



Estimación de la densidad de especies de coníferas a partir de variables ambientales

Density estimation of conifer species from environmental variables

Pablo Martínez-Antúnez^{1,*}, J. Ciro Hernández-Díaz², Christian Wehenkel²
y Carlos Antonio López-Sánchez²

¹ Universidad Juárez del Estado de Durango, Doctorado Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Durango, México. Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, Villa Lázaro Cárdenas, Puebla, México.

² Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México.

* Autor de correspondencia. pantunez4@gmail.com

RESUMEN

Las coníferas son la fuente más importante de materia prima para la industria forestal mexicana, cumplen funciones ecológicas importantes y proveen bienes y servicios para el hombre. Para probar si es posible predecir la densidad de las especies de coníferas a partir de las variables ambientales, se hizo un análisis de regresión lineal múltiple por el método paso por paso (*stepwise*). Se estudiaron veinte especies de cinco géneros distintos y once variables ambientales (nueve variables climáticas, una fisiográfica y otra de suelo). En este trabajo se detectó una escasa relación lineal entre la densidad de especies y las variables predictivas; no obstante, algunos indicadores sugieren que en 60% de las especies, la densidad es afectada principalmente por al menos cuatro variables ambientales; entre las que destacan la precipitación de abril a septiembre, el fenómeno de las heladas, la altitud sobre el nivel del mar y la precipitación media anual.

PALABRAS CLAVE: altura, Durango, heladas, regresión lineal múltiple, Sierra Madre Occidental, variables del clima.

ABSTRACT

Conifers are the most important source of raw material for the Mexican timber industry, besides they are a source of environmental services and are habitat of many living organisms. In order to evaluate if it is possible to predict species density of conifers by utilizing environmental variables, this study was conducted using multiple linear regression analysis by the method known as *stepwise*. Twenty species of conifers of five different genus and eleven environmental variables were analyzed. The results revealed that there is a small linear relationship between the abundance of the species and the analyzed predictors. However, some of the study findings indicate that the abundance for 60% of the selected conifer species is affected by at least four environmental variables, including mainly, the precipitation during the growing season (April to September), the average length of the frost-free period, the altitude above the sea level and the mean annual precipitation.

KEY WORDS: elevation, Durango, frost period, multiple linear regressions, Sierra Madre Occidental, climate variables.

INTRODUCCIÓN

El estudio del clima de los últimos años revela que las condiciones ambientales siguen tendencias cambiantes de distinta duración (Rehfeldt *et al.*, 2012; Zhu *et al.*, 2011); mientras que las especies de plantas no han mostrado respuesta morfológica sustancial; antes bien, existen eviden-

cias de desplazamiento, dispersión y fragmentación de sus comunidades (Desai *et al.*, 2008; Goparaju y Jha 2010; Zhu *et al.*, 2011). La importancia de los elementos climáticos en la distribución y abundancia de las especies forestales ha sido objeto de estudio por varios investigadores; por ejemplo, Crausbay y Hotchkiss (2010) al noreste de

Haleakala, Hawaii; Jahan y Gan (2011) en la parte centro-oriental de Alberta, Canadá; Li *et al.* (2011) al norte de China; Li y Guo (2012) al sur de Saskatchewan, Canadá; por citar algunos trabajos recientes que han sido realizados en distintas partes del mundo. El efecto de las variables de clima puede observarse a diferentes escalas: a nivel especie (Worrall *et al.*, 2008; Michaelian *et al.*, 2011), o bien, a nivel comunidad o afectando todo un ecosistema (Goparaju y Jha 2010; Zhu *et al.*, 2011). Por otro lado, las coníferas y, en particular los pinos, siguen siendo los recursos primarios de la industria maderera de México. Por ello, representan un valor económico significativo para el ser humano; sin dejar de lado a las funciones ecológicas, estéticas, culturales o de otra índole que tiene este tipo de vegetación (Aragón-Piña, 2010).

La Sierra Madre Occidental de México cobra relevancia por tener extensas superficies boscosas alojando a numerosas especies de plantas, entre las que se cuentan 24 especies de *Pinus*, siendo uno de los géneros predominantes en esta zona (González-Elizondo *et al.*, 2012). El género *Pinus* y las coníferas en general, se distribuyen en regiones con climas templados y fríos, con lluvias en verano y una estación seca en invierno y primavera. La temperatura media anual fluctúa entre 8.5 °C y 20 °C y la precipitación, entre 445 mm y más de 1450 mm al año (Martínez-Antúnez *et al.*, 2013). De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1998), predomina la clasificación climática “templado subhúmedo con lluvia de verano con distintos grados de humedad” (C (w0, w1, w2)).

Es indiscutible el efecto de las variables ambientales en la vegetación y es sabido que cada especie forestal tiene exigencias ambientales particulares (Wehenkel *et al.*, 2011, González-Elizondo *et al.*, 2012; Martínez-Antúnez *et al.*, 2013), pero a pesar de que lo anterior se asume como un hecho, aún hace falta definir con precisión cuáles variables climáticas, fisiográficas o edafológicas afectan en mayor medida la densidad, la frecuencia o cualquier indicador de abundancia de las especies arbóreas en la Sierra Madre Occidental, lo que permitirá a buscar la forma de predecir la abundancia

de los árboles mediante un modelo matemático, a partir de variables del medio natural.

