on the digital vegetation map within the study area where the presence of four-wing salt bush was reported to confirm the presence or absence of this plant in the field. The points were distributed randomly with the on-screen digitalization technique (Gorr and Kurland, 2008) with a Hawth's tools extension since this extension can generate

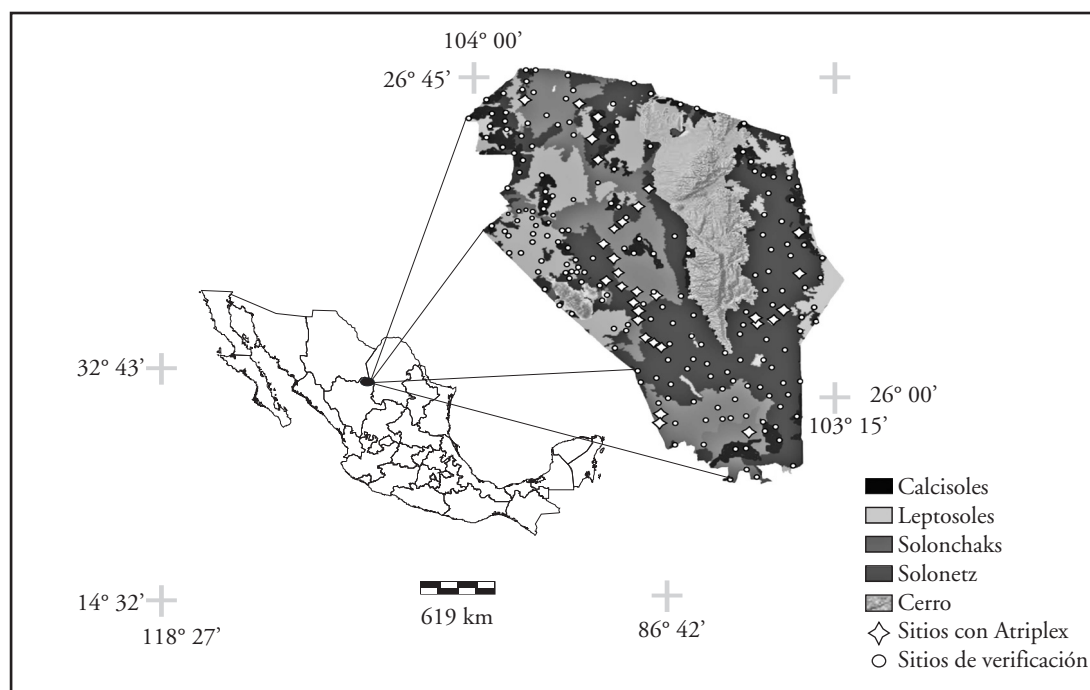


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio
Figure 1. Geographic location of the study area.

Primero, 229 puntos de verificación fueron ubicados en el mapa digital de vegetación donde se reporta la presencia de costilla de vaca, dentro del área de estudio, para comprobar la presencia o ausencia de esta planta en campo. Los puntos se distribuyeron en forma aleatoria mediante la técnica digitalización en pantalla (Gorr y Kurland, 2008) con la extensión Hawth's tools, ya que con esta extensión se pueden generar puntos de muestreo en casos controlados (elección condicional o discreta) como en regresión logística (ESRI, 2006). Las coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM) de cada punto fueron registradas en un GPS (GARMIN Etrex®), que sirvieron de guía para el recorrido de campo. Después de la verificación con los registros de presencia-ausencia de *A. canescens* se elaboró una capa vectorial de puntos.

Además, se obtuvieron datos de características de los suelos y la topografía del área de estudio (Cuadro 1), los cuales son importantes en el desarrollo de *A. canescens* (Talavera-Magaña *et al.* 1996; Lasanta *et al.*, 2004; Lasanta y Vicente, 2006). Para lograr esto, los puntos georreferenciados del mapa edafológico, que corresponden a perfiles de suelo caracterizados por INEGI (2007), se usaron como base para obtener los datos mencionados y con ellos se generaron mapas temáticos digitales por característica.

Primero, 229 puntos de verificación fueron ubicados en el mapa digital de vegetación donde se reporta la presencia de costilla de vaca, dentro del área de estudio, para comprobar la presencia o ausencia de esta planta en campo. Los puntos se distribuyeron en forma aleatoria mediante la técnica digitalización en pantalla (Gorr y Kurland, 2008) con la extensión Hawth's tools, ya que con esta extensión se pueden generar puntos de muestreo en casos controlados (elección condicional o discreta) como en regresión logística (ESRI, 2006). Las coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM) de cada punto fueron registradas en un GPS (GARMIN Etrex®), que sirvieron de guía para el recorrido de campo. Después de la verificación con los registros de presencia-ausencia de *A. canescens* se elaboró una capa vectorial de puntos.

Moreover, data on soil and topographical characteristics of the study area were obtained (Table 1), which are important for growth of *A. canescens* (Talavera-Magaña *et al.* 1996; Lasanta *et al.*, 2004; Lasanta and Vicente, 2006). To achieve this, the geo-referenced points on the soils map, corresponding to soil profiles characterized by INEGI (2007), were used as the basis in obtaining said data with which digital thematic maps were generated by characteristic.

Soil and topographic data modelling

The soil and topographic data indicated in the previous step were used to generate thematic maps of each attribute (Table 1) with a resolution of 65 m x 65 m per pixel, using interpolations with the Inverse Distance Weighted (IDW) model (Johnston *et al.*, 2001; Shcloed *et al.*, 2001) with ArcGis 9.2® (ESRI, 2006)

Modelación de datos edáficos y topográficos

Los datos de suelo y topografía indicados en la etapa anterior, se usaron para generar mapas temáticos de cada atributo (Cuadro 1) con un resolución de 65 m x 65 m por píxel, mediante interpolaciones con el modelo Inverse Distance Weighted (IDW) (Johnston *et al.*, 2001; Shcloeder *et al.*, 2001) con el programa ArcGis 9.2® (ESRI, 2006). Luego, datos de cada atributo de estos mapas fueron extraídos de nuevo mediante un muestreo digital usando la extensión Hawth's Tools del software ArcGis 9.2®, al sobreponer en los diferentes mapas temáticos el mapa vectorial de puntos de presencia y ausencia de *A. canescens*, y con ellos se elaboró una base de datos del área de estudio.

