

Germinación, sobrevivencia y crecimiento inicial de especies nativas con potencial para la restauración del paisaje forestal en la región de las Verapaces, Guatemala

José Castro Ventura^{1,2}, Ángel Cuellar Velasco^{3,4}, José Salazar De León^{4,5},
Mervin E. Pérez^{1,*}

¹Departamento de Restauración del Paisaje Forestal, Instituto Nacional de Bosques, 7a Avenida 6-80, zona 13, Ciudad Guatemala, Guatemala. ²Programa Ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar, Sede Escuintla, Escuintla, Guatemala. ³Programa Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, Centro Universitario Baja Verapaz, Universidad de San Carlos de Guatemala, San Miguel Chicaj, Baja Verapaz, Guatemala. ⁴Biotopo Universitario para la Conservación del Quetzal Mario Dary Rivera, Centro de Estudios Conservacionistas, Universidad de San Carlos de Guatemala, Purulhá, Baja Verapaz, Guatemala. ⁵Programa de Agronomía con Orientación en Agricultura Sostenible, Centro Universitario San Marcos, Universidad de San Carlos de Guatemala, San Marcos, Guatemala

* Correspondencia autor: ixmulej@gmail.com

Cita: Ventura, J.C., Cuellar Velasco, A., Salazar De León, J. y Pérez, M. (2020). Germinación, sobrevivencia y crecimiento inicial de especies nativas con potencial para la restauración del paisaje forestal en la región de las Verapaces, Guatemala, Guatemala. *Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático–Yu'am*, 4(2): 4-22.

Recibido: 13/05/2020 **Aceptado:** 13/07/2020 **Publicado:** 30/11/2020

Resumen

Guatemala busca contrarrestar la deforestación y restaurar tierras degradadas promoviendo el uso de especies nativas. Sin embargo, las iniciativas de restauración se ven limitadas por falta de conocimiento sobre las especies a utilizar y sus protocolos de propagación. Este estudio evaluó la germinación, sobrevivencia y crecimiento inicial de 10 especies de árboles nativos en la región de las Verapaces (encinos rojos: *Quercus sapotifolia*, *Q. acutifolia*; encinos blancos: *Q. purulhana*, *Q. segoviensis*, *Q. vicentensis*, *Q. oleoides*; aguacatillos: *Persea donnell-smithii*, *Nectandra longicaudata*, *Ocotea eucuneata*; árbol de brasil: *Haematoxylon brasiletto*) con potencial a utilizar en programas de restauración. Los experimentos fueron monitoreados durante 4-6 meses en viveros localizados en San Jerónimo y Purulhá, Baja Verapaz. Los tratamientos pre-germinativos en encinos rojos (e.g., lijado de semillas, inmersión en agua) y uso de sustratos ricos en nutrientes en aguacatillos (e.g., lombricompost, gallinaza), no influyeron significativamente en la germinación y sobrevivencia/crecimiento de plántulas, respectivamente. De las especies aquí evaluadas, los encinos rojos presentaron una tasa de germinación (50.2%) mayor que en encinos blancos (28.6%), y *H. brasiletto* tuvo el tiempo de germinación más rápido (2 días). Modelos realizados sugieren que, para encinos, la altura para trasplante de plántulas debe ser ≥ 15 cm para una mayor probabilidad de sobrevivencia en campo (>50%), mientras que para el trasplante de

aguacatillos del campo a vivero las alturas de plántulas deben ser menores 25 cm. Las especies evaluadas presentan alto valor ecológico (e.g., alimento fauna nativa/amenazada) y social (e.g., leña), y alto potencial de propagación en viveros, por lo tanto, se recomienda integrarlas en programas de restauración en la región de las Verapaces, Guatemala.

Palabras claves: Bosque nuboso, bosque pino-encino, bosque seco, disturbios naturales, especies arbóreas nativas, reforestación, restauración del paisaje, vivero especies nativas

Abstract

Guatemala seeks to counteract deforestation and restore degraded lands by promoting the use of native species. However, initiatives are limited by the lack of knowledge of the species to be used and propagation protocols. This study assessed the germination, survival and initial growth of 10 native species in the Verapaces region (Red oaks: *Quercus sapotifolia*, *Q. acutifolia*; White Oaks: *Q. purulhana*, *Q. segoviensis*, *Q. vicentensis*, *Q. oleoides*; Aguacatillos: *Persea donnell-smithii*, *Nectandra longicaudata*, *Ocotea eucuneata*; Árbol de brasil: *Haematoxylon brasiletto*) with potential to be used in restoration programs. The experiments were monitored during 4-6 months in nurseries located in San Jerónimo and Purulhá, Baja Verapaz. The pre-germinative treatments in the red oaks (seed sanding, immersion in water) and the use of nutrient-rich substrates in Aguacatillos (lombricompost, gallinaza) did not significantly influence germination and seedling survival/growth, respectively. Of the species evaluated here, the red oaks reported higher germination rate (50.2%) than in white oaks (28.6%), and that *H. brasiletto* had the fastest germination time (2 days). The models performed suggest that, for oaks, the height for transplanting seedlings should be ≥ 15 cm to have higher survival probability ($>50\%$) in natural conditions, while for the transplantation of aguacatillos from the field to nurseries the seedling heights must be less than 25 cm. The evaluated species have high ecological (e.g., food to native/endangered fauna) and social (e.g., firewood) values, therefore, it is recommended to integrate them into restoration programs in the Verapaces region of Guatemala.

