

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE ALGUNAS LEGUMINOSAS ARBUSTIVAS EN EL ALTIPLANO CENTRAL DE MÉXICO

POTENTIAL DISTRIBUTION OF SOME LEGUMINOUS SHRUBS IN THE CENTRAL HIGHLANDS OF MÉXICO

Aurelio Guevara-Escobar*, Enrique González-Sosa, Humberto Suzán-Azpiri, Guadalupe Malda-Barrera, Mahinda Martínez y Díaz,
Maricela Gómez-Sánchez, Luis Hernández-Sandoval, Yolanda Pantoja-Hernández y Diana Olvera-Valerio

Universidad Autónoma de Querétaro. Centro Universitario s/n. 76010. Santiago de Querétaro,
Querétaro. (guevara@uaq.mx) (egs@uaq.mx) (hsuzan@uaq.mx) (gmalda@uaq.mx) (mahinda@
uaq.mx) (gomezs@uaq.mx) (luishs@uaq.mx)

RESUMEN

El Bajío es una región agrícola importante localizada en el Altiplano Central Mexicano que enfrenta escasez de agua, necesita aumentar la recarga de acuíferos y disminuir la superficie de riego. La reforestación y reconversión agrícola basada en especies arbustivas del bosque tropical caducifolio puede ayudar a lograr estas metas. Con este fin se generaron mapas de probabilidad de presencia predicha (PP) en el Bajío para doce arbustivas. La probabilidad de PP se consideró representativa de la distribución potencial de las especies. Se utilizaron variables biofísicas espacialmente digitalizadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), registros botánicos de colecciones de la región y bases de datos compartidas de la Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO). Los datos se procesaron con el algoritmo genético GARP (Genetic Algorithm for Rule-setting Prediction). Las predicciones resultantes fueron distintas entre leguminosas pero, resaltan por su alta PP: *Caesalpinia* spp. y *Pithecellobium dulce* en el centro y sur oeste del Bajío; *Calliandra* spp., *Eysenhardtia polystachya*, *Lysiloma microphylla* y *Senna polyantha* en el norte; para la mayoría de las leguminosas en la zona oriental. Contrario a lo esperado, *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana* no fueron las especies con mayor área de alta PP.

Palabras clave: Bosque tropical caducifolio, distribución potencial, nicho fundamental, probabilidad predicha, GARP, reforestación.

INTRODUCCIÓN

La reforestación en México es importante para reparar el daño causado a los ecosistemas naturales. Sin embargo, los mayores esfuerzos realizados durante el siglo XX fueron con especies exóticas, aunque se conocían las especies nativas propicias para la reforestación (Flores y Lindig, 2005). Ahora se reconoce el valor de las especies nativas, aunque hay problemas en la producción de germoplasma y la

ABSTRACT

Located on the Central Highlands of México, El Bajío is an important agricultural region that faces water shortage, and therefore, it is necessary to increase aquifer recharge and decrease irrigated area. Reforestation and agricultural reconversion based on tropical deciduous forest shrub species can help to achieve these goals. Probability maps of predicted presence (PP) in El Bajío were generated for twelve shrub species. PP probability was considered representative of the potential distribution of the species. Biophysical variables spatially digitalized by Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), botanical records from regional collections, and shared Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO) data bases were used. The data were processed with the genetic algorithm GARP (Genetic Algorithm for Rule-setting Prediction). The resulting predictions were different among the legumes, but the following species were outstanding for their high PP: *Caesalpinia* spp. and *Pithecellobium dulce* in central and southwestern El Bajío; *Calliandra* spp., *Eysenhardtia polystachya*, *Lysiloma microphylla*, and *Senna polyantha* in the north; and most of the legumes in the eastern zone. Contrary to expectations, *Prosopis laevigata* and *Acacia farnesiana* were not the species with the largest area of high PP.

Key words: Tropical deciduous forest, potential distribution, fundamental niche, GARP, predicted probability, reforestation.

INTRODUCTION

Reforestation in México is essential to repair the damage caused to natural ecosystems. However, during the twentieth century the greater efforts were made with exotic species, although native species appropriate for reforestation were known (Flores and Lindig, 2005). Today, the value of native species is recognized, but producing germplasm and plant survival are problematic (CONAFOR, 2001). Reforestation in México has not been as successful as it might be because knowledge is insufficient to decide which species should be planted in the site to be reforested.

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Junio, 2007. Aprobado: Junio, 2008.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 42: 703-716. 2008.

supervivencia (CONAFOR, 2001). La reforestación en México no es tan exitosa sobre todo por la falta de conocimiento para decidir cual especie debe sembrarse en el lugar a recuperar.

Las leguminosas arbustivas son importantes para integrarse en el medio agropecuario porque algunas pueden fijar nitrógeno y son susceptibles de uso multipropósito (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Algunas leguminosas arbustivas con mayor potencial productivo son características del bosque tropical caducifolio (BTC); (Miranda y Hernández, 1963) que es la vegetación tropical con mayor distribución en México. La amplia gama de condiciones ambientales donde se establece el BTC promueve su diversidad, que alcanza niveles superiores a los de otras selvas neotropicales similares (Rzedowski, 1993).

En México, el BTC se establece a mayor altitud en el Bajío (Trejo, 1999). Sin embargo, estos relictos reflejan la degradación del ecosistema, ya que sólo se conserva 5% del área original del BTC en el Bajío (Peña y Neyra, 1998). Ahora, grandes extensiones de pastizales o matorrales secundarios ocupan el área original del BTC (Carranza, 2005). Los mayores cambios en la vegetación del Bajío ocurrieron desde la segunda mitad del siglo XVIII y hasta el XX, principalmente favoreciendo la agricultura (Butzer y Butzer, 1997; Niembro, 2001).

El Bajío es un área de alta productividad para la agricultura de riego pero el potencial productivo puede ser bajo para algunas zonas de temporal (García *et al.*, 1999). La sobreexplotación de los acuíferos ha ocasionado el abatimiento de los mantos freáticos y también el aumento de la concentración en el agua de elementos tóxicos como arsénico y flúor (Rosas *et al.*, 1999); por lo que se necesita aumentar la captación de agua en los acuíferos, servicio ambiental que cumplen las áreas forestales (CONAFOR, 2001). Dada la historia de la vegetación en el Bajío (Butzer y Butzer, 1997), parece conveniente la reforestación con especies del BTC en comparación con especies consideradas forestales (pino, encino, eucalipto y otros). En el BTC existe gran número de especies arbóreas y arbustivas con uso forrajero por rumiantes y fauna silvestre, complementarias con cultivos tradicionales. La principal ventaja de integrar especies con varios usos sería una producción diversificada adaptada a las necesidades y expectativas de los pobladores y menos sensible al mercado, clima y plagas. Desafortunadamente, se conoce poco sobre la distribución potencial u original del BTC en el Bajío, y el conocimiento de estos atributos es fundamental para planificar esfuerzos exitosos de reforestación. La predicción de áreas de distribución geográfica no es trivial, requiere bases de datos detalladas sobre el número de registros de

Integration of shrub legumes into agriculture and livestock systems is important because they fix nitrogen and are multi-purpose (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Some promising leguminous shrubs are characteristic of tropical deciduous forests (TDF) (Miranda and Hernández, 1963), the most widely distributed tropical vegetation in México. The broad range of environmental conditions where TDF have established promotes its diversity, which is superior to other similar neo-tropical forests (Rzedowski, 1993).

In México TDF are found at their highest altitude in El Bajío (Trejo, 1999); these relicts, however, reflect degradation of the ecosystem; only 5% remains of the original area covered by TDF in El Bajío (Peña and Neyra, 1998). Today, large extensions of grassland and secondary scrub vegetation cover the area that was originally TDF (Carranza, 2005). Most of the changes in vegetation occurred from the second half of the 18th century to the 20th century, favoring mainly agriculture (Butzer and Buzer, 1997; Niembro, 2001).

El Bajío is a highly productive area for irrigated agriculture, but in some rainfed areas productive potential can be low (García *et al.*, 1999). Over-extraction of the aquifers has caused water tables to drop and concentrations of toxic elements such as arsenic and fluorine to increase (Rosas *et al.*, 1999). It is thus necessary to increase aquifer recharge, an ecosystem service that forested areas provide (CONAFOR, 2001). Given the history of the vegetation in El Bajío (Butzer and Butzer, 1997), it seems more rational to reforest with TDF species rather than with those normally considered forest species (pine, oak, eucalyptus, among others). In the TDF there are a large number of tree and shrub species that can be used as forage by ruminants and wild fauna and can complement traditional crops. The main advantage of integrating species with several uses is diversified production adapted to the needs and expectations of the population and less sensitive to market trends, adverse weather and pests. Unfortunately, little is known about the potential or original distribution of TDF in El Bajío; this knowledge is fundamental for planning successful reforestation. Prediction of geographic distribution of the areas is not a trivial matter. It requires detailed databases of species, environmental and anthropic variables at a sufficiently fine scale, reliable data on geographic distribution of the species, and information about the sampling on which the data are based (Soberón and Peterson, 2005). Several statistical software programs predict species distribution using algorithms to identify plots ecologically similar to those where the presence of the species of interest has been confirmed (Anderson *et al.*, 2002; Argáez *et al.*, 2005).

especies, a escala suficientemente fina, de variables ambientales y antrópicas, de datos fiables sobre la distribución geográfica de las especies, y del muestreo en que se basan los datos (Soberón y Peterson, 2005). Varios paquetes estadísticos predicen la distribución de especies usando algoritmos para identificar parcelas ecológicamente similares a aquéllas donde consta la presencia de la especie de interés (Anderson *et al.*, 2002; Argáez *et al.*, 2005).