Este conocimiento podrá contribuir en la definición preliminar de los espacios eco-fisiográficos de las coníferas; información que podrá ser aplicada para incrementar las probabilidades de sobrevivencia de las plantaciones en el área de estudio; puede servir de apoyo también para realizar una migración asistida de las coníferas en situaciones de riesgo ante una modificación drástica del clima en el corto o mediano plazo, o ante una emergencia por ataque de plagas y enfermedades; asimismo, podrá aportar información valiosa para realizar en el futuro modelos sofisticados que permitan definir con precisión los nichos bioclimáticos de las especies estudiadas y su delimitación biogeográfica (Aitken *et al.*, 2008; Zhu *et al.*, 2011).

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo consistió en determinar la posibilidad de construir modelos lineales que permitan predecir la abundancia de especies de coníferas; donde las variables de regresión sean de tipo climático, fisiográfico y de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se realizó en el sistema montañoso de la Sierra Madre Occidental (SMO) que atraviesa el Estado de Durango, México, entre las coordenadas geográficas (elipsoide WGS 84) 22° 17' y 26° 50' de latitud norte y 102° 30' y 107° 09' de longitud oeste, abarcando una superficie aproximada de 6.33 millones de hectáreas. En esta región se distribuyen bosques de encino-pino, pino-encino, bosque de encino o de pino en asociación con otras especies propias del clima templado (Rzedowski, 1978).

Muestreo y variables evaluadas

La zona de estudio está cubierta por una red de unidades de muestreo primarias llamadas conglomerados que se distribuyen cada 5 km de manera equidistante, los cuales



fueron establecidos para realizar el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (Infys 2004-2009) por parte de empresas contratadas por la Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2009). Cada conglomerado se integra por cuatro unidades de muestreo secundarias (sitios) de 400 m². De esta forma, cada conglomerado tuvo 1,600 m² de superficie.

Para este análisis se seleccionaron 20 especies de coníferas: 15 especies del género *Pinus* (*P. arizonica* Engelm, *P. strobiformis* Engelm, *P. cembroides* Zucc, *P. chihuahuana* Engelm, *P. cooperi* D. Don, *P. douglasiana* Martínez, *P. durangensis* Martínez, *P. engelmannii* Carr., *P. herrerae* Martínez, *P. leiophylla* Schl. et Cham, *P. lumboltzii* Robins et Ferns, *P. luzmariae* Pérez de la Rosa, *P. maximinoi* H.E. Moore, *P. oocarpa* Schiede y *P. teocote* Schlecht et Cham); dos del género *Juniperus* (*Juniperus deppeana* Steud y *Juniperus flaccida* Schldl); además de *Cupressus lusitanica* Miller, *Pseudotsuga menziesii* Mirb y *Abies durangensis* Martínez.

Registro de variables

Como medida de abundancia se usó la densidad de los árboles (Jonsson *et al.*, 1992) por unidad de muestreo principal o conglomerado; considerando únicamente los árboles con diámetro mayor o igual a 7.5 cm a la altura de 1.3 m sobre el nivel del suelo (diámetro normal o diámetro a la altura del pecho), sin importar la edad del individuo.

Se seleccionaron como variables de regresión independientes nueve variables de clima: “temperatura media anual” (*MAT*, °C), “precipitación media anual” (*MAP*, mm), “precipitación acumulada de las medias durante el periodo vegetativo” correspondiente a los meses de abril a septiembre (*GSP*, mm), “temperatura media en el mes más frío” (enero) (*MTCM*, °C), “temperatura media mínima en el mes más frío” (*MMIN*, °C), “temperatura media en el mes más cálido” (junio) (*MTWM*, °C), “temperatura media máxima en el mes más cálido” (*MMAX*, °C), “promedio de duración del periodo libre de heladas” (*FFP*, días) y “día del año en que es probable que ocurra la última helada en primavera” (*SDAY*, día) (Hutchinson, 2004; Rehfeldt *et al.*, 2006).

Los datos de estas nueve variables climáticas se obtuvieron para cada conglomerado a partir de sus coordenadas geográficas y altitud sobre el nivel del mar; con el apoyo del servidor del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, que modela información climática con base en los datos registrados de 1961 a 1990 de poco más de 6000 estaciones climatológicas de México, sur de Estados Unidos, Guatemala, Belice y Cuba (Crookston *et al.*, 2008; Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Las variables fueron modeladas usando el software Anusplin ver. 4.3[®] propuesto por Hutchinson (2004). Adicionalmente, se consideraron la “altitud sobre el nivel del mar” (*ASL*, m), y el espesor del suelo en el que pueden penetrar y desarrollarse potencialmente las raíces; referido aquí como la “profundidad del suelo” (*DS*, cm). Estas dos últimas variables se obtuvieron directamente en campo. La primera a partir del sistema global de navegación por satélite (GPS) y, la segunda, al introducir una barrena metálica de 100 cm de longitud en el centro de la parcela (Conafor, 2009). En total se probaron once variables independientes. Los acrónimos de estas variables provienen de sus nombres en inglés mencionados y referidos en trabajos previos (Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Martínez-Antúnez *et al.*, 2013).

Análisis estadístico

Para determinar el conjunto de variables que posiblemente explican mejor la abundancia de cada especie estudiada, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple por el método *stepwise* usando el procedimiento REG del Sistema de Análisis Estadístico conocido como SAS[®] (*SAS Institute*, 2001), planteando la hipótesis de que las 11 variables ambientales permiten construir modelos lineales para predecir la abundancia de las coníferas. Se introdujeron las once variables para cada especie en el modelo, empleando el procedimiento RSQUARE; el cual permite visualizar los coeficientes de determinación resultantes al incluir en el modelo todas y cada una de las variables, haciendo todas las combinaciones posibles (Pomareda, 1980). Posteriormente mediante el método MAXR fue posible determinar el mejor modelo con una

variable para cada especie, el mejor modelo con dos variables, el mejor con tres y así sucesivamente, probando incluso si mejoraba el modelo al introducir las once variables ambientales.