Key words: Cloud forest, dry forest, landscape restoration, native tree species, natural disturbances, native plant nurseries, pine-oak forest, reforestation

Introducción

Guatemala es considerado un país megadiverso por su alta diversidad de especies y ecosistemas, así como por su alta diversidad cultural (CONAP, 2014). Sin embargo, es uno de los países de América Central con las mayores tasas de deforestación (Sales et al., 2016). Durante el período 2010-2016 hubo una pérdida de 101,542 hectáreas de bosque (GIMBUT, 2019) asociada a la expansión agrícola y ganadera, al consumo de leña como

recurso energético e incendios forestales (Sales et al., 2016). Ante los posibles escenarios de país, donde ya se ven limitados los servicios ecosistémicos por la degradación de los recursos naturales, Guatemala se une a esfuerzos globales (Bonn Challenge) y regionales (Iniciativa 20x20) para frenar la deforestación y ofrece, como Estado, restaurar 1.2 millones de hectáreas de tierras degradadas para el año 2045.

Una de las leyes que fortalece esta iniciativa es la Ley de fomento al establecimiento,

recuperación, restauración, manejo, producción y protección de bosques en Guatemala (PROBOSQUE, Decreto número 2-2015). Bajo la ley PROBOSQUE se incentiva, en un período de 10 años, proyectos bajo la modalidad de restauración de tierras degradadas para recuperar la cobertura forestal y mantener el flujo de bienes y servicios ecológicos. Además de esta modalidad, se proponen otras acciones para reducir la deforestación e incrementar la conectividad a escala de paisaje utilizando las siguientes técnicas de restauración: sistemas agroforestales, plantaciones forestales, sistemas silvopastoriles diversificados y la recuperación de bosques ribereños (Mesa Nacional de Restauración del Paisaje Forestal de Guatemala, 2018), además de la formulación de áreas protegidas y la integración de esfuerzos comunitarios. Estas acciones de restauración promueven la utilización de especies nativas para recuperar la estructura y función de ecosistemas degradados del país.

En algunos diseños de restauración será necesario incorporar especies nativas, sin embargo, estas especies no son del todo conocidas y se carece de protocolos de propagación y, consecuentemente, la disponibilidad de estas especies en viveros públicos y privados es casi nula (Pérez et al., 2020). Esto ha provocado que se recurra a especies que son tradicionalmente promovidas para el establecimiento de plantaciones, una estrategia que a nivel regional conduce a una forma de monocultivos industriales en las que se utilizan especies maderables de rápido crecimiento (Guerra-De la Cruz y Galicia, 2017).

El objetivo del presente estudio es generar información reproductiva de 10 especies nativas con alto valor ecológico y cultural, con potencial a utilizarse en procesos de restauración del paisaje forestal en la región de las Verapaces, área norte central de Guatemala. Este estudio se enfocó en obtener información sobre parámetros vitales de cada especie, tales

como germinación de semillas, la sobrevivencia y crecimiento inicial de plántulas. Se estudiaron seis especies de encinos/roble (*Q. acutifolia* Née, *Q. sapotiolia* Liebm., *Q. purulhana* Trel., *Q. segoviensis* Liebm., *Q. oleoides* Schldl. & Cham., *Q. vicentensis* Trel.) que dominan el paisaje en ecosistemas mixtos de Pino-Encino, una especie dominante de bosques secos (*Haematoxylum brasiletto* H. Karst.), y tres especies de aguacatillos de bosque nuboso (*Persea donnell-smithii* Mez, *Nectandra longicaudata* (Lundell) C.K.Allen, *Ocotea eucuneata* Lundell). Los resultados de este estudio contribuirán a ampliar el conocimiento de especies nativas para proyectos de restauración e incentivar su demanda, y con esto en mente, promover su producción en viveros institucionales, municipales, comunitarios y/o privados.

Metodología

Las especies aquí evaluadas fueron seleccionadas por ser dominantes en los tres ecosistemas de interés: seis especies de encinos/roble que dominan el paisaje en ecosistemas mixtos de pino-encino (*Quercus acutifolia*, *Q. sapotiolia*, *Q. purulhana*, *Q. segoviensis*, *Q. oleoides*, *Q. vicentensis*), tres especies de aguacatillos de bosque nuboso (*Persea donnell-smithii*, *Nectandra longicaudata*, *Ocotea eucuneata*) y una especie dominante de bosques secos (*Haematoxylum brasiletto*). Para cada una de las especies de *Quercus* y la especie de *Haematoxylum* se colectaron semillas de árboles padres en bosques naturales ubicados en diferentes localidades del departamento de Baja Verapaz, Guatemala (Tabla 1). La selección de árboles padres se basó en la presencia de frutos, siendo la colecta de semillas no sistemática. El número de semillas utilizadas en la parte experimental varió dependiendo de la disponibilidad de estas, por lo tanto, los experimentos realizados fueron diferentes para cada grupo de plantas (Tabla 1).

Tabla 1.

Especies nativas con potencial a ser utilizadas en procesos de restauración en las Verapaces. Se describe para cada especie el tipo de propágulo (TP) evaluado, el experimento realizado: experimento de escarificación (EE) y/o prueba de germinación (PG), y el número de árboles padres (AP) y su procedencia (Origen) dentro del departamento de Baja Verapaz (a excepción de *H. brasiletto* que fue colectado en el departamento de El Progreso).