El objetivo del presente estudio fue determinar la distribución de la presencia potencial de una selección de especies arbustivas leguminosas del BTC con uso multipropósito, con base en registros botánicos y variables ambientales digitalizadas.

MATERIAL Y MÉTODOS

El Bajío es una depresión en el Altiplano Mexicano localizada entre 1600 y 2000 m, con pendientes menores a 4% y suelos profundos dominados por Feozems y Vertisoles (García *et al.*, 1999). Limita con el Sistema Volcánico Transversal al sur, la Mesa Central al norte, las sierras Madre Oriental y Occidental al oriente y poniente. El clima es semiárido, subtropical; la precipitación pluvial anual tiene un gradiente del noroeste (menor a 600 mm) hacia el sureste (mayor a 800 mm). La altitud influye en el comportamiento de la temperatura, de heladas y granizo (Granados *et al.*, 2004).

El área de estudio tuvo una elevación menor a 2000 m, con los límites de los transectos realizados por Butzer y Butzer (1997) y usando el modelo de elevación digital producido por el INEGI. Comprende la mayor parte de los Estados de Guanajuato y porciones de Querétaro, Michoacán, México e Hidalgo; la colindancia occidental correspondió con las regiones de Los Altos de Jalisco y la Ciénega. Con esta definición se recortaron las capas para variables ambientales usadas en este tipo de análisis (Wohlgemuth, 1998): uso de suelo; temperatura media, máxima y mínima anual; clima; evapotranspiración; precipitación; vegetación y edafología, provistas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2002).

Para el área de estudio se usaron tres bases de datos de especímenes florísticos provistos por el Sistema Nacional de Información de la Biodiversidad a cargo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Herbario del Instituto de Ecología del Bajío A. C. (IE-BAJÍO) en Pátzcuaro, Michoacán, y Herbario de Querétaro (QMEX). Se consideraron especies que satisfacen las necesidades de combustible, forraje, medicina, construcción y servicios ambientales (Terrones *et al.*, 2006): *Acacia farnesiana*, *Albizia plurijuga*, *Caesalpinia* spp. (*C. mexicana* y *C. coriaria*), *Calliandra* spp. (*C. eriophylla* y *C. formosa*), *Erythrina* spp. (*E. americana* y *E. coralloides*), *Eysenhardtia polystachya*, *Inga* spp. (*I. jinicuil* y *I. vera*), *Leucaena leucocephala*, *Lysiloma microphylla*, *Pithecellobium dulce*, *Prosopis laevigata* y *Senna polyantha*. Se incluyó a *Karwinskia humboldtiana* como especie tóxica para el humano y ruminantes, distribuida ampliamente en México y adaptada a condiciones de aridez. *K. humboldtiana* no es

Therefore, the objective of this study was to determine the distribution of potential presence of a selection of multi-purpose TDF leguminous shrub species using botanical records and digitalized environmental variables.

MATERIALS AND METHODS

El Bajío is a depression in the Mexican Highlands located at altitudes of 1600 to 2000 m, characterized by slopes of less than 4% and deep soils dominated by Feozems and Vertisols (García *et al.*, 1999). It is bordered on the south by the Trans-Mexican volcanic Belt, on the north by the Central Plateau, and on the east and west by the Sierra Madre Oriental and the Sierra Madre Occidental. The climate is semiarid, subtropical; annual rainfall ranges from less than 600 mm in the northeast to more than 800 mm toward the southeast. Altitude affects temperature and incidence of frosts and hail (Granados *et al.*, 2004).

The study area had an altitude below 2000 m, using the limits of the transects determined by Butzer and Butzer (1997), and using the digital elevation model produced by INEGI. It comprehends most of the states of Guanajuato and portions of Querétaro, Michoacán, México and Hidalgo, and it is adjacent to the Los Altos de Jalisco and Ciénega regions on the west. With this definition, we outlined the layers for the environmental variables used in this type of analysis (Wohlgemuth, 1998): land use; annual mean, maximum and minimum temperature; climate; evapotranspiration; precipitation; vegetation; and edaphology, all provided by the Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2002).

For the study area, three databases of plant specimens were used; these were provided by Sistema Nacional de Información de la Biodiversidad, of the Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), the herbarium of the Instituto de Ecología del Bajío, A. C. (IE-BAJIO) in Pátzcuaro, Michoacán, and the herbarium of Querétaro (QMEX). The species considered are used as fuel, forage, medicine, and construction material, as well as for environmental services (Terrones *et al.*, 2006): *Acacia farnesiana*, *Albizia plurijuga*, *Caesalpinia* spp. (*C. mexicana* and *C. coriaria*), *Calliandra* spp. (*C. eriophylla* and *C. formosa*), *Erythrina* spp. (*E. americana* and *E. coralloides*), *Eysenhardtia polystachya*, *Inga* spp. (*I. jinicuil* and *I. vera*), *Leucaena leucocephala*, *Lysiloma microphylla*, *Pithecellobium dulce*, *Prosopis laevigata*, and *Senna polyantha*. *Karwinskia humboldtiana* was included as a drought tolerant species that is toxic for humans and ruminants and is widely distributed in México. *K. humboldtiana* is not a legume nor is its propagation desirable, but there are clinical cases of intoxication in the Mexican Highlands (Arreola *et al.*, 2000) and corroborating its location in the areas of predicted presence would be another form of validating the model. *Inga* spp., species from hot wet climates, are not found in El Bajío, and so the prediction model should not predict their presence even though data are fed into the model. For *Inga* spp., *P. dulce*, *Caesalpinia* spp. and *L. leucocephala*, the area of study was extended to the entire state of Querétaro to have

leguminosa y tampoco es deseable su propagación pero se estudió porque existen registros de casos clínicos de intoxicación en el Altiplano Mexicano (Arreola *et al.*, 2000), y corroborar la ubicación de éstos en las áreas de presencia predicha para *K. humboldtiana* sería otra forma de validar el modelo. *Inga* spp. fue un ejemplo proveniente de clima cálido húmedo y no está presente en el Bajío por lo que su modelo de predicción debe ser acorde a este hecho, a pesar de proporcionársele registros al paquete de modelación. Para *Inga* spp., *P. dulce*, *Caesalpinia* spp. y *L. leucocephala* se amplió el área de estudio a todo el Estado de Querétaro, con el fin de usar un mayor número de registros para las predicciones. Los registros botánicos usados fueron 146 (Cuadro 1). Los registros botánicos se georreferenciaron en bases de datos individuales para cada especie. El análisis espacial se hizo con el paquete ArcView 3.3 (ESRI, Redlands, CA).

Los registros botánicos y las capas se procesaron con el paquete Desktop GARP. El procedimiento GARP (Genetic Algorithm for Rule-setting Prediction) posee ventajas sustantivas sobre otros métodos para generar áreas de distribución predictiva de especies, usando la información contenida en las colecciones científicas con sesgos de recolecta, así como inventarios botánicos incompletos (Anderson, 2003). Para formar un modelo de los requerimientos biofísicos de una especie, el programa GARP utiliza un algoritmo genético para reglas de solución que busca asociaciones no aleatorias entre las características ambientales de las localidades de ocurrencia conocida, en contraste con las características de la región en general (Anderson, 2003). En el presente ejercicio se aplicaron los algoritmos y las opciones por defecto del paquete. Así, el modelo predictivo indicó las áreas potencialmente habitadas por la especie de acuerdo con las variables ambientales examinadas y los registros botánicos.

