

ESTIMACIÓN DE LA DISOCIACIÓN DE *Agave cupreata* A SU HÁBITAT IDÓNEO DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO

ESTIMATED DECOUPLING OF *Agave cupreata* POPULATIONS TO THEIR SUITABLE HABITAT DUE TO CLIMATE CHANGE

Cauhtémoc Sáenz-Romero^{1*}; Alejandro Martínez-Palacios¹; Juan M. Gómez-Sierra¹; Nidia Pérez-Nasser²; Nahum M. Sánchez-Vargas¹

¹Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, km 9.5, Carretera Morelia-Zinapécuaro. C. P. 58880. Tarímbaro, Michoacán.

²Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua carretera a Pátzcuaro, núm. 8701, Col. Ex-Hacienda de San Miguel de la Huerta. C. P. 58190. Morelia, Michoacán.
Correo-e: csaenzromero@gmail.com (*Autor para correspondencia)

RESUMEN

Los individuos maduros de *Agave cupreata* son cosechados para producir mezcal, una bebida alcohólica artesanal. El objetivo de este trabajo fue estimar el desfase potencial del hábitat apropiado, debido al cambio climático, entre las poblaciones y el clima al cual están adaptados. Para ello, se estimó el clima contemporáneo (promedio 1961-1990) y futuro (año 2030) de 12 localidades donde se distribuyen las poblaciones naturales. Las estimaciones se hicieron utilizando un modelo climático "spline", basado en resultados del modelo de circulación global canadiense, escenario de emisiones intermedio A1B. La estimación de la temperatura promedio de las 12 procedencias para el clima contemporáneo fue 19.1 °C y la estimación de la precipitación fue 961 mm. La predicción para el año 2030 fue 20.5 °C y 833 mm, con un incremento de temperatura de 1.4 °C y un decremento de precipitación de 13.3 %. Los resultados indican que el clima propicio para *A. cupreata* ocurrirá entre 175 y 225 m de altitud mayor que las localidades en donde actualmente se encuentran las poblaciones. Por tanto, se sugiere establecer plantaciones de conservación *ex situ* y comerciales bajo las condiciones mencionadas, como una medida de manejo de migración asistida para adaptarse al cambio climático predicho.

Recibido: 01 de noviembre de 2011
Aceptado: 16 de agosto de 2012
doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.11.078
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE: Agavaceae, calentamiento global, colonización asistida, desfase entre genotipos y ambiente, migración asistida.

ABSTRACT

Mature individuals of *Agave cupreata* are harvested to produce an artisan distilled alcoholic beverage (mezcal). The objective of this study was to estimate the potential decoupling of suitable habitat due to climatic change, between the populations and the climate for which they are adapted. Therefore, the contemporary (average 1961-1990) and future (decade centered in the year 2030) climate for 12 localities was estimated, where natural populations are distributed, using a spline climate model, based on outputs from the Canadian General Circulation Model and intermediate emission scenario A1B. Average temperature estimates of the 12 provenances for contemporary climate was 19.1 °C and precipitation estimates was 961 mm. Predicted for year 2030 was 20.5 °C and 833 mm, with a temperature increment of 1.4 °C and a precipitation decrease of 13.3 %. Results indicate that suitable climate for *A. cupreata* will occur at 175 to 225 m of higher elevations than the locations were populations are presently. Therefore, It is suggested to establish *ex situ* conservation and commercial plantations under the conditions mentioned above, as assisted migration management measure for adaptation to the predicted climatic change.

KEYWORDS: Agavaceae, global warming, assisted colonization, decoupling between genotype and environment, assisted migration.

INTRODUCCIÓN

Agave cupreata, una planta de la familia Agavaceae, es endémica del suroccidente de México, en los estados de Guerrero y Michoacán. La especie se distribuye en las laderas de la Depresión del Balsas entre 1,220 y 1,850 m, en la transición entre el bosque tropical

INTRODUCTION

Agave cupreata is an endemic plant of the Agavaceae family, found in the states of Guerrero and Michoacán, Southwestern Mexico. This specie is distributed on the slopes of the Balsas Depression (1,220 to 1,850 m) in the transition between tropical dry forest to oak, and pine-oak

seco a los encinares y en bosques de pino-encino (Gentry, 1982; Martin, Peters, Palmer, & Illsley, 2011). Los individuos maduros de las poblaciones naturales son cosechados justo antes de la floración para producir el mezcal, un destilado artesanal local similar al tequila mexicano (Colunga-García Marín & Zizumbo-Villareal, 2007; Zizumbo-Villareal & Colunga-García Marín, 2007). La cosecha impide la reproducción de la planta, ya que *A. cupreata* es semelpara (se reproducen una sola vez en su ciclo de vida) y no se reproduce vegetativamente. El efecto de la cosecha en la demografía de las poblaciones se agrava porque las plantas necesitan entre siete y 15 años para alcanzar su madurez sexual (Illsley et al., 2007).

Se ha estimado que para el año 2090, el cambio climático ocasionará en México un aumento de 3.7 °C en la temperatura media anual y una disminución de 18.2 % en la precipitación anual, respecto a los valores promedio registrados durante el periodo 1961-1990. Estas estimaciones fueron obtenidas promediando los resultados de la combinación de tres Modelos de Circulación General (Centro Canadiense, Centro Hadley y el Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos) y varios escenarios de emisiones (A2, A1B, B1 y B2), ajustándolos mediante un modelo climático de interpolación polinomial "spline" (Sáenz-Romero et al., 2010). Sin embargo, otras estimaciones para el año 2090 predicen un aumento de temperatura de 5 °C (modelo Hadley, escenario A2) y una disminución de la precipitación de 28.5 % (modelo Canadiense, escenario A2). La combinación de temperaturas altas y precipitaciones bajas provocarán un aumento general de la aridez en las regiones semiáridas de México, incluyendo la Depresión del Balsas. Para considerar posibles medidas de adaptación al cambio climático son necesarias tanto una estimación del clima contemporáneo, representado por variables climáticas clave como la temperatura promedio, precipitación y los grados día, como la predicción del clima en las localidades donde actualmente crece *A. cupreata* (Ledig, Rehfeldt, Sáenz-Romero, & Flores-López, 2010; Rehfeldt, Crookston, Sáenz-Romero, & Campbell, 2012).