Ecosistema	Especie	TP	Experimento			Localidad de origen
			EE	PG	AP	
Bosque pino-encino	<i>Quercus acutifolia</i> Née	semilla	si	si	6	San Jerónimo
	<i>Quercus. sapotifolia</i> Liebm.	semilla	si	si	1	San Jerónimo
	<i>Quercus purulhana</i> Trel.	semilla	no	si	6	Salamá
	<i>Quercus segoviensis</i> Liebm.	semilla	no	si	6	San Jerónimo
	<i>Quercus oleoides</i> Schldl. & Cham.	semilla	no	si	1	Purulhá
	<i>Q. vicentensis</i> Trel.	semilla	no	si	1	Salamá
Bosque nuboso	<i>Persea donnell-smithii</i> Mez	plántula	NA	NA	12	Purulhá
	<i>Nectandra longicaudata</i> (Lundell) C.K.Allen	plántula	NA	NA	5	Purulhá
	<i>Ocotea eucuneata</i> Lundell	plántula	NA	NA	2	Purulhá
Bosque seco	<i>Haematoxylum brasiletto</i> H.Karst	semilla	no	si	7	CA-14, Rancho a Cobán

NA = No aplica

Los árboles padres del grupo de encinos, identificados no sistemáticamente sino en base a la disponibilidad de frutos, fueron monitoreados mensualmente para la colecta de semillas durante el período de septiembre a noviembre de 2019. La producción de frutos fue baja y limitó la disponibilidad de sus semillas para la mayoría de las especies, por lo tanto, no todas fueron incluidas en el experimento de escarificación (ver más adelante). De las seis especies de encinos trabajadas, únicamente para dos especies (*Q. acutifolia* y *Q. sapotifolia*) se encontraron semillas suficientes para evaluar el efecto de escarificación. Para *Haematoxylum brasiletto* (árbol de brasil) sus semillas no fueron sometidas a ningún tipo de tratamiento pre-germinativo debido a que la totalidad de germinación de semillas generalmente ocurre en los primeros 10 días después de la siembra (Cervantes-Sánchez y Sotelo Boyás, 2002) y, por tanto, se consideró que un tratamiento de germinación no era relevante.

En el caso de las tres especies de aguacatillos, se utilizaron plántulas debido a que no fue evidente una fructificación durante la época lluviosa de 2019, pero se observó regeneración debajo de la copa de árboles padres (Tabla 1). Las plántulas colectadas en campo fueron trasplantadas al vivero para evaluar prendimiento (sobrevivencia) y crecimiento en tres tipos diferentes de sustratos.

Germinación, sobrevivencia y crecimiento en Quercus

Tratamientos pre-germinativos en *Quercus sapotifolia* y *Q. acutifolia*

Se establecieron cuatro tratamientos de escarificación (desgaste de la parte externa de la semilla, tegumento, para permitir la entrada de agua y aire y acelerar la germinación) para evaluar la tasa de germinación y crecimiento inicial en dos especies de encinos bajo

condiciones de vivero. Los tratamientos evaluados fueron: (1) grupo control (ningún tipo de manipulación), (2) lijado: se lijó la parte apical de la bellota para debilitar la testa y permitir el ingreso de agua, (3) inmersión en agua durante 24 horas y (4) combinado (lijado + inmersión en agua). Con base a la disponibilidad de propágulo al momento de establecer el experimento, el número utilizado para cada especie por tratamiento fue de 30 semillas. Se denominó éxito de germinación al observar el desarrollo de la plántula al salir sobre la superficie del sustrato, o al salir la semilla sobre la superficie del sustrato por la presión ejercida al momento de desarrollar la raíz (e.g., cuando la raíz era visible). Se realizaron monitoreos semanales durante un período de tres meses para evaluar la tasa de germinación de las semillas y posteriormente el crecimiento en altura de las plántulas. Se estimaron las tasas de germinación utilizando las frecuencias observadas del número de semillas que germinaron (y las que no germinaron) por tratamiento. Se utilizó una prueba de Chi-cuadrado para identificar relaciones (o independencia) entre dos variables categóricas (e.g., germinación y tipo de tratamiento pre-germinativo). Los análisis fueron realizados utilizando el paquete estadístico de R “stats” (R Core Team, 2018) y “chisq.posthoc.test” (Ebbert 2019).

Una vez desarrollada la plántula en cada uno de los tratamientos evaluados, se midió su crecimiento (e.g., medición de altura en cm) semanalmente. Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) de medidas repetitivas del crecimiento para evaluar el efecto del tratamiento pre-germinativo y el tiempo de monitoreo en el cambio de tamaño de los individuos. La significancia del análisis fue evaluada con un p-valor de 0.05. Posteriormente, se realizó una prueba de *t* pareada para determinar los tratamientos o tiempos que fueron distintos entre sí. Para dicho análisis se usó el paquete estadístico de R “rstatix” (Kassambara, 2019).