Para cada género o especie considerada, los registros botánicos se dividieron al azar en un grupo de entrenamiento y uno de validación. El grupo de entrenamiento se usó para generar un modelo predictivo preliminar y el de validación se usó como control para validar la estabilidad del modelo predictivo preliminar. Al modelar los nichos y distribuciones potenciales de las especies hay dos tipos principales de error; el de omisión o tasa de falsos negativos y el de comisión o tasa de falsos positivos. Para evaluar el desempeño de los modelos se calcularon los índices siguientes: la tasa de clasificación correcta = $(a+d)/(a+b+c+d)$; el error de omisión = $c/(a+b)$; el índice de comisión = $b/(b+d)$. Donde, *a* son los registros de distribución conocida correctamente predichos como presentes; *b* son los registros ausentes incorrectamente predichos como presentes; *c* son los registros de distribución conocida incorrectamente predichos como ausentes; *d* son los registros ausentes correctamente predichos como ausentes (Anderson *et al.*, 2003). También se calculó la probabilidad exacta de la prueba χ^2 de una cola para las proporciones observadas de los registros de validación ubicados en píxeles de presencia predicha (Anderson *et al.*, 2002). Esta prueba de significancia incorporó los aspectos de omisión de áreas de distribución verdadera (indicadas por los registros de validación) y la inclusión de áreas no habitadas (según las proporciones de píxeles de presencia predicha que influenciaron las probabilidades binomiales esperadas).

a larger number of records for the predictions. The 146 (Table 1) botanical records used were geo-referenced in individual databases for each species. Spatial analysis was done in ArcView 3.3 software (ESRI, Redlands, CA).

The botanical records and layers were processed with GARP Desktop software. GARP (Genetic Algorithm for Rule-setting Prediction) software has substantial advantages over other methods for generating areas of predictive species distribution when using information contained in scientific collections with collection biases or incomplete botanical inventories (Anderson, 2003). To construct a model of the biophysical requirements of a species, GARP software uses a genetic algorithm for solution rules that seek non-random associations among environmental characteristics of known sites, which are contrasted with the general characteristics of the region (Anderson, 2003). In the present exercise, default algorithms and software options were applied. Thus, the prediction model indicated areas potentially inhabited by the species, in accordance with the environmental variables examined and the botanical records.

For each genus or species, botanical records were divided at random into a training and a validation group. The training group was used to generate a preliminary predictive model, and the validation group was used as a control to validate stability of the preliminary predictive model. When modeling potential niches and distribution of species, there are two main types of error: omission, or rate of false negatives, and commission, or rate of false positives. To evaluate performance of the models, the following indexes were calculated: rate of correct classification = $(a+d)/(a+b+c+d)$; omission error = $c/(a+b)$; commission index = $b/(b+d)$, where *a* are the known distribution records correctly predicted as present, *b* are absent records incorrectly predicted as present, *c* are the known distribution records incorrectly predicted as absent, and *d* are absent records correctly predicted as absent (Anderson *et al.*, 2002). Exact probability of the one-tailed χ^2 test was also calculated for the proportions observed of the validation registers located in pixels of predicted presence (Anderson *et al.*, 2002). This test of significance incorporated omission aspects of true distribution areas (indicated by the validation records) and inclusion of uninhabited areas (according to the proportions of predicted presence pixels that had influence on expected binomial probabilities). The GARP analysis concludes with a distribution prediction map for each species; each prediction results from the application of different algorithms. According to Anderson *et al.* (2003), the 10 best models were taken from a total of 100 generated to identify the model set where the area pattern repeats more stably. The best models are those with the lowest omission values and those that have the highest rate of correct classification. The models were added to the version 1.1 Spatial Analyst module of ArcView 3.2 software, generating a map with 10 categories, in which the maximum number corresponds to the area with the highest probability of presence. This map was reclassified into probability categories: low, where 1 to 3 models converge; medium, 4 to 7; high, 8 to 10. With this, the final potential distribution model was generated for each species or genus.

El análisis GARP concluiría con un mapa predictivo de la distribución para cada especie; cada predicción resulta de la aplicación de distintos algoritmos. De acuerdo con Anderson *et al.* (2002), se tomaron los mejores 10 modelos de un total de 100 generados para identificar el conjunto de modelos donde se repite el patrón de áreas de manera más estable. Los mejores modelos serían aquellos con los más bajos valores de omisión y de aquellos, los que presentaran la mayor tasa de clasificación correcta. Los modelos fueron sumados con el módulo Spatial Analyst versión 1.1 del programa Arc View 3.2 generando un mapa con 10 categorías, donde el número máximo corresponde al área con mayor probabilidad de presencia. Este mapa se reclasificó en categorías de probabilidad: baja, donde convergen de 1 a 3 modelos; media, de 4 a 7; alta de 8 a 10. Con esto se generó el modelo final de distribución potencial de cada especie o género.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los diez mejores modelos generados para cada especie representaron bien el área de distribución potencial. Al escoger los modelos con un error de omisión igual a cero se aseguraron las presencias correctamente predichas y buena sensibilidad de los modelos. Los valores de χ^2 fueron significativos ($p \leq 0.001$) en todos los casos (Cuadro 1). Con la excepción de *L. leucocephala* y *A. farnesiana*, la tasa de clasificación correcta también tuvo valores superiores a 0.8 para todos los modelos, tanto para el grupo de entrenamiento como para el de validación. La semejanza de valores en la tasa de clasificación correcta entre el grupo de entrenamiento y el de validación sugirió que el número de registros fue suficiente para el entrenamiento. El valor relativamente alto del índice de comisión indicó

RESULTS AND DISCUSSION

The ten best models generated for each species yielded a good representation of the potential distribution area. When models with an omission error equal to zero were selected, correctly predicted presence and good model sensitivity were assured. χ^2 values were significant ($p \leq 0.001$) in all cases (Table 1). With the exception of *L. leucocephala* and *A. farnesiana*, the rate of correct classification also had values above 0.8 for all of the models, for both the training and the validation group. Similarity of correct classification rate of training and validation groups suggested that the number of records was sufficient for training. The relatively high commission index indicated that the models were conservative in predicting presence, or that the models were not highly specific, since they predict absence areas where the species is actually present, as was the case of *A. farnesiana* and *L. leucocephala*. Because the models are based only on records of presence and the sampling effort was not uniform over space, the commission index reflected not only the true commission error but also a component resulting from a deficient sampling in areas the species does inhabit (Anderson *et al.*, 2003). It is also possible that prediction of the distribution of a generalist species such as *A. farnesiana* or *L. leucocephala* were not more precise because of a low correlation between the selected environmental variables and their registered distribution. In this regard, Hernández *et al.* (2006) conclude that precision is greater for models generated with few records when

Cuadro 1. Registros usados en la modelación, valores promedio para los índices de desempeño de los diez mejores modelos GARP por cada especie y, áreas de presencia predicha (PP).

Table 1. Registers used in modeling; average values for the performance indexes of the ten best GARP models of each species, and areas of predicted presence (PP).

	Registros botánicos	Tasa de clasificación correcta		Índice de comisión	χ^2 [†]	Área con alta probabilidad de PP (ha)
		entrenamiento	validación			
<i>A. farnesiana</i>	14	0.81	0.71	36.6	6.4	365 515
<i>K. humboldtiana</i>	10	0.82	0.84	27.7	11.5	433 884
<i>P. laevigata</i>	11	0.95	0.95	9.3	46.7	526 222
<i>A. plurijuga</i>	9	0.87	0.88	26.0	9.8	573 178
<i>L. leucocephala</i>	13	0.72	0.66	52.8	17.7	600 740
<i>L. microphylla</i>	16	0.94	0.95	8.4	93.5	643 857
<i>E. polystachya</i>	9	0.89	0.89	21.6	8.2	679 185
<i>S. polyantha</i>	16	0.91	0.90	14.4	48.7	802 502
<i>Erythrina</i> spp.	7	0.90	0.91	16.7	30.4	837 909
<i>Caesalpinia</i> spp.	10	0.92	0.90	11.1	44.2	873 279
<i>Calliandra</i> spp.	7	0.93	0.89	12.3	46.5	1 077 211
<i>P. dulce</i>	11	0.89	0.89	21.6	8.2	1 217 306
Zona de estudio						2 859 926

[†] Todos los valores de χ^2 tienen un grado de libertad ♦ All χ^2 values have one degree of freedom.

De acuerdo a la formula presentada en la página 3 los valores del Índice de Comisión deben variar entre 0 y 1.

que los modelos fueron conservadores en la predicción de presencia, o que los modelos no tuvieron alta especificidad, ya que predicen áreas de ausencia donde en realidad hay presencia de la especie, como fue el caso de *A. farnesiana* y *L. leucocephala*. Debido a que los modelos se basan únicamente en registros de presencia y que el esfuerzo de muestreo no fue uniforme en el espacio, el índice de comisión reflejó no solamente el error de comisión verdadero, sino también a un componente resultante de un muestreo deficiente en áreas donde la especie realmente habita (Anderson *et al.*, 2003). También es posible que la predicción de la distribución de una especie generalista como *A. farnesiana* o *L. leucocephala* no fueran más precisas debido a una correlación baja entre las variables ambientales seleccionadas y su distribución registrada. Al respecto, Hernández *et al.* (2006) concluyen que la precisión es mayor para los modelos generados con pocos registros cuando se trata de especies con distribuciones geográficas limitadas y con baja tolerancia ambiental.