Ese procedimiento posibilitó realizar comparaciones entre los indicadores de ajuste de cada modelo, permitiendo al final elegir el mejor de todos los modelos para cada especie, según los siguientes criterios de ajuste: coeficiente de determinación ajustado (R^2_{Adj}), indicador de Mallows (CP), la raíz del cuadrado medio del error ($RCME$), la contribución significativa de cada parámetro en el modelo ($p < 0.01$) y el criterio de información de Akaike (AIC) (Pomareda, 1980). Debido a que este último estadístico tiene una estrecha relación con los primeros, se omitió mencionarlo en la parte de resultados y discusión. Los niveles de significancia usados fueron de $\alpha = 0.05$ y 0.01 .

RESULTADOS

Los resultados muestran que hay una escasa relación lineal entre la densidad de la mayoría de las especies y las variables ambientales estudiadas (Tabla 1). Los factores ambientales que se incluyeron en mayor cantidad de modelos son: GSP , FFP , ASL y MAP , apareciendo en al menos 10 modelos cada una; en tanto que los que aparecieron en menor cantidad fueron $MTWM$ y $MMAX$, apareciendo solamente en seis modelos cada una (Tabla 1). En la tabla 1 se muestran los parámetros estimados y los indicadores de ajuste de los modelos que resultaron significativos con $p < 0.001$.

A pesar de que los valores del coeficiente de correlación ajustado (R^2_{Adj}) fueron pequeños, el resto de los indicadores como el criterio de Mallows (CP), la raíz del cuadrado medio del error ($RCME$) y, sobre todo, la significancia de los parámetros, confirman que algunas variables tienen un efecto mayor que otras en la densidad de las especies estudiadas. En algunos casos, el R^2_{Adj} de algunos modelos se incrementó al introducir un mayor número de variables o cambiar una por otra; sin embargo, los parámetros respectivos no resultaron significativos o los valores del sesgo y la magnitud del error resultaron elevados, por lo que estas variables fueron excluidas de los modelos. Esto sucedió en

el caso de *Abies durangensis* al incluir $SDAY$ y $MTWM$ o el *Pinus chihuahuana* al incluir GSP , MAP y DS .

Resultaron tres modelos que se ajustaron significativamente con solo dos variables, el de *Abies durangensis* al incluir ASL y GSP , el de *Pinus engelmannii* con ASL y $MTWM$, y el de *Pinus chihuahuana* con la profundidad del suelo (DS) y el periodo libre de heladas (FFP) (Tabla 1). Para el caso de *Juniperus flaccida*, no hubo un modelo que cumpliera con los criterios de ajuste, en donde en el mejor de los casos, el CP y la $RCME$ mostraron valores de 0.2 y 3.04 respectivamente, pero con un $Pr > F$ igual a 0.080, al incluir la precipitación media anual y el promedio de duración del periodo libre de heladas.

Resultados por grupos de variables

Precipitación

La precipitación ocurrida durante los meses de abril a septiembre (periodo de mayor actividad vegetativa) mostró contribución significativa en la mayoría de los modelos (65% de las especies estudiadas), adquiriendo una importancia igual o quizá mayor que la precipitación media anual. Lo anterior fue más evidente en *Pseudotsuga menziesii*, en *Juniperus deppeana*, y en varias especies de *Pinus*, como *P. durangensis*, *P. teocote*, *P. luzmariae*, *P. cembroides*, por citar algunas.

Temperatura

Setenta y cinco por ciento de los modelos, que representa el mismo porcentaje de las especies estudiadas, mostraron sensibilidad por las temperaturas mínimas; 45% por la temperatura media anual y 65% por las temperaturas máximas. Siendo la temperatura media mínima del mes más frío ($MMIN$) la que apareció más veces en los modelos seleccionados (en nueve ocasiones). Las dos mediciones de temperatura mínima revelaron influencias significativas en *Juniperus deppeana*, *Pinus arizonica*, *Pinus durangensis*, *Pinus lumboltzii* y *Cupressus lusitanica*, en tanto que las mediciones de temperatura máxima: la media en el mes más cálido y la media máxima en el mismo mes, fueron significativas en seis modelos cada una. La tempera-



Tabla 1. Parámetros estimados e indicadores de ajuste de los mejores modelos de regresión encontrados.