Diferencias en la germinación entre encinos blancos y rojos

Los encinos son un grupo monofilético conformado por dos linajes principales en América, los encinos rojos que corresponde a la sección *Lobatae* y los encinos blancos en la sección *Quercus* (Cavender-Bares 2018). Los rasgos funcionales que definen a estos dos linajes incluyen, entre otros atributos, el tamaño, peso y tolerancia de la semilla a la desecación, caracteres que se reflejan en la capacidad germinativa de las especies (Sánchez-Montes de Oca et al., 2018; Rodríguez-Trejo y Pompa-García, 2016). Durante la fase de germinación de encinos se observó que los encinos rojos (*Q. acutifolia*, *Q. sapotifolia*) presentaban mayor germinación que los encinos blancos (*Q. purulhana*, *Q. segoviensis*, *Q. oleoides*, *Q. vicentensis*), por lo que para el análisis de germinación agrupamos a las especies por tipo de encino. Para esto se utilizó el paquete estadístico de R denominado “GerminaR” (Lozano et al., 2020) y se procedió a realizar análisis de varianza (ANDEVA) para identificar si la tasa de germinación y tiempo promedio de germinación era similar entre los dos tipos de encino, la significancia estadística fue evaluada a un valor de $p = 0.05$. Con base a la prueba de Shapiro-Wilk los residuales de ambos modelos indican una distribución normal de los datos ($p > 0.0999$). Debido a que no se realizaron tratamientos pre-germinativos para los encinos blancos, para este análisis sólo se utilizó la información del grupo control en el caso de los encinos rojos, sin incluir datos de tratamientos pre-germinativos.

Sobrevivencia de plántulas de encino en condiciones naturales

Se identificó un área degradada (0.5 ha aproximadamente) dentro de la Finca Santo Tomás en el municipio de Salamá, Baja Verapaz, la cual presentaba una cobertura arbórea menor al 15% del área y con regeneración natural limitada. En dicha área se trasplantaron las

plántulas de encinos desarrolladas en el vivero (82 plántulas en total) con el objetivo de evaluar la sobrevivencia y crecimiento inicial de los individuos en un área degradada. Las especies de encinos plantadas en el área corresponden a *Quercus purulhana* (56 plántulas) y *Q. acutifolia* (26 plántulas) que están presentes naturalmente dentro de la finca. Las plántulas fueron sembradas con una distancia de 5 metros entre individuos.

Las plántulas fueron trasplantadas a campo definitivo en diciembre de 2019 anotando la altura inicial, posteriormente se realizaron monitoreos mensuales del crecimiento de las plántulas (altura del tallo en cm) durante un período de tres meses (enero a marzo 2020). A finales del mes de enero, el experimento fue interrumpido a causa de un incendio inesperado de proporciones moderadas en el área de estudio. Aunque el incendio fue controlado por los propietarios y trabajadores del área el mismo día, obligó a modificar el objetivo inicial de nuestro experimento. El objetivo se replanteó de la siguiente manera: (1) evaluar la sobrevivencia y crecimiento de plántulas en función del tamaño inicial al primer mes de haberlas sembrado (enero 2020, antes del incendio), y (2) evaluar la sobrevivencia y crecimiento de plántulas en función del tamaño inicial al primer y segundo mes después de ocurrido el incendio. Para evaluar las relaciones descritas anteriormente se realizó un modelo lineal generalizado con una distribución binomial utilizando el paquete estadístico de R “ggplot2” (Wickham, 2016).

Sobrevivencia y crecimiento de plántulas de aguacatillo

El objetivo de este experimento fue evaluar si el uso de sustratos de alto contenido nutritivo incrementa la sobrevivencia y crecimiento de

plántulas trasplantadas. Se utilizaron tres especies de aguacatillo (*Ocotea eucuneata*, *Persea donnell-smithii*, *Nectandra longicaudata*) y tres tipos de sustrato: suelo proveniente de áreas aledañas al vivero (suelo orgánico), lombricompost¹ (2:1:1 [lombricomposta: arena: suelo orgánico]) y gallinaza² (2:1:1 [suelo orgánico: gallinaza: arena]). Las plántulas fueron trasladadas del campo al vivero localizado en el Biotopo Universitario para la Conservación del Quetzal, departamento de Baja Verapaz. Un total de 75 plántulas de cada especie fueron distribuidas al azar en los tres tratamientos (sustratos) anteriormente descritos (25 plántulas/tratamiento/especie). Adicionalmente, 25 plántulas por especie (10 en el caso de *O. eucuneata* porque no fue posible encontrar más plántulas en la localidad de origen) fueron monitoreadas en campo (fuente de origen de plántulas = control) como referencia del posible efecto del sitio y de transporte en la sobrevivencia y crecimiento de los individuos. Las plántulas (en vivero y campo) fueron monitoreadas mensualmente durante cuatro meses (octubre 2019 a enero 2020) para evaluar sobrevivencia y crecimiento.

Para este estudio, se consideraron como individuos muertos las plantas que después de dos meses no presentaron desarrollo de hojas y el tallo se tornó deshidratado y quebradizo. Utilizando los datos de frecuencia de individuos que sobrevivieron y murieron al último censo, se realizó una prueba de Chi-cuadrado por especie para identificar diferencias entre tipos de sustratos utilizando el paquete estadístico de R “chisq.posthoc.test” (Ebbert, 2019). Adicionalmente, se evaluó la relación de la sobrevivencia de plántulas en función del tamaño inicial (altura de los individuos al momento de la siembra), utilizando un modelo lineal generalizado con una distribución binomial con el paquete estadístico R “stats” (R Core Team, 2018), para este análisis se

1. Lombricompost es humus de estiércol de lombriz, considerado un material con propiedades de biofertilizante (Pérez, 1994).