Los objetivos del presente estudio fueron estimar las variables climáticas relevantes en las poblaciones naturales actuales de *A. cupreata* bajo un escenario contemporáneo y de cambio climático a futuro y proponer un lineamiento preliminar de migración asistida para adaptar dichas poblaciones al cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Poblaciones de estudio

En el área de distribución de *A. cupreata* se registraron latitud, longitud, altitud, pendiente y vegetación asociada. Los registros se hicieron en las localidades de

forests (Gentry, 1982; Martin, Peters, Palmer, & Illsley, 2011). Mature individuals of the natural populations are harvested just before flowering to produce a local artisan distillate known as *mezcal*, a traditional liquor similar to the Mexican tequila (Colunga-García Marín & Zizumbo-Villareal, 2007; Zizumbo-Villareal & Colunga-García Marín, 2007). Harvesting prevents the reproduction of the plant because *A. cupreata* is a semelparous plant (it reproduces sexually only once in its life time) and it does not reproduce vegetatively. The effect of harvesting in population demography is aggravated because plants need between seven and 15 years to reach their sexual maturity (Illsley et al., 2007).

It was estimated for Mexico that climatic change will increase the annual mean temperature in 3.7 °C and will decrease annual precipitation in 18.2 % for 2090, compared to the average period 1961-1990. These estimations were obtained averaging outputs from combinations of three General Circulation Models (Canadian Center, Hadley Center and Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), and several emission scenarios (A2, A1B, B1 and B2), fitted for a "spline" climate model (Sáenz-Romero et al., 2010). However, there are estimations of increase of temperature as high as 5.0 °C (Hadley model, scenario A2), and a decrease of precipitation of 28.5 % for 2090 (Canadian model, scenario A2). The combination of higher temperature and lower precipitation will cause a general increase of the aridity in the semiarid regions of México, including the Balsas Depression. Thus, an estimation of the contemporary climate, represented by key climatic variables such as mean average temperature, precipitation and degree days, and a prediction of the climate that will occur at the localities where *A. cupreata* populations occur in the present, are needed in order to consider possible measures of adaptation to the climatic change (Ledig, Rehfeldt, Sáenz-Romero, & Flores-López, 2010; Rehfeldt, Crookston, Sáenz-Romero, & Campbell, 2012).

The objectives of the present study were to estimate the relevant climatic variables in current natural populations of *A. cupreata* under a contemporary and a future climatic change scenario to suggest preliminary assisted migration guidelines to adapt these populations to climatic change.

MATERIALS AND METHODS

Study populations

Latitude, longitude, altitude, slope, and associated vegetation were recorded in the distribution area of *A. cupreata*. Records were obtained from the localities of

12 poblaciones naturales; ocho de Michoacán y cuatro de Guerrero (Cuadro 1). Los grupos de plantas individuales fueron considerados como poblaciones, mientras que la ubicación donde una población crece se le llamó procedencia o localidad. En las poblaciones se estimó también la diversidad genética (Martínez-Palacios, Gómez-Sierra, Sáenz-Romero, Pérez-Nasser, & Sánchez-Vargas, 2011).

12 natural populations; eight from the state of Michoacán and four from Guerrero (Table 1). The groups of individual plants were considered as populations, while the location where a population was recorded was called the provenance or locality. Genetic diversity was also estimated. (Martínez-Palacios, Gómez-Sierra, Sáenz-Romero, Pérez-Nasser, & Sánchez-Vargas, 2011).

CUADRO 1. Localización, pendiente, vegetación asociada y estado de conservación de 12 poblaciones de *Agave cupreata*.

Población	Estado	Municipio	Localidad	Coordenadas LN LW	Altitud (m)	Pendiente (°)	Vegetación	Estado de conservación
1	Michoacán	Turicato	Chiquito	19°21', 101°31'	1,650	25	PE ^a	Degradada
2	Michoacán	Madero	San Miguel	19°27', 101°11'	1,619	20	PE	Degradada
3	Michoacán	Morelia	Llanitos	19°35', 101°06'	1,887	15	PE	Degradada
4	Michoacán	Morelia	El Limón	19°32', 101°03'	1,811	25	PE	Degradada
5	Michoacán	Charo	Escalera	19°37', 101°02'	1,733	35	PE	Degradada
6	Michoacán	Charo	Pie de la Mesa	19°37', 100°57'	1,927	20	PE	Degradada
7	Michoacán	Tzitzio	Tembladera	19°34', 100°57'	1,800	40	PE	Degradada
8	Michoacán	Jungapeo	Escobas	19°28', 100°19'	1,420	30	PE	Conservada
9	Guerrero	E. Neri	Xochipala	17°48', 99°41'	1,286	15	ME ^b	Degradada
10	Guerrero	Tixtla	Tixtla	17°33', 99°27'	1,561	20	E ^c	Bien Conservada
11	Guerrero	Chilapa	Ayahualco	17°37', 99°10'	1,465	20	A ^d	Conservada
12	Guerrero	Atlixac	Mesones	17°33', 98°52'	1,703	25	PE	Bien Conservada
Media					1,655	24		

^aPE: Bosque de pino y encino, ^bME: Matorral espinoso, ^cE: Encinar, ^dA: Palmar.

TABLE 1. Location, slope, associated vegetation and conservation status of twelve *Agave cupreata* populations.