Especies	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	RMSE	CP	R ² Adj	Pr > F
<i>Pinus engelmannii</i>	12.87	-0.002	-0.380								4.58	-0.12	0.02	<0.0001***
		ASL	MTWM											
<i>Pinus chihuahuana</i>	1.74	-0.008	-0.004								3.55	-1.74	0.01	0.000***
		DS	FFP											
<i>Cupressus lusitanica</i>	5.83	-0.001	-0.153	-0.022	-0.011						2.14	-0.99	0.01	0.000***
		ASL	MMIN	SDAY	FFP									
<i>Pinus leiophylla</i>	23.76	-0.007	3.515	-1.490	-3.070						7.11	13.14	0.08	<0.0001***
		ASL	MAT	MMIN	MTWM									
<i>Pinus teocote</i>	-3.91	0.024	0.021	-0.026	0.047						11.15	6.59	0.07	<0.0001***
		DS	MAP	PAVP	SDAY									
<i>Pinus luzmariae</i>	2.80	0.202	-0.004	0.006	-0.218						1.68	2.30	0.05	<0.0001***
		MAT	MAP	PAVP	MMAX									
<i>Pinus maximinoi</i>	3.26	0.001	-0.222	0.050	0.054	-0.006					0.51	2.36	0.03	<0.0001***
		ASL	MAT	MMIN	MMAX	SDAY								
<i>Pinus cembroides</i>	4.74	-4.922	-0.027	0.033	1.013	3.678					6.54	5.87	0.10	<0.0001***
		MAT	MAP	PAVP	MMIN	MTWM								
<i>Pinus lumholtzii</i>	16.073	-0.022	-0.989	1.100	0.141	0.065					7.32	7.5	0.04	<0.0001***
		DS	MTCM	MMIN	SDAY	FFP								
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	-2.393	0.0011	0.0061	0.0053	-0.008	0.2426	-0.008				2.30	8.3	0.02	<0.0001***
		ASL	DS	MAP	GSP	MTCM	FFP							
<i>Pinus cooperi</i>	-17.736	-1.645	0.006	1.366	-0.932	0.799	0.021				6.75	5.4	0.03	<0.0001***
		MAT	GSP	MTCM	MMIN	MMAX	FFP							
<i>Pinus douglasiana</i>	-4.748	0.001	0.699	0.001	-0.486	-0.375	0.015				1.62	3.9	0.07	<0.0001***
		ASL	MAT	GSP	MMIN	MMAX	FFP							
<i>Pinus strobiformis</i>	-9.112	0.002	0.010	0.024	-0.031	0.833	-0.453	-0.014			3.88	7.4	0.14	<0.0001***
		ASL	DS	MAP	GSP	MTCM	MMIN	FFP						
<i>Pinus oocarpa</i>	-1.273	0.001	0.003	0.002	-0.172	-0.267	0.242	-0.034			1.96	7.6	0.06	<0.0001***
		ASL	DS	GSP	MMIN	MTWM	MMAX	SDAY						
<i>Pinus herrerae</i>	-15.535	0.002	0.011	0.012	-0.011	-0.327	0.333	0.013			4.82	6.6	0.04	<0.0001***
		ASL	DS	MAP	GSP	MTCM	MMAX	FFP						
<i>Pinus durangensis</i>	-14.354	0.007	-6.089	0.043	-0.035	2.314	4.562	-0.104	0.101		11.63	9.3	0.16	<0.0001***
		ASL	MAT	MAP	GSP	MTCM	MTWM	SDAY	FFP					
<i>Pinus arizonica</i>	89.146	0.026	8.873	0.071	-0.102	2.678	-4.751	-7.005	0.445	0.268	11.70	9.4	0.11	<0.0001***
		DS	MAT	MAP	GSP	MTCM	MMIN	MTWM	SDAY	FFP				
<i>Juniperus deppeana</i>	16.907	0.014	-2.902	0.019	-0.027	2.845	-0.827	0.790	0.080	0.054	5.88	9.7	0.08	<0.0001***
		DS	MAT	MAP	GSP	MTCM	MMIN	MMAX	SDAY	FFP				

*b0, b1, b2... b9: parámetros estimados, RCME: raíz del cuadrado medio del error, CP: coeficiente de Mallows, R²Adj: coeficiente de determinación ajustada, Pr > F: nivel de significancia, ***: P < 0.001; ASL: altitud sobre el nivel del mar (m), GSP: precipitación acumulada de las medias de los meses de abril a septiembre (mm), MTWM: temperatura media en el mes más cálido (°C), MAP: precipitación media anual (mm), FFP: promedio de duración del periodo libre de heladas (días), DS: profundidad del suelo (cm), MMIN: temperatura media mínima en el mes más frío (°C), MTCM: temperatura media en el mes más frío (°C) SDAY: día en el que ocurre la última helada en primavera (día), MMAX: temperatura media máxima en el mes más cálido (°C) y MAT: temperatura media anual (°C).

tura media anual fue observada en los modelos de: *Juniperus deppeana*, *P. arizonica*, *P. durangensis*, *P. herrerae*, *P. oocarpa*, *P. strobiformis*, *P. douglasiana*, *P. maximinoi* y *P. luzmariae* (Tabla 1).

Suelo

La profundidad del suelo (*DS*), única variable edafológica, mostró contribución significativa en nueve modelos. La mayoría en modelos del género *Pinus* como: *P. arizonica*, *P. herrerae*, *P. chihuahuana*, *P. teocote*, *P. lumboltzii*, *P. strobiformis* y *P. oocarpa*, además de *Juniperus deppeana* y *Pseudotsuga menziesii* (Tabla 1).

Heladas

El promedio de duración del periodo libre de heladas (*FFP*) fue uno de los parámetros que tuvo mayor contribución en varios modelos elegidos, entre los que destacan los de *Pinus chihuahuana*, *Pinus arizonica*, *Pinus lumboltzii*, *Pinus herrerae*, *Pinus strobiformis*, *Juniperus flaccida* y *Cupressus lusitanica*.

Altitud sobre el nivel del mar

Esta variable ocupó el tercer orden en cuanto a las variables con mayor número de apariciones en los modelos ajustados. A menudo apareció junto con otros elementos climáticos como el periodo de duración libre de heladas, la precipitación y las temperaturas máximas y mínimas. Las especies que mostraron fuertes indicios de afectación por esta variable fueron: *Pinus durangensis*, *Pinus engelmannii*, *Pinus teocote*, *Pseudotsuga menziesii*, *Abies durangensis* y *Cupressus lusitanica*, entre otras.

