

INSTITUTO POTOSINO
DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.

IPICYT

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE ENCINOS (*QUERCUS* SPP., FAGACEAE) DE AMBIENTES TEMPLADOS EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE CAMBIO DEL USO DE SUELO

Tesis que presenta

ERIK JOSÉ SÁNCHEZ MONTES DE OCA

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencias Ambientales

Director de tesis

Dr. Ernesto Iván Badano

San Luis Potosí

Julio de 2015



Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "***Germinación de semillas de encinos (*quercus spp.*, fagaceae) de ambientes templados en escenarios de cambio climático y de cambio del uso de suelo***" presentada para obtener el Grado de Maestro en Ciencias Ambientales fue elaborada por Erik José Sánchez Montes de Oca y aprobada el **dieciséis de julio del dos mil quince** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. Ernesto Iván Badano
Director de la tesis

Dr. Felipe Barragán Torres
Miembro del Comité Tutorial

Dr. Joel David Flores Rivas
Miembro del Comité Tutorial

M. en C. Juan Pablo Rodas Ortiz
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Ciencias Ambientales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la co-dirección del Dr. Ernesto Iván Badano y el M. en C. Juan Pablo Rodas Ortiz.

Durante la realización del trabajo, el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-296787).

Este proyecto fue financiado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación SEP-CONACYT clave CB-2013/221623.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 018 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Ciencias Ambientales está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 16 días del mes de julio del año 2015, se reunió a las 16:15 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. Joel David Flores Rivas	Presidente	IPICYT
Dr. Felipe Barragán Torres	Secretario	IPICYT
Dr. Ernesto Iván Badano _	Sinodal	IPICYT
M. en C. Juan Pablo Rodas Ortíz	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

sustentó el C.

Erik José Sánchez Montes de Oca

sobre la Tesis intitulada:

Germinación de semillas de encinos (quercus spp., fagaceae) de ambientes templados en escenarios de cambio climático y de cambio del uso de suelo

que se desarrolló bajo la dirección de

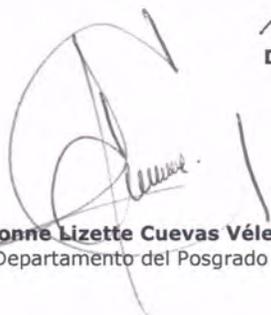
Dr. Ernesto Iván Badano _

El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 17:40 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 16 días del mes de julio de 2015.


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico



Agradecimientos

A mis padres, José y Matilde por su apoyo, su dedicación y su comprensión incondicional, por darme las herramientas en la vida para ser un hombre de bien, así como a mis hermanos Aydeé, René y César.

A la gran compañera de aventuras, por su apoyo y entusiasmo en todos los proyectos que hasta ahora hemos realizando juntos así como por todos los proyectos y aventuras que nos faltan por cumplir juntos: gracias Ariadna.

A mi director de tesis Dr. Ernesto Badano, así como al comité revisor, M. en C. Juan Pablo Rodas Ortiz, Dr. Joel Flores y Dr. Felipe Barragán, por los aportes, conocimientos, enseñanzas y motivaciones para desarrollar esta tesis.

A mis compañeros de generación, que voluntaria e involuntariamente participaron en la realización de este proyecto y actividades lúdicas que realizamos en estos 2 años de maestría, sobre todo por su amistad.

Todos aquellos que realizaron estancias, prácticas y servicio social que contribuyeron con su trabajo dentro del laboratorio, campo e invernadero.

Agradezco también la excelente disposición que siempre tuvo la Ing. Ana Mayra Garza Peña, propietaria de la Unidad de Manejo Ambiental “La Laguna”, quien siempre nos apoyó durante las labores de campo. Sin su colaboración, esta tesis no hubiera sido posible.

Al CONACYT por el apoyo económico a través de la beca, a la DCA del IPICYT a través del colegio de profesores-investigadores y técnicos por motivarme a aprender, en especial a la sociedad mexicana porque gracias a ella no podríamos realizar una maestría así como investigaciones para transformar a nuestra sociedad y ser un mejor país.

Se agradece el financiamiento aportado para esta investigación por el proyecto “Dinámicas de reclutamiento de encinos (*Quercus* spp.) en escenarios de cambio climático” (Fondo Sectorial de Investigación para la Educación SEP-CONACYT clave CB-2013/221623) asignado al Dr. Ernesto Iván Badano.

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	II
Créditos Institucionales	III
Acta de Examen	IV
Agradecimientos	V
Contenido.....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
HIPÓTESIS	5
OBJETIVO GENERAL	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
MATERIALES Y MÉTODOS	7
Zona de estudio.	7
Selección de especies	8
Experimento de simulación de cambio climático en campo.	8
Análisis estadístico.	12
RESULTADOS.....	14
Condiciones climáticas.	14
Germinación de bellotas.	18
Supervivencia de plántulas.	24
DISCUSIÓN.....	28
CONCLUSIONES.....	34
BIBLIOGRAFÍA.....	36

RESUMEN

En ecosistemas forestales dominados por encinos (*Quercus* spp.), la incorporación de nuevos individuos de estas especies ocurre mediante la germinación de sus bellotas. Este proceso depende, por un lado, de factores ambientales externos y, por otro lado, de factores intrínsecos de las especies. Entre los principales factores externos que regulan la germinación de bellotas está el clima, por lo que el cambio climático que está atravesando el planeta podría afectar las dinámicas de reclutamientos de encinos en el futuro. Los modelos climáticos que se han aplicado en México predicen que clima futuro será más cálido y, en algunos casos, más seco. Por esta razón, resulta importante evaluar si las poblaciones de encinos serán afectadas por este cambio climático, así como las interacciones entre este fenómeno y el actual uso de los suelos forestales. En este estudio se simulan experimentalmente las condiciones de cambio climático al interior de un bosque y en un área deforestada para evaluar las respuestas de germinación de bellotas de tres especies de encinos de ambientes templados (*Quercus castanea*, *Quercus crassipes* y *Quercus mexicana*). Estos experimentos se realizaron en la Sierra de Álvarez, San Luis Potosí (S.L.P.), y consistieron en establecer parcelas en las que se instalaron cámaras de techo abierto (OTC) para incrementar su temperatura, mientras que la disminución de precipitación se simuló estableciendo un sistema de canaletas que interceptaban el agua de lluvia que caía sobre ellas. También se emplearon parcelas control, las cuales consistieron en parcelas sometidas a las actuales condiciones climáticas. En estas parcelas experimentales se sembraron bellotas viables (prueba de flotación) y, para cada especie de encino, esto resultó en tres tratamientos para cada tipo de hábitat (interior del bosque y área deforestada): (a) control, (b) sólo con aumento de temperatura, y (c) con aumento de temperatura y reducción de precipitación. Los resultados indican que las estructuras aplicadas para la manipulación de condiciones microambientales permiten simular adecuadamente las condiciones climáticas que los modelos climáticos generales predicen para México en los próximos 20-30 años. Las bellotas de *Quercus castanea* y *Quercus crassipes* sembradas al interior del bosque

mostraron aumentos en sus tasas de germinación en aquellas parcelas donde se aplicó manipulación climática, mientras que no hubo diferencias en las tasas de germinación de *Quercus mexicana* entre tratamientos climáticos. En el área deforestada, en cambio, *Quercus crassipes* y *Quercus mexicana* tuvieron mayores tasas de germinación en las parcelas control, pero la germinación de *Quercus castanea* fue mayor en aquellas parcelas sometidas al tratamiento de calentamiento climático. Dado que junto con la germinación también se monitoreó la supervivencia de las plántulas resultantes, también se realizaron análisis dirigidos a comparar sus tasas de supervivencia en cada tipo de hábitat. En este caso se observó que, tanto al interior del bosque como en el área deforestada, la supervivencia de plántulas de todas las especies de encinos era mayor en las parcelas control. Estos resultados permiten sugerir que el cambio climático podría promover la germinación en algunas especies de encinos mientras que perjudicaría la germinación de otras pero, en todos los casos, reduciría las tasas de establecimiento de las plántulas resultantes.

Palabras Calve: cambio climático, encinos, germinación, reclutamiento, supervivencia

ABSTRACT

In forest ecosystems dominated by oaks (*Quercus* spp.), the recruitment of new individuals in these species mainly occurs through the germination of acorns. This process depends, on the one hand, on external environmental factors and, on the other hand, on intrinsic factors of the species. Among the main external factors that regulate the germination of acorns is the local weather and, thus, climate change is could affect the recruitment dynamics of oaks in the future. Climate models that have been applied to Mexico predict that the future climate will be warmer and, in some cases, drier. For this reason, it is important to assess whether oak populations will be affected by climate change, as well as the interactions between this phenomenon and the current use of forest soils. This study experimentally simulates climate change conditions within forests and deforested areas to evaluate responses of acorn germination of three oak species from temperate environments (*Quercus castanea*, *Quercus crassipes* and *Quercus mexicana*). These experiments were performed in Sierra de Alvarez, San Luis Potosi (S.L.P.), and consisted in establishing plots where open-top chambers (OTC) were installed to increase the temperature, while decreases in precipitation were simulated by establishing a gutter system for intercepting rainwater falling on them. In all cases, the controls consisted in parcels subjected to the current climatic conditions. In these experimental plots we sowed viable acorns (float test) and, for each species of oak, this resulted in three treatments for each type of habitat (within the forest and in the deforested area): (a) control plots (b) plots with temperature increase only, and (c) plots with increased temperature and precipitation reduction. The results indicate that the structures applied on plots for manipulating microenvironmental conditions properly allowed to simulate the climatic conditions that generalized climate models predict for Mexico in the next 20-30 years. The acorns of *Quercus castanea* and *Quercus crassipes* sowed into the forest showed increased germination rates in those plots where climatic manipulation was applied, but there were no differences in germination rates among climatic treatments for *Quercus mexicana*. In the deforested area, however, *Quercus mexicana* and *Quercus crassipes* had higher germination rates in control

plots, but the germination of *Quercus castanea* was higher in those plots subjected to the warming treatment. As survival of the resulting seedlings was monitored together with germination, we also performed analysis addressed to compare seedling survival rates at each habitat type. In this case we observed that, both within the forest and in the deforested area, seedling survival of all oak species was higher in the control plots. These results then suggest that climate change could promote germination in some oak species while germination would be reduced in other species, in all cases, climate change will reduce oak seedling establishment.

