



ARTÍCULO / ARTICLE

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *Pinus herrerae* Martínez EN EL OCCIDENTE DEL ESTADO DE JALISCO

POTENCIAL DISTRIBUTION OF *Pinus herrerae* Martínez AT WESTERN JALISCO

Rosaura Ávila Coria¹, Raymundo Villavicencio García² y José Ariel Ruiz Corral³

RESUMEN

Con base en su endemismo y área natural restringida en el occidente de Jalisco, se delimitaron las zonas potenciales de distribución de *Pinus herrerae*. Se georreferenciaron 391 árboles que se tradujeron en el mismo número de accesiones de la especie para realizar una caracterización ambiental; se consideraron ocho variables climáticas interpoladas, además de nueve ambientales. Con esta información se utilizó el modelo MaxEnt para categorizar de manera probabilística su distribución potencial. El área de estudio se ubicó al oeste de la Sierra de Quila. La validación del modelo se determinó con la técnica *Receiver Operating Characteristic* (ROC) aplicada en modelos de distribución basados en algoritmos de solo presencia. Para determinar las variables climáticas y ambientales más importantes que influyen en la distribución de la especie se utilizó la prueba de *Jackknife*. De acuerdo a la curva operativa área bajo la curva (AUC) del ROC, ambas interpolaciones en las curvas de entrenamiento y de prueba se situaron lo más juntas posible, lo que significó alcanzar un ajuste en el modelo utilizando las variables climáticas de 0.959 y 0.958; por otra parte, con la interpolación de los datos climáticos junto con las variables ambientales se obtuvieron los valores más altos para los datos de entrenamiento (0.973) y de prueba (0.971). Se concluye que la distribución potencial de *P. herrerae* se favorece cuando se desarrolla sobre un suelo Cambisol húmico, un intervalo altitudinal de 1 985 a 2 227 m; un promedio anual de precipitación de 882 mm y temperatura media anual de 18 °C.

Palabras clave: Hábitat, máxima entropía, modelo de distribución de especies, nicho, variable ambiental, variable climática.

ABSTRACT

Based upon its endemism and natural restricted areas at west *Jalisco*, potential zones were delimited for the distribution of *Pinus herrerae*. 391 trees were geo-referred which were translated into the same number of accessions of the species to make an environmental description; eight climatic variables were interpolated variables, as well as nine of the environmental kind. With this information, the MaxEnt model was use to classify, in a probabilistic way, its potential distribution. The study area was located at the west of *Sierra de Quila*. The validation of the model was determined with the Receiver Operating Characteristic (ROC) technique, which is applied in distribution models based on algorithms of presence only. To determine the most important climate and environmental variables that influence the species distribution, the Jackknife test was used. According to the area under the operational curve (AUC) of ROC, both interpolations in the training and testing curves were placed the closest possible, which meant to reach a fit in the model by using 0.959 and 0.958 climate variables. On the other side, with the interpolation of the climatic data with the environmental variables, the highest values for the training (0.973) and testing data (0.971) values were obtained. It can be concluded that the potential distribution of *P. herrerae* is favored when it grows in a humic cambisol soil, at an altitudinal range from 1 985 to 2 227m, an average annual precipitation of 882 mm and an average annual temperature of 18 °C.

Key words: Habitat, maximum entropy, species distribution model, niche, environmental variable, climate variable.

Fecha de recepción/date of receipt: 11 de abril de 2014; Fecha de aceptación/ date of acceptance: 14 de julio de 2014.

¹ Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. Correo-e: roxiprec@hotmail.com

² Departamento de Producción Forestal, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara

³ CIR-Pacífico Centro, INIFAP

INTRODUCCIÓN

En Norteamérica se reconocen tres regiones con una elevada diversidad de especies de pinos: México, el estado de California y la parte sureste de los Estados Unidos de América. En las zonas de clima templado y semihúmedo, los pinares se asocian con los bosques del género *Quercus*, algunas veces con *Abies*, *Juniperus* o *Alnus*, debido a la similitud de los requerimientos ecológicos de estos géneros, con los que llega a ocupar nichos muy parecidos y a formar intrincados mosaicos y complejas interrelaciones sucesionales (Rzedowski, 1978). Los pinares desempeñan una función importante dentro de los bosques de las tierras altas de México (Farjon et al., 1997); son endémicos, abundantes y dominantes; su diversidad varía según la condición ambiental que requiera cada especie. De manera particular, a *Pinus herrerae* Martínez se le atribuye su desarrollo a la profundidad, calidad del suelo, una buena capacidad de drenaje y moderada fertilidad del sustrato (Farjon et al. 1997; Rueda et al. 2006).

Los trabajos que abordan la distribución de los pinos en México son escasos; destacan entre ellos las aportaciones de Martínez (1948), Dvorak et al. (2000), Herrera et al. (2005), Rzedowski (2006), Sánchez (2008) y Sánchez et al. (2008), quienes refieren sus obras en monografías y guías de campo (Rosas, 2008); otros autores coinciden en que no hay una gama de estudios que empleen modelos de distribución para el género *Pinus* y evalúen cuantitativamente las condiciones generales de las especies (Vela, 1980). Aquellos que incorporan modelos de distribución se han enfocado preferentemente, en relacionar la condición de hábitat y distribución de felinos y reptiles y en menor proporción, para taxa vegetales, en general y arbóreas, en particular. Margules y Sarkar (2009) hacen mención de que cada taxón tiene una disposición única dentro del espacio ambiental, determinada por su constitución genética y sus requerimientos fisiológicos, por lo que existe soporte teórico para usar variables ambientales en el modelado de la distribución de especies; la ubicación geográfica de una especie corresponde al conjunto de localidades donde ésta ha sido registrada, ya sea mediante la recolecta de especímenes o la observación directa o indirecta.

Existen dos alternativas para estimar los patrones de distribución geográfica de los taxa, ya bien sea intuitivamente o bien, al relacionar las localidades de los registros con variables mediante el uso de modelos empíricos predictivos de distribución potencial, como por ejemplo, BIOCLIM (Envolventes Bioclimáticas) (Bonet, 2007) u otros modelos estadísticos como MLJ (Modelado Lineal Generalizado, *Domain (Domain Modelling)*), GARP (*Genetic Algorithm for Rule.set Prediction*) y MAG (Modelado Aditivo Generalizado) o los métodos de aprendizaje cibernético, como MaxEnt (Máxima entropía). MaxEnt puede ser utilizado con datos de solo presencia, es decir, cuando existen registros de donde está presente el taxón, pero no se conoce si una "no presencia" es una "ausencia verdadera" o simplemente es resultado de que dicho taxón no fue buscado en el sitio (Margules y Sarkar, 2009).

INTRODUCTION

In North America three regions are acknowledged with a high species diversity of pines: Mexico, California state and the southeast of the United States of America. In the mild-weather or temperate and semihumid zones, pines are associated with the forests of the *Quercus* genus, sometimes with *Abies*, *Juniperus* or *Alnus*, from the similitude of the ecological demands of these genera, with which it occupies very similar niches and form intricate mosaics and complex successional interrelationships (Rzedowski, 1978). Pine forests play a major role within the forests of the highlands of Mexico (Farjon et al., 1997.), they are endemic, abundant and dominant; their diversity varies with the environmental conditions required by each species. In particular, the development *Pinus herrerae* Martínez is attributed to the depth and quality of soil, and its good drainage capacity and moderate fertility (Farjon et al., 1997; Rueda et al., 2006).

Papers addressing the distribution of pines in Mexico are scarce; prominent among them are the contributions of Martínez (1948), Dvorak et al. (2000), Herrera et al. (2005), Rzedowski (2006), Sánchez (2008) and Sánchez et al. (2008) who report their work in monographs and field guides (Rosas, 2008); other authors agree that there is a range of studies using models of distribution for the genus *Pinus* and quantitatively evaluate the general conditions of the species (Vela, 1980). Those that incorporate distribution models have been primarily focused on relating the condition of habitat and distribution of felines and reptiles and to a lesser extent, vegetable and tree species. Margules and Sarkar (2009) mentioned that each species has a unique provision in the environmental space, determined by their genetic makeup and their physiological requirements, so there is theoretical support for using environmental variables on species distribution modeling; the geographical location of a species is the set of locations where it has been recorded, either through the collection of specimens or by direct or indirect observation.

There are two alternatives to estimate the patterns of geographic distribution of taxa as either intuitively or by relating the locations of records using variables predictive empirical models of potential distribution, such as BIOCLIM (Bioclimatic Envelopes) (Bonet, 2007) or other statistical models as MLJ (Generalized Linear Modeling, Domain (Domain Modelling), GARP (Genetic Algorithm for Prediction Rule. set) and MAG (Generalized Additive Modeling) or cyber learning methods, such as MaxEnt (Maximum entropy). MaxEnt can be used with data of only presence, i.e., when the taxon records exist where it is present, but it is not known whether a "non-presence" is a "real absence" or is simply a result of that the taxon was not looked for in the site (Margules and Sarkar, 2009).

El modelado se ha definido como la generalización de una realidad que solo se conoce parcialmente, mediante simulación o formulación matemática. En los últimos años, las técnicas correspondientes cada vez se aplican más en campos diversos de la ecología, la evolución, la biogeografía y la biología de la conservación; se les han designado como modelos de nicho, modelos de idoneidad, modelos predictivos del hábitat o modelos de distribución de especies (García, 2008). Estos pueden ser binarios, en los que se otorga el valor de uno a las áreas idóneas y cero a las no idóneas, o continuos, según un intervalo de valores que clasifican el territorio (Benito de Pando y Peñas de Giles, 2007). Para el uso de los modelos de distribución de especies deben considerarse tres aspectos: 1) que se parte de datos conocidos sobre la distribución del organismo; 2) que son los datos con diferentes variables independientes que describen las condiciones ambientales se asocian matemática o estadísticamente; y 3) que se extrapola la relación al resto del área de estudio y se obtiene un mapa de probabilidad de presencia de la especie (García, 2008).

De acuerdo a Benito de Pando y Peñas de Giles (2007; 2007a), Contreras *et al.* (2010), Reguerin *et al.* (s/f) y Elith *et al.* (2006), el modelo MaxEnt es uno de los que mejor se ajusta a la distribución de especies, cuando se utilizan solo datos de presencia, en comparación con los anteriores señalados; el modelo puede ser analizado de manera estadística y gráfica, de tal manera que permite reconocer la distribución espacial potencial de la especie, debido al principio de máxima entropía que aplica para calcular la distribución geográfica más probable de una especie; es decir, el modelo estima la probabilidad de su ocurrencia sujeta a la condición de que el valor esperado de cada variable coincida con su media empírica.