DISCUSIÓN

La escasa relación lineal encontrada entre la densidad de la mayoría de las especies y las variables ambientales no necesariamente significa que los elementos climáticos, la profundidad del suelo y las variables fisiográficas no afectan a la densidad de las especies evaluadas; más bien, puede sugerir que las relaciones no son lineales, sino cuadráticas, cúbicas, exponenciales, logarítmicas, o alguna otra (Wang y Shiqiang, 2011). En la mayoría de los casos

resultó complicado determinar con precisión el tipo de relación existente entre cada variable ambiental y la densidad de cada especie con solo observar la gráfica. Algunas veces, la nube de puntos mostró alguna tendencia más o menos definida (Figs. 1 y 3); para lo anterior, podría usarse alguna función de probabilidad, por ejemplo la función de densidad de *Weibull* por considerarse una función que genera modelos robustos y flexibles para definir puntos de máxima probabilidad de abundancia (Torres-Rojo, 2005). Las figuras 1 y 3 sugieren un espacio climático bien definido para las especies en particular; en este caso la figura 3 ilustra una mayor concentración de puntos alrededor de 2500 m, lo que significa que el intervalo de distribución de *Pinus cooperi* no es muy amplio si se toma en cuenta solamente la altitud sobre el nivel del mar, en tanto que para *Pinus cembroides* en relación con la precipitación durante el periodo vegetativo (*GSP*), la densidad óptima ocurre cercana a los 500 mm, en contraste con las figuras 2 y 4, donde no hay una tendencia clara, ni de la distribución de los puntos, ni el tipo de relación entre cada par de variables. El caso de la figura 2 ilustra una densidad muy dispersa del *Pinus strobiformis*, a pesar de que se trata de la misma variable de la figura 1 (*GSP*).

El escaso ajuste de los modelos puede ser debido a varias razones, algunas de las cuales se mencionan a continuación: (i) empleando el método del factor de inflación de la varianza, se detectó un alto grado de colinealidad entre las variables predictivas, en particular, los elementos climáticos; (ii) fueron estudiadas solo algunas variables ambientales, pero en el sistema natural existen múltiples variables y ocurren complejas interacciones que alteran la distribución y la abundancia de las plantas (Soberón y Peterson, 2005). Es probable que sean otras variables las que explican mejor la densidad de las coníferas, (que podrían usarse para predecir la densidad de los árboles) y que no fueron consideradas en este estudio; por ejemplo, factores edafológicos como las propiedades físicas y químicas del suelo, la fauna local, que de forma directa o indirecta logra incidir en la densidad de las coníferas (por ejemplo animales que se alimentan de semillas y que ayudan a dispersarlas), además de las perturbaciones en las

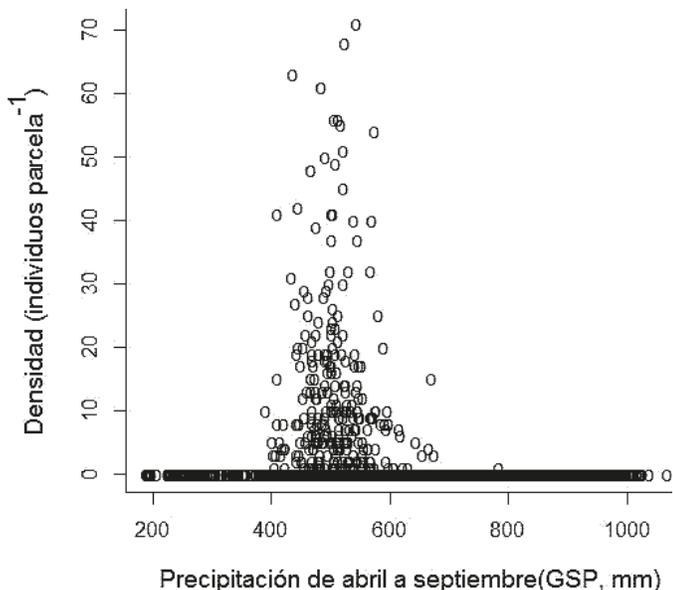


FIGURA 1. Relación entre la densidad de *Pinus cembroides* y la precipitación abril-septiembre.

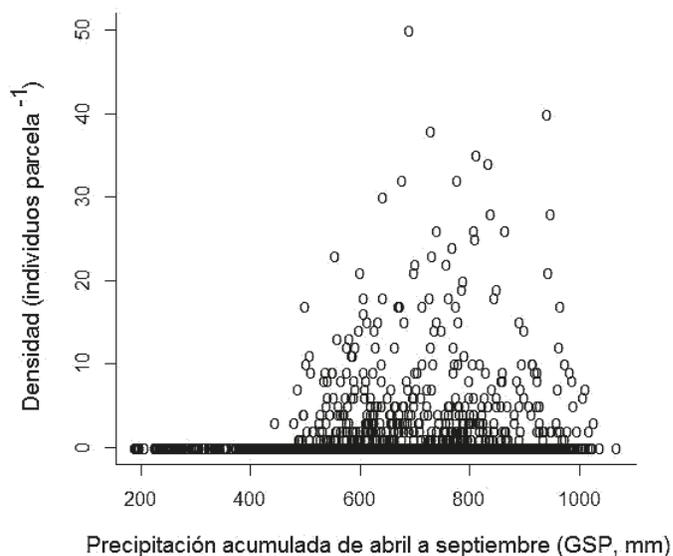


FIGURA 2. Relación entre la densidad de *Pinus strobiformis* y la precipitación de abril a septiembre.