Keywords: climate change, germination, oaks, recruitment, survival

INTRODUCCIÓN

Las especies vegetales presentan adaptaciones que les permiten desarrollar respuestas funcionales para aclimatarse al estrés producido por las variaciones climáticas naturales, donde los valores umbrales de tolerancia a estas condiciones ambientales definen sus rangos de distribución (Fernández et al. 2011; Lloret 2012; Gutiérrez & Trejo 2014; Sanders et al. 2014). Cuando los factores climáticos exceden el grado de tolerancia de las especies vegetales, éstas no pueden desarrollar adecuadamente su ciclo de vida. Por lo tanto, evaluar los potenciales efectos que el cambio climático global tendrá sobre las mismas es crítico para establecer su prevalencia en los ecosistemas (Scheller & Mladenoff 2005). Sin embargo, el cambio climático es solamente parte del problema. La demanda de superficie para el desarrollo de actividades agropecuarias se ha incrementado de manera alarmante durante el último siglo y esto ha conducido a importantes pérdidas de cobertura de los ecosistemas naturales donde, entre los más afectados, están los bosques templados (López-Barrera & Newton 2005; Scheller & Mladenoff 2005). Estas perturbaciones antrópicas, en combinación con el cambio climático, pueden generar condiciones ambientales extremas que sobrepasen ampliamente los umbrales de tolerancia de las especies que habitan los bosques, lo que a su vez podría repercutir en la capacidad de estos ecosistemas para recuperarse tras las perturbaciones (Gómez-Mendoza & Arriaga 2007).

El mantenimiento de los bosques, como también su recuperación tras las perturbaciones, son procesos modulados por factores bióticos y abióticos que afectan principalmente a los propágulos de las especies y el posterior

establecimiento de los individuos jóvenes (Pérez et al. 2014). Sin embargo, los factores abióticos son la primera barrera que las especies forestales deben superar para que ocurra el mantenimiento y la regeneración de los bosques, entre los cuales se incluyen la temperatura, la humedad del suelo, la humedad del aire, la disponibilidad nutrientes y las condiciones lumínicas del entorno (López-Barrera & Newton 2005; David et al. 2007; Gallardo et al. 2009; Villar et al. 2014). Estos factores físicos regulan la viabilidad y la germinación de las semillas, como también la posterior supervivencia y establecimiento de plántulas (Pérez-López et al. 2014; Gallardo et al. 2009). Sin embargo, estos factores abióticos están siendo alterados por el cambio ambiental inducido por el hombre, principalmente por el cambio climático, la pérdida de hábitats naturales y los cambios en el uso del suelo (Chapin et al. 2011; Kirtman et al. 2013).

Los modelos de cambio climáticos aplicados para México estiman que la temperatura se incrementará entre 1.5 y 2.0° C para el 2050, mientras que la precipitación anual pudiera reducirse hasta en un 10% (Gómez-Mendoza & Arriaga 2007). Por otra parte, entre los ecosistemas forestales de México cuya superficie ha sido más fuertemente reducida por la demanda de tierras para ganadería y cultivo están los bosques dominados por el género *Quercus* (Fagaceae), comúnmente conocidos como encinos o robles. En este sentido, cabe destacar que nuestro país alberga la mayor diversidad de este género de plantas a nivel mundial, con 161 especies que se dividen en tres secciones: sección *Quercus*, o encinos blancos, a los que pertenece el 46% de estas especies, sección *Lobatae*, o encinos rojos, que contiene el 51% de las especies mexicanas de encinos, y sección *Protobalanus*, o encinos intermedios, con el 3% de las especies (Nixon 2006; Valencia 2004). Los

bosques de encino mexicanos se localizan principalmente en climas templados, entre los 1200 y 2800 msnm (Rzedowski 2006), y 67.7% de las especies son endémicas para el país (Zavala-Chávez 1998). Además de proveer servicios ecosistémicos a las comunidades humanas desde épocas prehispánicas (Luna-José et al. 2003) y de mantener una gran diversidad de fauna (Sabás-Rosales 2011), estos bosques cubren las zonas de recarga de los mantos acuíferos de los cuales dependen parte de los asentamientos humanos de la zona central del país (García-Coll et al. 2004). Por lo tanto, este grupo de plantas debería considerarse como prioritario para la conservación y la restauración de ecosistemas forestales en México, pero la falta de información sobre su ecología y sus potenciales respuestas ante los factores que componen el cambio ambiental dificultan esta meta.

En bosques de encinos, la incorporación de nuevos individuos a las poblaciones de especies está fundamentalmente regulada por la germinación de las bellotas, que son el fruto característico de este grupo de plantas (Zavala-Chávez & García-Moya 1996; Pérez-López et al. 2014). Tomando en consideración únicamente los factores físicos, uno de los principales factores que reduce las tasas de germinación de las bellotas en el campo es su pérdida de viabilidad, lo cual se relaciona con la pérdida de agua (Moore 1928; Ramos-Palacios et al. 2014). Se ha reportado que las bellotas pueden perder agua muy rápidamente tras ser liberadas de la planta madre (semillas recalcitrantes) (Zavala-Chávez 2004), por lo que el mantenimiento de su capacidad germinativa en condiciones de campo puede reducirse en los escenarios de incremento de temperatura esperados para México. De igual forma, la germinación y la supervivencia de plántulas resultantes, también dependen de la disponibilidad de agua (Guo et al. 1998; Weltzin et al. 2001), por lo

que podría esperarse que las alteraciones pronosticadas en las precipitaciones reduzcan las tasas de reclutamiento de los encinos al interior de sus bosques.

Estos cambios climáticos podrían tener incluso efectos negativos más fuertes sobre las tasas de germinación de bellotas y la supervivencia de las plántulas en las áreas deforestadas. En este sentido, bajo las actuales condiciones climáticas, se ha visto que la germinación de bellotas puede ser mayor en espacios abiertos que al interior del bosque (Tabari et al. 2007), mientras que la supervivencia de las plántulas resultantes puede ser menor (López-Barrera & Newton 2005). Sin embargo, en escenarios de cambio climático, se puede sugerir que ambos procesos se verían perjudicados porque la elevada radiación solar pudiera intensificar los efectos de la temperatura y la falta de humedad. Así, los procesos de regeneración del bosque en áreas deforestadas pudieran estar altamente comprometidos en el futuro.

Los antecedentes provistos indican que, para México, sería importante evaluar cómo el cambio climático pudiera afectar las dinámicas de reclutamiento de los encinos en el futuro. Este estudio se enfoca en este tema analizando las respuestas de germinación de bellotas y establecimiento de plántulas en encinos rojos (sección *Lobatae*) de ambientes templados del centro de México. Ambos procesos se evalúan tanto al interior del bosque como en áreas deforestadas producto de perturbaciones humanas, pretendiendo generar conocimientos que sirvan para proponer estrategias de conservación, adaptación y recuperación de estos ecosistemas en escenarios de cambio climático.

HIPÓTESIS

1. Para encinos de climas templados, que son objeto de este estudio, se espera que el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación afecten negativamente la germinación de sus bellotas, como también el establecimiento de sus plántulas.
2. Los impactos del cambio climático sobre la germinación de bellotas y el establecimiento de las plántulas de encinos serán más intensos en áreas deforestadas que al interior del bosque, ya que la falta de protección del dosel potenciaría el impacto del aumento de la temperatura y el incremento de las condiciones de sequía.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto del aumento de la temperatura y la reducción de la precipitación sobre la germinación de bellotas y el posterior establecimiento de plántulas de especies del género *Quercus* pertenecientes a la sección *Lobatae* que habitan en climas templados, tanto al interior de sus bosques como en áreas deforestadas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar si se pueden simular en campo las condiciones de temperatura y precipitación esperadas bajo escenarios de cambio climático.

- Establecer el efecto de los cambios en la temperatura y la precipitación sobre las tasas de germinación de bellotas.
- Establecer cómo afectarán los cambios estimados en temperatura y precipitación a las tasas de establecimiento de plántulas de encinos en el campo.
- Establecer si los procesos de germinación de bellotas y establecimiento de plántulas se ven afectados diferencialmente en áreas deforestadas, en relación a lo que ocurre bajo el dosel de bosques conservados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio. El sitio de estudio se encuentra dentro de la Región Terrestre Prioritaria 98 de la SEMARNAT (RTP-98), Sierra de Álvarez (Figura 1), en el estado de San Luis Potosí. La Sierra de Álvarez ocupa una superficie de 2,265 km² y abarca los municipios de San Nicolás Tolentino, Santa María del Río, Tierranueva, Villa Hidalgo y Zaragoza. El clima predominante corresponde al templado semiseco, con temperatura media anual entre 18 y 22° C, con lluvias en verano y precipitación media anual de 500-600 mm, aunque en algunos sitios se sobrepasan los 800 mm al año. La vegetación predominante son bosques de encino (38%) y de pino (15%), incluyendo asociaciones pino-encino y zonas de pastoreo y cultivos. El área de estudio se encuentra específicamente en las coordenadas 21°58'29.4" N y 100°34'24.9" W, dentro de la Unidad de Manejo Ambiental "La Laguna", donde se dispone de un bosque de encinos primario que colinda con un área deforestada.

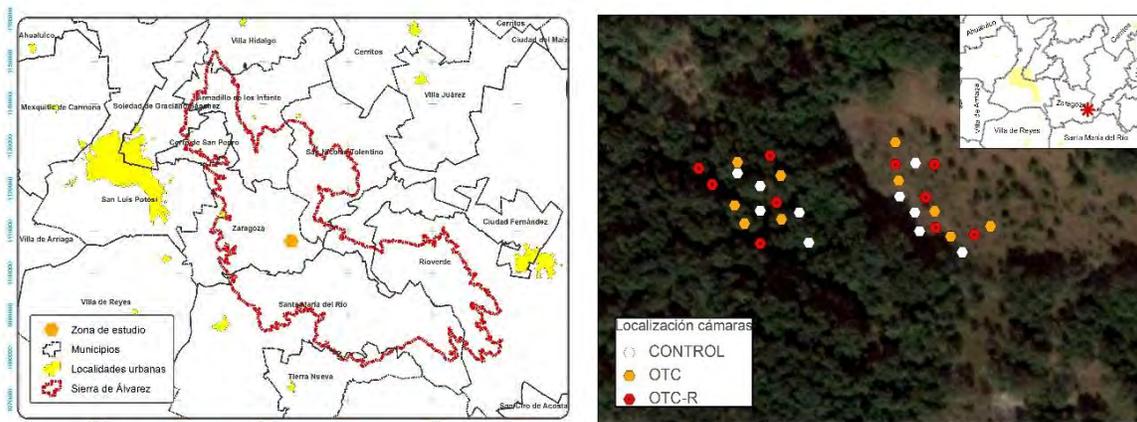


Figura 1. Localización de zona de estudio (imagen de la izquierda) y ubicación de las parcelas experimentales al interior del bosque y en la zona deforestada (imagen de la derecha).