Debido a la distribución de *P. herrerae*, restringida y disyunta a tres sistemas montañosos que confluyen en el occidente de México, por ser una especie endémica y estar considerada como vulnerable para el estado de Jalisco (Dvorak *et al.*, 2000), y debido a que es una de las especies de mayor aprovechamiento en la industria forestal, se llevó a cabo el presente estudio cuyo objetivo, fue conocer la distribución espacial potencial de *P. herrerae* en el área natural protegida Sierra de Quila del estado de Jalisco.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila (APFFSQ), que forma parte de la cadena montañosa del Eje Neovolcánico Transversal, y que está ubicada dentro de la subprovincia Sierras de Jalisco. El APFFSQ se sitúa entre los paralelos 20° 14' y 20° 21' N y 103° 56' y 104° 07' O; limita con los municipios Tecolotlán, Tenamaxtlán y San Martín Hidalgo en el estado de Jalisco. La sierra abarca una superficie de 14 168 ha y ocupa un intervalo altitudinal de 1 350 a 2 560 m (Conanp, 2010) (Figural).

Modeling has been defined as the generalization of a reality that is only partially known, by simulation or mathematical formulation. In recent years, the corresponding techniques are increasingly being applied in various fields of ecology, evolution, biogeography and conservation biology; they have been named as niche models, fitness models, predictive models of habitat or species distribution models (García, 2008). The expression of these models can be binary, giving a value of one to the best and zero to the not suitable, or continuous areas, according to a range of values that classify the territory (Benito de Peñas de Pando and Giles, 2007). For the use of species distribution models, three aspects should be considered: 1) that they part from known data about the distribution of the organism; 2) that the data with different independent variables describing the environmental conditions are associated mathematically or statistically, and 3) that the relationship is extrapolated to the rest of the study area and a map of probability of occurrence of the species is obtained (García, 2008).

According to Benito de Peñas de Pando and Giles (2007, 2007a), Contreras *et al.* (2010), Reguerin *et al.* (s/f) and Elith *et al.* (2006), the MaxEnt model is one that best fits the distribution of species when only presence data are used, compared to the previous mentioned; the model can be analyzed statistically and graphically, so that it allows to recognize the potential spatial distribution of the species, due to the principle of maximum entropy applied to calculate the most likely geographical distribution of a species; *i.e.*, the model estimates the probability of occurrence of the species subject to the condition that the expected value for each variable matches its empirical average.

Because of the distribution of *P. herrerae*, disjunct and restricted to three mountain ranges that converge in western Mexico, as it is an endemic species and regarded as vulnerable to the state of Jalisco (Dvorak *et al.*, 2000), and because it is one of the species of greatest use in the forest industry, this study was carried out with the aim to know the potential spatial distribution of *P. herrerae* in the Sierra de Quila Protection Area of Jalisco state.

MATERIALS AND METHODS

The study was performed in Sierra de Quila Flora and Wildlife Protection Area (APFFSQ, for its acronym in Spanish), which is part of the mountain chain of the Eje Neovolcánico Transversal, which is located within the Sierras de Jalisco subprovince. APFFSQ is located between 20° 14' and 20° 21' N, and 103° 56' and 104° 07' W; it borders Tecolotlán, Tenamaxtlán and San Martín Hidalgo municipalities in Jalisco state. It covers an area surface of 14 168 ha and altitudinal range from 1 350 to 2 560 m (Conanp, 2010) (Figure 1).

There are two prevailing types of climates in APFFSQ, the humid temperate with summer rains and the humid warm (García,

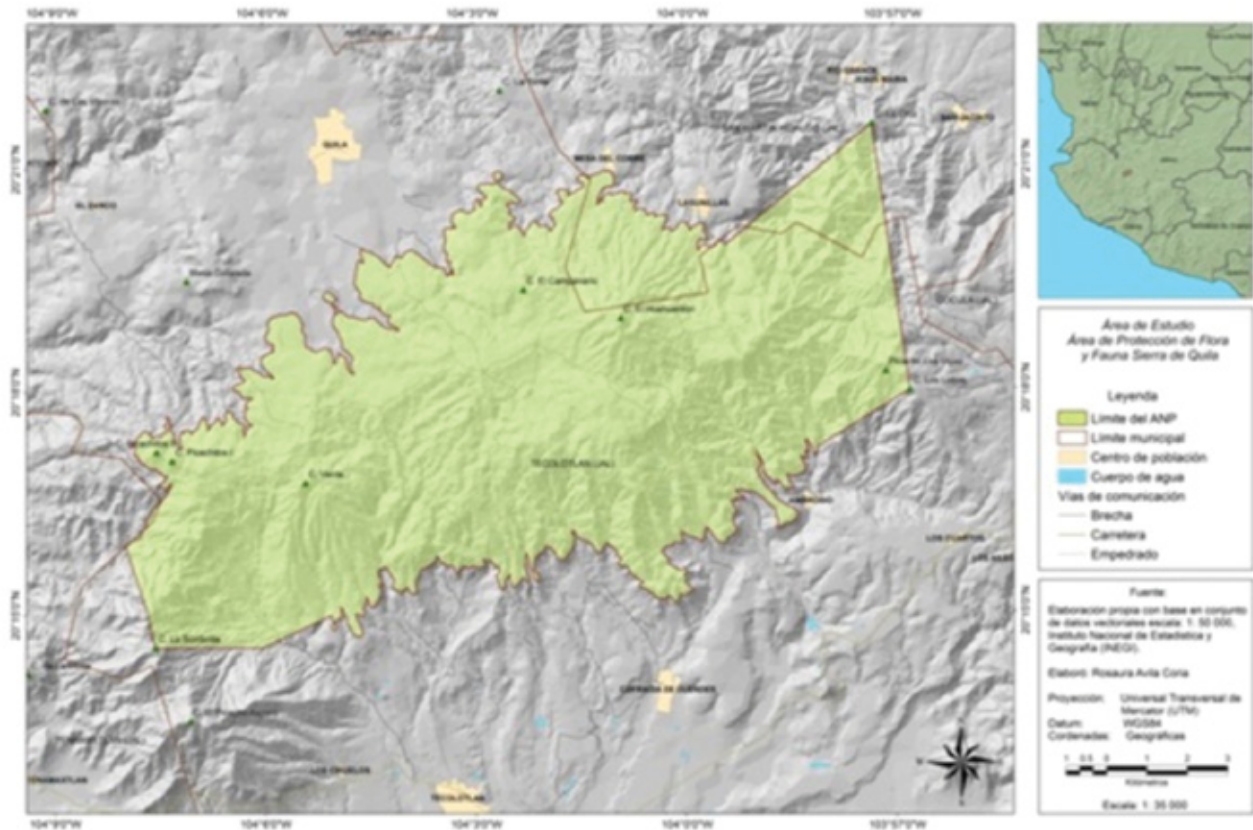


Figura 1. Localización del Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila en el estado de Jalisco.
 Figure 1. Sierra de Quila Flora and Wildlife Protection Area (APFFSQ) in Jalisco state.

En el APFFSQ prevalecen dos tipos de climas, el templado húmedo con lluvias en verano y el cálido húmedo (García, 1988), con una precipitación promedio anual de 882 mm (Ruíz *et al.*, 2003). Posee ocho subunidades de suelo descritos por la FAO/UNESCO: Cambisol eútrico, Cambisol húmico, Feozem háplico, Feozem luvico, Litosol, Luvisol crómico, Regosol eútrico y Vertisol pélico (Villavicencio *et al.*, 2005).

El sistema hidrológico de la Sierra de Quila provee de agua a dos cuencas del estado de Jalisco, a la cuenca de Ameca-Atenguillo (RH14-B) en la parte norte y en el lado sur a la cuenca Armería (RH16-B). Los arroyos que confluyen por la cara norte se juntan para formar al río Grande - río Ameca, mientras que los que se originan por la cara sur conforman el río Tecolotlán y el Atengo, mismos que posteriormente fluyen al río Ayuquila (CEAS, 2005). La diversidad de condiciones edáficas y climáticas de la sierra han favorecido la presencia de seis tipos de vegetación: el bosque de pino-encino, el bosque de encino, la selva baja caducifolia, el bosque espinoso, el bosque de galería y el bosque mesófilo de montaña (Guerrero y López, 1997). Los géneros mayormente representados son *Pinus* y *Quercus*, cuya mezcla ha generado otras tres condiciones de bosque mixto, en los que la dominancia de uno u otro género se manifiesta en el paisaje.

1988), with an annual average precipitation of 882 mm (Ruíz *et al.*, 2003). It has eight soil subunits as described by FAO/UNESCO: Eutric cambisol, humic cambisol, haplic Phaeozem, Luvic Phaeozem, Lithosol, Chromic luvisol, Eutric regosol and Pelic vertisol (Villavicencio *et al.*, 2005).

The hydrologic system of Sierra de Quila provides water to two basins of Jalisco state, to the Ameca-Atenguillo (RH14-B) to the north and to Armería (RH16-B) to the south. The streams get together to form the Grande-Ameca-river, while those which surge at the southern face make up Tecolotlán river and Atengo river, which, afterwards flow into the Ayuquila river (CEAS, 2005). The diversity of edaphic and climatic conditions of the mountain chain has favored the presence of six types of vegetation: the pine-oak forest, the oak forest, the low deciduous tropical forest, the thorn forest, the gallery forest and the middle mountain cloud forest (Guerrero and López, 1997). The best represented genera are *Pinus* and *Quercus*, whose mix has generated three other conditions of mixed forest, in which one or the other dominance becomes apparent in the landscape.