Los modelos generados de PP tienen varias fuentes posible de sesgo. Primero, la caracterización ambiental podría ser afectada por la escala espacial gruesa para algunas variables. Segundo, la confiabilidad de los registros depende de la amplitud y cantidad de los mismos, lo que sugiere una retroacción y actualización de inventarios, a pesar de los diversos estudios e inventarios hechos para la región. Tercero, los registros botánicos no reflejan el estado de la especie en cuanto a densidad de población o tasa de crecimiento; estos atributos serían más útiles, sobre todo para reflejar la potencialidad de la especie en un sitio dado. Cuarto, la temporalidad e intensidad de muestreo no es uniforme en la región, ya que los registros provienen de diferentes campañas y temporadas. Estos aspectos han sido enumerados por distintos autores de estudios biogeográficos donde el interés principal es identificar el área de distribución con fines de conocimiento ecológico o esfuerzos de conservación (Soberón y Peterson, 2005).

Para el presente estudio, definir claramente el área en donde se encuentran actualmente las especies no es el aspecto crítico. Más bien lo es determinar áreas con características ambientales similares a las existentes donde se registró la especie y que representan el conjunto de condiciones ecológicas donde las especies pueden mantener poblaciones. Para este enfoque de modelaje un número reducido de registros provee información biogeográfica útil pero debe interpretarse cuidadosamente, sobre todo cuando se tienen menos de diez registros (Pearson *et al.*, 2007). En el presente estudio la mayoría de las especies estudiadas tuvo más de diez registros. Stockwell y Peterson (2002) encontraron que para

dealing with species whose geographical distribution is limited and whose environmental tolerance is low.

PP generated models have several possible sources of bias. First, environmental characterization can be affected by the gross spatial scale for some variables. Second, reliability of the records is subject to their number and amplitude, suggesting the need for feedback and updated inventories, in spite of several studies and inventories conducted in the region. Third, the botanical records do not reflect the state of the species in terms of population density or growth rate; these attributes would be useful, especially in reflecting the species' potential in a given site. Fourth, seasonality and sampling intensity is not uniform in the region, and the records were from different collecting campaigns and seasons. These aspects have been enumerated by different authors in bio-geographic studies where the main interest is to identify the distribution area with aims of ecological knowledge or conservation efforts (Soberón and Peterson, 2005).

For this study, a clear definition of the area where the species is currently found is not the critical aspect; but rather, defining areas with environmental characteristics similar to those of the site where the species were registered, representing a set of ecological conditions that can maintain the species population. For this modeling approach, a small number of records provide useful bio-geographic information, but it should be carefully interpreted, especially when there are less than 10 registers (Pearson *et al.*, 2007). In our study, most of the studied species had more than 10 registers. Stockwell and Peterson (2002) found that for predicting presence and absence of species, success rate is 90% when 10 registers are used, compared with using 200. Likewise, Hernández *et al.* (2006) indicate that GARP reaches its maximum precision with sample sizes of 10 registers. In Table 1, a clear relationship between the number of registers used and performance index values cannot be appreciated; nor do the models of species with fewer registers show lower performance. For our study, identification of sites for re-introducing *L. microphylla*, *P. laevigata*, *Caesalpinia* spp., *Calliandra* spp., and *S. polyantha* can be based on models of potential distribution of these species since the commission index was low, the correct classification rate was high, and χ^2 was significant (Peterson, 2006).

Probability of PP exhibited distinct spatial patterns for the legumes studied: *Pithecellobium dulce* and *Calliandra* spp. had a greater PP area with high probability, followed by *Caesalpinia* spp., *Erythrina* spp., and *S. polyantha* (Table 1). The prediction models of geographic distribution for these species are presented in Figures 1 to 5 with probabilities of

la predicción de presencia y ausencia de especies la tasa de éxito es 90% cuando se usan diez registros comparado con el uso de 200. De manera similar, Hernández *et al.* (2006) indican que GARP alcanza su máxima precisión con tamaños de muestra de diez registros. En el Cuadro 1 no se aprecia una relación clara entre el número de registros utilizados y el valor de los índices de desempeño; tampoco los modelos de las especies con menos registros mostraron menor desempeño. Para el presente estudio, la identificación de sitios para la reintroducción de *L. microphylla*, *P. laevigata*, *Caesalpinia* spp., *Calliandra* spp. y *S. polyantha* puede basarse en los modelos de distribución potencial de estas especies debido a que el índice de comisión fue bajo, además de una alta tasa de clasificación correcta y χ^2 significativa (Peterson, 2006).

La probabilidad de PP presentó patrones espaciales distintos para las leguminosas estudiadas: *Pithecellobium dulce* y *Calliandra* spp. tuvieron mayor área de PP con alta probabilidad, seguidas por *Caesalpinia* spp., *Erythrina* spp. y *S. polyantha* (Cuadro 1). Los modelos de predicción de la distribución geográfica para estas especies se presentan en las Figuras 1 a 5 con las probabilidades de la presencia (PP) o ausencia predicha (AP) por el modelo GARP; las figuras correspondientes a las demás especies se pueden consultar en el anexo (disponible en la versión electrónica). En general, la distribución conocida de las especies se reflejó en la distribución predictiva desarrollada por los modelos, los detalles se presentan a continuación.

La PP fue alta en las zonas bajas del centro y suroeste del Bajío para *Caesalpinia* spp. y *P. dulce*. La PP de *P. dulce* fue alta en la mayoría de las elevaciones

predicted presence (PP) or predicted absence (AP) by the GARP model. The figures corresponding to the rest of the species can be consulted in the appendix (available in online version). In general, the known distribution of the species was reflected in the predicted distribution developed by the models; the details are presented below.

PP was high in the low central and southwestern zones of El Bajío for *Caesalpinia* spp. and *P. dulce*. PP of *P. dulce* was high at most elevations where *Caesalpinia* spp. had a medium PP or AP. Two clear examples were the Sierra de Pénjamo and Sierra de Cuatralba, and even Sierra de Santa Barbara toward its eastern versant. However, at elevations of Cerro el Jocoque, between Celaya and Querétaro, PP of *Caesalpinia* spp. seemed to be better than that of *P. dulce*. In the southeastern zone of El Bajío PP was low or absent for *Caesalpinia* spp., except for the zone of Tepeji del Río and the corridor Queretaro-San Juan del Río. In this same corridor *P. dulce* had a larger PP area, with probability medium to high, and more prominent into the Jilotepec zone. The presence of these two legumes in similar zones was congruent, since *Caesalpinia* spp. and *P. dulce* are associated particularly in humid and sub-humid tropical ecological zones (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). The prediction zone in El Bajío obeys to more benevolent conditions of humidity and temperature toward the southwest. Because the number of records within El Bajío was low for these legumes, records of the Sierra Gorda and Barranca la Peña Azul in Cadereyta, state of Querétaro, were used for prediction. The Querétaro registers were incorporated considering its geographical proximity and that the species inhabits similar environmental

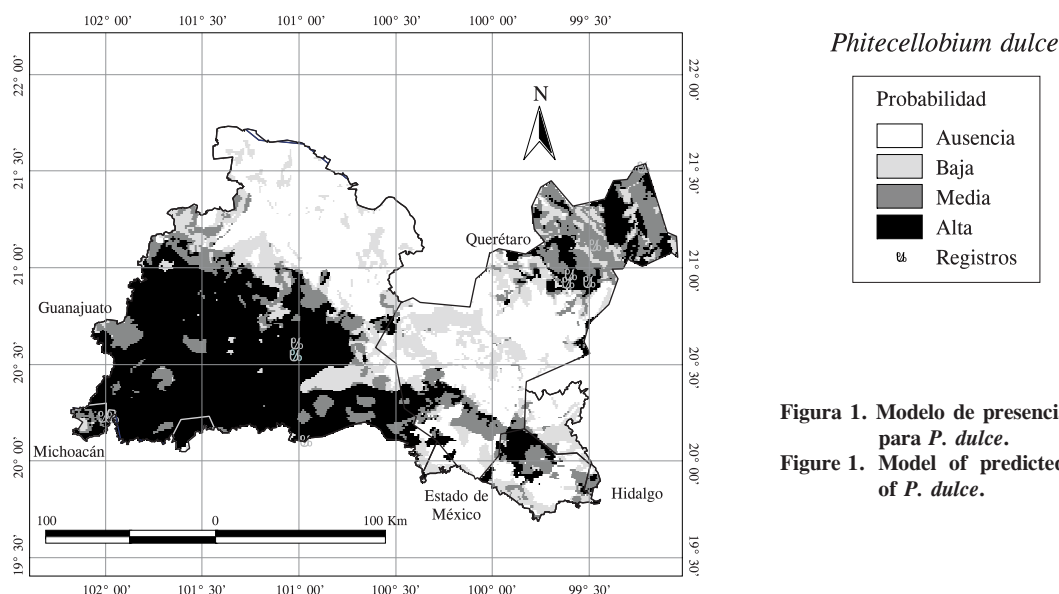


Figura 1. Modelo de presencia predicha para *P. dulce*.
Figure 1. Model of predicted presence of *P. dulce*.