Selección de especies. Para este estudio se consideraron tres especies de encinos rojos altamente conspicuos en la zona de estudio: *Quercus castanea*, *Quecus crassipes* y *Quecus mexicana*, todos pertenecientes a la sección *Lobatae* de este género. Se colectaron bellotas de las tres especies entre septiembre y diciembre de 2013, las cuales fueron sometidas a la prueba de flotación para separar las viables de las inviables. Esta es un prueba no invasiva donde las bellotas viables permanecen hundidas al ser colocadas en agua, mientras que las bellotas que perdieron su viabilidad flotan en la superficie (Zavala-Chávez & García-Moya 1996; Flores-Cano et al. 2012). Las bellotas viables se almacenaron a 5° C dentro de bolsas plásticas para evitar que perdieran humedad y poder ser utilizadas en el año 2014 en el presente estudio.

Experimento de simulación de cambio climático en campo. Una posibilidad para evaluar los posibles efectos del cambio climático en comunidades vegetales es el uso de cámaras de techo abierto (OTC por las siglas en inglés de Open Top Chambers) (Molau & Mølgaard 1996; Henry & Molau 1997). Estas cámaras fueron diseñadas para el Experimento Internacional en la Tundra (ITEX) con el objeto de incrementar la temperatura en campo (Henry & Molau 1997). Las OTC son de diseño simple y económico, permiten incrementar de manera pasiva la temperatura entre 2 y 5° C. Para este estudio las OTC fueron construidas con lámina de acrílico de 3 mm de grosor y siguiendo el modelo del ITEX (Molau & Mølgaard 1996), cámaras hexagonales que tienen una altura de 0.58 m, 2.08 m de base y 1.50 m de abertura en la parte superior.

En el sitio experimental, se colocaron diez OTC al interior del bosque y otras diez en un área deforestada adyacente. Previo a la colocación de las cámaras se realizó un clareo (limpieza) en el sitio donde se instalaron, retirando hojarasca y vegetación para evitar interferencia con el experimento. Además, sobre la mitad de OTC instaladas en cada tipo de hábitat, se colocaron sistemas de reducción de precipitación que consistieron en canaletas de fibra de vidrio que cubren el 10% de su parte superior abierta (Figura 2). De esta manera, se simularon las condiciones de las predicciones de cambio climático, donde además del incremento de la temperatura se esperan reducciones en la precipitación. No obstante, dado que hay incertidumbre si ocurrirán cambios en la precipitación en la región de estudio (Hernández-Cerda et al. 2000), se mantuvieron la mitad de las cámaras bajo los escenarios actuales de precipitación (sin canaletas). También se seleccionaron cinco parcelas que sirvieron de controles en cada uno de los hábitats de la zona de estudio, donde no se aplicó ninguna manipulación de la temperatura ni la precipitación (Figura 2). De esta manera, se tuvieron cinco réplicas de cada tratamiento en cada tipo de hábitat.

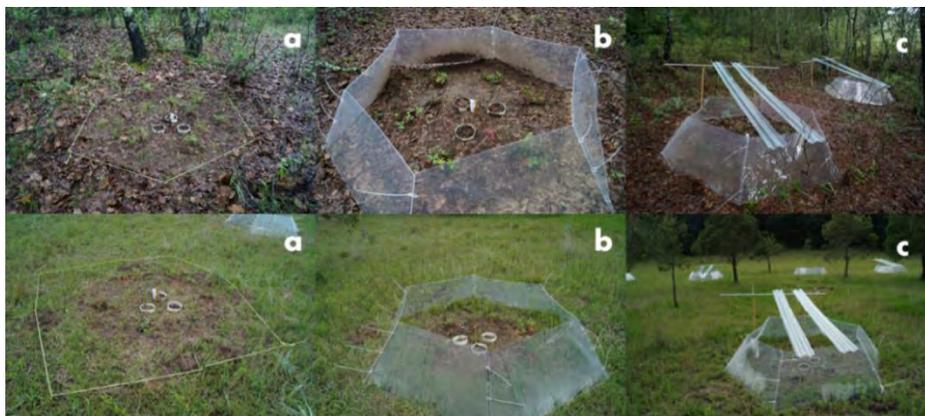


Figura 2. Parcelas experimentales instaladas en el bosque (arriba) y en el área deforestada (abajo). Se muestran las parcelas control (a), las parcelas con simulación de aumento de la temperatura solamente (b) y las parcelas con simulación de aumento de la temperatura y reducción de las precipitaciones (c).

Las parcelas experimentales se instalaron en el campo al inicio del periodo de lluvias, en junio de 2014, tanto en el bosque como en el área deforestada (distribución de unidades experimentales en Figura 1). Para determinar si las manipulaciones realizadas mediante las OTC y los sistemas de canaletas permiten simular adecuadamente las condiciones esperadas en escenarios de cambio climático, se seleccionaron al azar tres parcelas de cada tratamiento y dentro de ellas se colocaron sensores automatizados de temperatura y humedad relativa del aire (HOBO U23 Pro v2, Onset Computer Corporation, USA), los cuales fueron fijados a 20 cm del suelo en estacas de madera. En estas parcelas también se registró la temperatura del suelo con sensores automatizados (HOBO Pendant UA-002-08, Onset Computer Corporation, USA) que fueron enterrados a 2 cm de profundidad. Todos estos sensores fueron programados para registrar las variables climáticas cada hora. Dentro del bosque como en el área deforestada, se seleccionó

al azar una parcela experimental sometida al tratamiento de incremento de temperatura y reducción de precipitaciones y dentro de ella se colocó un sensor de precipitación automatizado (HOBO Rainfall Sensor S-RGB-M002, Onset Computer Corporation, USA) al nivel del suelo. Un sensor similar se colocó también fuera de estas parcelas. Estos sensores reportan la cantidad de agua de lluvia que impacta en el suelo por cada evento de precipitación, lo cual permitió estimar la diferencia de precipitación entre estas parcelas experimentales y aquellas en las que no se aplicaron sistemas de reducción de precipitaciones. Estas variables climáticas se registraron durante todo el período de estudio.

Para la siembra de bellotas, cada parcela fue dividida en tres cuadrantes que fueron asignados aleatoriamente a cada una de las especies de encinos. El 04 de julio de 2014, una vez que estuvieron montadas todas las parcelas experimentales, dentro de cada una de ellas se sembraron superficialmente (1.5 cm de profundidad) 30 bellotas de *Quercus castanea*, 10 bellotas de *Quercus crassipes* y 50 bellotas de *Quercus mexicana* en los cuadrantes correspondientes a cada especie. Esta variación en la cantidad de bellotas sembradas de cada especie se debió a diferencias en la disponibilidad de bellotas viables. En todos los casos, las bellotas fueron colocadas en agua durante 24 horas antes de su siembra, para que estuvieran plenamente hidratadas, estandarizándose así su potencial germinativo. Tras la siembra, se colocó una tela de alambre (apertura 13 mm) sobre las bellotas para evitar que las mismas fueran removidas por depredadores.

El monitoreo de la germinación en las parcelas experimentales se realizó cada 14 días. En todos los casos, se consideró que una bellota había germinado cuando se observara emergencia de su brote aéreo. Adicionalmente, se monitoreó

la supervivencia de las plántulas resultantes, para lo cual se registró la fecha de emergencia del brote aéreo y, en su caso, la fecha de muerte de cada plántula. En estos últimos casos, se asumió que las plántulas habían muerto cuando sus hojas, tallo y meristemas apicales se encontraban completamente secos. Este monitoreo de la germinación de bellotas y la supervivencia de plántulas se llevaron a cabo hasta el 30 de enero de 2015, cubriendo toda la estación lluviosa. El motivo de incluir solamente la temporada de lluvias se debió a que es el período del año en que las bellotas deben germinar, ya que después de esta fecha se asumió el inicio de la estación seca. Además, este es el único período en el cual tiene sentido el tratamiento de manipulación climática resultante de combinar incrementos de la temperatura con reducciones de la precipitación.

Análisis estadístico. Al finalizar los experimentos, los datos de temperatura y humedad relativa del aire, como también de temperatura del suelo, se procesaron de manera separada para el bosque y el área deforestada. Esos datos se agruparon en períodos de 14 días para cada sensor climático y se calcularon la temperatura máxima, media y mínima del aire y del suelo, como también el promedio de humedad relativa del aire. Estos valores fueron comparados entre tratamientos climáticos con pruebas ANDEVA de medidas repetidas. Los datos de precipitación, por otra parte, se utilizaron para construir curvas de precipitación acumulada dentro y fuera de las parcelas en las cuales se aplicaron los sistemas de reducción de precipitaciones.

Para establecer si las tasas de germinación y de supervivencia de plántulas fueron afectadas por los escenarios climáticos simulados en el campo, se realizaron

análisis de tiempo de falla para cada tipo de hábitat de forma individual. En estos análisis, la germinación de una bellota o la muerte de una plántula en una fecha de monitoreo determinada constituye una “falla”, por lo que se consideran a cada una de ellas como una réplica (Lee et al. 1975). Estos análisis se realizaron individualmente para cada especie de encino y en cada tipo de hábitat, usando el método de Kaplan-Meier (Kaplan & Meier 1958) para estimar las tasas de germinación y supervivencia en cada tratamiento. Posteriormente, se empleó la prueba chi-cuadrado de Gehan generalizada por Wilcoxon para comparar tasas de germinación y supervivencia entre tratamientos y, cuando se encontraron diferencias significativas, se usaron pruebas Cox-Mantel (Lee et al. 1975) para establecer diferencias entre pares de tratamientos.