Population	State	Municipality	Locality	Coordinates Lat. N, Long. W	Altitude m	Slope (°)	Vegetation	Conservation Status
1	Michoacán ²	Turicato	Chiquito	19°21', 101°31'	1650	25	OP ^a	Degraded
2	Michoacán	Madero	San Miguel	19°27', 101°11'	1619	20	OP	Degraded
3	Michoacán	Morelia	Llanitos	19°35', 101°06'	1887	15	OP	Degraded
4	Michoacán	Morelia	El Limón	19°32', 101°03'	1811	25	OP	Degraded
5	Michoacán	Charo	Escalera	19°37', 101°02'	1733	35	OP	Degraded
6	Michoacán	Charo	Pie de la Mesa	19°37', 100°57'	1927	20	OP	Degraded
7	Michoacán	Tzitzio	Tembladera	19°34', 100°57'	1800	40	OP	Degraded
8	Michoacán	Jungapeo	Escobas	19°28', 100°19'	1420	30	OP	Conserved
9	Guerrero ^y	E. Neri	Xochipala	17°48', 99°41'	1286	15	T ^b	Degraded
10	Guerrero	Tixtla	Tixtla	17°33', 99°27'	1561	20	O ^c	Well conserved
11	Guerrero	Chilapa	Ayahualco	17°37', 99°10'	1465	20	P ^d	Conserved
12	Guerrero	Atlixac	Mesones	17°33', 98°52'	1703	25	PQ ^x	Well conserved
Mean					1655	24		

^aOP: oak and pine forest, ^bT: Thorns scrub, ^cO: Oak, ^dP: Palm.

Estimación del clima

En las 12 procedencias de *A. cupreata* se estimaron la temperatura (T) promedio mensual y anual, la precipitación (P) mensual y anual, los grados día anuales > 5 °C (GD5) y se calculó un índice de aridez anual

Climate estimations

Monthly and annual average temperature (T), monthly and annual precipitation (P), annual degree days > 5 °C (DD5) and an annual aridity index (AAI = $\sqrt{DD5/P}$) for contemporary climate (average of period 1961-1990) was

($IAA = \sqrt{GD5/P}$) para el clima contemporáneo (promedio del periodo de 1961-1990) mediante un modelo climático de interpolación polinomial "spline" (Sáenz-Romero et al., 2010). Las estimaciones se obtuvieron interrogando superficies climáticas "spline" previamente desarrolladas –extensión de una regresión multivariada, donde el modelo de regresión paramétrico es reemplazado por una función no paramétrica (Rehfeldt, 2006; Sáenz-Romero et al., 2010)–, mediante la ejecución del programa ANUSPLINE (Hutchinson, 2004). En este programa, las coordenadas y altitudes de las procedencias se insertan utilizando la interfaz de un sitio de internet diseñado ex profeso (Crookstone, 2012). Los valores altos del índice de aridez anual indican un clima caliente y seco (más grados día y menos precipitación, clima más árido) y valores pequeños indican sitios fríos y húmedos (menos árido). Las mismas variables climáticas promedio también se obtuvieron para un escenario de cambio climático futuro en el año 2030. Para ello se usó un modelo climático "spline" ajustado a partir de salidas del Modelo de Circulación General (MCG) del Centro Canadiense de Análisis y Modelos del Clima, escenario de emisión "intermedio" A1B, en el mismo sitio de internet (Crookstone, 2012). El escenario de emisión A predice elevadas emisiones de gases de efecto invernadero, el escenario B predice bajas emisiones, mientras que el escenario A1B para el MCG Canadiense es intermedio con un valor pronosticado de temperatura cercano al promedio de varias combinaciones de escenarios de emisión del MCG (Sáenz-Romero et al., 2010).

Las estimaciones de la migración asistida hacia altitudes mayores, necesaria para acoplar las poblaciones presentes al clima que probablemente ocurrirá en el futuro, se hicieron mediante la comparación del clima contemporáneo en las localidades donde se encuentran las poblaciones naturales. Las estimaciones se hicieron en términos de las altitudes a las cuales se prevé que ocurran (año 2030) las temperaturas medias anuales y los valores de aridez anual adecuados para la especie estudiada (Sáenz-Romero et al., 2010). Utilizamos el año 2030 como periodo de predicción, ya que no tendría caso llevar a cabo la migración asistida para que coincida con los climas pronosticados en el 2060 o 2090, pues las localidades con tal clima son demasiado fríos en la actualidad y probablemente las heladas causarían daños a las plántulas sembradas (Sáenz-Romero et al., 2010). Las comparaciones se hicieron después de ajustar modelos de regresión lineal y cuadrática de los valores climáticos estimados para cada población contra la altitud de cada procedencia, utilizando el procedimiento REG de SAS (Statistical Analysis System [SAS], 2004).

estimated using a previously developed spline climate model (Sáenz-Romero et al., 2010). The estimates were obtained by interrogating previously developed climatic spline surfaces –extension of a multivariate regression, where the parametric regression model is replaced by a smooth non-parametric function (Rehfeldt, 2006; Sáenz-Romero et al., 2010)–, by running a pre-written ANUSPLINE program (Hutchinson, 2004). In this program, coordinates and altitudes of the provenances are inserted using an ex-profeso Internet web-site interface (Crookstone, 2012). Larger values of annual aridity index indicate warmer and dryer climate (more degree days and less precipitation, e.g. more arid climate) and smaller values indicate colder and moister sites (less arid climate). The same average climatic variables were obtained for a forecasted climatic change scenario, for the average of the decade centered in year 2030 (for simplicity, we will refer herein to that decade average as year 2030), using a "spline" climate model fitted with outputs of the General Circulation Model (GCM) of the Canadian Center for Climate Modeling and Analysis, and the "intermediate" emission scenario A1B in the same website (Crookstone, 2012). Emission scenarios A predicts elevated greenhouse gas emissions; scenarios B predicts low emissions; scenario A1B for Canadian GCM is intermediate, with a predicted value of temperature close to the average of several combinations of the GCM emission scenarios (Sáenz-Romero et al., 2010).

Estimates of the assisted upward altitudinal migration needed to realign current populations to the climate that likely will occur in the future, and for which they are adapted, were made by comparing the contemporary climate in locations where natural populations are found. Estimates were conducted, in terms of altitudes at which such mean annual temperatures and annual aridity values are predicted to occur in the (year 2030) (Sáenz-Romero et al., 2010). We used year 2030 as future time period because there is no point in conducting assisted migration to match climates predicted for 2060 or 2090, because the localities with such climate are too cold nowadays, and likely frost would cause damage to the planted seedlings (Sáenz-Romero et al., 2010). Such comparisons were made after fitting linear and quadratic regression models of the estimated climatic values for each population against the altitude of each provenance, using the Procedure REG of SAS (Statistical Analysis System [SAS], 2004).