Generación de mapas de distribución de *Atriplex canescens*.

Esta etapa inició con la obtención de la probabilidad de ocurrencia de costilla de vaca en cada punto de muestreo de la base de datos de la etapa anterior con el MRL y se calculó con la ecuación 1:

$$P_x = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (1)$$

donde P_x es probabilidad de ocurrencia de poblaciones de *A. canescens* con rango mínimo de cero y máximo de uno, con variación simoidal; z es la combinación lineal de las diferentes variables independientes en el estudio, cuya forma se muestra en la ecuación 2:

$$Z = \beta_0 + \beta_1 * \text{Pend} + \beta_2 * \text{E} + \beta_3 * \text{Asp} + \beta_4 * \text{CIC} + \beta_5 * \text{pH} + \beta_6 * \text{CE} + \beta_7 * \text{Pof} + \beta_8 * \text{MO} + \beta_9 * \text{L} + \beta_{10} * \text{A} + \beta_{11} * \text{R} + \beta_{12} * \text{PO}_4 + \beta_{13} * \text{K} + \beta_{14} * \text{CA} + \beta_{15} * \text{NA} + \beta_{16} * \text{Mg} \quad (2)$$

donde Z es el predictor lineal de la ocurrencia de *A. canescens*; $\beta_0, \dots, \beta_p$ son los coeficientes de regresión estimados para cada variable independiente (Cuadro 1).

Antes de aplicar el MRL, los coeficientes de la regresión lineal múltiple (β_p) fueron estimados por medio de máxima verosimilitud con el método Regresión Escalonada con el procedimiento de abajo hacia arriba ($p \leq 0.05$) (Giasson *et al.*, 2006), para identificar las variables asociadas significativamente con la presencia-ausencia de *A. canescens*. Por lo cual, dos combinaciones lineales fueron obtenidas, una con todas las variables y otra con las variables más significativas ($p \leq 0.05$). Dos regresiones logísticas múltiples se realizaron para calcular la probabilidad de presencia de *A. canescens* en cada punto georreferenciado, información con la cual se actualizaron las dos bases de datos. Los

Cuadro 1. Variables utilizadas para modelar la distribución de poblaciones de *Atriplex canescens*.

Table 1. Variables used for modeling the distribution of *Atriplex canescens* populations.

Categoría	Variable	Atributos
Topografía	Pendiente (Pend)	%
	Elevaciones (E)	msnm
	Aspecto (Asp)	Azimut
Edáficas	Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹
	Potencial hidrógeno (pH)	
	Conductividad eléctrica (CE)	dS m ⁻¹
	Profundidad (Pr)	m
	Materia orgánica (MO)	%
	Limo (L)	%
	Arena (A)	%
	Arcilla (R)	%
	Fosfato (PO ₄)	ppm
	Potasio (K)	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹
	Calcio (Ca)	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹
	Sodio (Na)	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹
	Magnesio (Mg)	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹

software. Then, the data on each attribute of these maps were again extracted with the digital sampling done with the Hawth's Tools extension in ArcGis 9.2® software by superimposing the vector map of *A. canescens* presence or absence points onto the different thematic maps. With these data, a database of the study area was constructed.

Generation of *Atriplex canescens* distribution maps

This stage initiated by obtaining the probability of occurrence of four-wing salt bush in each sampling point from the database of the previous stage with LRM and it was calculated with equation 1:

$$P_x = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (1)$$

where P_x is the probability of occurrence of *A. canescens* populations with a minimum range of zero and a maximum of one, with simoidal variation; z is the linear combination of the different independent variables in the study whose form is shown in equation 2:

$$Z = \beta_0 + \beta_1 * \text{Pend} + \beta_2 * \text{E} + \beta_3 * \text{Asp} + \beta_4 * \text{CIC} + \beta_5 * \text{pH} + \beta_6 * \text{CE} + \beta_7 * \text{Pof} + \beta_8 * \text{MO} + \beta_9 * \text{L} + \beta_{10} * \text{A} + \beta_{11} * \text{R} + \beta_{12} * \text{PO}_4 + \beta_{13} * \text{K} + \beta_{14} * \text{CA} + \beta_{15} * \text{NA} + \beta_{16} * \text{Mg} \quad (2)$$

pasos anteriores se realizaron con Minitab 16 (Minitab, 2012). Los puntos georreferenciados y el atributo probabilidad de cada base de datos fueron sometidos a una interpolación con el método IDW, con lo cual se generaron dos mapas temáticos con distribución de probabilidades de presencia de *A. canescens*, con una resolución por píxel de 65 x 65 m. La distribución resultante se dividió en diez clases de probabilidad: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 y 90-100 %.

Validación de la precisión de mapas

Cada mapa de distribución se verificó por comparación de puntos de cada clase de probabilidad, con sitios en campo (Fleishman *et al.*, 2001). El número de puntos (N) para la verificación del mapa de probabilidad se obtuvo con la herramienta estadística Tamaño de Muestra de Shabenberger y Pierce (2001). La selección de los puntos fue aleatoria (François *et al.*, 2003) y se registraron sus coordenadas. Durante la verificación de campo se revisó sólo la presencia de plantas (sin considerar la abundancia o cantidad) en un área de 100 m² (10 m x 10 m) alrededor del punto georreferenciado. El recorrido en campo se realizó en temporada seca para que la presencia de humedad no influyera en el resultado. El análisis se realizó en un sentido discreto, por ejemplo un sí o no, acierto o error (Congalton *et al.*, 1991), se calculó el porcentaje de aciertos (Lleverino *et al.* 2000), y se generó una matriz de precisión (Segura *et al.*, 2012). Asimismo, se realizó un prueba de Ji cuadrado para estimar cual de los dos modelos tiene un mejor ajuste; este análisis se realizó con MINITAB 16 (Minitab, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de *Atriplex canescens* en el área de estudio

Atriplex canescens fue registrada en 29 de los 229 sitios (10.2 % de persistencia) en el municipio de Tlahualilo. Los suelos donde se corroboró la presencia de la planta (Figura 1) fueron del grupo Calcisol (antes Yermosoles cálcicos, lúvicos o háplicos y Xerosoles) asociado con tres diferentes grupos (Leptosoles, Solonchaks y Solonetz) (WRB, 2007). En la región estos suelos tienen una CE de 4 a 12 cmol₍₊₎ k⁻¹, un pH de 7.6 a 8.5 (Cuadro 2) y una fase química salina de ligera a moderada (INEGI, 2007). La ausencia o presencia de esta especie de manera natural en la región, se puede deber a la sequía (Verhulst *et al.*, 2008), al sobrepastoreo (Facelli y Springhett, 2009) o al cambio de uso del suelo (Millenium Ecosystem Assessment, 2005), variables no usadas en el modelo

where Z is the linear predictor of *A. canescens* occurrence; $\beta_0...$ β_p are the regression coefficients estimated for each independent variable (Table 1).