RESULTADOS

Condiciones climáticas. Las temperaturas media y máxima del aire difirieron entre tratamientos climáticos, tanto al interior del bosque como en el área deforestada (Tabla 1). Sin embargo, en ambos hábitats se observaron variaciones significativas en los valores de estas variables a través del tiempo, como también efectos interactivos entre el tiempo y los tratamientos climáticos (Tabla 1). Entre Julio y Noviembre de 2014, las parcelas instaladas en el interior del bosque y en las cuales se indujo calentamiento con OTC (independientemente si estaban acompañadas con reductores de precipitación) presentaron temperaturas medias entre 2.1° y 2.8° C por encima de las registradas en las parcelas control, mientras que para este mismo período se registraron diferencias entre 2.6° y 4.4° C entre las temperaturas máximas registradas en las parcelas con calentamiento inducido y las parcelas control (Figura 1A). Estas diferencias en las temperaturas, sin embargo, se redujeron considerablemente después de mediados de Noviembre de 2014 (Figura 1A). En el área deforestada, las diferencias de temperatura entre parcelas con calentamiento inducido y parcelas control fueron aún más pronunciados, alcanzándose diferencias de hasta 3.9° C en las temperaturas medias y diferencias de hasta 7.3° C en las temperaturas máximas, aunque en este hábitat ambas variables presentaron valores más altos en las parcelas con calentamiento inducido que en parcelas control durante todo el período de estudio (Figura 1B). A diferencia de las temperaturas media y máxima, la temperatura mínima solo presentó variación en el tiempo, tanto al interior del bosque como en el área deforestada, sin observarse efectos de los tratamientos climáticos ni efectos interactivos entre estos tratamientos y el tiempo (Tabla 1; Figura 3A y 3B).

Tabla 1. Resultados de las pruebas ANDEVA de medidas repetidas realizados para comparar las variables climáticas entre parcelas sometidas a manipulación climática y parcelas control dentro del bosque y en el área deforestada (valor crítico para diferencias significativas $\alpha = 0.05$ en todos los casos). La tabla muestra los valores de los estadísticos (F, g.l., y p) resultantes de la comparación entre tratamientos climáticos (efecto del tratamiento), entre fechas (efecto del tiempo) y de la interacción entre estos dos factores (Interacción tratamiento x tiempo). Los casos donde se detectaron efectos significativos se destacan en color rojo.

Variable climática	Interior del bosque			Área deforestada		
	Efecto del tratamiento	Efecto del tiempo	Interacción tratamiento x tiempo	Efecto del tratamiento	Efecto del tiempo	Interacción tratamiento x tiempo
Temperatura media del aire	$F_{(2,6)} = 46.7829$ $p = 0.0002$	$F_{(14,84)} = 2037.2430$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 4.1387$ $p < 0.0001$	$F_{(2,6)} = 107.6146$ $p < 0.0001$	$F_{(14,84)} = 2368.3404$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 2.5685$ $p < 0.0001$
Temperatura máxima del aire	$F_{(2,6)} = 17.5865$ $p = 0.0031$	$F_{(14,84)} = 20.9050$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 129.4838$ $p < 0.0001$	$F_{(2,6)} = 53.3044$ $p = 0.0002$	$F_{(14,84)} = 73.2705$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 2.2611$ $p = 0.0023$
Temperatura mínima del aire	$F_{(2,6)} = 2.4319$ $p = 0.21685$	$F_{(14,84)} = 16661.3588$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 0.9907$ $p = 0.4914$	$F_{(2,6)} = 4.6201$ $p = 0.0610$	$F_{(14,84)} = 3861.4260$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 1.4271$ $p = 0.1092$
Humedad relativa del aire	$F_{(2,6)} = 335.1175$ $p < 0.0001$	$F_{(14,84)} = 1823.7510$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 12.1866$ $p < 0.0001$	$F_{(2,6)} = 485.8336$ $p < 0.0001$	$F_{(14,84)} = 756.1423$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 18.2609$ $p < 0.0001$
Temperatura media del suelo	$F_{(2,6)} = 517.7133$ $p < 0.0001$	$F_{(14,84)} = 3388.7672$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 2.2109$ $p = 0.0029$	$F_{(2,6)} = 648.2180$ $p < 0.0001$	$F_{(14,84)} = 6660.7228$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 3.4817$ $p < 0.0001$
Temperatura máxima del suelo	$F_{(2,6)} = 1.7765$ $p = 0.2478$	$F_{(14,84)} = 39.1276$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 1.6121$ $p = 0.0496$	$F_{(2,6)} = 2.8770$ $p = 0.1330$	$F_{(14,84)} = 284.3670$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 1.8820$ $p = 0.0143$
Temperatura mínima del suelo	$F_{(2,6)} = 1.9287$ $p = 0.2255$	$F_{(14,84)} = 2360.1505$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 0.8472$ $p = 0.6828$	$F_{(2,6)} = 2.4110$ $p = 0.1705$	$F_{(14,84)} = 847.6170$ $p < 0.0001$	$F_{(28,84)} = 1.5651$ $p = 0.0610$

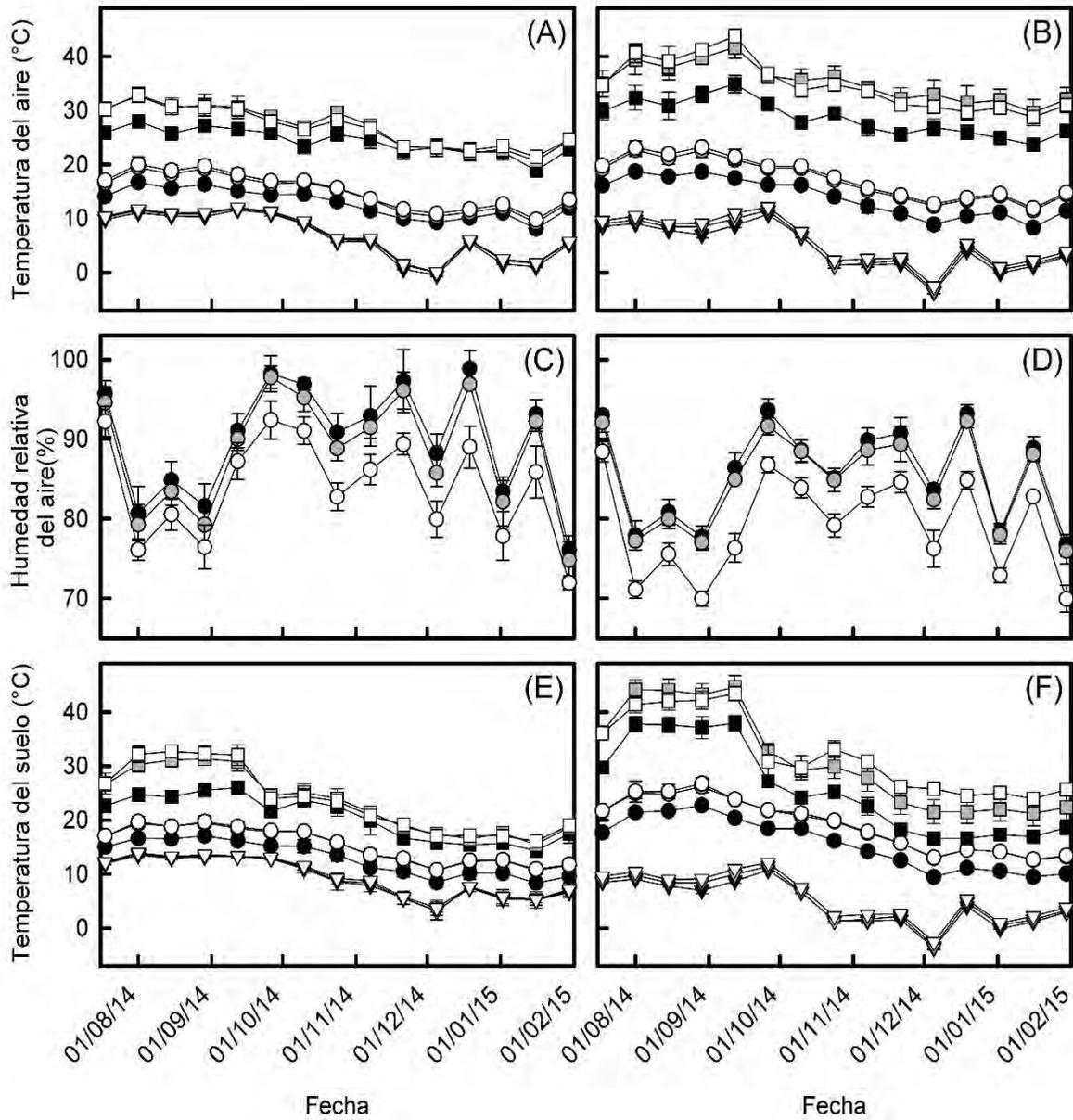


Figura 3. Valores de las variables climáticas (promedios \pm 95 I.C.) medidas en las parcelas de control (símbolos negros), parcelas sometidas solamente a calentamiento (símbolos grises) y parcelas sometidas a calentamiento y reducción de precipitaciones (símbolos blancos), tanto al interior del bosque (columna de la izquierda) y en el área deforestada (columna de la derecha). Estas variables incluyen las temperaturas medias (círculos), máximas (cuadrados) y mínimas (triángulos) del aire (paneles A y B), humedad relativa del aire (paneles C y D), y temperaturas medias (círculos), máximas (cuadrados) y mínimas (triángulos) del suelo (paneles E y F).

Tanto al interior del bosque como en el área deforestada, la humedad relativa del aire difirió entre tratamientos climáticos y a través del tiempo, observándose también efectos interactivos entre estos dos factores (Tabla 1). En ambos hábitats, y a lo largo de todo el período de estudio, las parcelas que recibieron el tratamiento climático en el cual se combinó calentamiento inducido con reducción de precipitaciones presentaron menores valores de la humedad relativa que las parcelas control y aquellas en las que solamente se indujo calentamiento (Figura 3C y 3D). Las temperaturas del suelo, por otra parte, presentaron patrones similares a los reportados para las temperaturas del aire (Tabla 1, Figura 3E y 3F).

La precipitación total en el área de estudio para el período comprendido entre julio de 2014 y enero de 2015 fue de 555.4 mm, indicado por el pluviómetro automatizado localizado fuera de las parcelas experimentales en el área deforestada (Figura 4). Durante este período se registraron un total de 79 eventos de precipitación, cuya intensidad osciló entre los 0.4 mm y los 56.4 mm diarios. La cantidad total de agua de lluvia al interior del bosque fue un 42.7% más baja (318.4 mm) que en el área deforestada (Figura 4), probablemente debido a que parte de la misma queda retenida en el dosel. En promedio, el sistema de reducción de precipitaciones aplicado en las parcelas experimentales retuvo un 7.9% de las precipitaciones en el área deforestada y un 7.2% de las precipitaciones al interior del bosque (Figura 4).