RESULTS AND DISCUSSION

Contemporary and 2030 climate estimates

The average of the mean annual temperature for the contemporary climate of the 12 provenances was

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación del clima contemporáneo y en 2030

El promedio de la temperatura media anual para el clima contemporáneo de las 12 procedencias fue 19.1 °C (Cuadro 2), y la prevista para el año 2030 fue 20.5 °C (Figura 1), lo cual representa un incremento de 1.4 °C, valor muy cercano al esperado de 1.5 °C de aumento de la temperatura promedio en México (Sáenz-Romero et al., 2010). El promedio de precipitación anual para el clima contemporáneo de las 12 procedencias fue 961 mm (Cuadro 2) y el previsto para el año 2030 fue 833 mm. Esto significa una disminución de 13.3 % con relación a la precipitación contemporánea, representando una reducción considerable en comparación con el 8.9 % pronosticado para México (Sáenz-Romero et al., 2010). Nuestros resultados de las procedencias localizadas en la Depresión del Balsas de Michoacán y Guerrero son congruentes con la predicción general acerca de una disminución de la precipitación de los territorios continentales de México. Dicha disminución surge aparentemente como resultado del aumento de temperatura y disminución de la humedad de las masas de aire (Christensen et al., 2007).

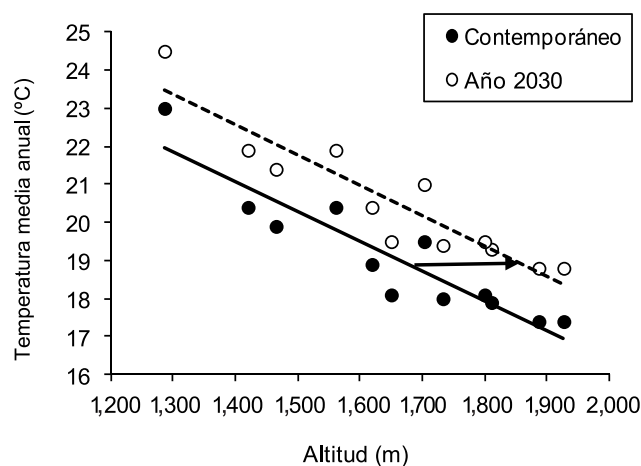


FIGURA 1. Temperatura media anual (°C) del clima contemporáneo (promedio 1961-1990) y la prevista para el año 2030 (Modelo Canadiense, escenario de emisión A1B), graficadas contra la altitud (m) de 12 procedencias de *Agave cupreata*. La flecha indica la migración asistida promedio necesaria para que el clima contemporáneo de las localidades de procedencia coincida con el clima predicho para el año 2030.

Desfasamiento entre genotipos y el hábitat adecuado

La regresión de los valores de la temperatura media anual para el clima contemporáneo y del año 2030, contra la altitud de cada procedencia (Figura 1), revela una disociación entre genotipos y el ambiente

19.1 °C (Table 2), and that predicted for year 2030 was 20.5 °C (Figure 1) which represents an increase of 1.4 °C, value very close to the expected 1.5 °C of increase of the average temperature in México (Sáenz-Romero et al., 2010). The average of the annual precipitation for contemporary climate was 961 mm (Table 2), and that predicted for year 2030 was 833 mm. This represents a decrease of 13.3 % in relation to the contemporary precipitation, representing a larger decrease of precipitation in comparison to the 8.9 % predicted for Mexico (Sáenz-Romero et al., 2010). Our results for the provenances located at the Balsas Depression of Michoacán and Guerrero are congruent with the general prediction of a decrease of precipitation for the interior lands of Mexico; apparently as result of the increase of temperature and decrease of humidity of the air masses that reaches the interior lands (Christensen et al., 2007).

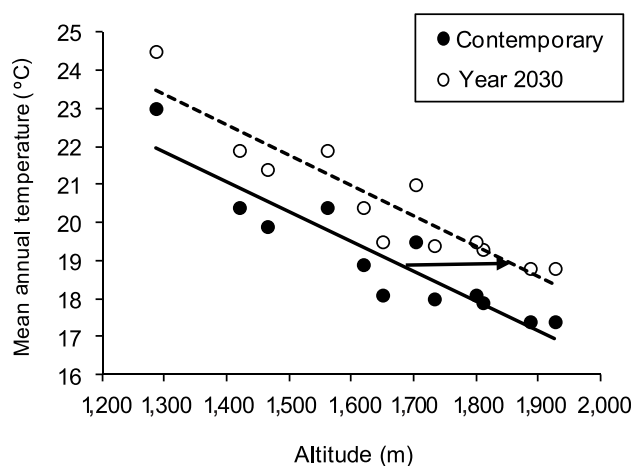


FIGURE 1. Mean annual temperature (°C) of the contemporary climate (average 1961-1990) and that predicted for year 2030 (Canadian Model, emission scenario A1B), plotted against altitude (m) of 12 provenances of *Agave cupreata*. Arrow indicate average assisted migration needed to match the contemporary climate of the provenance localities with the predicted climate for 2030.

Decoupling between genotypes and suitable habitat

The regression of the mean annual temperature for both contemporary and year 2030 climate, against altitude of each provenance (Figure 1), shows a decoupling between genotypes and the environments for which they are adapted. The lag between the altitude at which a given averaged contemporary mean annual temperature value occurs, and the elevation at which the same temperature value will likely occur in 2030, is nearly 175 m. Thus, in order to realign those populations to the average temperature for which they are adapted by year 2030, an assisted upward altitudinal migration of 175 m would be needed, which for simplified management can be rounded to 200 m (see arrow on Figure 1). With assisted

CUADRO 2. Estimaciones de la temperatura media mensual y anual (T), precipitación mensual y anual (P), grados día >5 °C (GD5) e índice de aridez anual (IAA) del clima contemporáneo (promedio 1961-1990) para 12 poblaciones de *Agave cupreata*.