Before applying LRM, the multiple linear regression coefficients (β_p) were estimated by maximum likelihood with the Stepwise Regression method, bottom-up procedure ($p \leq 0.05$) (Giasson *et al.*, 2006), to identify the variables associated significantly with *A. canescens* presence-absence. To this end, two linear combinations were obtained, one with all the variables and the other with the most significant variables ($p \leq 0.05$). Two multiple logistic regressions were performed to calculate the probability of *A. canescens* presence at each geo-referenced point. With this information the two databases were updated. The previous steps were done with Minitab 16 (Minitab, 2012). The geo-referenced points and the probability attribute from each database were subjected to interpolation with the IDW method, in which two thematic maps were generated of the distribution of probable *A. canescens* presence with a resolution per pixel of 65 x 65 m. The resulting distribution was divided into ten probability classes: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80, 80-90 and 90-100 %.

Validation of map accuracy

Each distribution map was verified by comparing points of each probability class with field sites (Fleishman *et al.*, 2001). The number of points (N) for verification of the probability map was obtained with the Shabenberger and Pierce (2001) statistical tool Sample Size. Points were selected randomly (François *et al.*, 2003) and their coordinates were registered. During field verification, only presence of plants (disregarding abundance or quantity) was recorded in an area of 100 m² (10 m x 10 m) around the geo-referenced point. Field reconnaissance was done in the dry season so that humidity would not affect the results. The analysis was done in a discrete sense, for example, a yes or no, right or wrong (Congalton *et al.*, 1991). The percentage of right scores (Lleverino *et al.* 2000) was calculated and an accuracy matrix (Segura *et al.*, 2012) was constructed. Moreover, a chi squared test was performed to estimate which of the two models had the better fit; this analysis was done with MINITAB 16 (Minitab, 2012).

RESULTS AND DISCUSSION

Identification of *Atriplex canescens* in the study area

Atriplex canescens was registered in 29 of the 229 sites (10.2 % persistence) in the municipality

Cuadro 2. Coeficientes de la regresión lineal múltiple y análisis de regresión escalonada.
Table 2. Multiple linear regression coefficients and stepwise regression analysis.

Variables	$\bar{X}^{\dagger}$	$\bar{X} \pm \sigma$	β	Error	$p \leq 0.05$
Intercepto			-69.422	68.210	0.309
Altitud	1106.90	1079.90 - 1151.14	-0.012	0.011	0.270
Aspecto	38.41	14.79 - 62.03	-0.081	0.104	0.435
Pendiente	2.9	0.8 - 5.0	-0.971	0.579	0.093
CIC	33.15	25.66 - 41.64	0.011	0.099	0.915
pH	8.05	7.60 - 8.50	2.596	1.573	0.099
CE	4.68	2.59 - 6.77	-0.290	0.285	0.308
Profundidad	92.23	84.13 - 100.33	-0.134	0.071	0.057
MO	1.35	0.49 - 1.71	-1.398	1.269	0.270
Limo	31.86	27.08 - 36.64	0.625	0.662	0.345
Arena	27.29	20.61 - 33.97	0.613	0.885	0.347
Arcilla	37.18	35.95 - 38.45	0.525	0.655	0.428
PO ₄	26.53	18.22 - 34.84	-0.148	0.061	0.016*
K	11.13	4.13 - 18.13	1.629	0.729	0.025*
Ca	36.70	28.52 - 44.88	0.188	0.074	0.109
Na	25.96	22.71 - 29.11	0.098	0.193	0.611
Mg	11.63	8.14 - 15.12	0.145	0.121	0.229

$^{\dagger}\bar{X}$: promedio; σ : desviación estándar; p: probabilidad de rechazo del análisis de regresión escalonada

♦ $\bar{X}$: average; s: standard deviation; p: probability of rejection of the stepwise regression analysis.

y que debieran incluirse en otras investigaciones. La presencia de *A. canescens* en el área de estudio puede explicarse por sus características genotípicas como su capacidad fotosintética y por características fisiológicas como el cambio de posición de sus hojas o la presencia de cristales de cloruro de sodio para reducir la captación de radiación (Mooney *et al.*, 1977). Así aprovecha las condiciones ambientales y edáficas (Jacquemyn *et al.*, 2003), subsiste en condiciones áridas (Venable, 2007) y tolera condiciones de salinidad (Enríquez *et al.*, 2011). Lo anterior significa que otras variables edáficas o topográficas, como características físicas y químicas de los suelos o la altitud, pendiente y aspecto del lugar podrían influir en la presencia de esta planta, como se analiza a continuación.

Modelación de variables edáficas y topográficas con la presencia de *Atriplex canescens*

Los sitios con *A. canescens*, así como donde no se encontró, tuvieron diferentes valores en sus características edáficas y topográficas. Los coeficientes de regresión de cada característica (Cuadro 2) muestran que cada uno de ellos interviene en la presencia de la planta ($R^2=0.75$). Sin embargo, después de analizar los coeficientes con el método regresión escalonada,

of Tlahualilo. The soils where presence of the plant was corroborated (Figure 1) were of the group of Calcisols (formerly calcic, luvisc or haplic Yermosols and Xerosols) associated with three different groups (Leptosols, Solonchaks and Solonetz) (WRB, 2007). In the region these soils have a CEC of 4 to 12 $\text{cmol}_{(+)}\text{ k}^{-1}$, pH 7.6 to 8.5 (Table 2) and a slight to moderate saline chemical phase (INEGI, 2007). The absence or presence of this naturally-occurring species in the region may be due to drought (Verhulst *et al.*, 2008), overgrazing (Facelli and Springhett, 2009) or land use change (Millenium Ecosystem Assessment, 2005), variables that are not used in the model and that should be included in other studies. The presence of *A. canescens* in the study area can be explained by its physiological characteristics, such as changing the position of its leaves or the presence of sodium chloride crystals in its leaves to reduce radiation capture (Mooney *et al.*, 1977). In this way, it takes advantage of the environmental and edaphic conditions (Jacquemyn *et al.*, 2003), survives in arid conditions (Venable, 2007) and tolerates salinity (Enríquez *et al.*, 2011). This means that other soil and topographic variables, such as physical and chemical characteristics of the soils or the altitude, slope and appearance of the place, can have an