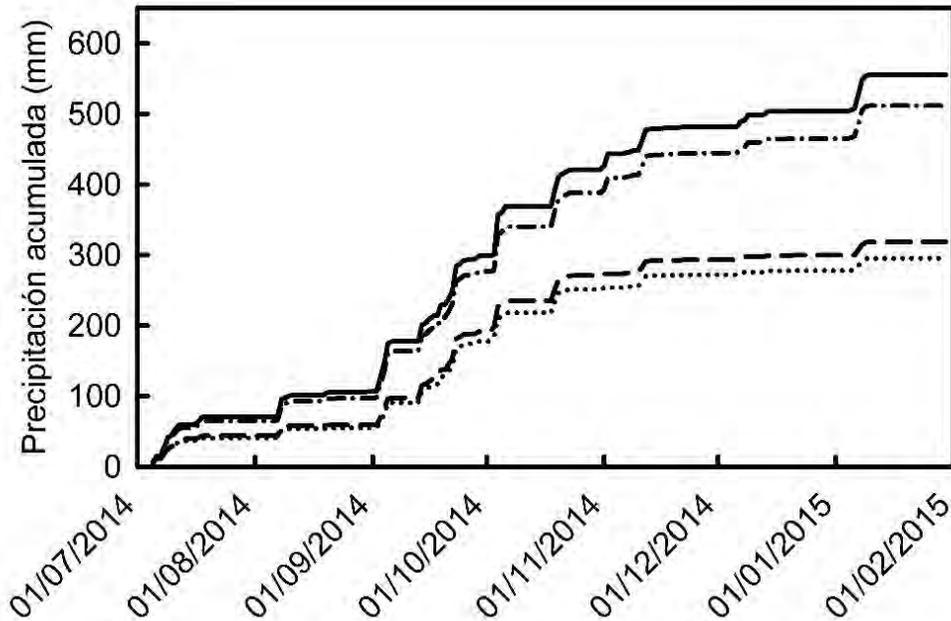


Figura 4. Registro de precipitación acumulada en el área deforestada (línea sólida) y al interior del bosque (línea segmentada sin puntos) entre el 01 de Julio de 2014 y el 31 de Enero de 2015. En la figura también se muestra el registro de la precipitación acumulada dentro de parcelas sobre las cuales se dispusieron los sistemas de canaletas destinados a reducir la cantidad de agua de lluvia dentro de las mismas, tanto en el área deforestada (línea segmentada con puntos) y al interior del bosque (línea punteada).

Germinación de bellotas. Las tasas de germinación para las tres especies de encinos utilizadas en el estudio, estimadas mediante el método de Kaplan-Meyer y comparadas mediante la prueba chi-cuadrado de Gehan generalizada por Wilcoxon (Tabla 2), difirieron significativamente entre tratamientos climáticos tanto en el bosque (Figura 5) como en el área deforestada (Figura 6). La única excepción fue *Quercus mexicana* al interior del bosque (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la prueba de chi-cuadrado de Gehan generalizada por Wilcoxon utilizadas para comparar las tasas de germinación de bellotas y de supervivencia de plántulas entre tratamientos climáticos al interior del bosque y en el área deforestada (valor crítico para diferencias significativas $\alpha = 0.05$ en todos los casos). La tabla muestra los valores estadísticos de (Chi^2 , g.l., y p) resultantes de la comparación entre las tasas de germinación entre tratamientos climáticos. Los casos donde se detectaron efectos significativos se destacan en color rojo.

Variable	Especie	Interior del bosque	Área deforestada
Germinación	<i>Quercuscastanea</i>	$\text{Chi}^2 = 15.8517$, g.l. = 2, p = 0.0004	$\text{Chi}^2 = 6.2268$, g.l. = 2, p = 0.0444
	<i>Quercucrassipes</i>	$\text{Chi}^2 = 7.0267$, g.l. = 2, p = 0.0298	$\text{Chi}^2 = 5.9923$, g.l. = 2, p = 0.0499
	<i>Quercus mexicana</i>	$\text{Chi}^2 = 2.2954$, g.l. = 2, p = 0.3173	$\text{Chi}^2 = 33.1578$, g.l. = 2, p = <0.0001
Supervivencia	<i>Quercuscastanea</i>	$\text{Chi}^2 = 8.3229$, g.l. = 2, p = 0.0155	$\text{Chi}^2 = 20.2281$, g.l. = 2, p < 0.0001
	<i>Quercuscassipes</i>	$\text{Chi}^2 = 16.0001$, g.l. = 2, p = 0.0003	$\text{Chi}^2 = 6.1907$, g.l. = 2, p = 0.0452
	<i>Quercus mexicana</i>	$\text{Chi}^2 = 7.0316$, g.l. = 2, p = 0.0297	$\text{Chi}^2 = 15.2059$, g.l. = 2, p = 0.0005

La germinación de *Quercus castanea* en las parcelas control localizadas al interior del bosque fue más tardía que en las parcelas sobre las cuales se simularon escenarios de cambio climático (Figura 5). En estos controles se registró una tasa máxima de germinación del 2% que se mantuvo estable después de 142 días de monitoreo (Figura 5). Los tratamientos de aumento de temperatura y aumento de temperatura con reducción de la precipitación mostraron efectos positivos sobre las tasas de germinación de esta especie de encino, los cuales difirieron significativamente de las tasas de germinación estimadas para los controles. En el tratamiento donde solamente se aumentó la temperatura, las tasas de germinación de *Quercus castanea* se incrementaron hasta el 14% durante los primeros 100 días del experimento, mientras que en el tratamiento de aumento de temperatura con disminución de precipitaciones la tasa de germinación de esta especie solo alcanzó el 8% después de 122 días (Figura 5).

Las bellotas de *Quercus crassipes* al interior del bosque también presentaron menores tasas de germinación en las parcelas control que en las parcelas donde se simularon condiciones de cambio climático (Figura 5). Las bellotas en los controles alcanzaron tasas de germinación del 4% después de 80 días, mientras que las bellotas en los otros dos tratamientos climáticos alcanzaron tasas de germinación superiores al 10% en el mismo período (Figura 5). La tasa de germinación final en los tratamientos de aumento de temperatura y aumento de temperatura con reducción de precipitaciones fueron del 18% y del 14%, respectivamente (Figura 5).

Como se mencionó anteriormente, las tasas de germinación de *Quercus mexicana* no difirieron entre tratamientos climáticos al interior del bosque. En todos

los tratamientos climáticos, las tasas de germinación de esta especie fueron inferiores al 7% (Figura 5).

La germinación de bellotas en el área deforestada mostró un comportamiento diferente al observado al interior del bosque. En este tipo de hábitat, las tasas de germinación de *Quercus castanea* se incrementaron hasta casi el 7% en todos los tratamientos climáticos durante los 40 días del experimento, pero luego tendieron a permanecer estables y por debajo del 10% en las parcelas control y en las parcelas sometidas a aumento de la temperatura con reducción de precipitaciones (Figura 6). En cambio, la germinación en las parcelas donde solo se aplicó aumento de la temperatura continuó incrementándose durante el experimento, alcanzándose una tasa de germinación del 18% hacia el final del mismo (Figura 6).

En los casos de *Quercus crassipes* y *Quercus mexicana* en el área deforestada, las tasas de germinación más altas se obtuvieron en las parcelas control, las cuales alcanzaron el 16% y el 28% respectivamente (Figura 6). Para ambas especies, no se encontraron diferencias significativas en sus tasas de germinación entre los tratamientos de aumento de la temperatura y de aumento de temperatura con reducción en la precipitación, ya que en todos los casos fueron inferiores al 10% (Figura 6).

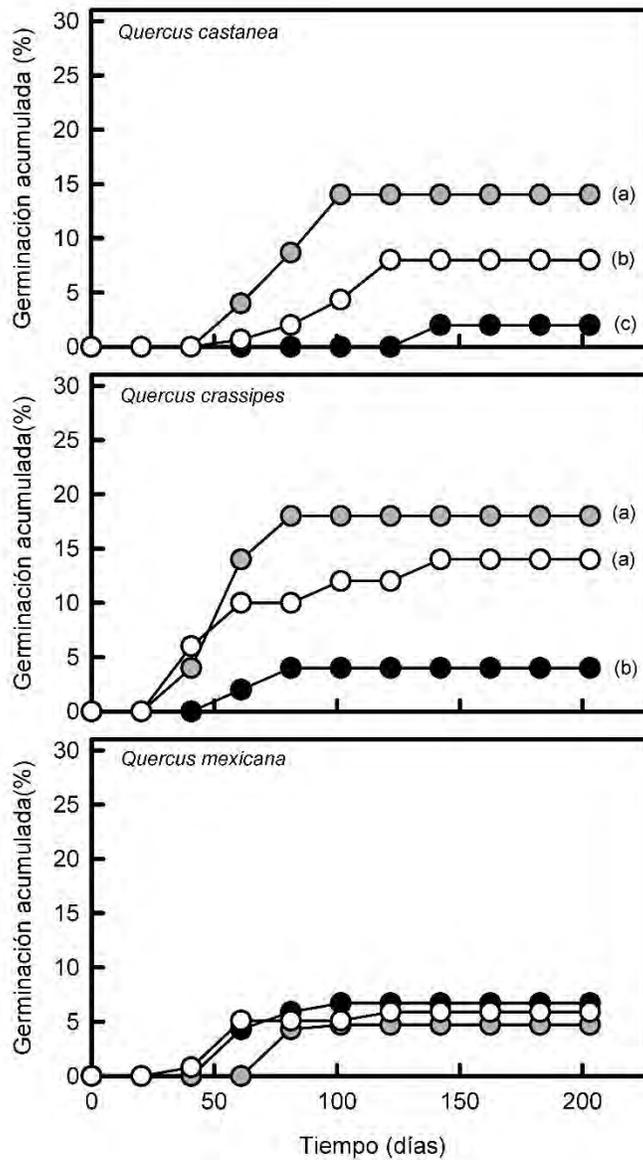


Figura 5. Tasas de germinación de bellotas al interior del bosque de las tres especies de encinos en las parcelas control (símbolos negros), en las parcelas sometidas a calentamiento (símbolos grises) y en parcelas sometidas a calentamiento con reducción en la precipitación (símbolos blancos). Diferentes letras junto a las curvas indican diferencias significativas entre ellas (α crítico de las pruebas de Cox-Mantel = 0.05).