Población	T (°C) P (mm)	Mes												Promedio T (°C) Total P (mm)	GD5	IAA
		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic			
1	T	15.4	16.2	18.2	20.0	20.9	20.0	18.9	18.7	18.5	17.9	16.9	15.7	18.1	4,748	0.0660
	P	22	7	6	13	40	184	254	226	199	67	18	8	1,044		
2	T	15.8	16.7	18.9	20.9	22.1	21.1	20.0	19.8	19.6	18.9	17.4	16.1	18.9	5,049	0.0701
	P	22	8	7	13	47	180	236	210	192	74	16	9	1,014		
3	T	14.0	15.0	17.3	19.4	20.6	19.8	18.5	18.4	18.2	17.2	15.7	14.4	17.4	4,490	0.0692
	P	20	9	9	15	48	162	222	206	184	70	15	9	969		
4	T	14.7	15.6	17.8	19.9	21.0	20.2	18.9	18.8	18.6	17.8	16.4	15.0	17.9	4,674	0.0684
	P	21	9	8	14	47	170	230	209	192	75	16	8	999		
5	T	14.6	15.6	17.9	19.8	21.2	20.5	19.2	19.1	18.9	17.9	16.4	14.9	18.0	4,714	0.0717
	P	20	8	7	13	45	162	223	202	181	72	16	8	957		
6	T	14.0	15.0	17.2	19.3	20.5	19.8	18.5	18.4	18.2	17.2	15.8	14.4	17.4	4,484	0.0700
	P	20	9	9	14	46	161	221	207	178	69	14	8	956		
7	T	14.8	15.7	18.0	19.9	21.2	20.4	19.1	19	18.9	18	16.6	15.1	18.1	4,734	0.0701
	P	20	9	8	13	46	168	227	207	186	75	15	8	982		
8	T	18.3	19.1	20.4	22.0	22.7	21.7	20.4	20.5	20.9	20.6	19.9	18.7	20.4	5,576	0.0955
	P	15	7	5	8	47	152	184	153	134	54	14	9	782		
9	T	20.8	21.8	23.7	25.5	26.0	24.4	23.3	23.1	22.8	22.6	21.7	20.8	23.0	6,506	0.1025
	P	8	2	11	16	49	163	167	154	145	60	9	3	787		
10	T	18.4	19.0	20.4	21.8	22.4	21.6	21.0	20.9	20.7	20.5	19.6	18.6	20.4	5,568	0.0727
	P	13	4	4	17	60	200	223	204	196	84	17	5	1,027		
11	T	17.4	18.3	20.0	21.5	22.2	21.4	20.7	20.4	20.3	19.9	18.8	17.7	19.9	5,382	0.0766
	P	14	4	4	19	60	185	209	195	173	73	15	7	958		
12	T	17.8	18.4	19.8	21.1	21.5	20.4	19.7	19.8	19.7	19.2	18.4	17.7	19.5	5,225	0.0681
	P	14	4	7	17	78	193	228	229	196	73	17	6	1,062		
Media	T	16.3	17.2	19.1	20.9	21.9	20.9	19.9	19.7	19.6	19.0	17.8	16.6	19.1	5,096	0.0751
	P	17	7	7	14	51	173	219	200	180	71	15	7	961		

TABLE 2. Monthly and annual mean temperature estimates (T), monthly and annual total precipitation (P), degree days > 5 °C (DD5) and annual aridity index (AAI) of contemporary climate (average 1961-1990) for 12 populations of *Agave cupreata*.

Population	T (°C) P (mm)	Mes												DD5	AAI	
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec			
1	T	15.4	16.2	18.2	20.0	20.9	20.0	18.9	18.7	18.5	17.9	16.9	15.7	18.1	4,748	0.0660
	P	22	7	6	13	40	184	254	226	199	67	18	8	1,044		
2	T	15.8	16.7	18.9	20.9	22.1	21.1	20.0	19.8	19.6	18.9	17.4	16.1	18.9	5,049	0.0701
	P	22	8	7	13	47	180	236	210	192	74	16	9	1,014		
3	T	14.0	15.0	17.3	19.4	20.6	19.8	18.5	18.4	18.2	17.2	15.7	14.4	17.4	4,490	0.0692
	P	20	9	9	15	48	162	222	206	184	70	15	9	969		
4	T	14.7	15.6	17.8	19.9	21.0	20.2	18.9	18.8	18.6	17.8	16.4	15.0	17.9	4,674	0.0684
	P	21	9	8	14	47	170	230	209	192	75	16	8	999		
5	T	14.6	15.6	17.9	19.8	21.2	20.5	19.2	19.1	18.9	17.9	16.4	14.9	18.0	4,714	0.0717
	P	20	8	7	13	45	162	223	202	181	72	16	8	957		
6	T	14.0	15.0	17.2	19.3	20.5	19.8	18.5	18.4	18.2	17.2	15.8	14.4	17.4	4,484	0.0700
	P	20	9	9	14	46	161	221	207	178	69	14	8	956		
7	T	14.8	15.7	18.0	19.9	21.2	20.4	19.1	19	18.9	18	16.6	15.1	18.1	4,734	0.0701
	P	20	9	8	13	46	168	227	207	186	75	15	8	982		
8	T	18.3	19.1	20.4	22.0	22.7	21.7	20.4	20.5	20.9	20.6	19.9	18.7	20.4	5,576	0.0955
	P	15	7	5	8	47	152	184	153	134	54	14	9	782		
9	T	20.8	21.8	23.7	25.5	26.0	24.4	23.3	23.1	22.8	22.6	21.7	20.8	23.0	6,506	0.1025
	P	8	2	11	16	49	163	167	154	145	60	9	3	787		
10	T	18.4	19.0	20.4	21.8	22.4	21.6	21.0	20.9	20.7	20.5	19.6	18.6	20.4	5,568	0.0727
	P	13	4	4	17	60	200	223	204	196	84	17	5	1,027		
11	T	17.4	18.3	20.0	21.5	22.2	21.4	20.7	20.4	20.3	19.9	18.8	17.7	19.9	5,382	0.0766
	P	14	4	4	19	60	185	209	195	173	73	15	7	958		
12	T	17.8	18.4	19.8	21.1	21.5	20.4	19.7	19.8	19.7	19.2	18.4	17.7	19.5	5,225	0.0681
	P	14	4	7	17	78	193	228	229	196	73	17	6	1,062		
Mean	T	16.3	17.2	19.1	20.9	21.9	20.9	19.9	19.7	19.6	19.0	17.8	16.6	19.1	5,096	0.0751
	P	17	7	7	14	51	173	219	200	180	71	15	7	961		