las variables que influyen de manera significativa o con una menor probabilidad de rechazo ($p \leq 0.05$), fueron PO_4 y K (Cuadro 2). Además, los modelos estimados en este estudio (Cuadro 3) son significativos ($p \leq 0.05$), aunque la R^2 del primer modelo con todas las variables de estudio (0.64), es menor que en el segundo (0.92). Esto muestra que considerar en el modelo lineal sólo las concentraciones de PO_4 y K en el suelo, es más apropiado para predecir la presencia de esta especie en la región. No obstante, en este modelo el signo de los coeficientes de las variables fue distinto (-0.1294 y 1.1438 , respectivamente), lo cual influirá en el aumento o disminución del logaritmo de los momios debido a un incremento unitario de las variables independientes (Pindyck y Rubinfeld, 2001). Al respecto, Menard (1995) menciona que si un coeficiente es positivo, el valor del logaritmo transformado será mayor que uno, lo cual indica que el evento es más probable de ocurrir; en cambio, si el coeficiente es negativo el valor del logaritmo será menor que uno, y la probabilidad de ocurrencia del evento disminuye. Esto tiene un sentido biológico pues el signo negativo del coeficiente sugiere que la probabilidad de ocurrencia de *A. canescens* es menor cuando la concentración de PO_4 aumenta, a diferencia del potasio. Echavarría *et al.* (2009) indican que la concentración de estos elementos en el suelo afectan el desarrollo de *A. canescens* en regiones semiáridas, como cuando se ha cultivado en jales de minas en el estado de Hidalgo (Hernández-Acosta *et al.*, 2009). No obstante, Wilkinson *et al.* (2000) señalan que la combinación de niveles altos de un nutrimento con niveles bajos de otro, influyen en el desarrollo de las plantas, como lo sugieren los resultados obtenidos en el modelo. Pero es importante considerar que la concentración de estos elementos en los suelos de la

influence in whether or not the plant is present, as analyzed below.

Modelling edaphic and topographic variables associated with the presence of *Atriplex canescens*

The values found for soil and topographic characteristics in sites that contained *A. canescens* were different from those of the sites in which it was absent. The regression coefficients for each characteristic (Table 3) showed that each intervenes in the presence of the plant ($R^2=0.75$). However, after analyzing the coefficients resulting from the stepwise regression model, the variables that have a significant influence, or that have a lower probability of rejection ($p \leq 0.05$), were PO_4 and K (Table 2). Moreover, the models estimated in this study (Table 3) are significant ($p \leq 0.05$), although the predicted R^2 of the first model with all of the variables studied (0.64) is smaller than the predicted R^2 of the second (0.92). This suggests that considering only the concentrations of soil PO_4 and K in the model is more appropriate for predicting the presence of this species in the region. Nevertheless, in the model the signs of the coefficients of the variables were different (-0.1294 and 1.1438 , respectively) and will determine the increase or decrease of the odds logarithm because of a unitary increase in the independent variables (Pindyck and Rubinfeld, 2001). In this regard, Menard (1995) states that if a coefficient is positive, the value of the transformed logarithm will be greater than one, indicating that the event is more likely to occur. In contrast, if the coefficient is negative, the value will be less than one, and the likelihood that the event occurs decreases. This has biological sense since the negative sign of the coefficient suggests

Cuadro 3. Análisis de varianza de los modelos lineales.
Table 3. Analysis of variance of the linear models.

Modelo	R^2	R^2 (predicha)	$p \leq 0.05^\dagger$
$Z1 = -69.4220 - 0.9710 \cdot \text{Pend} - 0.0124 \cdot \text{E} - 0.0811 \cdot \text{Asp} + 0.0811 \cdot \text{CIC} + 2.5959 \cdot \text{pH} + 0.2901 \cdot \text{CE} - 0.1345 \cdot \text{Pr} + 1.3988 \cdot \text{MO} + 0.6251 \cdot \text{L} + 0.6251 \cdot \text{A} + 0.5255 \cdot \text{R} + 0.1477 \cdot \text{PO}_4 + 1.6285 \cdot \text{K} + 0.1881 \cdot \text{Ca} + 0.0982 \cdot \text{Na} + 0.1455 \cdot \text{Mg}$	0.75	0.64	0.046
$Z2 = -2.7012 - 0.1294 \cdot \text{PO}_4 + 1.1438 \cdot \text{K}$	0.98	0.92	0.022

$^\dagger p \leq 0.05$: probabilidad de rechazo del análisis de varianza de la regresión ♦ $p \leq 0.05$: probability of rejection of analysis of variance of the regression.

región de estudio se tomó como constante a partir de datos obtenidos en la década de 1980 (INEGI, 2007), pero el suelo es un ente dinámico y por tanto la concentración de los nutrientes cambia por distintas causas con el tiempo (Brady y Weil, 2008).

Mapas de probabilidad de *Atriplex canescens*

Los mapas temáticos digitales de presencia de *A. canescens* (MPA1 y MPA2) en el municipio de Tlahualilo (Figura 2 y 3), muestran una distribución de probabilidades distinta. El MPA1 (a partir de todas las características), tiene sólo 2 % (68 km²) de la superficie total del municipio (3709.8 km²) con una probabilidad mayor de 90 % de encontrar *Atriplex*. En cambio, al usar los coeficientes de PO₄ y K (MPA2), el área con probabilidades mayores de 50 % es 748 km² (20 % respecto al total). La precisión de los mapas fue verificada. El tamaño de muestreo se calculó con los siguientes datos: 11 clases o categorías (10 clases agrupadas de 10 en 10: 0-10, 10-20,..., 90-100 % y ninguna) por lo cual el número de clases (*c*) es igual a 11. Al considerar lo encontrado por Cruz-Cárdenas *et al.* (2010) en una región árida, el valor de precisión (*bi*) fue 30 %, el nivel de confianza (α) 95 %, y el mayor porcentaje esperado de cualquier categoría fue 50 %. Con estos datos, el tamaño de muestra fue 18 píxeles por cada clase de probabilidad, con un total de 198 para cada mapa.