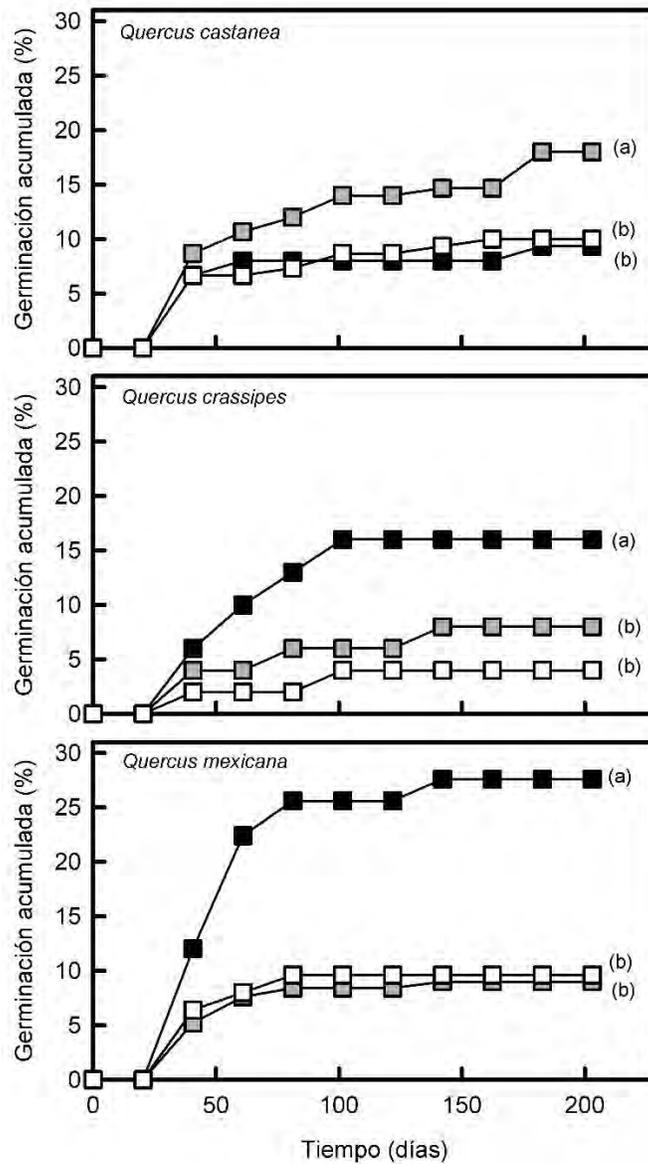


Figura 6. Tasas de germinación de bellotas en el área deforestada de las tres especies de encinos en las parcelas control (símbolos negros), en las parcelas sometidas a calentamiento (símbolos grises) y en parcelas sometidas a calentamiento con reducción en la precipitación (símbolos blancos). Diferentes letras junto a las curvas indican diferencias significativas entre ellas (α crítico de las pruebas de Cox-Mantel = 0.05).

Supervivencia de plántulas. Para las tres especies de encinos, la prueba de chi-cuadrada de Gehan generalizada por Wilcoxon indicó diferencias significativas en las tasas de supervivencia de plántulas entre tratamientos climáticos, tanto al interior del bosque como en el área deforestada (Tabla 2). Al interior del bosque, las tres especies de encinos presentaron tasas de supervivencia significativamente mayores en las parcelas control que en aquellas sometidas a simulaciones de cambio climático, superando el 60% de supervivencia en todos os casos (Figura 7). En este tipo de hábitat, las tasas de supervivencia de la plántulas de *Quercus castanea* y en *Quercis crassipes* se redujeron por debajo del 40% en el tratamiento donde se simuló calentamiento y en el tratamiento donde se simuló calentamiento con reducción de precipitaciones (Figura 7). En *Quercus mexicana*, se observó un efecto más marcado de las simulaciones climáticas, donde la tasa de supervivencia de las plántulas en el tratamiento en que se simuló solamente calentamiento cayeron por debajo del 30%, mientras que en el tratamiento en el cual se simuló calentamiento con reducción de precipitaciones ninguna planta sobrevivió más de 110 días (Figura 7).

En el área deforestada, las plántulas de *Quercus castanea* y *Quercus mexicana* presentaron mayores tasas de supervivencia en las parcelas control que en las parcelas donde se aplicaron las simulaciones de cambio climático, sin encontrarse diferencias en los valores de esta variable entre el tratamiento donde se simuló calentamiento y en el tratamiento donde se simuló calentamiento con reducción de precipitaciones (Figura 8). Las plántulas de *Quercus crassipes* presentaron un patrón de supervivencia diferente al de estas dos especies de encinos. En este caso, se observaron diferencias significativas entre las tasas de

germinación estimadas para el control y las estimadas para el tratamiento en donde solo se aplicó la simulación de calentamiento. Sin embargo, estas diferencias solamente se observaron al principio de experimento, ya que al final del mismo ambos tratamientos presentaron tasas de supervivencia inferiores al 30% (Figura 8). El efecto más fuerte sobre la supervivencia de plántulas de *Quercus crassipes* se observó en el tratamiento en el cual se simuló calentamiento con reducción de precipitaciones, ya que ningún individuo sobrevivió más de 50 días (Figura 8).

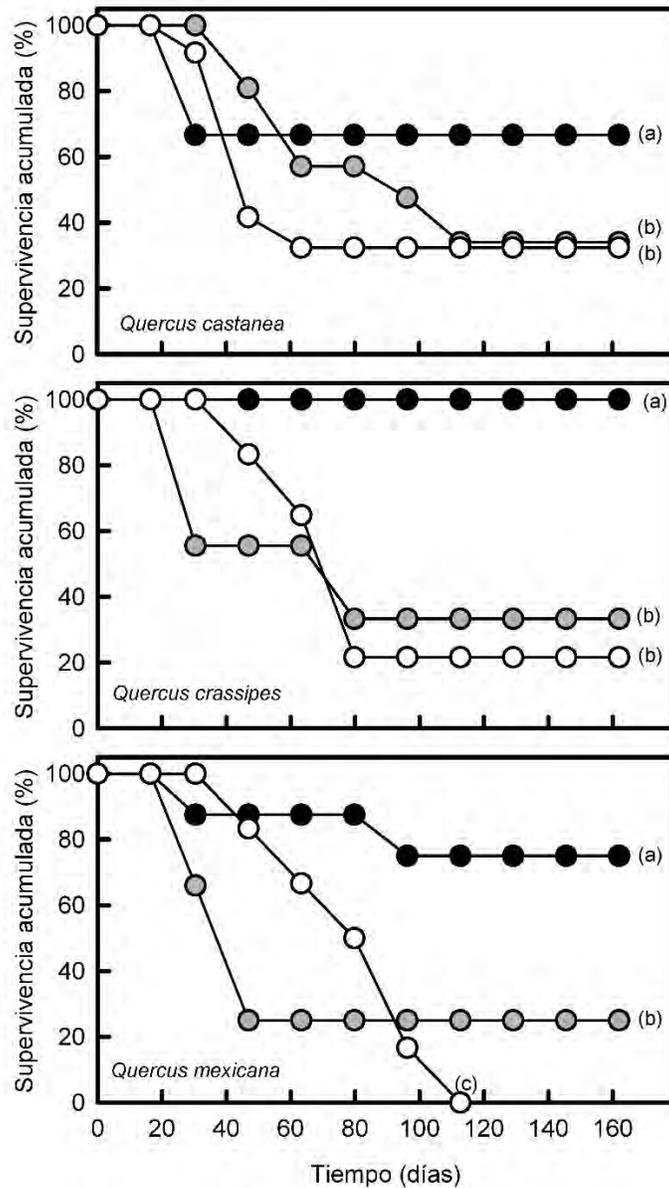


Figura 7. Tasas de supervivencia de plántulas al interior del bosque de las tres especies de encinos en las parcelas control (símbolos negros), en las parcelas sometidas a calentamiento (símbolos grises) y en parcelas sometidas a calentamiento con reducción en la precipitación (símbolos blancos). Diferentes letras junto a las curvas indican diferencias significativas entre ellas (α crítico de las pruebas de Cox-Mantel = 0.05).

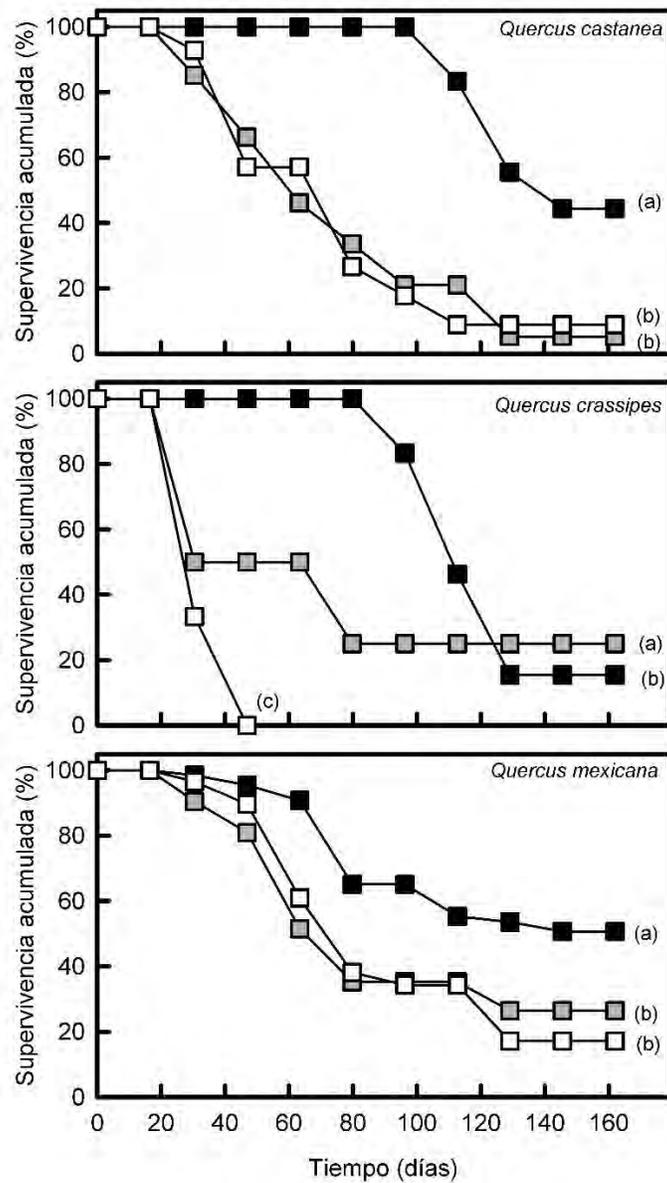


Figura 8. Tasas de supervivencia de plántulas en el área deforestada de las tres especies de encinos en las parcelas control (símbolos negros), en las parcelas sometidas a calentamiento (símbolos grises) y en parcelas sometidas a calentamiento con reducción en la precipitación (símbolos blancos). Diferentes letras junto a las curvas indican diferencias significativas entre ellas (α crítico de las pruebas de Cox-Mantel = 0.05).