para el cual están adaptados. El desfase entre la altitud, en la cual ocurre un determinado valor promedio de la temperatura media anual contemporánea, y la elevación en la cual ese mismo valor de temperatura ocurrirá probablemente en el año 2030, es de casi 175 m. Por lo tanto, para realinear estas poblaciones a la temperatura promedio para la cual están adaptadas, en el año 2030 sería necesaria una migración asistida hacia altitudes 175 m mayores, incremento de elevación que deberá redondearse a 200 m para simplificar el manejo (véase la flecha en la Figura 1). La migración asistida requiere el coleccionar semillas de una determinada población, producir plántulas en un vivero a partir de esas semillas y trasplantar esas plántulas en el campo a elevaciones entre 175 y 200 m mayores a las de las poblaciones de origen. Estas plantaciones podrán ser destinadas tanto a la conservación de la diversidad genética *ex situ* como a la producción comercial (Martínez-Palacios et al., 2011).

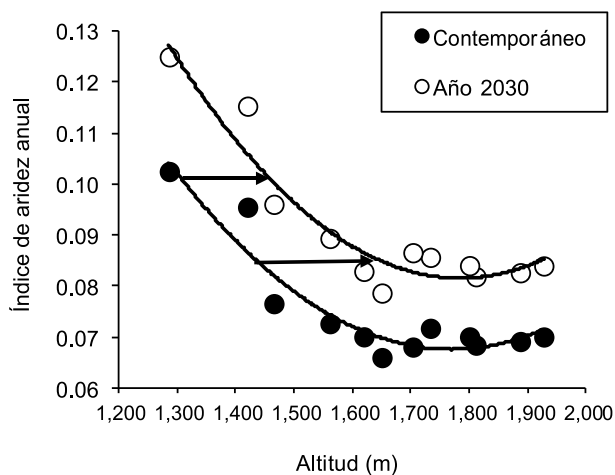


FIGURA 2. Valores del índice de aridez anual para el clima contemporáneo (promedio 1961-1990) y la predicción para el año 2030 (Modelo Canadiense, escenario de emisión A1B), graficados contra la altitud (m) de 12 procedencias de *Agave cupreata*. La flecha indica la migración asistida promedio necesaria para que el clima contemporáneo de las localidades de procedencia coincida con el clima predicho para el año 2030.

Los mismos criterios se aplicaron en una regresión del índice de la aridez media anual contra la altitud de procedencia (Figura 2). En este caso, la migración asistida deberá ser realizada a elevaciones mayores entre 175 y 225 m, al menos para las poblaciones localizadas en el menor intervalo altitudinal de la distribución natural, ya que la relación entre altitud y el índice de aridez anual es más complejo y requiere de más análisis. Este realineamiento sería necesario si las diferencias genéticas de las características cuantitativas entre las poblaciones de *A. cupreata* resultaran estar asociadas al gradiente altitudinal como ocurre en otras especies leñosas de las

migración we mean that seeds need to be collected from a given population, seedlings produced in a nursery, and then planted in the field at higher (175 to 200 m) elevation. Plantation could be either for *ex situ* conservation of forest genetic diversity or for commercial production (Martínez-Palacios et al., 2011).

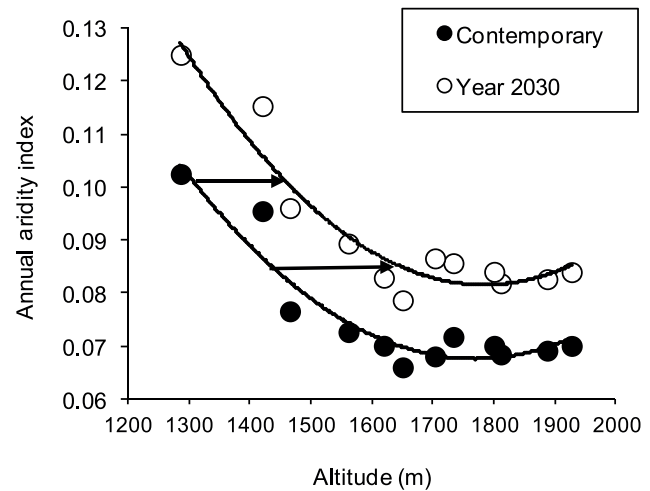


FIGURE 2. Annual aridity index values of the contemporary climate (average 1961-1990) and that predicted for year 2030 (Canadian Model, emission scenario A1B), plotted against altitude (m) of 12 provenances of *Agave cupreata*. Arrow indicate average assisted migration needed to match the contemporary climate of the provenance localities with the predicted climate for the year 2030.

The same criteria could be applied based on a regression of mean annual aridity index per provenance against altitude (Figure 2). In that case, the assisted migration upwards would be between 175 and 225 m of altitudinal difference, at least for the populations of the lowest altitudinal interval of the natural distribution, because the relationship between altitude and annual aridity index is more complex and requires of further analysis. This realignment would be needed if genetic differences of the quantitative traits among populations of *A. cupreata* prove to be associated to an altitudinal gradient, as it is the case for other woody forest species in the mountains of Mexico (Sáenz-Romero, Guzmán-Reyna, & Rehfeldt, 2006; Sáenz-Romero & Tapia-Olivares, 2008; Viveros-Viveros et al., 2009). However, to know if such association exists in this particular case, tests would need to be established.