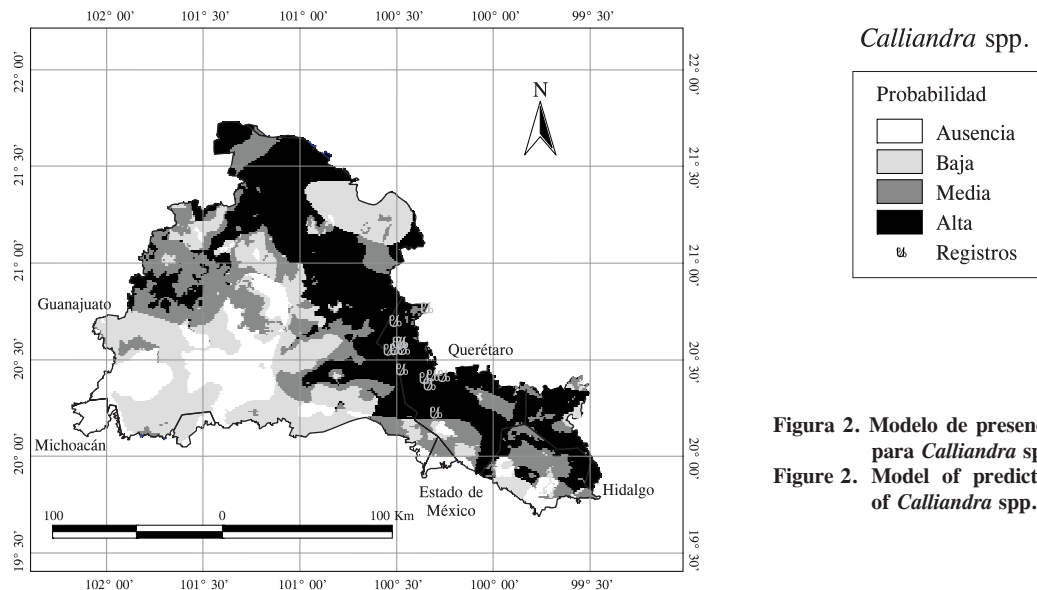


Figura 2. Modelo de presencia predicha para *Calliandra* spp.
Figure 2. Model of predicted presence of *Calliandra* spp.

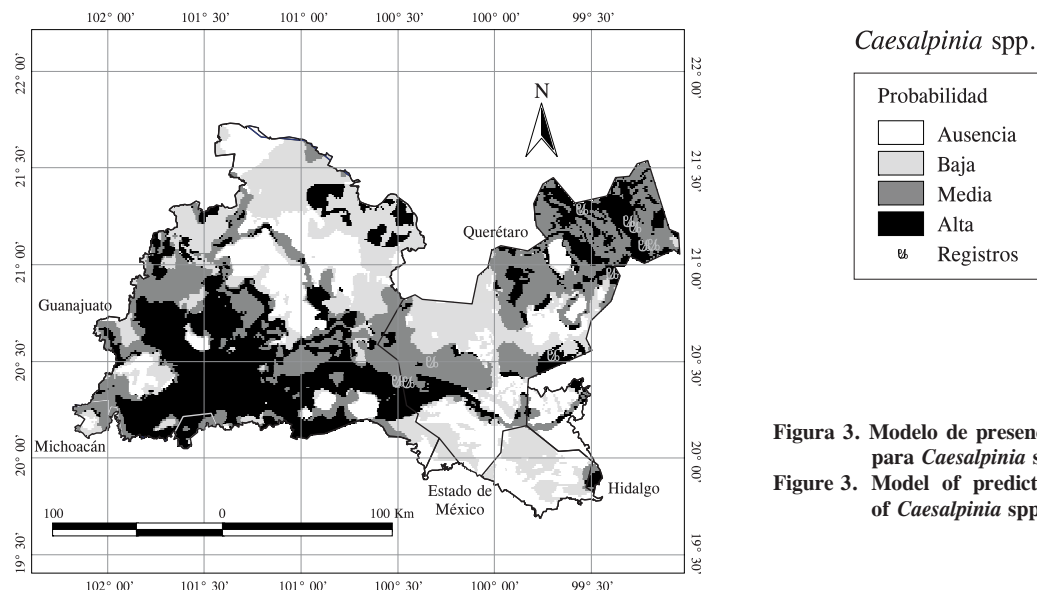


Figura 3. Modelo de presencia predicha para *Caesalpinia* spp.
Figure 3. Model of predicted presence of *Caesalpinia* spp.

donde *Caesalpinia* spp. tuvo una PP media o AP; dos ejemplos claros fueron la Sierra de Pénjamo y la Sierra de Cuatralba y hasta la Sierra de Santa Bárbara hacia su vertiente oriental. Sin embargo, en las elevaciones de Cerro el Jocoque entre Celaya y Querétaro, la PP de *Caesalpinia* spp. pareció ser mejor comparativamente con la de *P. dulce*. En la zona sureste del Bajío la PP fue baja o ausente para *Caesalpinia* spp., a excepción de la zona de Tepeji del Río y el corredor Querétaro-San Juan del Río. En ese mismo corredor *P. dulce* tuvo un área de PP más amplia pero con probabilidad de media a alta y más prominente en la zona de Jilotepec. La presencia de estas dos leguminosas en zonas similares fue congruente, ya que *Caesalpinia* spp., y

conditions, though outside El Bajío, and its exclusion produces an underestimate of the distribution of its fundamental niche in the environmental dimension examined (Anderson, 2003).

The northern zone of El Bajío is the driest of the region, and here PP of the studied plants was not high. Medium and low probability PP zones were identified for two groups of TDF species: *Calliandra* spp., *L. microphylla*, *P. laevigata*, and *S. polyantha*, whose present distribution is considered good; *L. leucocephala*, *A. plurijuga*, and *E. polystachya*, whose presence is scarce and tends to disappear. Of the first group, *Calliandra* spp. was outstanding with good PP in the north and west, except for the

P. dulce se asocian sobre todo en zonas ecológicas de trópico húmedo y sub-húmedo (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). La zona de predicción en el Bajío obedece a las condiciones de humedad y temperatura más benévolas hacia el suroeste. El número de registros dentro del Bajío fue bajo para estas leguminosas y para la predicción se usaron registros del Estado de Querétaro, de la Sierra Gorda y Barranca la Peña Azul en Cadereyta. Los registros de Querétaro se incorporaron considerando la cercanía geográfica y que la especie ocupase condiciones ambientales similares, aunque fuera del Bajío, dado que su exclusión produce una subestimación de la distribución del nicho fundamental de la especie en la dimensión ambiental examinada (Anderson, 2003).

San Luis de la Paz zone. This genus adapts to a broad range of precipitation (700-3000 mm) in the TDF ecological zone (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). However, the prediction model for *Calliandra* spp. is very different from those obtained for *Caesalpinia* spp. and *P. dulce*, which had high PP in the most humid and lowest zone of El Bajío. This may be explained by the larger number of botanical registers for *Calliandra* spp. within El Bajío, while *Caesalpinia* spp. and *P. dulce* were predicted by expanding the geographical area of botanical records. Nevertheless, prediction of *Calliandra* spp. was considered correct since the modeled distribution area coincides with that of Martínez-Cruz and Téllez-Valdez (2004), who

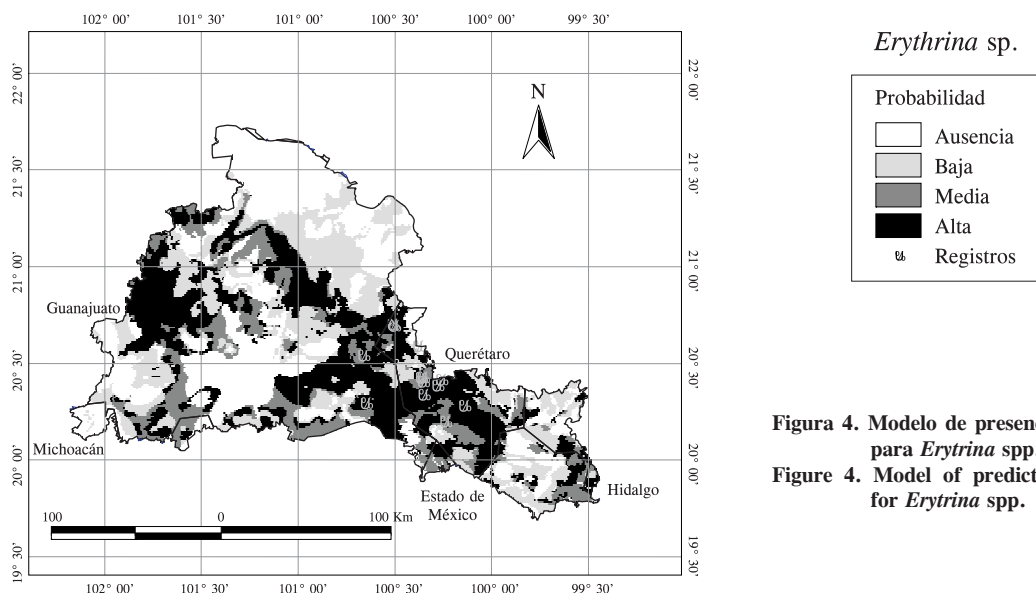


Figura 4. Modelo de presencia predicha para *Erythrina* spp.