La precisión del MPA1 fue 29.8 % (Cuadro 4), mientras que en MPA2 fue 76.2 %; esto es una diferencia de 46.4 %, lo cual no es raro, ya que el segundo modelo incluye sólo las variables ambientales que aportan variación significativa. Este resultado se debe al número de clases en cada mapa. El MPA1 presenta sólo cuatro clases de probabilidad, mientras que MPA2 tiene 10 clases. Esto causa que MPA1 tenga una generalización de siete clases (de 20 a 70 %), con una probabilidad de 0-10 %; así, aunque el área de estudio sea la misma, el número de clases evaluadas son distintas y por tanto el número de puntos para su comprobación. Esta situación se verificó al analizar el ajuste de las distribuciones de probabilidad de los dos modelos, donde el MPA2 tuvo el mayor ajuste ($p \leq 0.05$) y por ende predice mejor la probabilidad de presencia de *A. canescens*.

Al respecto, Cruz-Cárdenas *et al.* (2010) mencionan que el tamaño de muestra para la verificación de la precisión varía en función del tamaño del área

that the probability of *A. canescens* occurrence is lower when the concentration of PO₄ increases, unlike what occurs with potassium. Echavarría *et al.* (2009) indicate that the concentration of these elements in the soil affects *A. canescens* growth in semiarid regions, such as when it was cultivated mine tailings in the state of Hidalgo (Hernández-Acosta *et al.*, 2009). Nevertheless, Wilkinson *et al.* (2000) point out that the combination of high levels of one nutrient with low levels of another can impact plant development, as suggested by the results obtained in the model. But it is important to consider that the concentration of these elements in the soils of the study region were taken as constant as of the data obtained in the 1980s (INEGI, 2007), but the soil is a dynamic entity and therefore the concentration of nutrients changes over time for different reasons (Brady and Weil, 2008).

Atriplex canescens probability maps

The digital thematic maps of *A. canescens* presence (MPA1 and MPA2) in the municipality of Tlahualilo (Figures 2 and 3) show distinct probability distributions. MPA1 (based on all the characteristics) has only 2 % (65 km²) of the total area of the municipality (3709.8 km²) with a probability of more than 90 % of finding *Atriplex*. In contrast, using the coefficients of PO₄ and K (MPA2), the area with more than 50 % probability is 748 km² (20 % of the total). Accuracy of the maps was verified. The sampling size was calculated with the following data: 11 classes or categories (10 classes grouped by 10s: 0-10, 10-20,..., 90-100 % and none), so that the number of classes (*c*) is equal to 11. Considering the findings of Cruz-Cárdenas *et al.* (2010) in an arid region, the precision value (*bi*) was 30 %, the level of confidence (α) 95 %, and the highest expected percentage of any category was 50 %. With these data, the sample size was 18 pixels for each probability class, a total of 198 for each map.

The accuracy of MPA1 was 29.8 % (Table 4), while in MPA2 it was 76.2 %; this is a difference of 46.4 %, which is not uncommon since the second model includes only the environmental variables that contribute significant variation. This result is due to the number of classes in each map. MPA1 has only four probability classes, whereas MPA2 has 10 classes. This causes MPA1 to have a generalization of

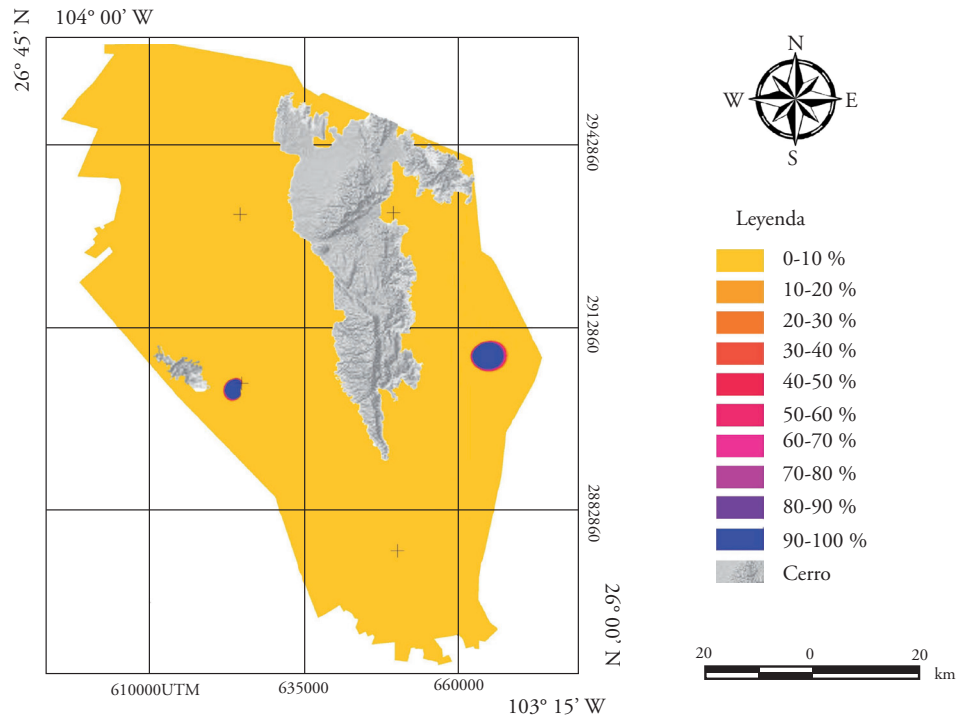


Figura 2. Mapa de distribución de *Atriplex canescens* (MPA1) con el total de variables.
Figure 2. *Atriplex canescens* distribution map (MPA1) with all variables.