If assisted migration is not conducted, it is likely that particularly populations located at the low altitudinal limit (approximately 1300 to 1500 m) of the altitudinal distribution range will be suffering gradually increasing drought stress, due to the predicted increase of temperature and decrease of precipitation, beyond their tolerance threshold provided by their phenotypic plasticity. Decay of forest tree populations at the low altitudinal

montañas de México (Sáenz-Romero, Guzmán-Reyna, & Rehfeldt, 2006; Sáenz-Romero & Tapia-Olivares, 2008; Viveros-Viveros et al., 2009). Sin embargo, para establecer tal asociación en este caso particular serían necesarias las pruebas de procedencia.

Si no se aplica la migración asistida es probable que, debido al incremento de la temperatura y disminución de la precipitación predichos, las poblaciones sufrirían un incremento gradual de estrés hídrico más allá del límite de tolerancia de su plasticidad fenotípica; en particular, aquéllas distribuidas en el límite inferior de la distribución altitudinal de la especie, entre 1,300 y 1,500 m de elevación. La declinación de poblaciones de árboles forestales a lo largo de su límite altitudinal inferior ha sido documentado para *Pinus edulis* en el suroeste de EUA (Breshears et al., 2005), *Populus tremuloides* en las Montañas Rocallosas, EUA (Rehfeldt, Ferguson, & Crookston, 2009), *Cedrus atlantica* en las montañas del Moyen Atlas, Marruecos (Mátyás, 2010) y *Fagus sylvatica* en el suroeste de Hungría (Mátyás et al., 2010) y el noreste de España (Peñuelas, Oyaga, Boada, & Jump, 2007). Si las poblaciones naturales de *A. cupreata* decaeran debido al cambio climático, los productores locales de mezcal tendrían que elegir entre los siguientes: a) reemplazar las poblaciones en decadencia por genotipos realineados adecuadamente o, b) cambiar el uso de suelo por otro cultivo más resistente al estrés hídrico que *A. cupreata* (lo que sería difícil de lograr) o por el pastoreo.

En este trabajo se asume que el clima apropiado para *A. cupreata* puede representarse adecuadamente mediante la temperatura media anual, la precipitación total anual y el índice de aridez anual. No obstante, es una limitación de nuestro análisis, ya que pudieran ser importantes otras variables, tales como, la temperatura media del mes más caliente como en el caso de *Abies religiosa* (Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, & Lindig-Cisneros, 2012), o el diferencial de temperatura verano-invierno (la diferencia entre las temperaturas del mes más cálido y del más frío) para *Picea chihuahuana* (Ledig et al., 2010). Para determinar el conjunto de variables más determinantes de la distribución de *A. cupreata*, deberá construirse un modelo bioclimático específico para esta especie mediante datos de presencia-ausencia, y un análisis con el algoritmo *Random Forests* como el que fue hecho en los trabajos de *A. religiosa* y *P. chihuahuana*.

CONCLUSIONES

El promedio de la temperatura media anual estimada para el clima contemporáneo de las 12 procedencias fue 19.1 °C, y para el año 2030 (MCG canadiense, escenario de emisiones intermedia A1B) fue 20.5 °C. El promedio de precipitación anual estimado para el clima

distribución limit is documented already for *Pinus edulis* in south-western USA (Breshears et al., 2005), *Populus tremuloides* in the Rocky Mountains, USA (Rehfeldt, Ferguson, & Crookston, 2009), *Cedrus atlantica* in the Moyen Atlas mountain range, Morocco (Mátyás, 2010), and *Fagus sylvatica* in South-west Hungary (Mátyás et al., 2010) and in northeast Spain (Peñuelas, Oyaga, Boada, & Jump, 2007). Also, if natural populations decay due to the climatic change, local mezcal producers would need to face the dilemma of: (a) replace the decaying populations for appropriate realigned genotypes, or (b) change the use of the land for a different crop, more resistant to drought stress that the *Agave cupreata* (something difficult to do) or even change to grazing activities.

In this work it is assumed that suitable climate for *A. cupreata* is well represented by mean annual temperature, annual total precipitation and annual aridity index. However, it is possible than other variables would be more relevant such as mean temperature of the warmest month like the case of *Abies religiosa* (Sáenz-Romero, Rehfeldt, Duval, & Lindig-Cisneros, 2012), or the summer-winter temperature differential (difference of temperature of the warmest month and the coldest month) for *Picea chihuahuana* (Ledig et al., 2010). In order to establish the set of most relevant climatic variables that determine the *A. cupreata* distribution, it would be needed to construct a species-specific bioclimatic model using presence/absence data and Random Forests (software R) analysis, as it was conducted for the mentioned examples of *A. religiosa* and *P. chihuahuana*.

CONCLUSIONS

The average of mean annual temperature estimated for contemporary climate (average 1961-1990) was 19.1 °C, and that predicted for year 2030 (Canadian general circulation model, intermediate emission scenario A1B) was 20.5 °C. Annual precipitation estimated for contemporary climate was 961 mm, and that predicted for year 2030 was 833 mm. These predictions represents an increase of mean temperature, due to climatic change, of 1.4 °C, and a precipitation decrease of 13.3 %, in comparison to the contemporary climate.

To realign *A. cupreata* populations to the climate for which they are adapted and the climate that will occur in different localities than the current ones, it is necessary to conduct an assisted migration of 175 to 225 m of altitudinally shift upwards, to match the climate expected for year 2030.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support was provided to AMP by the joint research fund for Basic Research between the Mexican

contemporáneo fue 961 mm y el predicho para el año 2030 fue 833 mm. Estas predicciones representan un incremento de la temperatura promedio, debido al cambio climático, de 1.4 °C y una disminución promedio de la precipitación de 13.3 % en comparación con el clima contemporáneo.

Para hacer el realineamiento de las poblaciones de *A. cupreata* al clima al cual están adaptadas y que se presentará en localidades distintas de las actuales, es necesario realizar una migración asistida desplazando las poblaciones a elevaciones entre 175 y 225 m más altas para hacerlas coincidir con el clima proyectado para el año 2030.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Fondo CONACYT-SEP (2004-P47777-Z) al Consejo de la Investigación Científica de la UMSNH (5.6) del COECYT-Michoacán (CB0702122-8) y a la Fundación Produce Michoacán (COFUPRO-001673 y 001852) por el financiamiento otorgado para la realización de este trabajo. También agradecemos el financiamiento brindado por los Fondos Mixtos CONACYT y el Gobierno del estado de Michoacán (FOMIX-2009-127128).