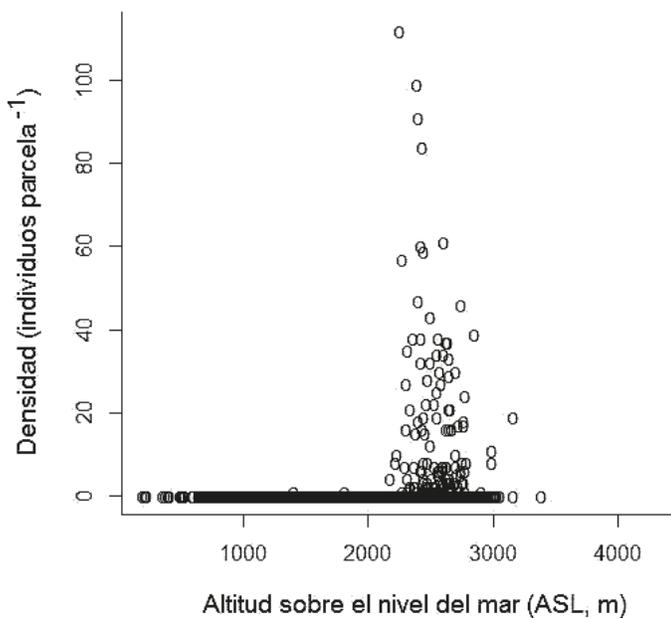


FIGURA 3. Relación entre la densidad de *Pinus cooperi* y la altitud sobre el nivel del mar.

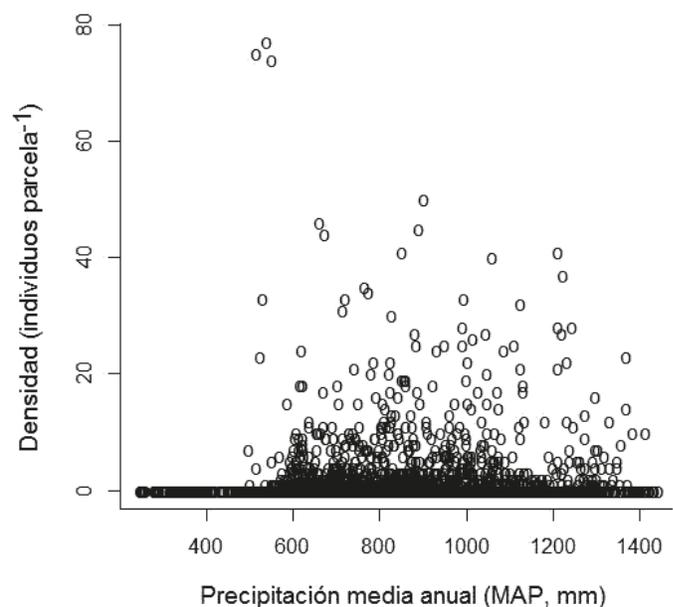


FIGURA 4. Relación entre la densidad de *Juniperus deppeana* y la precipitación media anual.

parcelas de muestreo por la actividad ganadera; el establecimiento de vías de comunicación como las brechas de saca, las líneas eléctricas; la extracción excesiva de algunas coníferas con propósitos maderables (*Pinus durangensis*, *Pinus engelmannii*, *Pinus cooperi* y *Pinus arizonica*) o

cualquier otra actividad antropogénica que altera la densidad natural de las especies estudiadas.

Del lado de las variables independientes analizadas en este estudio, hay que tomar en cuenta (i) el posible error en los datos climáticos, pues no fueron medidos sino

modelados para cada conglomerado; (ii) la influencia de la distancia entre cada unidad de muestreo principal dispuestas cada 5 km, pues debido a las características de la zona de estudio, en escasos kilómetros, incluso en metros, diversas condiciones de los sitios cambian, esto como resultado de la orografía, los tipos de suelo, la presencia de cuerpos de agua o arroyos, y otros aspectos locales; (iii) por último, considerar que la abundancia de cualquier organismo no solo depende de los factores externos, sino también dependen en gran medida de las características genéticas consecuencia de la evolución, que tampoco se consideraron en los modelos de regresión probados (Soberton y Peterson, 2005).

A pesar de los bajos resultados mostrados por los indicadores de bondad del ajuste de la regresión, el grado de ajuste y los parámetros de los modelos cambiaron al introducir distintas variables y al hacer varias combinaciones, lo que soporta el planteamiento de que cada variable influye a diferente escala y magnitud sobre cada individuo en particular, lo que complica hacer una predicción precisa usando solamente algunas variables de las que existen en el sistema natural.

Las temperaturas extremas, la altitud sobre el nivel del mar, el día de la última helada en primavera y el periodo libre de heladas aparecen en los modelos de *Pinus herrerae*, *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* y *Pinus maximinoi*; siendo esto comparable con lo obtenido en un estudio anterior (Martínez-Antúnez *et al.*, 2013) en donde se encontraron altas correlaciones entre las variables citadas y la densidad de las mismas especies; si bien, en este trabajo se valoró la contribución significativa de cada variable en la construcción de modelos de regresión lineal y en el estudio citado se evaluó el grado de correlación individual entre la abundancia de cada especie y cada una de las variables climáticas analizadas, los resultados de ambos estudios sugieren una posible relación de causalidad y dependencia entre algunas de las variables explicativas y la densidad de los árboles. Como ejemplos pueden citarse los casos de: *Juniperus deppeana*, *Pinus arizonica*, *Pinus durangensis* y *Pinus herrerae*, que en sus respectivos modelos comparten al menos tres variables climáticas: la

precipitación media anual, la precipitación de abril a septiembre y la temperatura media en el mes más frío (Tabla 1) lo que puede explicar la coexistencia de algunas de estas especies en algunas localidades como lo registran Wehenkel *et al.* (2011), González-Elizondo *et al.* (2012) y Silva-Flores *et al.* (2014).