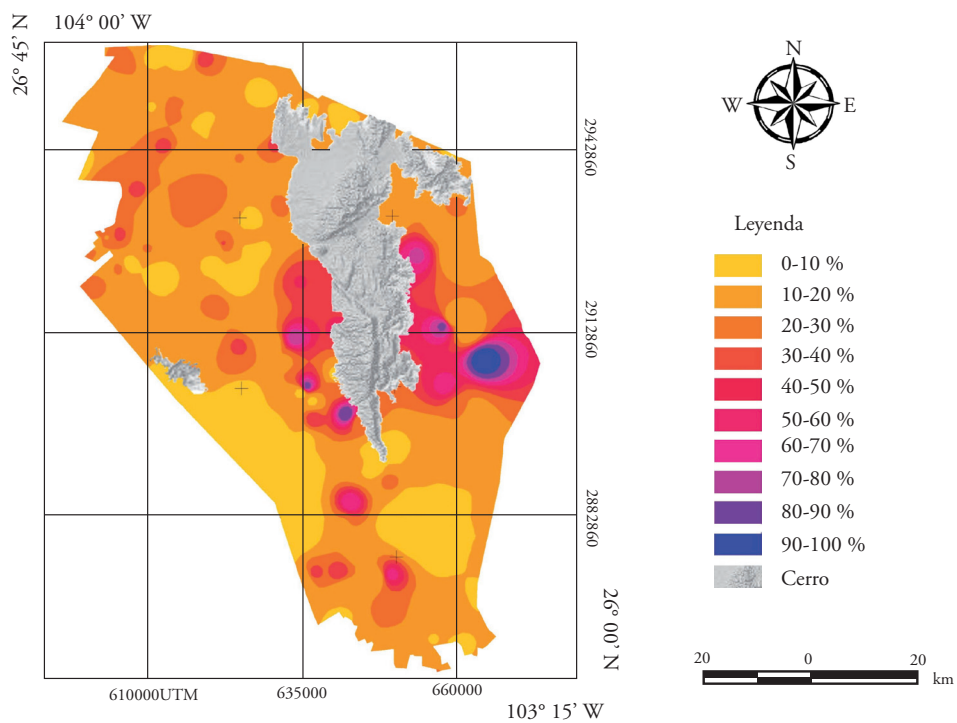


Figura 3. Mapa de distribución de *Atriplex canescens* (MPA2) con variables significativas.
Figure 3. *Atriplex canescens* distribution map (MPA2) with significant variables.

Cuadro 4. Matriz de validación precisión de mapas de distribución de *Atriplex canescens*.
Table 4. Accuracy validation matrix of *Atriplex canescens* distribution maps.

PO [†] (%)	N	Mapa de <i>Atriplex canescens</i> 1			Mapa de <i>Atriplex canescens</i> 2		
		Acierto	Error	Precisión (%)	Acierto	Error	Precisión (%)
0-10	18	5	13	28	13	5	72
10-20	18	-	18	-	11	7	61
20-30	18	-	18	-	12	6	67
30-40	18	-	18	-	13	5	72
40-50	18	-	18	-	15	3	83
50-60	18	-	18	-	17	1	94
60-70	18	-	18	-	16	2	89
70-80	18	14	4	78	14	4	78
80-90	18	13	5	72	13	5	72
90-100	18	17	1	94	17	1	94
Ninguna	18	10	8	56	10	1	56
Total	198	59	139	29.8	151	47	76.2

[†]PO: probabilidad de ocurrencia; N: tamaño de muestra ♦ PO: probability of occurrence; N: sample size.

de estudio y el número de unidades cartográficas en cada mapa. En el presente estudio, el área analizada es constante (3709.8 km²), mientras que las unidades cartográficas (clases de probabilidad) en un principio 10 para cada mapa, representaron un tamaño de muestra de 198. Pero después de la interpolación, el MPA1 tiene cuatro unidades y diez el MPA2 (Figura 3 y 4, respectivamente), aunque el tamaño de muestras y la distribución de los puntos de muestreo permanecieron igual para cada mapa, lo cual causó que la precisión del MPA1 fuera menor que la del MPA2.

La precisión de los mapas obtenidos en esta investigación es menor que el porcentaje reportado en otros tipos de mapas predictivos (80 %), pero la validación de los resultados en esos estudios se realizó mediante relaciones de frecuencia y el cálculo del área bajo la curva, o por la comparación de bondad de ajuste (Hengla *et al.*, 2004; Lee y Pradhan, 2007). En el presente estudio los mapas se validaron con información de campo, lo cual pudo causar la disminución de la precisión ya que los datos de la planta fueron actualizados, mientras que los diferentes datos de las características edáficas tienen más de 30 años desde su registro. Al respecto, van Horssen *et al.* (2002) mencionan que la calidad y cobertura de los datos espaciales pueden afectar el resultado de la cartografía. Anaya-Romero (2005) también sugiere que el modelo predictivo depende de la calidad de los datos empleados.

seven classes (from 20 to 70 %), with a probability of 0-10 %. Thus, although the study area is the same, the number of classes evaluated is different and, therefore, the number of points for verification is also different. This situation was confirmed when analyzing the fit of the probability distributions of the two models; MPA2 had a better fit ($p \leq 0.05$), and therefore, better predicts the probability of *A. canescens* presence.

In this respect, Cruz-Cárdenas *et al.* (2010) mention that the sample size for verifying accuracy varies in function of the size of the study area and the number of cartographic units in each map. In our study, the area analyzed is constant (3709.8 km²), whereas the cartographic units (probability classes) beginning with 10 for each map, represented a sample size of 198. After interpolation, however, MPA1 had four units and MPA2 had ten (Figures 3 and 4, respectively), although the sample size and the distribution of the sampling points remained the same for each map, causing MPA1 to be less accurate than MPA2.

Accuracy of the maps obtained in this study is less than the percentage reported in other types of predictive maps (80 %), but the results in those studies were validated using frequency relations and calculation of the area under the curve, or by comparing goodness of fit (Hengla *et al.*, 2004; Lee and Pradhan, 2007). In our study, the maps were

CONCLUSIONES

El esquema metodológico que integra el modelo de regresión logística y la cartografía asistida por computadora, es útil para establecer la distribución espacial de probabilidades de ocurrencia de *Atriplex canescens* en una región árida, a partir de datos de vegetación, suelos y topografía existentes en mapas de dependencias oficiales. La identificación de las variables edáficas que influyen en la probabilidad de ocurrencia de una planta, así como la calidad de sus datos, es importante porque de éstos depende la precisión de la cartografía asistida por computadora. Cuando se utilizan datos cartográficos de instancias oficiales, el mapa de distribución puede alcanzar una precisión mayor que 76 %, pero en el modelo de regresión logística se deben usar las variables independientes más significativas a la presencia o ausencia de la planta, porque si se usan todas las variables, la precisión del mapa puede disminuir hasta un 46 %. Esta metodología puede ser una opción para instancias oficiales durante la planeación del manejo de áreas naturales, porque considera la probabilidad de ocurrencia de una especie vegetal en función de características del suelo y topografía; aunque podrían sumarse más variables ambientales importantes. La precisión de este tipo de mapas puede aumentar si los datos edáficos en el estudio se obtienen de muestras de suelo recolectadas en cada punto al momento de la verificación de la existencia de la planta en campo y de sus respectivos análisis físicos y químicos.