Figure 4. Model of predicted presence for *Erythrina* spp.

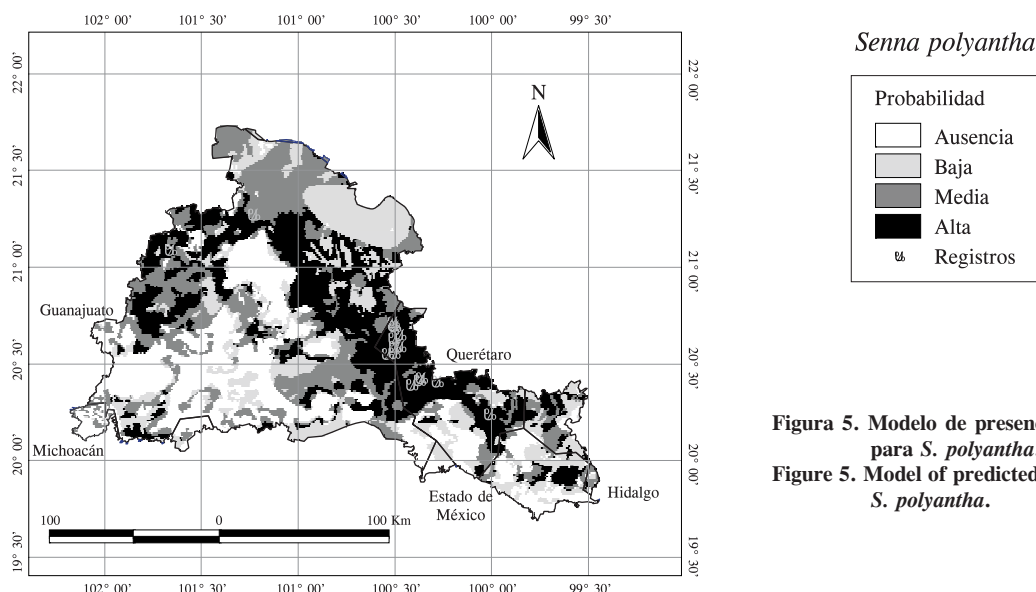


Figura 5. Modelo de presencia predicha para *S. polyantha*.

Figure 5. Model of predicted presence of *S. polyantha*.

La zona norte del Bajío es la más árida de la región y en ella la PP de las plantas estudiadas no fue alta. Se identificaron zonas de PP con probabilidad media y baja para dos grupos de especies del BCT: *Calliandra* spp., *L. microphylla*, *P. laevigata* y *S. polyantha* que se consideran con buena distribución en la actualidad; y *L. leucocephala*, *A. plurijuga* y *E. polystachya* cuya presencia es más escasa y tienden a desaparecer. Del primer grupo sobresalió *Calliandra* spp. con una buena PP en el norte y oriente del Bajío excepto en la zona de San Luis de la Paz. Este género se adapta en un intervalo amplio de precipitación (700-3000 mm) en la zona ecológica del BTC (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Sin embargo, el modelo predictivo de *Calliandra* spp. es muy diferente de los obtenidos para *Caesalpinia* spp. y *P. dulce*, mismas que tuvieron PP alta en la zona más húmeda y baja del Bajío. Esto posiblemente se explica por el mayor número de registros botánicos para *Calliandra* spp. dentro del Bajío, mientras que para *Caesalpinia* spp. y *P. dulce*, la predicción se realizó expandiendo el área geográfica de registros botánicos. No obstante, la predicción para *Calliandra* spp. se consideró correcta ya que el área de distribución modelada coincide con la descripción de Martínez-Cruz y Téllez-Valdez (2004) para la Sierra de Santa Bárbara-Santa Rosa, que describe la presencia de matorral en su vertiente oriental, mientras que la occidental se caracteriza por bosque de encino.

Las demás leguminosas del primer grupo tuvieron mejor PP un poco más al sur; sobre todo *L. microphylla*, desde Dolores Hidalgo y hasta Amealco, por el occidente y el límite de altitud definido para el área de estudio por el occidente. *Prosopis* spp. se distribuye ampliamente en el país (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999), y es freatófita (Scott *et al.*, 2003). Rzedowski (1988) indica que *P. laevigata* es el mezquite típico del centro y sur de México, pero en sus afinidades ecológicas no se trata de una entidad uniforme. De acuerdo con el presente estudio, es posible que la PP de *P. laevigata* sea más específica que la de *S. polyantha* o *L. microphylla*. Las zonas con AP de estas tres especies es similar a la de *Caesalpinia* spp. y *P. dulce*, mientras que las de AP de *L. microphylla*, *P. laevigata* y *S. polyantha* corresponden a aquellas en que *Caesalpinia* spp. y *P. dulce* tienen mayor AP.

Para el segundo grupo de especies las zonas de PP media fueron mayores en el norte del Bajío. Para *E. polystachya* la zona de San Luis de la Paz y hasta la Sierra del Azafrán la PP fue baja e inclusive zonas de AP, mientras que para *L. leucocephala* esta misma zona fue de PP alta. El área de PP alta de *A. plurijuga* fue similar a la de las especies del primer grupo, mientras que la zona de PP alta para *E. polystachya* fue la menor. *Eysenhardtia polystachya* es escasa en algunas

describió la presencia de scrub vegetation on the eastern versant and oak forest on the western versant of Sierra de Santa Bárbara-Santa Rosa.

The other legumes of the first group had better PP a little farther south, particularly *L. microphylla*, from Dolores Hidalgo to Amealco on the west, and the elevation limit defined for the study area on the west. *Prosopis* spp. is widely distributed throughout the country (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999) and is a phreatophyte (Scott *et al.*, 2003). Likewise Rzedowski (1988) states that *P. laevigata* is the mesquite typical to central and southern México, but its ecological affinities do not refer to a uniform entity. According to results of our study, it is possible that PP of *P. laevigata* is more specific than PP of *S. polyantha* or *L. microphylla*. The PA zones of these three species are similar to those of *Caesalpinia* spp. and *P. dulce*, while the PA zones of *L. microphylla*, *P. laevigata*, and *S. polyantha* comprise the zones in which *Caesalpinia* spp. and *P. dulce* have a higher AP.

For the second group of species, the medium PP zones were wider in the north of the Bajío. For *E. polystachya*, PP was low, and even AP, in San Luis de la Paz up to Sierra del Azafrán, while for *L. leucocephala* PP was high in the same zone. The area of high PP of *A. plurijuga* was similar to that of the species of the first group, while the high PP zone for *E. polystachya* was the smallest. *Eysenhardtia polystachya* is scarce in some zones of El Bajío, possibly because of the disturbance caused by clearing for crops or for urban settlements. The species had been previously registered in areas around Querétaro, where the sites have now disappeared. This species is avidly consumed by livestock, and demand is high for traditional medicine; this may explain its scarcity in some areas.

For the second group of legumes, PP zones were coherent, since *A. plurijuga*, *E. polystachya*, *L. microphylla*, *P. laevigata*, and *S. polyantha* are associated in several ecological zones (Zamudio *et al.*, 1992; Rzedowski *et al.*, 1996). Although *L. leucocephala* is cultivated in El Bajío, there are no records of it, in spite of its extensive distribution in humid, arid and semi-arid tropical and subtropical zones (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). The distribution model for *L. leucocephala* should be considered with caution for northern Bajío, until botanical records of this area are obtained, or until there is sound information on its establishment and adaptation, given that low winter temperatures reduce its survival and growth. It may be possible to maintain potential distribution area of *L. leucocephala* in El Bajío only under agronomical care, considering that the PP probability of *P. dulce* was high, where that of *L. leucocephala* was low.

zonas del Bajío, tal vez por el disturbio, producto de la apertura de algunas zonas para cultivo o para la urbanización, pues algunas zonas de los alrededores de Querétaro donde había registros previos han desaparecido las localidades. Esta especie es altamente apetecible al ganado y tiene una fuerte demanda en la medicina tradicional lo cual, quizás, explique por qué esta especie es escasa en algunas zonas.

En el segundo grupo de leguminosas, las zonas de PP fueron coherentes, debido a que *A. plurijuga*, *E. polystachya*, *L. microphylla*, *P. laevigata* y *S. polyantha* se asocian en varias zonas ecológicas (Zamudio *et al.*, 1992; Rzedowski *et al.*, 1996). Aunque *L. leucocephala* se cultiva en el Bajío no hay registros de ella, no obstante su amplia distribución en zonas tropicales y subtropicales húmedas, áridas y semiáridas (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). El modelo de distribución para *L. leucocephala* debe considerarse con cautela para el norte del Bajío; hasta no tener registros botánicos de esa área, o información sobre su establecimiento y adaptación ya que las bajas temperaturas invernales reducen la supervivencia y crecimiento de *L. leucocephala*. El área de distribución potencial de *L. leucocephala* en el Bajío posiblemente sólo pueda mantenerse bajo cuidados agronómicos, considerando que la probabilidad de PP de *P. dulce* fue alta, donde la de *L. leucocephala* fue baja.