To determine the potential distribution of *P. herrerae* in Sierra de Quila NPA the MaxEnt 3.3.3 algorithm was used. A group of 391 geo-referred points of the species were input in the model

Para determinar la distribución potencial de *P. herrerae* en el ANP Sierra de Quila se utilizó el algoritmo MaxEnt 3.3.3. Al modelo se le incorporaron un conjunto de 391 puntos georreferidos de la especie como datos de entrada (Figura 2) y diversas capas en formato digital de variables climáticas interpoladas y variables ambientales. Los archivos raster de las variables climáticas provienen de la interpolación de datos de 116 estaciones meteorológicas para el período de 1961 a 2000 obtenidas para la elaboración cartográfica del sistema de información ambiental para el estado de Jalisco (Ruiz *et al.*, 2003); las capas temáticas utilizadas para este estudio fueron precipitación media anual, temperaturas mínima, media y máxima anual, evaporación media anual, humedad relativa anual y evapotranspiración media anual. Las variables ambientales en formato raster de textura, pendiente, exposición, área de radiación solar, rugosidad y altura, fueron elaboradas a partir de un modelo de elevación del terreno; además se digitalizaron las cartas geológica y edafológica escala 1:50 000 del INEGI (INEGI, 1999); asimismo se utilizó una carta de vegetación y uso del suelo y una carta del índice normalizado de vegetación elaboradas por Villavicencio (2004). Finalmente, para integrar la información que daría la caracterización ambiental del APFFSQ, todas las capas de las variables se

as entrance data (Figure 2) and several layers in digital format of interpolated climate and environmental variables. The raster archives of the climate variables come from the interpolation of the data from 116 meteorological stations for the 1961 to 2000 period, which were obtained for the maps of the environmental information system for Jalisco state (Ruiz *et al.*, 2003); the thematic layers used for this study are: annual average precipitation, minimum temperatures, annual average evaporation, relative annual humidity and annual average evapotranspiration. The environmental variables in raster format of texture, slope, hill side, solar radiation area, roughness and height, were made from a land elevation model; also, the geology and edaphology scale at 1 :50 000 (INEGI, 1999) were digitalized; also, a vegetation and land use map and a map of vegetation normalized index of Villavicencio (2004). Finally, to integrate the information that would reveal the environmental description of the APFFSQ, all the layers of the variables were cut by the limit of the protected area and were transformed into a raster format with a resolution of 20 m and were stored into the ASCII format.

According to Benito de Pando and Peñas de Giles (2007), the fit of the constants and the parameters of the model to

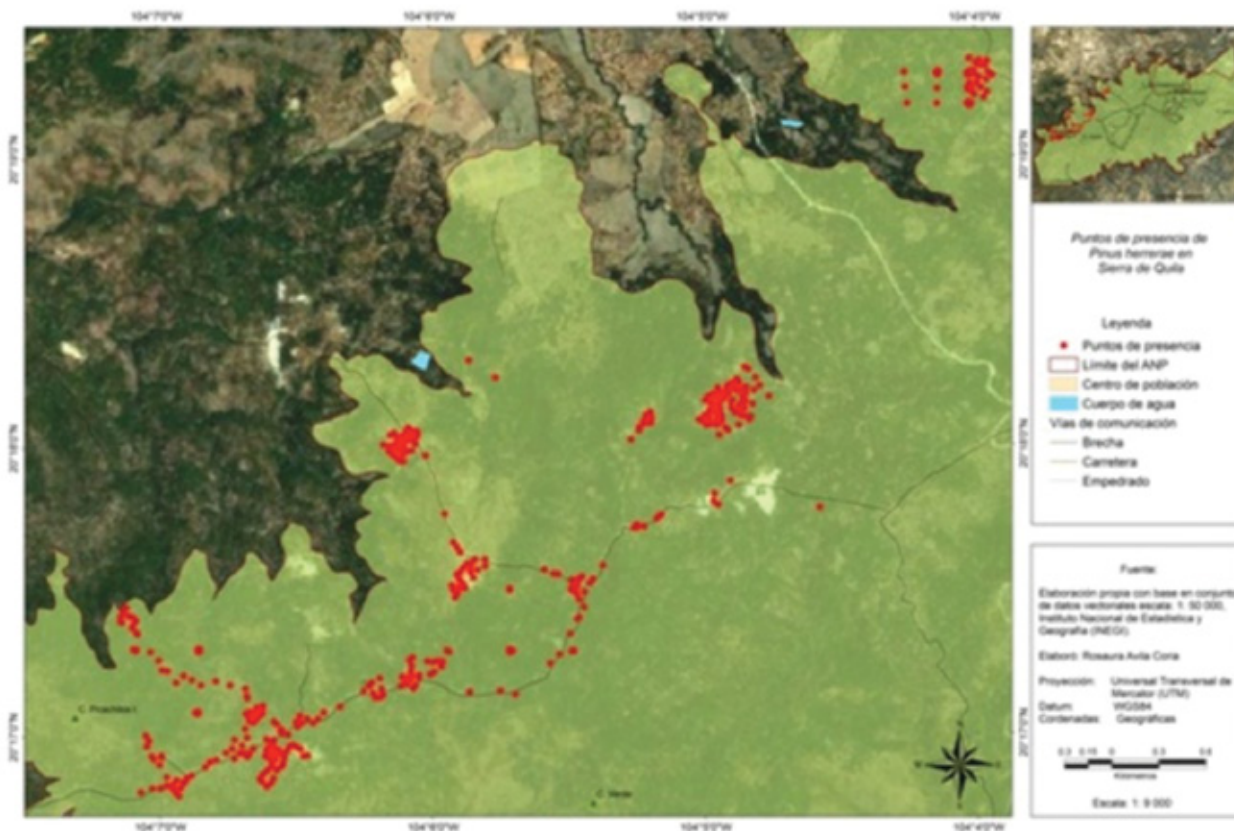


Figura 2. Localización geográfica de puntos de presencia en *Pinus herrerae* Martínez en el área natural protegida Sierra de Quila.

Figure 2. Geographic location of the points of *Pinus herrerae* Martínez presence in Sierra de Quila Natural Protected Area.

recortaron por el límite del área protegida y se transformaron en un formato raster con resolución de 20 m y se almacenaron en formato ASCII.

Según lo especifican Benito de Pando y Peñas de Giles (2007), el ajuste de los parámetros y constantes del modelo para incrementar la coherencia entre los datos de entrada y los resultados del modelo puede sustentarse en tres formatos: *Crudo (raw)*; el cual lo constituye el modelo exponencial de MaxEnt *per se*; *Acumulativo (accumulative)*, que corresponde a un registro crudo de r y es el porcentaje de la distribución de MaxEnt, cuyo valor crudo es al menos r . Lo anterior explica que lo que vale una celda es la suma de las probabilidades de todas ellas, que es más elevada que la celda problema; de esta forma, las que el modelo predice que presentan las mejores condiciones para la especie, tendrán valor acumulativo de 100, mientras que los próximos a 0 indican características inadecuadas para el desarrollo de la especie (García, 2008). El Logístico describe si c es el exponencial de la entropía de la distribución de MaxEnt, entonces el valor logístico correspondiente a un dato crudo de r es $c \cdot r / (1 + c \cdot r)$; se le denomina logística porque los valores crudos son una función exponencial de las variables ambientales.

La configuración del modelo MaxEnt para la distribución geográfica potencial de *P. herrerae* se realizó con la función logística, por ser la más sencilla de conceptualizar, ya que proporciona un estimado entre cero y uno de probabilidad de presencia, si se asume que el diseño de muestreo es tal que las localidades de presencia típicas tienen una probabilidad de alrededor de 0.5 de existir (Phillips *et al.*, s/f). El tipo de característica de las capas climáticas y ambientales puede ser continua y categórica. En la primera, las variables toman valores arbitrarios reales que corresponden a los medidos como la altitud, la precipitación anual y la temperatura máxima. Las categóricas toman solo un número limitado de valores discretos como el tipo de suelo o de vegetación. Al modelo se le configuraron las siguientes características: "Quadratic", "Product" y "Hinge" derivadas de variables continuas; esta última permite a MaxEnt la aproximación simple y sucinta de la respuesta verdadera de la especie con el medio ambiente (Phillips y Dudík, 2008).

En la calibración del modelo se especificaron 1 000 iteraciones y el límite de convergencia se fijó en 0.00001 (valor por defecto); cifras, según Phillips *et al.* (2006), son conservadoras y permiten garantizar la convergencia del algoritmo. La definición de estos parámetros del número de iteraciones y de convergencia también han sido empleados por Benito de Pando y Peñas de Giles (2007 y 2007a). El valor de regularización se determinó en 1.0 (valor por defecto), ya que al considerar regular el modelo con un valor menor a uno, se producirá una distribución de salida más localizada, la cual se ajusta estrechamente o de manera excesiva a los registros

increase the coherence among the entrance data and the results of the model can be sustained in three formats: Raw, which is the exponential MaxEnt model *per se*; Accumulative, which corresponds to a raw record and it is the distribution percent of MaxEnt, whose raw value is r at least. This explains that the value of a cell is the sum of the probabilities of all of them, which is higher than that of the problem; in this way, those predicted by the model which offer the best conditions for the species will have 100 as the accumulative number, while the closer to 0 means inappropriate conditions for the development of the species (García, 2008). The Logistic which describes if c is the exponential of the entropy of the MaxEnt distribution, and thus, the corresponding to a raw r datum is $c \cdot r / (1 + c \cdot r)$; it is named logistic because the raw values are an exponential function of the environmental variables.

The configuration of the MaxEnt modes for the potential geographic distribution of *P. herrerae* was made with the logistic function, as it is the simplest to conceptualize, since it provides an estimation between zero and one of presence probability, if it is assumed that the sampling design is such that the typical presence localities have a probability around 0.5 to exist (Phillips *et al.*, s/f). The type of characteristic of the climate and environmental layers can be continuous or categorical. In the first one, the variables take real arbitrary values that belong to the measured values such altitude, annual precipitation and the maximum temperature. The second ones only take discrete values such as the type of soil or vegetation. To the model were shaped the following characteristics: "Quadratic", "Product" and "Hinge", derived from the continuous variables; the latter allows MaxEnt the simple and succinct approach of the real response of the species to the environment (Phillips and Dudík, 2008).

In the calibration of the model 1 000 interactions were specified and the convergence limit was fixed in 0.00001 (value by defect); these numbers, according to Phillips *et al.* (2006) are conservative and allow to guarantee the convergence of the algorithm. The definition of these parameters, of the number of repetitions and of convergence have been used by Benito de Pando and Peñas de Giles (2007; 2007a). The value of regularization was determined in 1.0 (value by defect), since, while considering the model as regular with a value under one, it will produce an exit distribution better located which will fit closely or excessively to the records of presence; on the opposite, the regularization value over 1.0 will produce a broader distribution (Phillips *et al.*, s/f); in spite of this, Phillips *et al.* (2006) and Ortega and Townsend (2008) coincide in that this parameter is still a research item.