La precipitación ha sido referida en numerosas ocasiones como uno de los factores decisivos en la distribución y abundancia de la vegetación forestal (Jabro *et al.*, 2009; Wittmer *et al.*, 2010; Meng *et al.*, 2011). Pero pocas veces se ha señalado que no sólo resulta importante la cantidad o la frecuencia de precipitación, sino la temporada en que ésta ocurre. Los resultados de este trabajo sugieren que la precipitación de abril a septiembre incide más que la precipitación media anual, debido a que en este periodo hay mayor actividad vegetativa (Sáenz-Romero *et al.*, 2010).

Por otro lado, la inestabilidad de la temperatura en ciertos periodos del año debe tomarse en cuenta, pues en algunos periodos la temperatura es más inestable que en otros; por ejemplo en verano es más inestable que en invierno (Sáenz-Romero *et al.*, 2010), por lo que es muy probable que algunas especies (las menos sensibles a las variaciones), tengan mayor distribución y sean más abundantes en algunas zonas (Moreno, 2008), por ello, las temperaturas extremas deben considerarse también como factores decisivos en la distribución y abundancia de la vegetación forestal.

Debido a la baja precisión de ajuste de los modelos, se recomienda implementar otras técnicas de análisis en el futuro con el propósito de mejorar las estimaciones; por ejemplo emplear la regresión no lineal de cuantiles, o tal vez probar diferentes tipos de ecuaciones no lineales para modelar de forma separada la densidad de cada especie con cada variable (Torres-Rojo, 2005; Nord-Larsen y Cao, 2006).

Otra posible alternativa es el empleo de métodos multivariados no paramétricos, tales como los árboles de clasificación y regresión, o conocidos como modelos Cart por sus siglas en inglés "Classification and Regression Trees"; propuesta por Breiman *et al.* (1984). Este



tipo de análisis permitirá agrupar a las especies según sus cualidades particulares, a través de una técnica de partición que se obtiene de *forma recursiva* mediante una serie de combinaciones binarias expresadas en términos de una única variable independiente en cada momento, pudiéndose identificar ciertos perfiles o vectores que permitan describir a los individuos estudiados (Hu *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

No se encontró relación lineal robusta entre las variables independientes y la densidad de las especies de árboles estudiadas, por lo que las variables climáticas empleadas no fueron suficientes para estimar con precisión la densidad de las coníferas mediante modelos de regresión lineal múltiple. Por lo anterior, se rechaza la hipótesis de que las once variables estudiadas permiten construir modelos lineales significativos para estimar la abundancia de las especies seleccionadas. Por otro lado, los resultados sugieren que cada variable actúa a diferente intensidad sobre la abundancia de cada especie de conífera.

RECONOCIMIENTOS

A los Doctores Klaus von Gadow, Cuauhtémoc Sáenz Romero, José Javier Corral Rivas y Martha González Elizondo por sus importantes comentarios y sugerencias en esta y en las distintas fases del trabajo de investigación, así como a la Comisión Nacional Forestal, Delegación Durango y al Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (SF-USDA) por aportar información valiosa durante todo el trabajo de investigación. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante los estudios de Doctorado.

REFERENCIAS

- Aitken S., N.S. Yeaman, J.A. Holliday, T. Wang y S. Curtis-McLane. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* 1(1):95-111.
- Aragón-Piña, E.E., A. Garza-Herrera, M.S. González-Elizondo e I. Luna-Vega. 2010. Composición y estructura de las comunidades vegetales del rancho El Duranguense, en la Sierra Madre Occidental, Durango, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81(3):771-787.
- Breiman, L., J.H. Friedman, R.A. Olshen y J. Stone, 1984. Classification and regression trees. 1a ed. Wadsworth International Group. Belmont. p:102-116.
- Conafor (Comisión Nacional Forestal). 2009. Manual y procedimientos para el muestreo de campo - Inventario Nacional Forestal y de Suelos -http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/secciones/inventarionacional/documentos/ManualMuestreoCampo.pdf. Fecha de Consulta: 7 de octubre de 2010.
- Crausbay, S.D. y S.C. Hotchkiss. 2010. Strong relationships between vegetation and two perpendicular climate gradients high on a tropical mountain in Hawai'i. *Journal of Biogeography* 37(6):1160-1174.
- Crookston, N.L., E.G. Rehfeldt, D.E. Ferguson y M. Warwell. 2008 - FVS and global warming: A prospectus for future development. In: R.N. Havis, N.L. Crookston, comps. Third forest vegetation simulator Conference 2007. 13-15 de febrero; Fort Collins, CO. Proceedings RMRS-P-54. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p:7-16.
- Desai, A.R., A. Noormets, P.V. Bolstad, J. Chen, B.D. Cook, K.J. Davis, E.S. Euskirchen, C. Gough, J.G. Martin, D.M. Ricciuto, H.P. Schmid, J. Tang y W. Wang. 2008. Influence of vegetation and seasonal forcing on carbon dioxide fluxes across the Upper Midwest, USA: implications for regional scaling. *Agricultural and Forest Meteorology* 148(2):288-308.
- García, E. 1998. Climas (Clasificación de Köppen, modificada por García) Escala 1:1 000 000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F., México.
- González-Elizondo, M.S., M. González-Elizondo, J.A. Tena-Flores, L. Ruacho-González y I.L. López-Enríquez. 2012. Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Botanica Mexicana* 100:351-403.
- Goparaju, L. y C.S. Jha. 2010. Spatial dynamics of species diversity in fragmented plant communities of a Vindhyan dry tropical forest in India. *Tropical Ecology* 51(1):55-65.