LITERATURA CITADA

- Anaya-Romero, M., R. Pino, A. Jordan, L. Martínez-Zavala, y N. Bellifante. 2005. Modelización del hábitat potencial de formaciones forestales en la provincia de Huelva. *Edafología* 12: 65-73.
- Baumgartner, D. J., E. P. Glenn, G. Moss, T. L. Thompson, J. F. Artiola, and R. D. Kuehl. 2000. Effect of irrigation water contaminated with uranium mill tailings on Sudan grass, *Sorghum vulgare* var. *sudanense*, and fourwing saltbush, *Atriplex canescens*. *Arid Soil Res. Rehab.* 14:43-57.
- Brady, N. C., and R. R. Weil. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. 14th ed. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. USA. 975 p.
- Cawsey, E. M., M. P. Austin, and B. L. Baker. 2002. Regional vegetation mapping in Australia: a case study in the practical use of statistical modelling. *Biodivers. Cons.* 11: 2239-2274.
- Cingolani, A. M., D. Renison, P. A. Tecco, D. E. Gurvich, and M. Cabido. 2008. Predicting cover types in a mountain range with long evolutionary grazing history: a GIS approach. *J. Biogeogr.* 35: 538-551.
- validated with field information; this may have caused accuracy to decrease since the plant data were updated, whereas the data on the different soil characteristics were recorded more than 30 years ago. In this respect, van Horssen *et al.* (2002) point out that the quality and coverage of the spatial data can affect the results of cartography. Likewise, Anaya-Romero (2005) suggests that the predictive model depends on the quality of the data used.

CONCLUSIONS

The methodological scheme that integrates the logistic regression model and computer-assisted cartography is useful in establishing spatial distribution of the probability of *Atriplex canescens* occurrence in an arid region using existing data on vegetation, soils and topography from maps constructed by government agencies. Accuracy of computer-assisted cartography depends on identification of edaphic variables that have influence in the likelihood of occurrence of a plant, as well as on the quality of the data. When cartographic data from government agencies are used, the distribution map can achieve a precision of more than 76 %, but in the logistic regression model independent variables that are more significant to presence or absence of the plant should be used. If all the variables are used, the accuracy of the map can diminish up to 46 %. This methodology is an option for government agencies in planning management of natural areas since it considers the probability of occurrence of a plant species in function of soil and topographical characteristics, although additional important environmental variables can be added. The precision of this type of maps can increase if the soil data in the study are obtained from soil samples collected at each point when the existence of the plant in the field is being verified and the relevant physical and chemical analyses are performed.

—End of the English version—

—*—

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1999. *Uso de suelo y vegetación agrupado por CONABIO*. Escala 1:1 000 000. CONABIO, México.