The quality of prediction of the distribution area of *P. herrerae* of the NPA was determined with the Receiver Operating Characteristic (ROC) assessment technique used in distribution models based in algorithms of only presence. The construction of the ROC curve is an interactive process applied to the limit

de presencia, por el contrario, un valor de regularización mayor a 1.0 producirá una distribución más extendida (Phillips *et al.*, s/f); no obstante lo anterior, Phillips *et al.* (2006) y Ortega y Townsend (2008) coinciden en que este parámetro es aún motivo de futura investigación.

La calidad de la predicción del área de distribución de *P. herrerae* en el ANP se determinó con la técnica de evaluación *Receiver Operating Characteristic* (ROC) utilizada en modelos de distribución basados en algoritmos de solo presencia. La construcción de la curva ROC es un proceso interactivo aplicado al umbral de idoneidad del modelo y se reclasifica en dos categorías para obtener un modelo binario, en el que los valores del modelo original inferiores al umbral indican ausencia y los valores iguales o superiores al mismo, presencia (Phillips *et al.*, s/f); a partir de ellos se calcula la fracción de verdaderos positivos (sensibilidad) en el eje xy la fracción de aleatorios positivos (especificidad) en el eje y, reflejados en el área bajo la curva (AUC), la cual supone que para un punto de presencia y uno aleatorio seleccionados al azar, la probabilidad de que el valor de idoneidad previsto por el modelo para el punto de presencia sea mayor que el previsto para el punto aleatorio. La curva AUC es una medida directa que muestra la capacidad de discriminación del modelo con valores que fluctúan de cero a uno, en los que 0.5 indica que el ajuste del mismo no es mejor que el obtenido al azar, y próximos a uno cuando existe un buen ajuste con los datos (Benito de Pando y Peñas de Giles, 2007); es decir, cuanto más próximo a uno, los datos de entrenamiento y de prueba, el modelo es más correcto (García, 2008).

Las variables climáticas y ambientales más importantes asociadas a la especie se determinaron con la prueba de *Jackknife*. Los puntos geográficos de registro de la especie se dividieron al 50 % para las accesiones de entrenamiento y 50 % para las accesiones de prueba; el propósito de esta distribución es garantizar una significancia estadística y equitativa para el modelo (Hurtado, 2007). Las accesiones de entrenamiento se usaron para correrlo y los datos de prueba se utilizaron para validarlo. La prueba de *Jackknife* crea un gráfico al usar cada variable de manera aislada y adicionalmente genera otro con todas las variables, en donde indica la ganancia de cada una de estas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización ambiental del APFFSQ se determinó con ocho variables climáticas y nueve variables ambientales, mismas que se incluyen en el modelo, el cual identifica a las celdas con la condición climática y ambiental que se atribuye al desarrollo, a la presencia y posible distribución potencial de la especie de manera espacial. El Cuadro 1 muestra los valores mínimos, medios y máximos de las variables climáticas y ambientales.

de suitability of the model and is reclassified in two categories to get a binary, in which the values of the original model under the limit refer to absence, and the values equal or over the limit mean presence (Phillips *et al.*, s/f); from these numbers is calculated the fraction of the positive reals (sensitivity) in the xy axis, the fraction of the positive randoms (specificity) in the y axis, which are reflected in the area under the curve (AUC), which supposes that for a presence point and one at random selected at random, the probability that the foreseen value of suitability for the model for the presence point is higher that the foreseen for the random point. The AUC curve is a direct measure that shows the ability of discrimination of the model with values that vary from zero to one, in which 0.5 means that its fit is no better that the one obtained at random, and close to one when there is a good fit of the data (Benito de Pando and Peñas de Giles, 2007); that is, as the training data and those of testing get closer to one, the model is more accurate (García, 2008).

The most important climate and environmental variables linked to the species were determined by the Jackknife test. The geographic points of the species record were divided as 50 % for the training accessions and 50 % for the testing accessions; the aim of this distribution is to guarantee a statistical and equitable significance for the model (Hurtado, 2007). The training accessions were used to run it and the testing data were used to validate it. The Jackknife test creates a graphic when using each variable in an isolated way and additionally generates another with all the variables, where it indicates gain for each of them.

RESULTS AND DISCUSSION

The environmental description of APFFSQ was determined with eight climate and nine environmental variables, that are included in the model, which identifies, in a spatial way, the cells with the climate and environment that is attributed to the development, presence and possible potential distribution of the species. In Table 1 are expressed the minimal, maximum values of the climate and environmental variables.

The potential distribution map of *P. herrerae* was obtained by modeling two assays. The first one used only climate variables (1 vc assay) and the second one included climate and environmental variables (2 vca assay). According to Benito de Pando and Peñas de Giles (2007), to determine the prediction of the potential distribution area of any species, the Receiver Operating Characteristic (ROC) is admitted as a standard method to assess the accuracy of the predictive distribution models and provides a simple measure of the model's behavior, with the calculus of the area under the curve (AUC). In this context, the result of it for the 1 vc and 2 vca assays are shown in Figure 3; those corresponding to AUC for the training data (red line) and for the testing data (blue line) describe a similar fit, oriented to the left upper part; its interpretation is based in the fact that, while both curves are as close to each other

Cuadro 1. Conjunto de variables climáticas y valores mínimos, máximos y promedio que caracterizan el área natural protegida Sierra de Quila.

Table 1. Group of climate variables and minimum, maximum and average values that describe Sierra de Quila Natural Protected Area.

Variabes climáticas	Valor mínimo	Valor medio	Valor máximo	Desviación estándar
Temperatura mínima anual (°C)	7.7	9.6	11.6	0.78
Temperatura media anual (°C)	16.4	18.4	20.6	0.83
Temperatura máxima anual (°C)	24.9	27.1	29.5	0.9
Precipitación pluvial media anual (mm)	837.6	881.8	914.2	16
Humedad relativa media anual (%)	60.7	64.4	67.4	1.32
Área de radiación solar (WH m ⁻²)	591 932.62	1 422 337.1	2 225 516.25	144 935.4
Evapotranspiración media anual (mm)	1 333.7	1 418	1 502.9	34.5
Evaporación media anual (mm)	1 667.2	1 772.6	1 878.6	43.1
Variables ambientales				
Altura (msnm)	1 345	1 942.4	2 558.7	226.9
Exposición	-	-	-	-
Pendiente (%)	0	33	259	21.5
Rugosidad	0	171	254	39
Índice normalizado de vegetación (valor de celda)	0	128	256	-
Geología	-	-	-	-
Suelo	-	-	-	-
Textura	-	-	-	-
Vegetación	-	-	-	-

La exposición, geología, suelo, textura y vegetación son variables cualitativas. °C= grados centígrados; mm= milímetros; %= porcentual; WH m⁻²= vatio hora por metro cuadrado; msnm= metros sobre el nivel del mar.

The hillside, geology, soil, texture and vegetation are qualitative variables; °C= centigrade degrees; mm= millimeters; %= percent; WH m⁻²= hour by square meter ratio; msnm= meters above sea level (masl).

El mapa de distribución potencial de *P. herrerae* se obtuvo mediante la modelación de dos ensayos. El primero utilizó solo las variables climáticas (ensayo 1 vc) y el segundo incluyó variables climáticas y ambientales (ensayo 2 vca). De acuerdo con Benito de Pando y Peñas de Giles (2007), la determinación de la predicción del área de distribución potencial de cualquier especie mediante la técnica *Receiver Operating Characteristic* (ROC) es aceptada como un método estándar para evaluar la exactitud de los modelos de distribución predictiva y proporciona una medida simple del desempeño del modelo, con el cálculo del área bajo la curva (AUC). En este contexto, el resultado de ella para los ensayos 1 vc y 2 vca se muestran en la Figura 3; las correspondientes al AUC para los datos de entrenamiento (línea roja) y para datos de prueba (línea azul) describen un ajuste similar, orientado a la parte superior izquierda; su interpretación se basa en que, mientras ambas curvas se sitúen lo más juntas posible, mejor es el ajuste del modelo, lo que indicaría que no habría ningún error de omisión (la especie si está pero se predice ausente), 100 % de sensibilidad y ningún error de comisión (la especie puede estar ahí, sobre predicción) 100 % de especificidad.

as possible, the fit of the model is even better, which would mean that there would be no omission error at all (the species is present but it is predicted as absent), 100 % of sensibility and no commission error (the species might be there, according to prediction), 100 % of specificity.

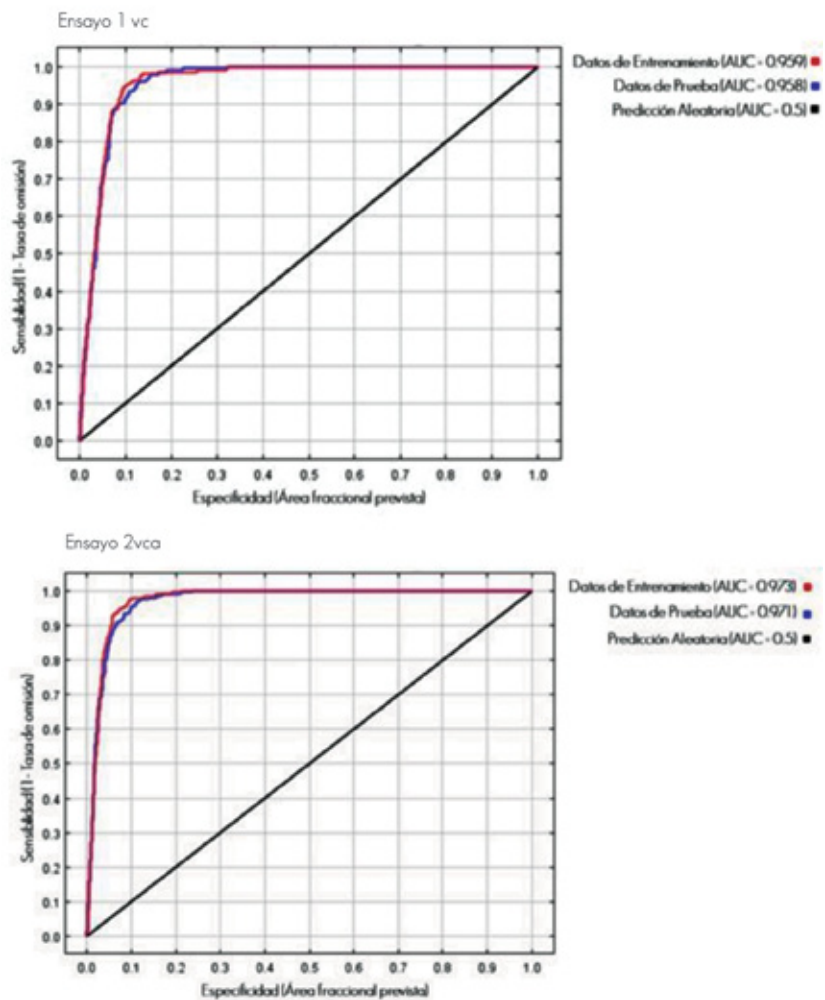
The AUC values of both assays were over 0.95, a number that suggests a good fit of the models; however, the best was from the vca assay 2, as it achieved the higher values under the curve for the training and testing data (0.973 and 0.971), in addition to the fact that this assay defines in a spatial way a better distribution of the species according to what was observed in the field. Contreras et al. (2010) obtained AUC values rather high (0.997) for the *Taxus globosa* Schlecht. distribution in Mexico; therefore, the authors concluded having found accurate results with the use of MaxEnt. Kumar and Stohlgren (2009) applied MaxEnt as well to model the