- Hu, W., K. Mengersen y S. Tong. 2010. Risk factor analysis and spatiotemporal CART model of cryptosporidiosis in Queensland, Australia. *BMC infectious diseases* 10(1):311.
- Hutchinson, M.F. 2004. ANUSPLIN version 4.3 user guide. Centre for Resource and Environmental Studies. The Australian National University. Canberra. 54 p.
- Jabro, J.D., R.G. Evans y Y. Kim. 2009. Estimating in situ soil-water retention and field water capacity in two contrasting soil textures. *Irrigation Science* 27(3):223-229.
- Jahan, N. y T.Y. Gan. 2011. Modelling the vegetation-climate relationship in a boreal mixedwood forest of Alberta using normalized difference and enhanced vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing* 32(2):313-335.
- Jonsson, B., S. Holm y H. Kallur. 1992. A forest inventory method based on density-adapted circular plot size. *Scandinavian Journal of Forest Research* 7(1-4):405-421.
- Li, Y., M.J. Bunting, Q. Xu, S. Jiang, W. Ding y L. Hun. 2011. Pollen-vegetation-climate relationships in some desert and desert-steppe communities in northern China. *The Holocene* 21(6):997-1010.
- Li, Z. y X. Guo. 2012. Detecting climate effects on vegetation in northern mixed prairie using NOAA AVHRR 1-km time-series NDVI data. *Remote Sensing* 4(1):120-134.
- Martínez-Antúnez, P., C. Wehenkel, J.C. Hernández-Díaz, M. González-Elizondo, J.J. Corral-Rivas y A. Pinedo-Álvarez. 2013. Effect of climate and physiography on the density of trees and shrubs species in Northwest Mexico. *Polish Journal of Ecology* 61(2):283-295.
- Meng, M., J. Ni, y M. Zong. 2011. Impacts of changes in climate variability on regional vegetation in China: NDVI-based analysis from 1982 to 2000. *Ecological Research* 26(6):421-428.
- Michaelian, M., E.H. Hogg, R. Hall y E. Arsenaault. 2011. Massive mortality of aspen following severe drought along the southern edge of the Canadian boreal forest. *Global Change Biology* 17(6):2084-2094.
- Moreno, J.M. 2008. Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. *Boletín CF+ S* (38/39). Disponible en: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n38/>.
- Nord-Larsen, T. y Q.V. Cao. 2006. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark. *Forest Ecology and Management* 231(1):218-225.
- Pomareda, C. 1980. Introducción al uso del programa SAS para análisis de regresión. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAS505.pdf. Fecha de consulta: 12 de septiembre de 2012.
- Rehfeldt, G.E., N.L. Crookston, C. Sáenz-Romero y E.M. Campbell. 2012. North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems. *Ecological Applications* 22(1):119-141.
- Rehfeldt, G.E., N.L. Crookston, M.V. Warwell y J.S. Evans. 2006. Empirical analyses of plant-climate relationships for the western United States. *International Journal of Plant Sciences* 167(6):1123-1150.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México, D.F. 432 p.
- Sáenz-Romero, C., G.E. Rehfeldt, N.L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu y B.A. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102(3-4):595-623.
- SAS Institute Inc. 2001 SAS/STAT 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Silva-Flores, R., G. Perez-Verdin y C. Wehenkel. 2014. Patterns of tree species diversity in relation to climatic factors on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *PLoS ONE* 9(8):e105034. doi:10.1371.
- Soberón, J.M. y A.T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2(2005):1-10.
- Torres-Rojo J.M. 2005. Predicción de distribuciones diamétricas multimodales a través de mezclas de distribuciones Weibull. *Agrociencia* 39(2):211-220.
- Wang, T. y Z. Shiqiang. 2011. Study on linear correlation coefficient and nonlinear correlation coefficient in mathematical statistics. *Studies in Mathematical Sciences* 3(1):58-63.
- Wehenkel, C., J.J. Corral-Rivas y J.C. Hernández-Díaz. 2011. Genetic diversity in relation to secondary succession of



- forest tree communities. *Polish Journal of Ecology* 59(1):45-54.
- Wittmer, M.H., K. Auerswald, Y. Bai, R. Schaeufele y H. Schnyder. 2010. Changes in the abundance of C3/C4 species of Inner Mongolia grassland: evidence from isotopic composition of soil and vegetation. *Global Change Biology* 16(6):605-616.
- Worrall, J.J., L. Egeland, T. Eager, R.A. Mask, E.W. Johnson, P.A. Kemp y W.D. Shepperd. 2008. Rapid mortality of *Populus tremuloides* in southwestern Colorado, USA. *Forest Ecology and Management* 255(3):686-696.
- Zhu Q., H. Jiang, J. Liu, C. Peng, X. Fang, S. Yu, G. Zhou, X. Wei y W. Ju. 2011. Forecasting carbon budget under climate change and CO2 fertilization for subtropical region in China using integrated biosphere simulator (IBIS) model. *Polish Journal of Ecology* 59(1):3-24.

Manuscrito recibido el 29 de agosto de 2013.
Aceptado el 29 de mayo de 2014.

Este documento se debe citar como:

Martínez-Antúnez, P., J.C. Hernández-Díaz, C. Wehenkel y C.A. López-Sánchez. 2015. Estimación de la densidad de especies de coníferas a partir de variables ambientales. *Madera y Bosques* 21(1):23-33.