DISCUSIÓN

Condiciones climáticas. Nuestros resultados indican que la aplicación de cámaras de techo abierto es un mecanismo adecuado para simular los efectos esperados del cambio climático sobre la temperatura para la región central del país. Para el período de estudio, que comprendió la época del año en el cual debiera ocurrir la germinación de bellotas, las cámaras de techo abierto incrementaron la temperatura media dentro de lo esperado en el transcurso del presente siglo (Kirtman et al. 2013). En cuanto a la efectividad de los sistemas de reducción de precipitación, los datos de los pluviómetros automatizados sugieren que también se logró simular las condiciones de menores precipitaciones esperadas para el futuro (Martínez-Fernández 2007). Esto se vio también reflejado en la menor humedad relativa del aire al interior de las parcelas en las que se aplicaron cámaras de techo abierto junto con los reductores de precipitación, la cual fue mayor en las parcelas control y en aquellas parcelas sobre las que se sólo se simuló calentamiento.

Germinación de bellotas. Las semillas de las diferentes especies que componen el género *Quercus* han sido catalogadas como *recalcitrantes* debido a que su viabilidad se reduce drásticamente si pierden humedad (Zavala-Chávez 2004). Esto es especialmente válido en condiciones de campo, donde las bellotas empiezan a perder agua rápidamente tras ser liberadas de la planta madre (Moore 1928; Zavala-Chávez & García-Moya 1996; Ramos-Palacios et al. 2014). Sin embargo, este género se subdivide en cinco secciones taxonómicas, habiendo tres de ellas presentes en México. Estas incluyen la sección *Lobatae* (encinos rojos), la sección

Quercus (encinos blancos) y la sección *Protobalanus* (encinos de copa dorada) (Valencia, 2004). Se ha propuesto que las bellotas que producen las especies de la sección *Lobatae* o encinos rojos, a la cual pertenecen las tres especies de encinos utilizadas en este estudio (*Quercus castanea*, *Quercus crassipes* y *Quercus mexicana*), pudieran ser semi-ortodoxas porque en condiciones controladas de laboratorio su viabilidad puede ser mantenida por más de un año, a diferencia de lo que ocurre con las especies de las otras dos secciones taxonómicas presentes en nuestro país que han sido clasificadas como completamente recalcitrantes (Zavala-Chávez & García-Moya 1996). No obstante, dada la elevada sensibilidad de las bellotas ante la pérdida de agua, se esperaban reducciones en su capacidad germinativa bajo los escenarios de cambio climático que se simularon en campo. Esto debido a que los incrementos de temperatura y las reducciones de las precipitaciones generarían condiciones que influirían negativamente en su capacidad para retener humedad. Sin embargo, contrario a lo esperado, nuestros resultados muestran que puede existir una amplia variedad de respuestas ante este fenómeno, cuyos efectos sobre la germinación de las bellotas pueden ser positivos, neutrales o negativos.

En relación a esto último, al interior del bosque se observó que la germinación de las bellotas de *Quercus castanea* y *Quercus crassipes* fue potenciada en las parcelas sometidas a simulaciones de aumento de la temperatura, tanto con y sin sistema de reducción de precipitación. En estas parcelas las bellotas mostraron mayores velocidades de germinación y mayores tasas finales de germinación que en las parcelas control bajo las actuales condiciones climáticas. No obstante, aunque las tasas de germinación de bellotas en *Quercus castanea* en las parcelas

sometidas al efecto combinado de incremento de temperatura y reducción de precipitaciones también fue mayor que en las parcelas control, en este caso se observó un efecto negativo de la reducción de las precipitaciones en comparación con las tasas de germinación registradas para esta especie cuando solamente se indujo calentamiento. A diferencia de estas dos especies, para las bellotas de *Quercus mexicana* al interior del bosque no se observaron efectos de los cambios climáticos esperados en el futuro sobre sus tasas de germinación. Estos resultados permiten sugerir que las condiciones más cálidas previstas por los modelos de cambio climático (Gómez-Mendoza & Arriaga 2007) pudieran influir positivamente sobre los mecanismos fisiológicos que gatillan la germinación de las bellotas de algunas especies de encinos, o bien no tendrán efectos sobre las mismas. De hecho, aun si estos cambios de temperatura son acompañados por reducciones en las precipitaciones, los resultados sugieren que aún bajo estas condiciones climáticas estos patrones de germinación al interior de los bosques de encino se mantendrían, aunque algunas especies (ej., *Quercus castanea*) no presentarían tasas de germinación tan elevadas como las que pudieran esperarse si solamente ocurren cambios en la temperatura.

Estos resultados permiten entonces sugerir que el cambio climático pudiera llegar a tener efectos positivos, o como mucho neutrales, sobre las respuestas de germinación de bellotas al interior de los bosques, que es el primer proceso involucrado en el reclutamiento de encinos para el mantenimiento de sus bosques. Sin embargo, estos hallazgos no permiten descartar que los cambios climáticos esperados para el futuro reducirán el potencial de las bellotas para mantener su viabilidad en el tiempo. Esto se debe a que se ha reportado que incrementos en la

temperatura aumentan la pérdida de agua en estos frutos, lo que en consecuencia reduce su viabilidad (Zavala-Chávez & García-Moya 1996). En este caso, nuestros resultados solamente indican que el cambio climático puede acelerar la germinación, pero establecer sus efectos sobre la viabilidad de las bellotas al interior de los bosques requiere estudios más detallados.

En el área deforestada los efectos de las simulaciones climáticas sobre la germinación de bellotas fueron diferentes a los observados al interior del bosque. En este hábitat, solamente *Quercus castanea* presentó mayores tasas de germinación en las parcelas sometidas a simulaciones de cambio climático. De hecho, esta especie solamente mostró incrementos en sus tasas de germinación en las parcelas donde solamente se indujeron incrementos de la temperatura, mientras que los valores de esta variable fueron similares entre las parcelas control y las parcelas en las que se indujo el aumento de temperatura junto con reducciones de precipitaciones. En cambio, las bellotas de *Quercus crassipes* y *Quercus mexicana* en el área deforestada mostraron siempre menores tasas de germinación en las parcelas sometidas a ambas simulaciones de cambio climático, en comparación con las parcelas control. Esto concuerda con nuestra hipótesis inicial que la germinación de bellotas se verá afectada de manera negativa, y más profunda, en las áreas deforestadas que al interior de los bosques.

Supervivencia de plántulas. Como resultado de la germinación, se obtuvieron plántulas de las tres especies de encinos en todas las parcelas experimentales, tanto al interior del bosque como en el área deforestada. Sin embargo, en todos los

casos, se observaron efectos negativos sobre la supervivencia de estas plántulas en los escenarios climáticos simulados en estos hábitats.

La supervivencia de plántulas de encinos depende de la interacción de las condiciones ambientales y características del sitio, así como de cada especie (López-Barrera & Newton 2005; Sanders et al. 2014). Al interior del bosque, la protección del dosel favorece la supervivencia de especies tolerantes a la sombra, ya que las tasas de evaporación y la radiación solar son bajas, mientras que las altas temperatura en las áreas deforestadas favorecen la sequía y solo permitirían el establecimiento de especies que toleren estas condiciones ambientales (Tabari et al. 2007; Pérez-López et al. 2014; Pérez-Ramos 2014). Al interior del bosque, los resultados de la supervivencia de plántulas en las parcelas control indicaron que las tres especies de encinos utilizadas en este estudio pueden llegar a establecerse en este hábitat, alcanzando tasas de establecimiento por encima del 60%. En las parcelas control del área deforestada, tanto *Quercus castanea* como *Quercus mexicana* mostraron tasas de supervivencia superiores al 40%, lo que permite sugerir que ambas especies son parcialmente tolerantes a las condiciones ambientales que predominan en estos sitios bajo el escenario climático actual. Sin embargo, *Quercus crassipes* en el área deforestada mostró una baja supervivencia en las parcelas control establecidas en este último hábitat, la cual fue inferior al 20% hacia el final del experimento, lo cual sugiere que es una especie que requiere de la protección del dosel para establecerse adecuadamente.

En base a lo anterior, los resultados de este estudio permiten sugerir que el incremento de la temperatura y reducción de precipitación esperadas para el futuro reducirán substancialmente las tasas de supervivencia de las plántulas de encinos

en ambos tipos de hábitat. Al interior de bosque, *Quercus castanea* y *Quercus crassipes* no mostraron diferencias entre las tasas de supervivencia de sus plántulas entre las parcelas solamente sometidas a calentamiento y aquellas en las que además se indujo la reducción de precipitaciones, lo que permite sugerir que el establecimiento de estas especies bajo el dosel sería más sensible a los cambios que se esperan en las temperaturas que los cambios que se esperan en las precipitaciones. Sin embargo, aunque la supervivencia de plántulas de *Quercus mexicana* al interior del bosque fue reducida por la simulación de calentamiento, estos efectos negativos fueron mucho más marcados en las parcelas donde se simuló también la reducción de precipitaciones, donde ninguna plántula sobrevivió hasta el final del experimento. Esto permite sugerir que la permanencia de estas tres especies de encinos como componentes de los bosques templados se puede ver comprometida en los futuros escenarios de cambio climático que se esperan para la región central del país.