2. Gallinaza proviene de excrementos de gallinas (*Gallus domesticus*)

consolidó una base de datos con todos los sustratos evaluados incluyendo el control.

Al igual que con las especies de encinos evaluados en este estudio, los datos de crecimiento de las plántulas de aguacatillos fueron analizados con un ANDEVA de medidas repetitivas para evaluar el efecto del sustrato y tiempo de monitoreo en el cambio de tamaño de los individuos. Con base a la prueba de Shapiro-Wilk los residuales de los modelos estadísticos realizados presentaron una distribución normal ($p > 0.0999$). La significancia estadística del análisis fue evaluada con un valor de $p = 0.05$ y la interpretación de los resultados se basó en la significancia de la interacción o de los efectos principales. Posteriormente, se realizó una prueba de t de a pares para determinar los sustratos o tiempos que fueron diferentes entre sí utilizando el paquete estadístico de R “rstatix” (Kassambara, 2019).

Germinación en Hematoxylum brasiletto (árbol de Brasil)

Las semillas procedentes de siete árboles padres (mil semillas aproximadamente) fueron mezcladas, 100 de esas semillas fueron seleccionadas al azar y colocadas en una cama germinadora con suelo orgánico (suelo procedente del área con vegetación dentro de las instalaciones del Instituto Nacional de Bosques—INAB) localizada en la sub-regional II-4 del INAB, San Jerónimo, Baja Verapaz. A estas semillas no se les aplicó ningún tipo de tratamiento pre-germinativo ya que iniciaron a germinar al segundo día, por lo que un tratamiento adicional para acelerar la germinación no fue necesario. La germinación fue evaluada a la segunda semana de haber sido sembradas las semillas, mientras que la medición de altura de las plántulas se realizó solamente al tercer mes después de germinadas. Por lo tanto, el análisis para esta especie es puramente descriptivo.

Resultados

Germinación, sobrevivencia y crecimiento en robles/encinos

Tratamientos pre-germinativos en *Quercus sapotifolia* y *Q. acutifolia*

Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos pre-germinativos y la variable de respuesta (germinación/no germinación) para la especie *Q. acutifolia* ($X^2=11.76$, $p = 0.008$, Cuadro 1). Los tratamientos control (54%), agua (56%) y combinado (63%) presentaron los valores de germinación más altos y fueron similares entre sí ($p > 0.05$). El tratamiento lija presentó el valor más bajo (23%) y fue significativamente distinto a los estimados en el tratamiento control, agua y combinado ($p < 0.008$). En el caso de *Q. sapotifolia* no se observó diferencia estadísticamente significativa de la variable respuesta entre los tratamientos pre-germinativos ($X^2=4.27$, $p = 0.598$). El porcentaje de germinación de los tratamientos evaluados en esta especie estuvo entre un rango de 38-58% (Cuadro 1).

Al evaluarse el efecto del tratamiento pre-germinativo y tiempo con el cambio de tamaño en las plántulas de encinos, en ninguna de las especies la interacción resultó significativa ($p > 0.5$). En el caso de *Q. sapotifolia* ambos efectos principales (e.g., tratamiento pre-germinativo y tiempo) resultaron ser significativos ($p < 0.05$). La altura promedio de plántulas en el tratamiento control y lija fueron similares entre sí (5.89 ± 0.58 cm y 4.57 ± 0.39 cm, respectivamente), y significativamente mayores ($p < 0.05$) a los reportados en el tratamiento agua y combinado (3.67 ± 0.47 cm y 3.29 ± 0.43 cm, respectivamente). Al evaluar el efecto del tiempo en las alturas de las plántulas de *Q. sapotifolia*, el tamaño promedio en la primera medición fue significativamente menor (2.52 ± 0.35 cm) al reportado en el último censo (6.02 ± 0.44 cm).

En el caso de *Q. acutifolia* solamente el efecto del tiempo resultó significativo ($F_{1,48,25,21} = 112.9$, $p < 0.001$) en el tamaño de las plántulas. En la primera medición el tamaño promedio fue de 2.13 ± 0.19 cm y fue significativamente menor al reportado en el último censo (5.93 ± 0.20 cm). El tamaño promedio de las plántulas en los tratamientos pre-germinativos evaluados fue similar entre sí ($F_{3,51} = 0.86$, $p > 0.5$), con un rango de promedios entre 3.5 a 4.4 cm. Con base a la prueba de Shapiro-Wilk los residuales de los modelos estadísticos realizados presentaron una distribución normal de los datos ($p > 0.0999$).

Cuadro 1.

Porcentaje de germinación de dos especies de encino rojo bajo cuatro tratamientos pre-germinativos en condiciones de vivero.

Tratamiento*	Porcentaje de germinación (%)**	
	<i>Quercus acutifolia</i>	<i>Quercus sapotifolia</i>
Control	54 a	53 a
Lijado	23 b	53 a
Inmersión agua	56 a	38 a
Combinado	63 a	58 a

* Tratamientos: Control, ningún tipo de manipulación; Lijado: se lijó la parte apical de la bellota para debilitar la testa y permitir el ingreso de agua; Inmersión en agua durante 24 horas; Combinado (lijado + inmersión en agua).