- Consejo Nacional de las Zonas Áridas (CONAZA). 1993. Aspectos técnicos y socioeconómicos de la costilla de vaca. Serie: Fichas técnicas de especies forestales (Mimeografiado) Saltillo, Coahuila, México.
- Congalton, R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 37: 35-46.
- Cruz C., G., C. A. Ortiz S., E. Ojeda T., J. F. Martínez M., E. D. Sotelo R., and A. L. Licona V. 2010. Evaluation of four digital classifiers for automated cartography of local soil classes based on reflectance and elevation in Mexico. *Int. J. Remote Sens.* 31: 665-679.
- Echavarría Ch., F. G., A. Serna P., F. A. Rubio A., A. F. Rumayor R., y H. Salinas G. 2009. Productividad del chamizo *Atriplex canescens* con fines de reconversión: dos casos de estudio. *Téc. Pecu. Méx.* 47: 93-106.
- Enríquez C., E., M. A. Parra G., y F. Ramírez M. 2011. Producción y valor nutritivo de forraje de *Atriplex* en un suelo salino. *Biotécnia* 13: 29-34.
- ESRI. 2006. ArcGis 9.2. Working with the ArcMap Spatial Analyst. ESRI Educational Services, Redland, California. U.S.A.
- Facelli, J. M., and H. Springbett. 2009. Why do some species in arid lands increase under grazing? Mechanisms that favour increased abundance of *Maireana pyramidata* in overgrazed chenopod shrublands of South Australia. *Austral Ecol.* 34: 588-597.
- Fleishman, E., R. Mac Nally, J. P. Fay, and D. D. Murphy. 2001. Modelling and predicting species occurrence using broad-scale environmental variables: an example with butterflies of the Great Basin. *Conservation Biol.* 15: 1674-1685.
- François, M. J., G. J. R. Díaz, y V. A. Pérez. 2003. Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Invest. Geogr.* 51: 53-72.
- García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Offset Larios, México. 255 p.
- Gasparri, N. I. 2010. Efecto del cambio de uso de la tierra sobre la cobertura vegetal y dinámica de biomasa del chaco semiárido argentino. *Población y Soc.* 17: 187-190.
- Giasson, E., R. T. Clarke, A. Vasconcellos I., G. Henrique M., and C. G. Tornquist. 2006. Digital soil mapping using multiple logistic regressions on terrain parameters in southern Brazil. *Sci. Agric.* 63: 262-268.
- Gorr, L. W., and K. S. Kurland. 2008. GIS Tutorial: Workbook for ArcView 3th. ed. ESRI Press, Redland, California. U.S.A. 434 p.
- Gross, J. E., M. C. Kneeland, D. F. Reed, and R. M. Reich. 2002. GIS-based habitat models for mountain goats. *J. Mammal.* 83: 218-228.
- Hengla, T., G.B.M. Heuvelinkb, and A. Steina. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120: 75-93.
- Hernández-Acosta, E., E. Mondragón-Romero, D. Cristobal-Acevedo, J. E. Rubiños-Panta, y E. Robledo-Santoyo. 2009. Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Rev. Chapin-go Serie Ciencias For. Ambiente* 15: 109-114.
- Hosmer, D. W., and S. Lemeshow. 2004. Applied Logistic Regression. 2a. ed. John Wiley and Sons. New York. U.S.A. 392 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003. XII Censo General de Población y Vivienda, 2000. Censo Agropecuario. <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.asp> (Consulta: diciembre 2011).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Sistema de descarga de productos digitales. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/detalle2.aspx> (Consulta: enero 2012).
- Jacquemyn, H., J. Butaye, and M. Hermy. 2003. Influence of environmental and spatial variables on regional distribution of forest plant species in a fragmented and changing landscape. *Ecography* 26: 768-776.
- Johnston, K., J. M. Ver Hoef, K. Krivoruchko, and N. Lucas. 2001. Using ArcGis Geostatistical Analyst. ESRI Press. Redland, California. U.S.A. 300 p.
- Kessler, J. J. 1990. *Atriplex* forage as a dry season supplementation feed for sheep in the montane plains of the Yemen Arab Republic. *J. Arid Environ.* 19: 225-234.
- Lasanta M, T., S. M. Vicente S., y A. Romo. 2004. Influencia de la topografía en la estacionalidad de la actividad vegetal: análisis en el pirineo occidental aragonés a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Bol. Asoc. Geol. Espan.* 38: 175-197.
- Lasanta M, T., y S. M. Vicente S. 2006. Factores en la variabilidad espacial de los cambios de cubierta vegetal en el Pirineo. *C. I. G.* 32: 57-80.
- Le Houérou, H. N. 2000. Utilization of fodder trees and shrubs in the arid and semiarid zones of west Asia and north Africa. *Arid Soil Res. Rehab.* 14: 101-135.
- Lee, S., and B. Pradhan. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4: 33-41.
- Loyn, R. H., E. G. McNabb, L. Volodina, and R. Willing. 2001. Modelling landscape distributions of large forest owls as applied to managing forests in north-east Victoria, Austr. *Biol. Conservation* 97: 361-376.
- Luoto, M., and M. Seppälä. 2002. Modelling the distribution of palsas in finish lapland with logistic regression and GIS. *Permafrost Periglac.* 13: 17-28.
- Lleverino, G. E., C. A. Ortiz S., y M. C. Gutiérrez C. 2000. Calidad de los mapas de suelos en el ejido Atenco, Estado de México. *Terra Latinoam.* 18: 103-113.
- Menard, S. 1995. Applied logistic regression analysis. Sage University Paper Series on Quantitative Applications in Social Sciences. Vol. 106. Thousand Oaks, California. 98 p.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: A framework for assessment. Island Press, Washington, D.C.
- Minitab. 2012. Statistical Software. (PA, USA: State College).
- Mooney, H. A., J. Ehleringer, and O. Björkman. 1977. The energy balance of leaves of evergreen desert shrub *Atriplex hymenelytra*. *Oecologia* 29: 301-310.
- Ortiz D., J., C. Martínez M., E. Corral, B. Simon, and J. L. Cenis. 2005. Genetic structure of *Atriplex halimus* population in the Mediterranean basin. *Ann. Bot.* 95: 827-834.
- Pärtel, M. 2002. Local plant diversity patterns and evolutionary history at the regional scale. *Ecology* 83: 2361-2366.
- Pindyck, R. S, y D. L. Rubinfeld. 2001. Econometría: Modelos y Pronósticos. Velázquez-Arellano, J.A. (trad). Cuarta edición. McGraw-Hill. 661 p.
- Pineda J., V. B., J. Bosque S., M. Gómez D., y W. Plata R. 2009.

- Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Invest. Geogr.* 69: 33-52.
- Ramírez, F. J., E. Porcayo, y O. Mejía. 2010. Comportamiento espacial de larvas de *Jacobiasca libica* (Hemiptera: Cicadellidae) en Andalucía, España: modelización y mapeo. *A. I. A.* 14: 33-46.
- Romero-Paredes R, J. L., y R. G. Ramírez L. 2003. *Atriplex canescens* (Purch Nutt) como fuente de alimento para zonas áridas. *Ciencia UANL* 4: 85-92.
- Schloeder, C. A., N. E. Zimmerman, and M. J. Jacobs. 2001. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 470-479.
- Segura C., M. A., L. Martínez C., E. García B., A. Huerta G., J. L. García H., M. Fortiz H., J. A. Orozco V., and P. Preciado R. 2012. Localization of local soil classes in an arid region of Mexico, using satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 33: 184-197.
- Shabenberger, O., and F. J. Pierce. 2001. *Contemporary Statistical Models for the Plants and Soil Science*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida. 752 p.
- Sperry, J. S., and U. G. Hacke. 2002. Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plant functional type. *Funct. Ecol.* 16: 367-378.
- Talavera-Magaña, D., J. Pérez P., V. A. González H., E. García M., y J. Espinoza V. 1996. Respuesta de los componentes del crecimiento de *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt a tipos de suelo y niveles de humedad edáfica. *Agrociencia* 30: 37-45.
- van Horssen, P. W., E. J. Pebesma, and P. P. Schot. 2002. Uncertainties in spatially aggregated predictions from a logistic regression model. *Ecol. Model.* 154: 93-101.
- van Niekerk, W. A., C. F. Sparks, N. F. G. Rethman, and R. J. Coertze. 2004. Mineral composition of certain *Atriplex* species and *Cassia sturtii*. *S. Afr. J. Anim. Sci.* 34: 105-107.
- Venable, L. 2007. Bet hedging in a guild of desert annuals. *Ecology* 88: 1086-1090.
- Verhulst, J., C. Montaña, M. C. Mandujano, and M. Franco. 2008. Demographic mechanisms in the coexistence of two closely related perennials in a fluctuating environment. *Oecologia* 156: 95-105.
- Wilkinson, S. R., D. L. Grunes, and M. E. Sumner. 2000. Nutrient interactions in soil and plant nutrition. *In*: Sumner, M. E. *Handbook of Soil Science*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- WRB. 2007. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos* No. 103. FAO, Roma. 117 p.