En el área deforestada, el incremento de temperatura y reducción de la precipitación tuvieron efectos negativos mucho más marcados sobre la supervivencia de plántulas que al interior del bosque. En este hábitat, la supervivencia de *Quercus castanea* y *Quercus mexicana* fue inferior al 30% en las parcelas sometidas a calentamiento y en las parcelas sometidas a calentamiento y reducción de precipitaciones, lo que claramente sugiere que ambas especies de encinos son sensibles a los cambios climáticos que se esperan en el futuro. En el caso de *Quercus crassipes* en el área deforestada, aunque mostró tasas de supervivencia similares a las observadas para las otras dos especies de encinos en el escenario en que solamente se indujo calentamiento, su supervivencia fue del 0%

en el escenario donde además se simularon reducciones en la precipitación. Todo esto indica que, si bajo las actuales condiciones climáticas el reclutamiento de encinos en áreas deforestadas ya es limitado (Badano et al. 2009; Gonzalez-Salvatierra 2013), las condiciones climáticas previstas para el futuro reducirán mucho más posibilidades de que estos bosques se recuperen naturalmente en áreas deforestadas.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación permiten concluir que los cambios de temperatura previstos en los futuros escenarios de cambio climático pudieran favorecer la germinación de bellotas de encinos rojos (sección *Lobatae*) al interior de los bosques presentes en climas templados del país. Sin embargo, esto no influiría en mayores tasas de reclutamiento, al menos para las tres especies incluidas en este estudio, ya que la supervivencia de sus plántulas se verá perjudicada por estos mismos cambios climáticos. Incluso la permanencia de algunas de estas especies los bosques pudiera verse extremadamente comprometida si estos incrementos de la temperatura son acompañados con reducciones en las precipitaciones, como es el caso de *Quercus mexicana* y *Quercus crassipes*.

Por otra parte, para las áreas deforestadas, se puede sugerir que la mayor parte de las especies mostrará reducciones tanto en las tasas de germinación de bellotas como en las tasas de supervivencia de sus plántulas conforme avancen estos cambios en el aumento de la temperatura y la reducción de la precipitación. De esta manera, la recuperación de los bosques en sitios que fueron afectados por

las actividades humanas pudiera verse fuertemente comprometida bajo los escenarios climáticos previstos para el futuro. Esto tiene consecuencias profundas sobre las acciones de restauración ecológica que pudieran emprenderse en estos sitios, ya que la diversidad de especies de encinos que se podrán utilizar para el desarrollo de las mismas se verá fuertemente restringida.

Por lo anterior, la principal recomendación que se puede derivar de la presente tesis es que se deben realizar estudios de este tipo que sean más completos, incluyendo una mayor cantidad de especies y que proporcionen información más detallada sobre los mecanismos que influyen la germinación de bellotas y el establecimiento de plántulas del género *Quercus* al interior de los bosques y en áreas deforestadas. Incluso, dada la elevada sensibilidad que muestran las especies de encinos de climas templados ante el cambio climático, sería recomendable realizar investigaciones que evalúen la posibilidad de traslocar especies desde climas más cálidos hacia los actuales climas templados que estarán sujetos a estos cambios climáticos, lo que permitiría evaluar si estos bosques pueden ser mantenidos en el futuro aunque sea con otras especies de encinos.

BIBLIOGRAFÍA

- Badano, E.I., Pérez, D., Vergara, C.H. 2009. Love of nurse plants is not enough for restoring oak forests in a seasonally dry tropical environment. *Restoration Ecology* 17, 571-576.
- Chapin III, F.S., Matson, P.A., Vitousek, P. (2011). Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer Verlag, New York, NY, pp: 3 -22.
- David, T. S., Henriques, M. O., Kurz-Besson, C., Nunes, J., Valente, F., Vaz, M., Pereira, J. S. (2007). Water-use strategies in two co-occurring Mediterranean evergreen oaks: surviving the summer drought. *Tree physiology*, 27(6), 793-803.
- Fernández-Cancio, A., Navarro-Cerrillo, R.M., Sánchez-Salguero, R., Fernández-Fernández, R., & Manrique-Menéndez, E. (2011) Viabilidad fitoclimática de las repoblaciones de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) en la Sierra de los Filabres (Almería). *Ecosistemas* 20(1):124-144.
- Flores-Cano, J., Badano, E. I., & Flores, J. (2012). Effects of burial depth on seed germination and seedling emergence of Mexican oaks: A glasshouse experiment. *Archives of Biological Sciences*, 64(4), 1543–1554.
- Gallardo, A., Covelo, F., Morillas, L., & Delgado, M. (2009). Ciclos de nutrientes y procesos edáficos en los ecosistemas terrestres: especificidades del caso mediterráneo y sus implicaciones para las relaciones suelo-planta. *Revista Ecosistemas*, 18(2):4-19.
- García-Coll, I., Martínez, A., Ramírez, A., Niño-Cruz, A., Rivas, A.J. & Domínguez, L. (2004). La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la Cuenca del Río Gavilanes,

- Coatepec, Veracruz. En: H. Cotler (Ed.), El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental (pp. 99-114). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México.
- Gómez-Mendoza, L., & Arriaga, L. (2007). Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 21(6), 1545–55.
- González-Salvatierra, C., Badano, E. I., Flores, J., & Rodas, J. P. (2013). Germinación, infestación y viabilidad en bellotas de *Quercus polymorpha* (Schltdl. & Cham.) tras un año de almacenamiento. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(3), 351-362.
- Guo, Y., Shelton, M., & Lockhart, B. R. (1998). Effects of flood duration and season on germination of black, cherrybark, northern red, and water oak acorns. *New forests*, 15(1), 69-76.
- Gutiérrez, E. & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179-188.
- Hernández-Cerda, M.E. & Valdez-Madero, G. (2004). Sequía meteorológica. En: J. Martínez, A. Fernández-Bremauntz & P. Osnaya (Eds), *Cambio climático: una visión desde México* (pp. 315-326). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México.
- Henry, G.H.R. & Molau, U. (1997) Tundra plants and climate change: the International Tundra Experiment (ITEX), *Global Change Biology* 3, (Suppl. 1) 1–9.

- Kaplan, E. L., & Meier, P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American statistical association*, 53 (282), 457-481.
- Kirtman, B., Power, S.B., Adedoyin, J.A., Boer, G.J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblas-Reyes, F.J., Fiore, A.M., Kimoto, M., Meehl, G.A., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., van Oldenborgh, G.J., Vecchi, G. & Wang, H.J. (2013). Near-term climate change: projections and predictability. En: T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 953-1028). Cambridge University Press, New York.
- Lee, E.T., Desu, M.M., & Gehan, E.A. (1975) A Monte Carlo study of the power of some two-sample tests. *Biometrika*, 62, 425-432.
- Lloret, F. (2012). Vulnerabilidad y resiliencia de ecosistemas forestales frente a episodios extremos de sequía. *Ecosistemas* 21(3):85-90.
- López-Barrera, F., & Newton, A. (2005). Edge type effect on germination of oak tree species in the Highlands of Chiapas, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 217(1), 67-79.
- Luna-José A. L., Montalo-Espinosa, L. & Rendón-Aguilar, B. (2003) Los usos no leñosos de los encinos en México. *Bol Soc Bot. México*. 72:107-117
- Martínez-Fernández, J. (2007). ABC de cambio climático: Impactos y acciones en México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Ciudad de México.

- Molau, U. & Mølgaard, P. (eds.) (1996) International Tundra Experiment. Danish Polar Center, Copenhagen.
- Moore, B. (1928). Germination and Early Survival in Oaks Factors Controlling Germination and Early Survival in Oaks by Clarence F. Korstian, *Ecology*, 9(1), 104–106.
- Nixon, K. C. (2006). Global and neotropical distribution and diversity of oak (genus *Quercus*) and oak forests. In: M. Kappelle (Ed.), *Ecology and conservation of neotropical montane oak forests* (pp. 3-13). Springer, Heidelberg.
- Pérez-López, P., López-Barrera, F., García-Oliva, F., Cuevas-Reyes, P., & González-Rodríguez, A. (2014). Procesos de regeneración natural en bosques de encinos: factores facilitadores y limitantes. *Biológicas*, 1, 18-24.
- Pérez-Ramos, I.M., Villar, R., Marañón, T. (2014). El fascinante mundo de los *Quercus*: desde la biología molecular hasta la ecología de comunidades. *Ecosistemas* 23(2):1-4.
- Ramos-Palacios, C. R., Badano, E. I., Flores, J., Flores-Cano, J. A., & Flores-Flores, J. L. (2014). Distribution patterns of acorns after primary dispersion in a fragmented oak forest and their consequences on predators and dispersers. *European Journal of Forest Research*, 133(3), 391-404.
- Rzedowski, J., (2006). *Vegetación de México*. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. MÉXICO.
- Sabás-Rosales, J. (2011). *Taxonomía, diversidad y distribución de los Encinos (Quercus spp) del Estado de San Luis Potosí México*, Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias y Tecnologías, Agrícolas, Pecuarias y de los Alimentos.

- Sanders, T. G., Pitman, R., & Broadmeadow, M. S. (2014). Species-specific climate response of oaks (*Quercus* spp.) under identical environmental conditions. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 7(2), 61-69.
- Scheller, R. M., & Mladenoff, D. J. (2005). A spatially interactive simulation of climate change, harvesting, wind, and tree species migration and projected changes to forest composition and biomass in northern Wisconsin, USA. *Global Change Biology*, 11(2),
- Tabari, M., Jalali, G. A., Ali-Arab, A. R., & Ghanbari, M. (2007). Restoration of oak forests in soils compacted by human and livestock. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 10(9), 1536-1539.
- Valencia, A. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*.
- Villar, R., Lopez-Iglesias, B., Ruiz-Benito, P., de la Riva, E.G., Zavala, M.A. (2014). Crecimiento de plántulas y árboles de seis especies de *Quercus*. *Ecosistemas* 23(2): 64-72.
- Weltzin, J. F., Snyder, K. A., & Williams, D. G. (2001). Experimental manipulations of precipitation seasonality: Effects on oak (*Quercus*) seedling demography and physiology. *Western North American Naturalist*, 463-472.
- Zavala-Chávez, F., (2004). "Desecación de bellotas y su relación con la viabilidad y germinación en nueve especies de encinos mexicanos". *Ciencia ergosum*, 11: 177-185.
- Zavala-Chávez, F. (1998). Observaciones sobre la distribución de encinos en México. *Polibotánica*, (8) 47-64.

Zavala-Chávez, F., & García-Moya, E. (1996). Frutos y semillas de encinos.
Universidad Autónoma Chapingo. México. 51 pp.