** Letras diferentes sugiere diferencias significativas entre tratamientos para una especie, evaluado a un alfa de 0.05 (Análisis de Chi-cuadrado utilizando datos de frecuencia de semillas que germinaron y no germinaron al finalizar el experimento)

Diferencias en la germinación entre encinos blancos y encinos rojos

En conjunto, el porcentaje de germinación de las especies de encinos estudiados fue del 38.03% ($\pm 4.18\%$). El ANDEVA identificó una diferencia significativa en la tasa de germinación entre los dos tipos de encinos ($p=0.001$). Los encinos rojos presentaron una tasa

de germinación del 50.24 ± 2.92 % (rango 41.5-54.0%), mientras que en los encinos blancos fue de $28.26 \pm 2.01\%$ (rango 22.8-33.3%). No hubo una diferencia estadísticamente significativa en el tiempo de inicio de germinación entre los dos tipos de encinos ($p = 0.734$), ambos empezaron a germinar al quinto censo que corresponde a 37 días calendario (5 semanas) posterior a su siembra.

Sobrevivencia de plántulas de encino en condiciones naturales

Las plántulas de encinos germinadas en el vivero ($n = 82$) presentaron un rango de altura inicial entre 2-20 cm, siendo la altura promedio de 8.35 cm (± 0.27) al momento de ser trasplantadas a campo, un mes después alcanzaron una altura promedio de 9.1 cm (± 0.28). La sobrevivencia de las plántulas en campo después de un mes de ser trasplantadas fue alta (96%) y no parece estar relacionada al tamaño inicial ($p = 0.716$), esto se evidencia por la carencia de un patrón de los valores predichos por el modelo (Figura 1A). Después de un mes de ocurrido el incendio de intensidad moderada, únicamente 17 plántulas desarrollaron un nuevo tallo con una altura promedio de 2.6 cm (± 0.4). Para el segundo mes, cuatro individuos más desarrollaron un nuevo tallo para un total de 21 plantas con una altura promedio de 4.39 cm (± 0.6). Todos los individuos que sobrevivieron corresponden únicamente a *Q. purulhana*. El análisis nos sugiere que el tamaño de la plántula antes del incendio tuvo una relación con la sobrevivencia del individuo al primer (valor-Z = 2.629, $p = 0.0085$) y segundo mes (valor-Z = 2.149, $p = 0.0316$) de ocurrido el disturbio (Figura 1B-C). Los valores predichos por cada uno de los modelos sugieren que los individuos con un tamaño inicial igual o mayor a los 15 cm presentaron mayor probabilidad ($>50\%$) de sobrevivir al incendio forestal ocurrido en el área de estudio (Figura 1B-C).

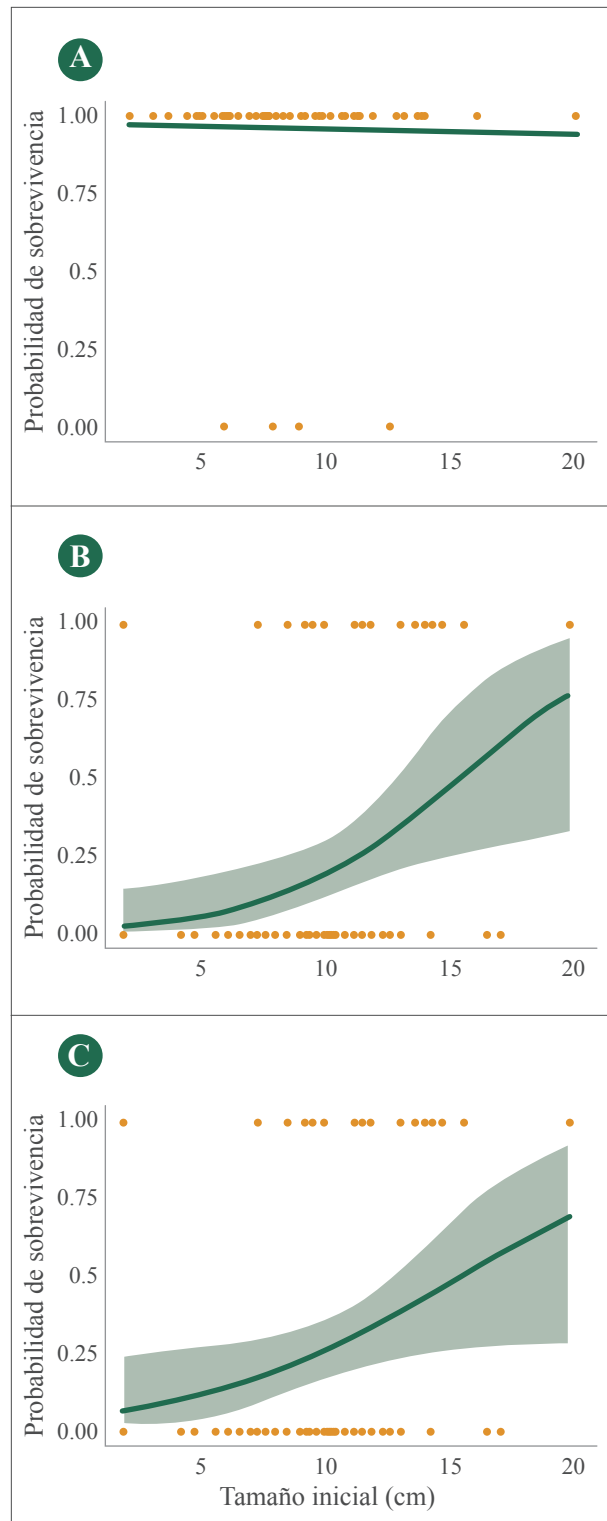


Figura 1. Sobrevivencia de encinos (*Quercus acutifolia* y *Q. purulhana*) en relación con el tamaño inicial, (A) al mes uno de haberlos trasplantado a campo definitivo, y después del (B) primer y (C) segundo mes de ocurrido un incendio forestal en el área de la siembra.