Acacia farnesiana y *P. laevigata* están ampliamente distribuidas en el matorral espinoso y son parte de la vegetación ruderal (Rzedowski, 1988). Sin embargo, la carta de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2002) no registra áreas de matorral espinoso (mezquital o huizachal) en el Bajío. El modelo para *A. farnesiana* mostró principalmente zonas de PP con media y baja probabilidad en un área total mayor que la pronosticada para *P. laevigata*; no obstante, las zonas de PP alta fueron menores para *A. farnesiana* en relación a *P. laevigata*. Como otras especies de *Acacia*, *A. farnesiana* es una especie nativa de México que sigue una distribución en laderas bajas cubiertas de matorral, cuyo crecimiento se favorece por el disturbio, y en ciertas circunstancias se transforman en invasoras y ponen en riesgo la conservación del resto de la flora nativa (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Su crecimiento arbustivo ramificado desde la base y su condición espinosa convierten a esta especie en poco atractiva para reforestación. Además, *P. laevigata* y diversas especies de *Acacia* son especies preferidas como hospederos por otras especies parásitas y epifitas como *Psittacanthus*, *Phoradendron* y *Tillandsia*, sobre todo en las áreas perturbadas en todo el Bajío. La infestación es amenazante porque las parásitas ya utilizan otras especies del BTC como hospederos. Los mapas de predicción sugieren que en las áreas de PP alta para *A. farnesiana* se complementan

Acacia farnesiana and *P. laevigata* are widely distributed in thorny scrub, and form part of ruderal vegetation (Rzedowski, 1988). However, the land use and vegetation map (INEGI, 2002) does not register areas of thorny scrub (mesquite or huizache) in El Bajío. The *A. farnesiana* model showed mainly PP zones of medium or low probability in a larger total area than that predicted for *P. laevigata*. Nevertheless, the high PP zones were smaller for *A. farnesiana* than those for *P. laevigata*. Like other species of *Acacia*, *A. farnesiana* is native to México, distributed on low hillsides covered with scrub vegetation, and its growth is favored by disturbance; under certain circumstances, it becomes invasive and endangers conservation of other native species of flora (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Its shrub-like growth from its base and its thorns make it unattractive for reforestation. In addition, *P. laevigata* and other *Acacia* species are preferred hosts of parasitic and epiphytic species such as *Psittacanthus*, *Phoradendron*, and *Tillandsia*, especially in perturbed areas throughout El Bajío. Infestation is a threat because the parasites use other TDF species as hosts. The prediction maps suggest that the high *A. farnesiana* PP areas are complemented also by high PP zones of the thornless species *L. microphylla*, *L. leucocephala*, *A. plurijuga*, *Calliandra* spp., *Erythrina* spp., and *E. polystachya*.

Inga spp. was the legume with lowest PP and highest PA. This is logical since it is distributed at altitudes below 1500 m and only in tropical and mesophyll forests (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Although *Inga* spp. can be associated with *L. leucocephala*, their PP maps are contrasting, indicating that the environmental variables used better describe the PP zone in El Bajío for *L. leucocephala* than that for *Inga* spp. The predominance of PA zones for *Inga* spp. indicates that the GARP model predicted a real, not artificial, absence due to the small number of registers (Anderson *et al.*, 2003).

Karwinskia humboldtiana was a species with high PP in a few areas, mainly in the southeastern part of El Bajío in the state of Querétaro, on the eastern versant of the Sierra de Santa Bárbara, and the area of San Francisco del Rincón and south of León. Health problems associated with ingesting fruits of this species concord with distribution in the states of Querétaro and Hidalgo, but not for other identified zones (Arreola *et al.*, 2000). Like *A. farnesiana*, the species is associated with TDF, but the results indicate that El Bajío is not a region where its distribution is favored.

The GARP model used showed areas potentially habitable by species as a function of their macro-distribution associated with environmental variables

también con zonas de PP alta de especies inermes *L. microphylla*, *L. leucocephala*, *A. plurijuga*, *Calliandra* spp., *Erythrina* spp. y *E. polystachya*.

Inga spp. fue la leguminosa con menor PP y mayor AP, este resultado es lógico, pues se distribuye a menos de 1500 m y sólo en el bosque tropical y el mesófilo (Vázquez-Yanes *et al.*, 1999). Aunque *Inga* spp. se puede asociar a *L. leucocephala*, los mapas de PP son contrastantes entre ellas, indicando que las variables ambientales usadas describen mejor la zona de PP en el Bajío para *L. leucocephala* en comparación con *Inga* spp. La predominancia de zonas de AP para *Inga* spp. indican que el modelo GARP predijo una ausencia real, y no una ausencia artificial debida a pocos registros (Anderson *et al.*, 2003).

Karwinskia humboldtiana fue una especie con PP alta en pocas áreas: principalmente en el sureste del Bajío en el Estado de Querétaro, en la vertiente oriental de la Sierra de Santa Bárbara y en la zona de San Francisco del Rincón y el sur de León. Los problemas de salud asociados con el consumo de frutos de la especie concuerdan con la distribución en los Estados de Querétaro e Hidalgo, pero no para las otras zonas identificadas (Arreola *et al.*, 2000). Al igual que *A. farnesiana*, son especies asociadas en el BTC, pero los resultados indican que el Bajío no es una región favorable para su distribución.

El modelo GARP usado mostró las áreas potencialmente habitables por las especies en función de su macrodistribución asociada a variables ambientales que caracterizan su hábitat. Si bien no existen registros botánicos de una especie, *P. dulce* para el centro del Bajío por ejemplo, el modelo generado sugiere que el medio ambiente provee condiciones de hábitat favorables. Esto se interpretó como áreas de distribución potencial donde la especie estaría presente en caso de una propagación exitosa. Debe destacarse que pocas especies ocupan todas las áreas de distribución potencial, ya sea porque se han extinguido localmente o porque la dispersión no ha sido exitosa (Anderson, 2003). Argáez *et al.* (2005) sugieren que las áreas modeladas con GARP son mucho más amplias de lo que son en realidad y deben reducirse en función de conocimiento previo u otro tipo de información. Ciertamente, el Bajío ha sufrido una gran transformación afectando drásticamente la distribución de especies, de tal manera que ahora se encuentran en forma fragmentada. Para el presente estudio, el mantener la predicción de las áreas potencialmente habitables en su extensión modelada resulta más útil para planificar los esfuerzos de reforestación. Por esta razón, en los modelos presentados no se excluyeron las áreas urbanas y otras formaciones vegetales presentes. De esta manera, los modelos generados también son valiosos para

that characterize their habitat. Even if no botanical records exist for a species such as *P. dulce* in central Bajío, the generated model suggests that the environment provides favorable habitat conditions. This was interpreted as areas of potential distribution where the species would be present in case of successful propagation. It should be highlighted that few species occupy all of the potential distribution areas, either because they have become locally extinct, or because dispersion has not been successful (Anderson, 2003). Argáez *et al.* (2005) suggest that the areas modeled with GARP are much larger than they are in reality and that they should be reduced in function of previous knowledge or other type of information. Certainly, El Bajío has undergone severe transformation, which has drastically affected species distribution to the degree that it is now fragmented. The predicted potential distribution is more useful for planning reforestation efforts if the entire modeled area is considered. For this reason, urban areas and other present plant formations were not excluded from the models presented. In this way, the generated models are also valuable for objectively planning plantation of native species in the urban zone.

There are several listings of plant species related to TDF (Zepeda, 1999), but geographic distribution of some shrubs is only partially known (Rzedowski, 1988). Thus, our study is the first to associate biophysical characteristics of the collection sites of the botanical records with potential distribution for this type of vegetation. Considering that 95% of tropical deciduous forest has disappeared in the El Bajío region (Peña and Neyra, 1998), future efforts must be focused on identification of non-dominant individuals in the areas of the dominant mesquite-huizache scrub vegetation and the agricultural mosaic where high probability of presence is predicted. These new registers would improve current models.

CONCLUSIONS

Models obtained with the GARP procedure are considered to be adequate, according to performance index values. For the models of some species the commission index was high, possibly because of the generalist characteristic of the species and the low correlation with environmental data used for the prediction. Deficient sampling in areas where the species is actually present also affected the commission index; this fact limits the usefulness of botanical collection records. Among the shrubs studied, *Pithecellobium dulce* and *Calliandra* spp. were the legumes with the best and largest area of potential distribution in El Bajío (more than 1 000 000 ha per species), the former in

planificar objetivamente la plantación de especies nativas en la zona urbana.