Los valores AUC de ambos ensayos fueron superiores a 0.95, cifra que interpreta un buen ajuste de los modelos; sin embargo, el mejor lo presentó el ensayo 2 vca por lograr los valores más altos del área bajo la curva para los datos de entrenamiento y de prueba (0.973 y 0.971), además de que este ensayo define de manera espacial una mejor distribución de la especie según lo observado en campo. Contreras *et al.* (2010) obtuvieron valores de AUC altos (0.997) para la distribución de *Taxus globosa* Schlecht. en México, por lo que los autores concluyen haber alcanzado resultados precisos con el uso de MaxEnt. Kumar y Stohlgren (2009) también aplicaron MaxEnt para modelar el hábitat potencial para *Canacomyrica monticola* Guillaumin, una especie arbórea en peligro de extinción y amenazada en Nueva Caledonia en el Océano Pacífico occidental; el modelo resultante se definió con valores altos de sensibilidad (0.82) y de especificidad (0.91); las variables que más influyeron para el hábitat potencial de la especie fueron la temperatura y la precipitación.

potential habitat of *Canacomyrica monticola* Guillaumin, a tree threatened and at risk of extinction species of New Caledonia in the western Pacific Ocean; the result of the model was defined with high sensibility (0.82) and specificity (0.91); the variables that had the greatest influence upon the potential habitat of the species were temperature and precipitation.

The most important variables related to the species were determined by the Jackknife test; the model assigns the increment to the variables, which results in a graphic (Figure 4), where the gain or contribution of each of them is shown; for example, the intense blue bar refers to the option when the variable is only used in an isolated way or by itself; the pale blue bars indicate the reduction of gain when they are excluded or omitted, and finally, the red bar creates a model in which all the variables are used. Graphics help to identify which are the variables that influence and determine the distribution of the species.



Ensayo 1 vc = 1 vc Assay; Ensayo 2 vca = 2 vca Assay.
 Figura 3. Curva operacional ROC para los ensayos 1 vc y 2 vca.
 Figure 3. ROC operational curve for the 1 vc and 2 vca assays.

Las variables más importantes asociadas a la especie fueron determinadas mediante la prueba de *Jackknife*; el modelo asigna el incremento a las variables, lo que da como resultado un gráfico (Figura 4), donde se muestra la ganancia o contribución de cada una de estas; por ejemplo, la barra en color azul rey corresponde a la opción de cuando solo se utiliza la variable de manera aislada o por sí sola; las barras en color azul claro señalan la disminución de la ganancia cuando se excluye o se omite y, finalmente la barra roja crea un modelo en el que se usan todas la variables. Los gráficos ayudan a identificar cuáles son las variables que influyen y determinan la distribución de la especie.

In the graphics the variables of solar radiation area (1 vc assay) and hill side (2 vca assay) were identified as those that are used by themselves and do not get any gain, and thus, are not dispensable to determine the *P. herrerae* distribution; while the maximum temperature variables (1 vc assay) and soil (2 vca assay) when they are used by themselves, a higher value is obtained that allows a good data fit, from which it results that they are the most useful to determine the distribution of the species. On the other hand, those which lower the gain when they are omitted are the solar radiation area and precipitation.

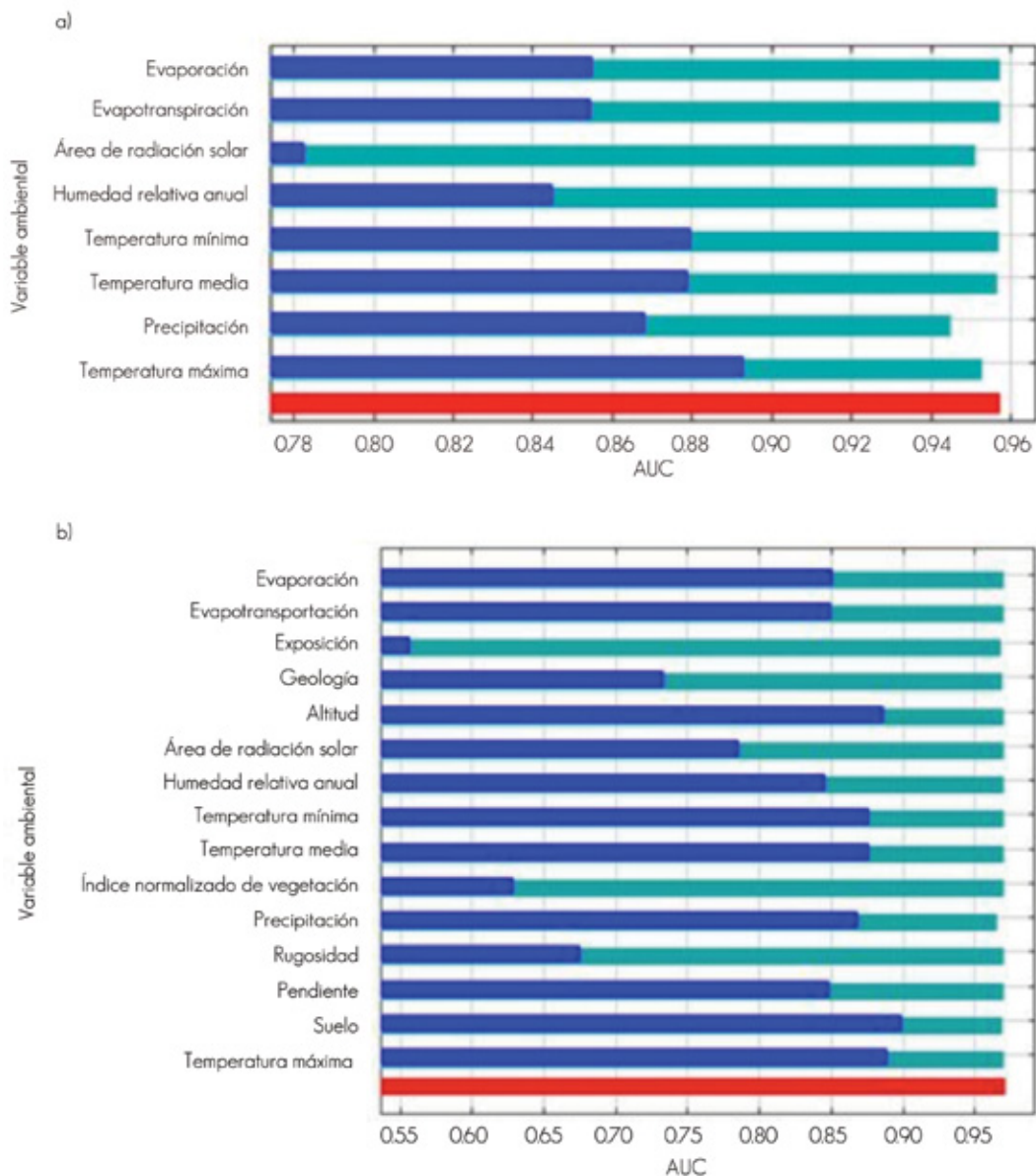


Figura 4. Contribución de las variables climáticas del ensayo 1 vc (a) y de las variables climáticas y ambientales del ensayo 2 vca (b).

Figure 4. Contribution of the climate variables of the 1 vc assay (a) and of the climate and environmental variables of the 2 vca (b).

En los gráficos se identifican las variables de área de radiación solar (ensayo 1 vc) y exposición (ensayo 2 vca) como las que se usan por sí solas y no obtienen ganancia, por lo tanto, no resultan ser prescindibles para definir la distribución de *P. herrerae*; mientras que las variables temperatura máxima (ensayo 1 vc) y suelo (ensayo 2 vca) cuando se utilizan por sí solas, se obtiene un valor más alto que permite un buen ajuste a los datos, de lo que resulta que son las más útiles para determinar la distribución de la especie. Por otra parte, las que disminuyen la ganancia cuando se omiten son el área de radiación solar y la precipitación.

De acuerdo a la prueba de *Jackknife*, las variables que influyen en la distribución de la especie son el suelo Cambisol húmico, de textura fina y medianamente permeable; la temperatura media anual de 18 °C; la altitud, de 1 985 m a 2 227 m y la precipitación media anual de 882 mm y máxima de 914 mm. Guerrero y López (1997) y Madrigal (1995, citado en Rueda *et al.*, 2006) coinciden con el intervalo altitudinal para la especie; asimismo, describen otros factores que influyen en su desarrollo como situarse en zonas con un régimen de precipitación entre 500 mm y 1 700 mm y crecer entre un intervalo térmico entre -3 °C hasta una máxima de 42 °C. Por otro lado, Dvorak *et al.* (2000) señalan que a *P. herrerae* se le encuentra entre los 1 200 y los 2 600 m, con una respuesta óptima entre 1 800 y 2 400 m; otra de las características asociadas a su presencia es el buen drenaje del suelo. Según Escalante *et al.* (2003), no solo las variables ambientales determinan la permanencia de una especie en un lugar, sino que además las explicaciones históricas espaciales son relevantes; es decir, el patrón biogeográfico y evolutivo de la especie.