Sobrevivencia y crecimiento en aguacatillos

En la especie *Nectandra longicaudata* la sobrevivencia de plántulas fue alta independientemente del sustrato, más del 60% del total sobrevivieron al cuarto mes de monitoreo (Cuadro 2). Entre tratamientos, las plántulas creciendo en condiciones naturales, en sustrato lombricomposta y gallinaza presentaron valores similares de sobrevivencia (valores $p > 0.05$), pero fueron significativamente menores a los reportados en el sustrato suelo orgánico ($p < 0.0093$; Cuadro 2). En *Ocotea eucuneata* la sobrevivencia fue muy variable, en condiciones naturales alcanzó el 100%, mientras que en los otros sustratos fue menor al 50% (Cuadro 2). Estas diferencias entre sustratos fueron significativas ($p < 0.0001$) a excepción de la comparación entre lombricomposta y suelo ($p > 0.05$, Cuadro 3). En el caso de *Persea donnell-smithii* la sobrevivencia de plántulas fue mayor al 65% en todos los sustratos, sin diferencias significativas a un valor $p = 0.05$ (Cuadro 2). Al evaluar el patrón de sobrevivencia en su conjunto (datos de las tres especies), el modelo lineal generalizado realizado sugiere que la sobrevivencia de aguacatillo fue mayor en plántulas con tamaños iniciales pequeños, mientras que en plántulas con alturas iniciales mayores la mortalidad se incrementó (Figura 2).

El análisis de crecimiento de las plántulas de aguacatillo se realizó a nivel de especie, la comparación entre especies no fue posible por la no ortogonalidad de los datos (el número de individuos al final del experimento fue distinto debido a la no sobrevivencia de algunos a lo largo del período del estudio). En la especie *N. longicaudata*, la altura de los individuos estuvo explicada por el efecto de la interacción entre tratamiento y tiempo ($F_{2,95,47.2} = 8.39$, $p < 0.001$). En el primer monitoreo el promedio de altura de las plántulas fue similar en los

Cuadro 2.

Sobrevivencia de plántulas de aguacatillos en tres tipos de sustrato bajo condiciones de vivero y naturales (control), a los 4 meses de monitoreo.

Tratamiento	Sobrevivencia de aguacatillos (%)		
	<i>Nectandra longicaudata</i>	<i>Ocotea eucuneata</i>	<i>Persea donnell-smithii</i>
Control	68 a	100 a	84 a
Lombricomposta	72 a	40 b	88 a
Gallinaza	68 a	8.6 c	68 a
Suelo	100 b	48 b	84 a

* Tratamientos: Control, suelo orgánico proveniente de áreas aledañas al vivero; Lombricompost (2:1:1 [lombricomposta:arena:suelo orgánico]); Gallinaza (2:1:1 [suelo orgánico:gallinaza:arena])

** Letras diferentes sugiere diferencias significativas entre tratamientos para una especie, evaluado a un alfa de 0.05 (Análisis de Chi-cuadrado utilizando datos de frecuencia de individuos vivos y muertos al último censo)

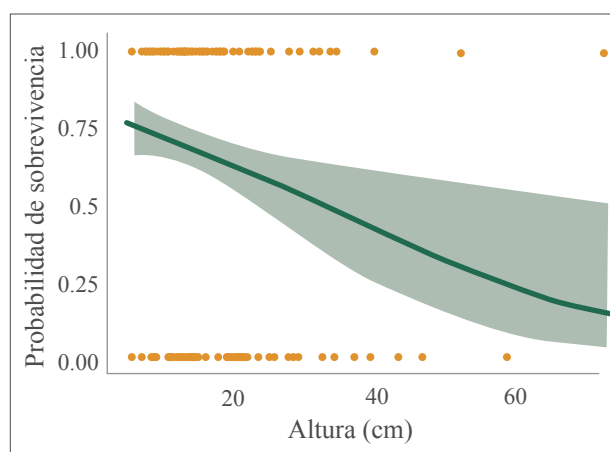


Figura 2. Sobrevivencia de plántulas de aguacatillos en función del tamaño inicial al momento del trasplante. Para este análisis se unieron los datos de supervivencia de las tres especies evaluadas en el presente estudio.

tres sustratos evaluados y las que estaban creciendo en condiciones naturales (control), pero en los monitoreos siguientes el promedio de altura de los aguacatillos en los diferentes tipos de sustrato decreció, mientras que las plantas en condiciones naturales incrementaron su tamaño (Figura 3). En *P. donnell-smithii* la interacción de las variables evaluadas no fue significativa ($F_{2.57,36.06} = 2.21$, $p = 0.119$), pero hubo una diferencia significativa en los efectos principales, tipo de sustrato ($F_{2.43,162.53} = 33.18$, $p < 0.001$) y tiempo ($F_{1.63,109.27} = 76.18$, $p = 0.005$). En esta especie, las plántulas monitoreadas en campo (control) presentaron en promedio 15.8