REFERENCIAS

- Breshears, D. D., Cobb, N. S., Rich, P. M., Price, K. P., Allen, C. D., Balice, R. G., ...Meyer, C. W. (2005). Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 102, 15144-15148. doi: 10.1073/pnas.0505734102
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioac, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., ...Whetton, P. (2007). Regional climate projections. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, ...H. L. Miller (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 847-940). United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press, Cambridge.
- Colunga-García Marín, P., & Zizumbo-Villarreal, D. (2007). El tequila y otros mezcales del centro-occidente de México: Domesticación, diversidad y conservación de germoplasma. In P. Colunga-García Marín, L. Eguiarte, A. Larqué, & D. Zizumbo-Villarreal (Eds.), *En lo ancestral hay futuro: Del tequila, los mezcales y otros agaves* (pp. 113-131). México D.F.: CICY-CONACYT-CONABIO-SEMARNAT-INE.
- Crookstone, N. L. (2012). Custom Climate Data Requests. In Research on Forest Climate Change: Potential Effects of Global Warming on Forests and Plant Climate Relationships in Western North America and Mexico. USA: Moscow Forestry Sciences Laboratory, Rocky Mountain Research Station, USDA Forest Service. Obtenido de <http://forest.moscowfs.wsu.edu/climate/>
- Gentry, S. H. (1982). *Agaves of Continental North America*. Tucson, Arizona: University of Arizona.
- Hutchinson, M. F. (2004). *ANUSPLIN version 4.3. User guide*. Canberra, Australia: Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University.
- National Council of Science and Technology (CONACYT) and the Mexican Ministry of Education (SEP, project -2004-P47777-Z), the Scientific Research Council (CIC) of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH, project 5.6), the State of Michoacán Council of Science and Technology (COECYT-Michoacán, Project CB0702122-8), the Fundación Produce Michoacán projects COFUPRO-001673 and 001852, and to CSR by the joint research fund between CONACYT and the State of Michoacán (FOMIX-2009-127128).

End of English Version

Illsley, C., Vega, E., Pisanty, I., Tlacotempa, A., García, P., Morales, P., ...Calzada, M. (2007). Maguey papalote: Hacia el manejo campesino de un recurso colectivo en el trópico seco de Guerrero, México. In P. Colunga-García Marín, L. Eguiarte, A. Larqué, & D. Zizumbo-Villarreal (Eds.), *En lo ancestral hay futuro: Del tequila, los mezcales y otros agaves* (pp. 19-338). México D.F.: CICY-CONACYT-CONABIO-SEMARNAT-INE.

Ledig, F. T., Rehfeldt, G. E., Sáenz-Romero, C., & Flores-López, C. (2010). Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany*, 97(6), 970-987. doi: 10.3732/ajb.0900329

Martin, M. P., Peters, C. M., Palmer, M. I., & Illsley, C. (2011). Effect of habitat and grazing on the regeneration of wild *Agave cupreata* in Guerrero, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1443-1451. doi: 10.1016/j.foreco.2011.06.045

Martínez-Palacios, A., Gómez-Sierra, J. M., Sáenz-Romero, C., Pérez-Nasser, N., & Sánchez-Vargas, N. M. (2011). Genetic diversity of *Agave cupreata* Trel. & Berger. Considerations for its conservation. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(3), 159-165. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802011000300006&script=sci_arttext

Mátyás, C. (2010). Forecasts needed for retreating forests. *Nature*, 464, 1271. doi:10.1038/4641271a

Mátyás, C., Berki, I., Czúcz, B., Gálos, B., Móczis, N., & Rasztoivits, E. (2010). Future of beech in Southern Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 6, 91-110.

Peñuelas, J., Oyaga, R., Boada, M., & Jump, A. S. (2007). Migration, invasion and decline: Changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 30, 830-838. doi: 10.1111/j.2007.0906-7590.05247.x

Rehfeldt, G. E. (2006). *A spline model of climate for the western United States*. Fort Collins, Colorado, USA: USDA Forest Service.

Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Sáenz-Romero, C., & Campbell, E. (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. doi:10.1890/11-0495.1

Rehfeldt, G. E., Ferguson, D. E., & Crookston, N. L. (2009). Aspen, climate and sudden decline in western USA. *Forest Ecology and Management*, 258, 2353-2364. doi:10.1016/j.foreco.2009.06.005

Sáenz-Romero, C., Guzmán-Reyna, R., & Rehfeldt, G. E. (2006). Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, México. Implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management*, 229, 340-350. doi:10.1016/j.foreco.2006.04.014

Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-

- Amant, R., Beaulieu, J., & Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for México and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102, 595-623. doi: 10.1007/s10584-009-9753-5
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98-106. doi:10.1016/j.foreco.2012.03.004
- Sáenz-Romero, C., & Tapia-Olivares, B. L. (2008). Genetic variation in frost damage and seed zone delineation within an altitudinal transect of *Pinus devoniana* (*P. michoacana*) in Mexico. *Silvae Genetica*, 57, 165-170. doi:10.1016/j.foreco.2012.03.004
- Statistical Analysis System (SAS) Institute Inc. (2004). *SAS/STAT 9.1 User's Guide*. Cary, North Carolina, USA: SAS Institute Inc.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Ramírez-Valverde, G., & Santacruz-Varela, A. (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I.: Height growth, shoot phenology, and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management*, 257, 836-842. doi:10.1016/j.foreco.2008.10.021
- Zizumbo-Villareal, D., & Colunga-García Marín, P. (2007). La introducción de la destilación y el origen de los mezcales en el occidente de México. In P. Colunga-García Marín, L. Eguiarte, A. Larqué, & D. Zizumbo-Villarreal (Eds.), *En lo ancestral hay futuro: Del tequila, los mezcales y otros agaves* (pp. 85-112). México D.F: CICY-CONACYT-CONABIO-SEMARNAT-INE.