Con el programa Bioclim, Rosas (2008) modeló la distribución del género *Pinus* en la subcuenca de Tequantepec-Apulco-México y obtuvo modelos de distribución ecogeográfica para las diferentes especies de pinos. A partir de los registros de colecta, este algoritmo definió un dominio central en función de los valores mínimos y máximos de 19 variables climáticas; los modelos para *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* Shaw, *P. hartwegii* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. patula* Schltdl. et Cham., *P. pseudostrobus* Lindl. y *P. teocote* Schiede ex Schltdl. mostraron una amplia afinidad climática a las condiciones existentes en la subcuenca; *P. cembroides* Zucc. y *P. leiophylla* Schltdl. et Cham. revelaron áreas poco favorables para su desarrollo; *P. maximinoi* H. E. Moore. y *P. oocarpa* Schiede var. *oocarpa* manifestaron la preferencia por un intervalo altitudinal entre 1 600 y 2 300 m y en patrón de exposición de noroeste a sureste, en la que impera un ambiente cálido y húmedo.

Cabe destacar que *P. hartwegii* registró adaptabilidad a cotas altitudinales mayores e intervalos de temperatura baja; por su parte, *P. cembroides* se asocia a los registros más bajos de precipitación, mientras que *P. maximinoi* y *P. oocarpa* Schiede a las temperaturas y precipitaciones más altas.

According to Jackknife's test, the variables that affect the distribution of the species are the humic cambisol soil, fine textured and mildly permeable; annual average temperature of 18 °C; altitude, from 1 985 to 2 227 m and the annual average precipitation of 882 mm with a maximum of 914 mm. Guerrero and López (1997) and Madrigal (1995, quoted by Rueda *et al.*, 2006), coincide with an altitudinal interval for the distribution of the species; also, they described other factors that have an influence in its development, such as growing in places with a rain regime between 500 mm and 1 700 mm and developing within a thermic interval from -3 °C up to a maximum of 42 °C. On the other side, Dvorak *et al.* (2000) pointed out that *P. herrerae* distributes on an altitudinal range from 1 200 to 2 600 m, with an optimal response between 1 800 and 2 400 m; another of the conditions related to its distribution is the good soil drainage. According to Escalante *et al.* (2003), not only the environmental variables determine the permanence of a species in a place, but that also the historical spatial explanations are relevant, that is, when the biogeographical and evolutionary pattern of the species is considered.

With the Bioclim program, Rosas (2008) modelled the genus *Pinus* ecogeographic distribution in the *Tequantepec-Apulco-México* sub-basin and got distribution models for the different pine species. From collection records, this algorithm defined a central domain from the minimum and maximum values of 19 climatic variables; the models for *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* Shaw, *P. hartwegii* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. patula* Schltdl. et Cham., *P. pseudostrobus* Lindl. and *P. teocote* Schiede ex Schltdl. showed a broad climate affinity for the prevailing conditions in the sub-basin; *P. cembroides* Zucc. and *P. leiophylla* Schltdl. et Cham. revealed poorly favorable areas for their growth; *P. maximinoi* H. E. Moore. and *P. oocarpa* Schiede var. *oocarpa* showed the preference for an altitudinal interval between 1 600 and 2 300 m and in a hillside exposure pattern from northwest to southwest, in which a warm and humid environment prevails.

It is worth noting that *P. hartwegii* registered adaptability to higher altitudes and low temperature intervals; *P. cembroides* is associated to the lowest precipitation records, while *P. maximinoi* and *P. oocarpa* Schiede to higher temperatures and precipitations.

Télez *et al.* (2005) made a similar study, in which they used bioclimatic modelling as a tool for the forest management of four pine species of economic value for Mexico; of the 19 climate assessed variables those who had the greatest effect upon their distribution for the four species were the maximum and minimum values of temperature and precipitation. The intervals of the variables by species were for *Pinus arizonica* Engelm. a minimal temperature of 8.7 °C and a maximum of 18.8 °C with a minimum precipitation of 280 mm and a maximum of 1 236 mm; for *P. devoniana* Lindl. the minimum and maximum temperature and precipitation values were 9.7 - 23.8 °C and 400 - 2 071 mm.

Un estudio similar lo realizaron Téllez *et al.* (2005) quienes utilizaron el modelado bioclimático como herramienta para el manejo forestal de cuatro especies de pino de valor económico para México; de las 19 variables climáticas evaluadas, destacaron como las de mayor influencia para su distribución para las cuatro especies, los valores mínimos y máximos de la temperatura y la precipitación. Los intervalos de las variables por especie fueron para *Pinus arizonica* Engelm. una temperatura mínima de 8.7 °C y una máxima de 18.8 °C con una precipitación mínima de 280 mm y una máxima de 236 mm; para *P. devoniana* Lindley los valores mínimos y máximos respectivos de temperatura y precipitación fueron de 9.7 - 23.8 °C y de 400 - 2 071 mm; para *P. durangensis* Ehren. de 8.8 - 22.8 °C y de 412 - 1 270 mm, y para *P. pseudostrobus* fueron de 6 - 23.3 °C y de 400 - 2 279 mm.

Maximiliano *et al.* (2013) utilizaron el programa MaxEnt para determinar la distribución potencial de nueve especies forestales de interés económico y ecológico en la Península de Yucatán, México; los valores obtenidos de la AUC fueron superiores a 0.8 para todas las especies, por consiguiente, el ajuste de los modelos para todas las especies resultó aceptable. Entre las especies difieren algunas de las variables que influyen en su distribución, por ejemplo, aquellas de amplia extensión como *Dendropanax arboreus* (L.) Decne. & Planch., *Swietenia macrophylla* King y *Vitex gaumeri* Greenm. coinciden en que la relación de absorción de sodio, la temperatura media del trimestre más húmedo y la precipitación promedio anual (1 200 mm) son las variables que explican en más de 45 % su distribución; por el contrario, para aquellas de distribución baja como *Avicennia germinans* (L.) Stearn., *Calophyllum brasiliense* Cambess. y *Cedrela odorata* L. las variables que propician el ambiente natural idóneo para su crecimiento fueron distintas para cada una. Aguirre y Duivenvoorden (2010) modelaron por medio de MaxEnt la distribución de 56 especies del género *Pinus* en México con el objetivo de evaluar si las especies de pino clasificadas por IUCN (2014) como amenazadas tienen una buena representación en las áreas protegidas de México; 70 % de las especies tienen menos de 10 % de su distribución modelada (para *Pinus herrerae*, 8 %). Clasificadas como amenazadas tienen una distribución más estrecha, ocurren a menores elevaciones y están menos representadas en las áreas protegidas en comparación con las otras especies. Los autores concluyen que la red actual de áreas protegidas no protege adecuadamente el género *Pinus* y que los esfuerzos de conservación deben estar dirigidos a especies con distribución reducida y de desarrollo a bajas altitudes, en particular, tales como *Pinus attenuata* Lemmon, *P. cembroides* subsp. *cembroides* var. *lagunae* Robert-Passini, *P. radiata* D. Don var. *binnata* (Engelm.) Lemmon, *P. rzedowskii* Madrigal & Caball and *P. muricata* D. Don.

Maximiliano *et al.* (2013) used the MaxEnt program to determine the potential distribution of nine forest species of economic and ecological interest in the Yucatán Peninsula, Mexico; the AUC values obtained were greater than 0.8 for all species, and therefore, the fit of the models for all species was acceptable. Among the species, some of the variables that influence their distribution differ, such as those of large area like *Dendropanax arboreus* (L.) Decne. & Planch., *Swietenia macrophylla* King. and *Vitex gaumeri* Greenm. which coincide in the sodium absorption ratio, mean temperature of the wettest quarter, and the average annual rainfall (1 200 mm), which are the variables that explain over 45 % of the distribution; on the other hand, for those of low distribution as *Avicennia germinans* (L.) Stearn., *Calophyllum brasiliense* Cambess, *Cedrela odorata* L. and variables that promote the ideal natural environment for growth were different for each one. Aguirre and Duivenvoorden (2010) modeled via MaxEnt the distribution of 56 species of the genus *Pinus* in Mexico in order to assess whether the pine species listed by IUCN (2014) as threatened are well represented in protected areas of Mexico; 70 % of the species have less than 10 % of their protected modeled distribution (*Pinus herrerae*, 8 %). The pine species classified as threatened have a narrower distribution, occurring at lower elevations and less represented in protected areas compared to other species. The authors conclude that the current network of protected areas does not adequately protect the genus *Pinus* and conservation efforts should be targeted to species with reduced development and distribution particularly at low altitudes, such as *Pinus attenuata* Lemmon, *P. cembroides* subsp. *cembroides* var. *lagunae* Robert-Passini, *P. radiata* D. Don var. *binnata* (Engelm.) Lemmon, *P. rzedowskii* Madrigal & Caball and *P. muricata* D. Don.

The final maps of potential geographic distribution of *P. herrerae* in Sierra de Quila were the result of the combination of the variables of each one of the assays (va and vca); the images show an estimate from zero to one, that is, a relative value from 0 to 100 of probability that the species is present. Figure 5 shows in a general way, the suitability zones; the areas of greatest value can be observed to the west and northeast; the warmer tones (red-orange-yellow) mean a higher probability of the species, and, on the opposite, the colder tones (green-blue) are interpreted as less susceptible areas for their presence, and those without any color suggest they are non-existent.

Figura 6 shows the limit that partially defines the surface of the potential distribution of *P. herrerae* in correlation with the parameters of the 2 vca assay; the potential distribution area considers from 0.5 of probability; it is observed a restricted distribution with some remaining areas. This area has been calculated in 606 ha, and is assessed as suitable for the potential distribution of the species within the protected area.