Hay diversos listados florísticos relacionados con el BTC y sus especies (Zepeda, 1999), pero la distribución geográfica de algunas arbustivas sólo se conoce en forma parcial (Rzedowski, 1988). Así, el presente trabajo es el primero en asociar las características biofísicas de los sitios de recolección de registros botánicos con su distribución potencial para este tipo de vegetación. Considerando que 95% de la selva baja caducifolia ha desaparecido en la región del Bajío (Peña y Neyra, 1998), un futuro esfuerzo de muestreo tendría que enfocarse a la identificación de individuos no dominantes en las áreas con alta probabilidad de presencia predicha dentro de la vegetación de matorral de mezquite-huizache y el mosaico agrícola predominantes. Estos nuevos registros mejorarían los presentes modelos.

CONCLUSIONES

Los modelos obtenidos con el procedimiento GARP se consideraron adecuados de acuerdo a los valores de los índices de desempeño. Para los modelos de algunas especies el valor del índice de comisión fue elevado, posiblemente por la característica generalista de la especie y baja correlación con los datos ambientales usados para la predicción. El muestreo deficiente en áreas donde la especie realmente habita posiblemente también influyó en el índice de comisión; esta es una limitante de los registros de colecciones botánicas. Entre las arbustivas estudiadas *Pithecellobium dulce* y *Calliandra* spp. fueron las leguminosas con mejor y mayor área de distribución potencial en el Bajío (superior a 1 000 000 ha por cada especie); la primera en la zona centro y sur-oeste; la segunda en la zona norte-occidental. Especies como *Prosopis laevigata*, *Albizia plurijuga* y *Leucaena leucocephala* se encuentran entre las especies con menor área con alta probabilidad de distribución potencial (500 000 - 600 000 ha). Las recomendaciones para siembra de las arbustivas estudiadas deben hacerse en relación al sitio particular, ya que la distribución potencial modelada no es uniforme espacialmente. La delimitación de los nichos fundamentales de las especies representa una herramienta útil para la planeación de estrategias de reforestación y reconversión agrícola. El éxito del uso de esta herramienta aún debe ser validado, preferentemente con el seguimiento de las plantaciones de las arbustivas estudiadas.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo es producto del proyecto CONACYT-CONAFOR 5134.

the central and southwestern zone and the latter in the northwestern zone. Species, such as *Prosopis laevigata*, *Albizia plurijuga* and *Leucaena leucocephala*, are found among the species with the smallest area, but with a high probability of potential distribution (500 000 - 600 000 ha). The recommendations for planting the shrubs studied should relate to a particular site since the modeled potential distribution is not spatially uniform. Delimitation of fundamental niches of the species is a useful tool for strategic planning of reforestation and agricultural reconversion. Successful use of this tool should still be validated, preferably by follow-up of the plantations of the studied shrubs.

—End of the English version—



LITERATURA CITADA

- Anderson, R. P. 2003. Real vs. artefactual absences in species distributions: tests for *Oryzomys albigularis* (Rodentia: Muridae) in Venezuela. *J. Biogeogr.* 30: 591-605.
- Anderson, R. P., M. Gómez-Laverde, and A. T. Peterson. 2002. Geographical distributions of spiny pocket mice in South America: insights from predictive models. *Global Ecol. Biogeogr.* 11: 131-141.
- Anderson, R. P., D. Lew, and A. T. Peterson. 2003. Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecol. Modell.* 162: 211-232.
- Argáez, J. A., J. A. Christen, M. Nakamura, and J. Soberón. 2005. Prediction of potential areas of species distributions based on presence-only data. *Environ. Ecol. Stat.* 12: 27-44.
- Arreola N., M. A., J. L. Vázquez, and C., M. E. González C. 2000. Geographical factors in the epidemiology of intoxication by *Karwinskia* (tullidora) in Mexico. *Cadernos de Saúde Pública.* 16: 255-260.
- Butzer, K. W., and E. K. Butzer. 1997. The natural vegetation of the Mexican Bajío: Archival documentation of a 16th century savanna environment. *Quat. Int.* 43/44: 161-172.
- Carranza G., E. 2005. Conocimiento actual de la flora y la diversidad vegetal del estado de Guanajuato, México. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Fascículos complementarios serie 21.* 23 p.
- CONAFOR (Consejo Nacional Forestal) 2001. Plan Estratégico Forestal para México 2000-2025. 195 p.
- Flores O., M. H., y R. Lindig C. 2005. La lista de nombres vulgares y botánicos de árboles y arbustos propicios para repoblar los bosques de la República de Fernando Altamirano y José Ramírez a más de 110 años de su publicación. *Rev. Mex. Biodiv.* 76: 11-35.
- García N., H., J. López B., R. Moreno S., M. de L. Villers R., y R. R. García D. 1999. Potencial agrícola del distrito de desarrollo rural 004, Celaya, Guanajuato, México. Una aplicación del enfoque de límites de transición gradual (fuzzy) utilizando SIG. *Inv. Geogr.* 38: 69-83.
- Granados R., R., T. Reyna T., J. Soria R., y Y. Fernández O. 2004. Aptitud agroclimática en la Mesa Central de Guanajuato, México. *Inv. Geogr.* 54: 24-35.
- Hernández A., P., C. H. Graham, L. L. Master, and D. L. Albert. 2006. The effect of sample size and species characteristics on

- performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*. 29: 773-785.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2002. Conjunto de datos vectoriales de cartas de uso de suelo y vegetación. Serie II. Escala 1:250 000. Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- Martínez-Cruz, J., y O. Téllez-Valdés. 2004. Listado florístico de la Sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 74: 31-49.
- Miranda, F., y E. Hernández, X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 28: 29-179.
- Niembro R., A. 2001. Las diásporas de los árboles y arbustos nativos de México: posibilidades y limitaciones de uso en programas de reforestación y desarrollo agroforestal. *Madera y Bosques* 7: 3-11.
- Peña J., A., y L. Neyra G. 1998. Amenazas a la biodiversidad. *In: La Diversidad Biológica de México: Estudio de País. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.* pp: 158-181.
- Pearson, R. G., C. J. Raxworthy, M. Nakamura, and A. T. Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *J. Biogeogr.* 34: 102-117.
- Peterson, A. T. 2006. Uses and requirements of ecological niche models and related distributional models. *Biodivers. Inform.* 3: 59-72.
- Rosas, I., R. Belmont, A. Armienta, and A. Baez. 1999. Arsenic concentrations in water, soil, milk and forage in Comarca Lagunera, México. *Wat Air Soil Poll.* 112: 133-149.
- Rzedowski, J. 1993. Diversity and origins of the phanerogamic flora of Mexico. *In: Ramamoorthy, T. P., R. Bye, A. Lot y J. Fa (eds). Biological Diversity of Mexico. Origins and Distribution.* Oxford University Press. N.Y. pp: 129-144.
- Rzedowski, J. 1988. Análisis de la distribución geográfica del complejo *Prosopis* (Leguminosae, Mimosoideae) en Norteamérica. *Acta Bot. Mex.* 3: 7-19.
- Rzedowski, J., G. Calderón de Rzedowski, y R. Galván. 1996. Nota sobre la vegetación y la flora del noreste del estado de Guanajuato. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Fascículo complementario XIV. Instituto de Ecología, A.C., Centro Regional del Bajío. Pátzcuaro, Michoacán. 22 p.
- Scott, R. L., C. Watts, J. Garatuzo-Payan, E. Edwards, D. C. Goodrich, D. Williams, W. J. and Shuttleworth. 2003. The understory and overstory partitioning of energy and water fluxes in an open canopy, semiarid woodland. *Agric. For. Meteorol.* 114: 127-139.
- Soberón, J., and A. T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodivers. Inform.* 2: 1-10.
- Stockwell, D. R. B., and A. T. Peterson. 2002. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecol. Model.* 148: 1-13.
- Terrones R., T. del R. L., C. González S., y S. A. Ríos R. 2006. Arbustivas Nativas de Uso Múltiple en Guanajuato. Libro Técnico No 1. INIFAP, Campo Experimental Bajío, Celaya, Gto., México. 216 p.
- Trejo V., I. 1999. El clima de la selva baja caducifolia en México. *Inv. Geogr.* 39: 40-52.
- Vázquez-Yanes, C., A. I. Batis M., M. I. Alcocer S., M. Gual D., y C. Sánchez D. 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO-Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. 311 p.
- Wohlgemuth, T. 1998. Modelling floristic species richness on a regional scale: a case study in Switzerland. *Biodivers. Conserv.* 7: 159-177.
- Zamudio R., S., J. Rzedowski, E. Carranza G., y G. Calderón de Rzedowski. 1992. La vegetación en el estado de Querétaro. Instituto de Ecología, Centro Regional del Bajío. Pátzcuaro, Michoacán. 92 p.
- Zepeda G., C. 1999. El bosque tropical caducifolio de la vertiente sur de la Sierra de Nanchititla, Estado de México, la composición y la afinidad geográfica de su flora. *Acta Bot. Mex.* 46: 29-55.