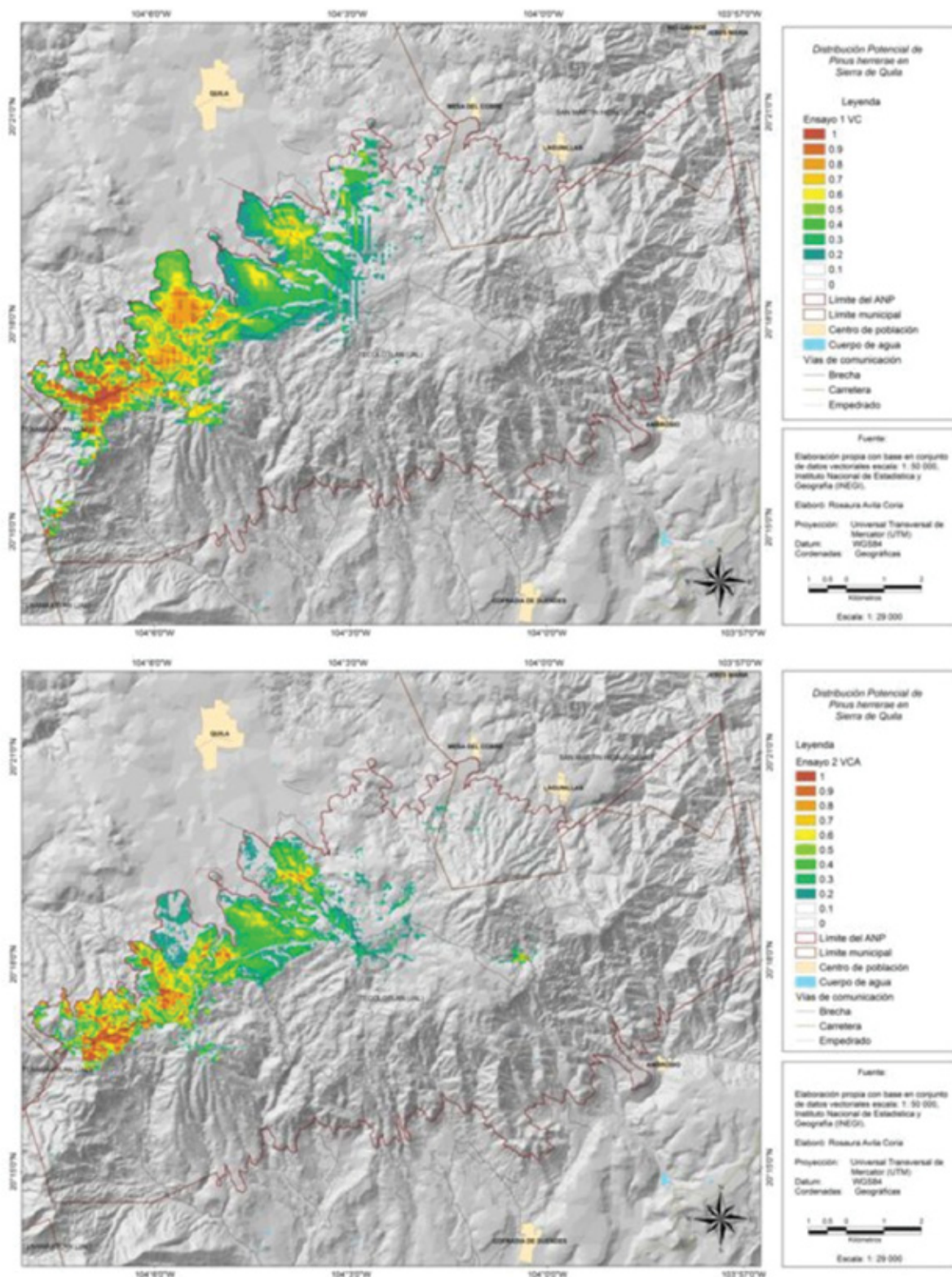


Figura 5. Área de distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el área natural protegida Sierra de Quila. Ensayo 1 con variables climáticas y ensayo 2 con variables climáticas y ambientales.

Figure 5. Potential distribution area of *Pinus herrerae* Martínez in Sierra de Quila Natural Protected Area. Assay 1 with climate variables and assay 2 with climate and environmental variables.

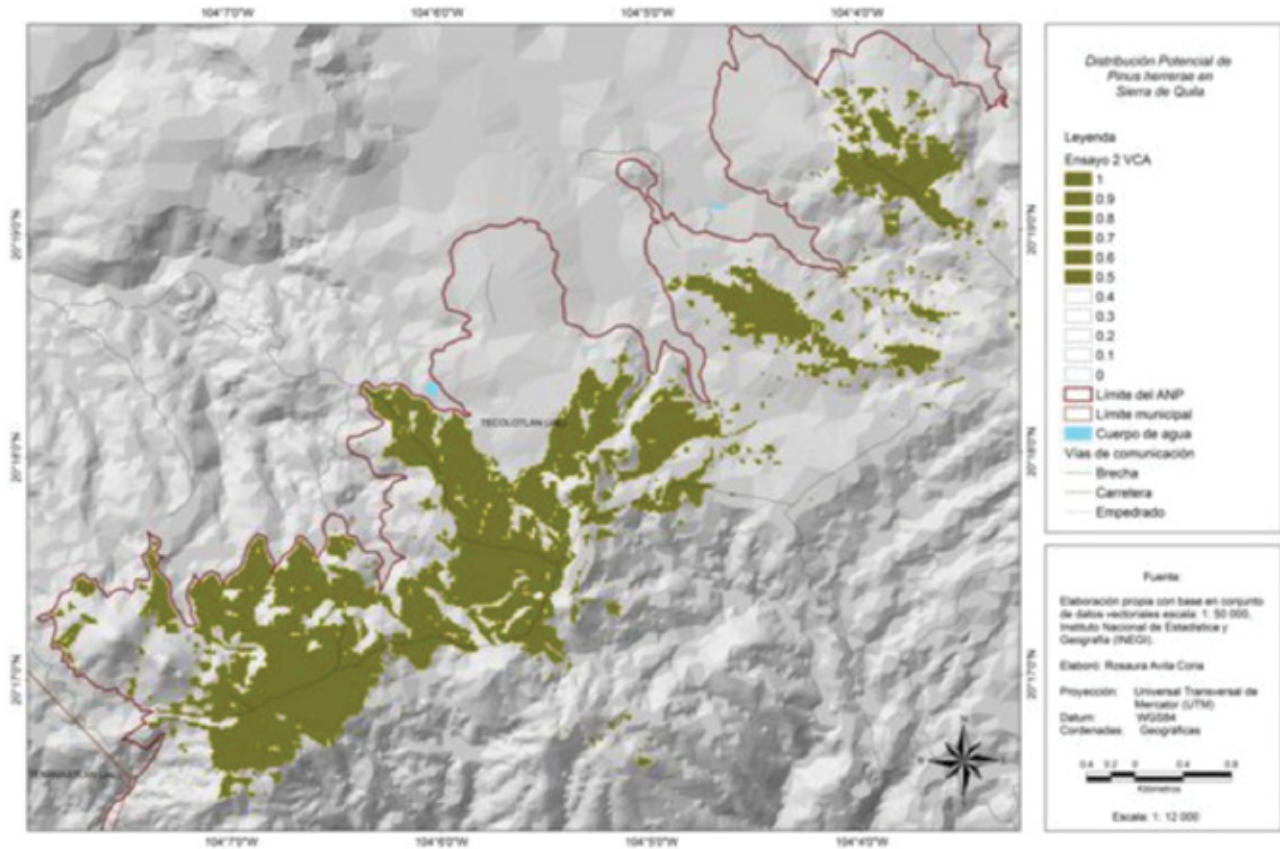


Figura 6. Distribución geográfica potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el área protegida Sierra de Quila a partir de 0.5 de probabilidad de distribución, en el escenario del ensayo 2 vca con variables climáticas y ambientales.
 Figure 6. Potential geographic distribution of *Pinus herrerae* Martínez in Sierra de Quila Natural Protected Area, from 0.5 of probability of distribution, from the 2 vca assay scene with climate and environmental variables.

Los mapas finales de distribución geográfica potencial de *P. herrerae* en la Sierra de Quila resultaron de la combinación de las variables de cada uno de los ensayos (va y vca), las imágenes proporcionan un estimado de cero a uno, es decir, un valor relativo de 0 a 100 de probabilidad a la presencia de la especie. La Figura 5 muestra de manera general las zonas de idoneidad; se distinguen las áreas de mayor valor hacia el oeste y noreste; las tonalidades de colores más cálidos (rojo-naranja-amarillo) significan una mayor probabilidad de la presencia de la especie, por el contrario, los tonos más fríos (verde-azul) se interpretan como áreas menos susceptibles para su presencia, asimismo las zonas sin color sugieren una nula distribución.

La Figura 6 muestra el umbral que delimita de forma parcial la superficie de distribución potencial de *P. herrerae* en correlación con los parámetros del ensayo 2 vca; el área potencial de distribución se considera a partir de 0.5 de probabilidad; se observa una distribución restringida con algunas áreas remanentes. El cálculo de esta superficie es de 606 ha, consideradas como aptas para la distribución potencial de la especie dentro del área protegida.

Arriaga and Gómez (2007) point out that the emission of greenhouse effect gases will provoke temperature and precipitation differences, and thus lets to estimate that the temperate forests in Mexico will be one of the most affected vegetation types, which implies a change in the distribution of species; the authors exemplify with several oaks and pines, among which is *P. herrerae* the second most important of the latter; it has a high change per cent (33 %), which will bring some modification to its present distribution under a scenario of effect from climate change, identified by the use of the Hadley Centre Coupled Model, version 2 (HadCM2). Therefore, it is important to know the present and potential distribution of the specie and particularly in Sierra de Quila.

CONCLUSIONS

The presence of *P. herrerae*, in general, reacts to complex relations that it establishes with its physical and biotic environment; thus, its development and distribution does not depend only on one single variable, but on a series of interdependent and intertwined influences; the most significant climate variables

Arriaga y Gómez (2007) indican que el aumento en las emisiones de gases efecto invernadero provocará diferencias en la temperatura y precipitación, por lo que se estima que los bosques templados en México serán uno de los tipos de vegetación más afectados, lo cual implicará un cambio en la distribución de las especies; los autores ejemplifican con diversos encinos y pinos, entre ellos *P. herrerae*, y lo señalan como el segundo más importante de los pinos, con un porcentaje alto de cambio (33 %), mismo que traerá una modificación en su distribución actual bajo un escenario por efecto del cambio climático mediante el uso del modelo Hadley Centre Coupled Model, versión 2 (HadCM2). De ahí la importancia de conocer la distribución actual y potencial de la especie y en particular en la Sierra de Quila.

CONCLUSIONES

La presencia de *P. herrerae*, en general, responde a relaciones complejas que establece con su medio físico y biótico; por ende, su desarrollo y distribución no dependen de una sola variable, sino de una serie de influencias interdependientes e interrelacionadas; las variables climáticas más significativas registradas en este trabajo fueron la precipitación y las temperaturas mínimas, medias y máximas.

Las variables ambientales que mayor influencia ejercen en la distribución de *P. herrerae* son el suelo del tipo Cambisol húmico y la altitud en el intervalo de 1 985 a 2 227 msnm.

El mapa de distribución potencial de *P. herrerae* no solo facilita la localización del marco hipotético de ocurrencia, sino también podría ser una herramienta auxiliar en la planeación de la conservación y gestión de la especie. 🌿

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Producción Forestal del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA) de la Universidad de Guadalajara por el apoyo institucional para realizar este proyecto. Al Comité Regional de Protección, Promoción y Fomento de los Recursos Naturales de la Sierra de Quila, A. C. y al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro por las facilidades brindadas para llevar a cabo este estudio. Un particular reconocimiento al Sr. Rafael Sevilla y todos los brigadistas del Comité Regional por el apoyo recibido así como a todos los estudiantes del CUCBA que de una u otra forma fueron partícipes de este trabajo.

REFERENCIAS

Aguirre, G. J. and J. Duivenvoorden. 2010. Can we expect to protect threatened species in protected areas? A case study of the genus *Pinus* in Mexico. *Rev. Mex. Biodiv.* 8: 875-882. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=425184390271>. (20 de junio de 2014).

Arriaga, L. y L. Gómez. 2007. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. Instituto Nacional de Ecología (INE). <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/437/arriaga.html>. (10 de febrero de 2014).

registered in this study were precipitation and the minimum, average and maximum temperatures.

The environmental variables that had a greater influence upon the distribution of *P. herrerae* are the humic Cambisol type of soil and altitude in the 1 985 - 2 227 masl interval.

The potential distribution map of *P. herrerae* does not only facilitates the hypothetical framework of occurrence, but also could be a useful tool in planning its conservation and management. 🌿

ACKNOWLEDGEMENT

To the *Departamento de Producción Forestal del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA) of the Universidad de Guadalajara* for the institutional support to carry out this project. To the *Comité Regional de Protección, Promoción y Fomento de los Recursos Naturales de la Sierra de Quila, A. C.* as well as to the *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro* for the facilities provided for this study. A particular acknowledgement to Mr. Rafael Sevilla and to all the brigades of the Regional Committee for their help as well as to all the students of CUCBA who in one way or another took part in this work.

End of the English version



- Bonet G., F. J. 2007. Modelos algorítmicos. In: Réplica del III Taller sobre modelización de nichos ecológicos de GIF. 14-16 marzo de 2007. Madrid, España. <http://www.gbif.es/formaciondetalles.php?IDForm=22#ad-image-0>. (20 de septiembre de 2013).
- Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento (CEAS). 2005. Cuencas hidrográficas en Jalisco, conjuntos de datos geográficos de la carta hidrográfica de aguas superficiales 1:250,000. Comisión Estatal del Agua de Jalisco. Anuario estadístico del estado de Jalisco. <http://www.ceajalisco.gob.mx/cuencajal.html#cuenca-jal>. (29 de agosto de 2011).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). 2010. Las áreas naturales protegidas de México. http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/. (17 de abril de 2011).
- Contreras, M. R., I. Luna V. y C. Ríos M. 2010. Distribución de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México: Modelos ecológicos de nicho, efectos del cambio del uso de suelo y conservación. *Revista Chilena de Historia Natural* 83:421-433.
- Dvorak, W. S., J. E. Stanger and M. Mapula. 2000. *Pinus herrerae*. In: Conservation and testing of tropical & subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative, College of Natural Resources, NCSU. Raleigh, NC. USA. pp. 75-84.
- Elith, J., C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudík, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huetmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. Mc. Overton, A. T. Peterson, S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberón, S. Williams, M. S. Wisz and N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129-151.
- Escalante, T., D. Espinosa N. y J. Llorente B. 2003. Una perspectiva latinoamericana de la biogeografía: métodos para la identificación, descubrimiento y comparación de patrones biogeográficos: Ejemplos en México. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. México. pp. 303-307.
- Farjon, A., J. A. Pérez D. L. R. and B. T. Stalis. 1997. Field guide pines of Mexico and Central America. The Royal Botanic Gardens. Kew, UK. pp. 44-45.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. México. 246 p.
- García M., M. R. 2008. Modelos predictivos de riqueza de diversidad vegetal. Comparación y optimización de métodos de modelado ecológico. Memoria de Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas. Departamento de Biología Vegetal I. Madrid, España. 188 p.
- Guerrero N., J. J. y G. A. López C. 1997. La vegetación y flora de la Sierra de Quila, Jalisco, México. FOMES. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal. México. pp. 19-20.
- Herrera, R. C., J. J. Vargas H. y J. López U. 2005. Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta Botánica Mexicana* 72:1-16.
- Hurtado A., C. A. 2007. Uso de modelos de predicción como herramienta para estimar el área de distribución potencial de la especie *Aniba perutilis* Hemsley (Comino Cresp) en el Departamento del Valle del Cauca. Tesis de Pregrado. Fundación Universitaria de Popayán, Facultad de Ciencias Naturales, Programa de Ecología. Popayán, Colombia. 57 p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1999. Datos vectoriales de las cartas topográficas F13D73 Atengo, F13D74 Coaula, F13D83 Tecolotlán y F13D884 Atemajac de Brizuela. Escala 1:50,000. México, D. F. México. s/p.
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). 2014. The IUCN Red List of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org> (15 de marzo de 2014).
- Kumar, S. and T. J. Stohlgren. 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *J. Ecol. Nat. Environ.* 1(14): 94-98.
- Margules, C. y S. Sarkar. 2009. Planeación sistemática de la conservación. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D. F. México. 304 p.
- Martínez, M. 1948. Los pinos mexicanos. Ediciones Bota, S.A. México, D. F. México. pp. 1-45.
- Maximiliano, M., G., T. Alfaro R., R. A. Ramírez G., C. T. Lomas B., A. de la Rosa V., A. Maya M., X. García C., B. Rodríguez S. y E. de la Rosa M. 2013. Distribución de especies forestales de importancia ecológica y económica en la Península de Yucatán. In: Campos, J. J. (comps.). *Memorias del III Congreso Latinoamericano de IUFRO* <http://web.catie.ac.cr/iufrolat/iufrolatresumenesponencialfababetico.htm#M>. 12 al 15 de junio de 2013. San José, Costa Rica. (15 de junio de 2014).
- Ortega H., M. A. and A. Townsend P. 2008. Modeling ecological niches and predicting geographic distributions: a test of six presence-only methods. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 79(1): 205-216.
- Phillips, S. J., M. Dudík y E. Schapire R. s/f. Una breve guía didáctica sobre MaxEnt. AT&T, Princeton University y el Centro para la Biodiversidad y Conservación del Museo Americano de Historia Natural. <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/tutorial/tutorial-in-spanish.doc>. (20 de mayo de 2010).
- Phillips, S. J., P. Anderson R. and E. Schapire R. 2006. A maximum entropy modeling of species geographics distributions. *Ecol. Model.* 190: 231-259.
- Phillips, S. J. and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.
- Reguerin, J. M., I. Loza y F. Fuentes A. S/f. Distribución geográfica y nicho ecológico de dos especies del género *Schefflera* (Araliaceae), endémicas de Bolivia. Herbario Nacional de Bolivia, Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés y Missouri Botanical Garden. La Paz, Bolivia. http://www.mobot.org/MOBOT/Research/madidi/pdf/Distribucion_Reguerin.pdf. (26 de enero de 2012).
- Rosas A., J. C. 2008. Ecogeografía del género *Pinus* (Linnaeus, 1753) en la subcuenca Tecuantepec-Apulco-México. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional; Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. México, D.F. México. 104 p.
- Rueda, S. A., J. A. Ruiz C., J. G. Flores G. y E. Talavera. 2006. Potencial productivo para once especies de pino en Jalisco. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, Campo Experimental Altos de Jalisco. INIFAP-SAGARPA. Tepatitlán de Morelos, Jal. México. Libro Técnico Núm. 1. 25 p.
- Ruiz, C. J. A., I. J. González A., J. Contreras A., I. Vizcaíno V., D. Ibarra C., J. Alcalá G., S. Espinoza V. y H. E. Flores L. 2003. Estadísticas climatológicas básicas para el estado de Jalisco. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. INIFAP. Tepatitlán de Morelos, Jal. México. Libro Técnico Núm. 1 pp. 45-235.
- Rzedowski J. 1978. Vegetación de México. Editorial limusa. México, D.F. México. pp. 283-313.
- Rzedowski J. 2006. Vegetación de México. 1ª. edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. pp. 295-327. http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_C_ont.pdf. (15 de diciembre de 2011).
- Sánchez G., A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques* 14 (1): 107-120.
- Sánchez V., L. R., J. Galindo G. y F. Díaz F. 2008. Ecología, manejo y conservación de los ecosistemas de montaña de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Universidad Veracruzana, Mundi Prensa México, S. A. de C. V. México, D. F. México. pp. 211-224.

Téllez V., O., Y. M. Chávez H., A. Gómez-Tagle Ch. y M. V. Gutiérrez G. 2005. Modelado bioclimático como herramienta para el manejo forestal: estudio de cuatro especies de *Pinus*. Rev. Cien. For. en Méx. 29 (95): 61-82.

Vela G., L. 1980. Contribución a la ecología de *Pinus patula* Schlecht. et Cham. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México, D. F. México. 109 p.

Villavicencio G., R. 2004. Kartierung von Vegetationsstrukturen und deren Veränderung in Naturschutzgebieten mit Hilfe von Fernerkundung und terrestrische Inventurverfahren. Dargestellt am Beispiel des Schutzgebietes für Flora und Fauna Sierra de Quila im Bundesstaat Jalisco im Westen Mexikos. Cuvillier Verlag, Göttingen, Deutschland. 161 p.

Villavicencio G., R., P. Bauche P., A. Gallegos R., A. L. Santiago P. y F. M. Huerta M. 2005. Caracterización estructural y diversidad de comunidades arbóreas de la Sierra de Quila. Ibugana. 13 (1):67-76.