± 0.46 cm de altura, siendo significativamente mayor que los tamaños de plántulas sembradas en los otros sustratos bajo condiciones de vivero (Figura 4A). El tamaño promedio de las plántulas en los sustratos gallinaza (10.3 ± 0.31 cm), lombricompost (10.8 ± 0.33 cm) y suelo (11.6 ± 0.52 cm) fueron similares entre sí (todos los valores $p > 0.05$, Figura 4A). Entre los tiempos evaluados, la altura promedio de plantas en los primeros censos fue similar (11.93 ± 0.47 cm y 11.91 ± 0.48 , Figura 4B), pero fue significativamente menor a la altura reportada en el tercer (12.13 ± 0.48) y cuarto (12.49 ± 0.52) monitoreo (Figura 4B). En *O. eucuneata* no se observó un efecto de la interacción de las variables evaluadas ($F_{1.27,11.46} = 0.87$, $p = 0.396$), mientras que en los efectos principales solamente el tipo de sustrato resultó significativo ($F_{1.27,49.63} = 10.64$, $p = 0.001$). Las plantas en condiciones naturales (control) presentaron las alturas mayores (29.9 ± 2.89 cm) comparadas con las plantas creciendo en sustratos de lombricompost (19.0 ± 1.29 cm) y suelo (18.4 ± 1.30 cm) bajo condiciones de vivero (Figura 5). El sustrato gallinaza no fue considerado en el análisis porque solamente dos individuos sobrevivieron durante el período de estudio. Estos dos individuos reportaron un incremento de 0.3 cm ($18.2 - 18.5$ cm) y de 1.1 cm ($17 - 18.1$ cm) durante los cuatro meses de monitoreo

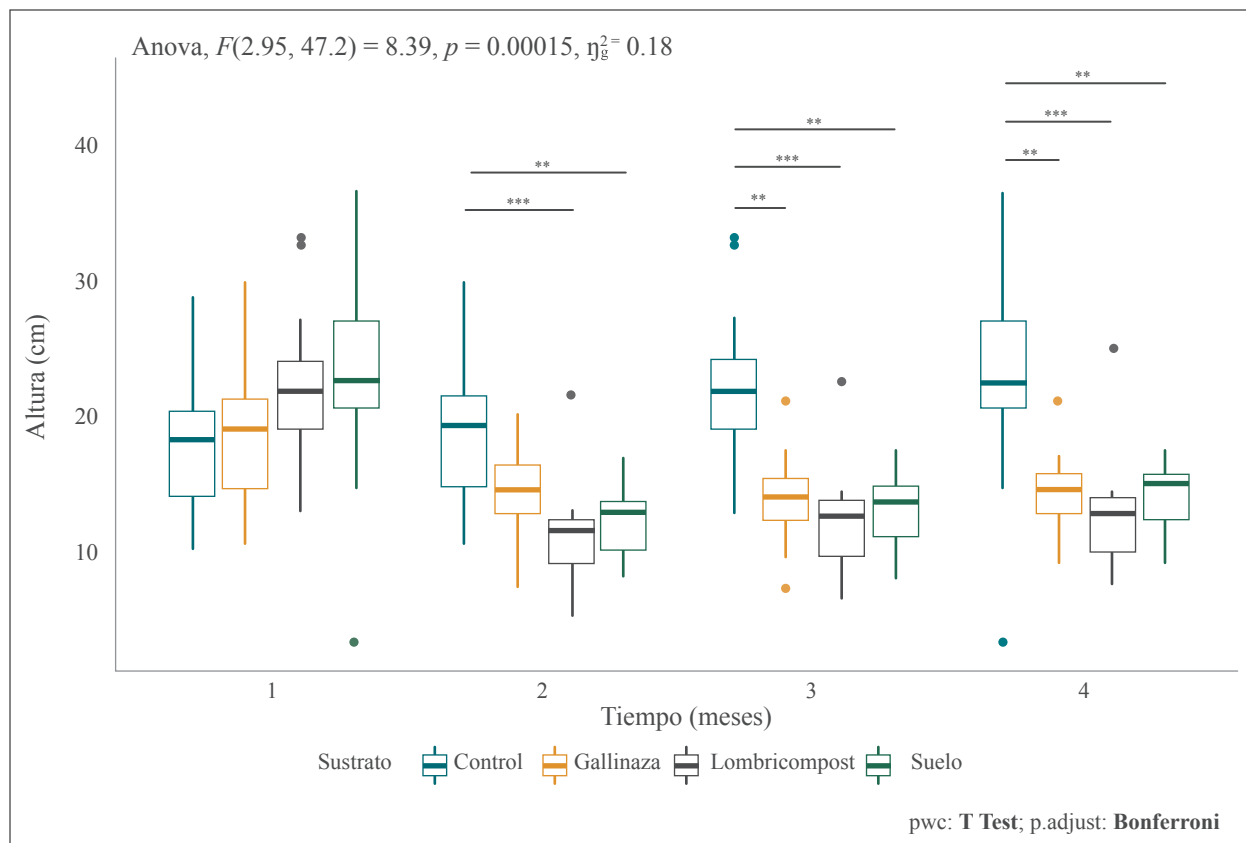


Figura 3. Interacción del crecimiento en cuatro tipos de sustrato (control, gallinaza, lombricompost, suelo) de plántulas de *Nectandra longicaudata*, durante cuatro meses de monitoreo bajo condiciones de vivero.

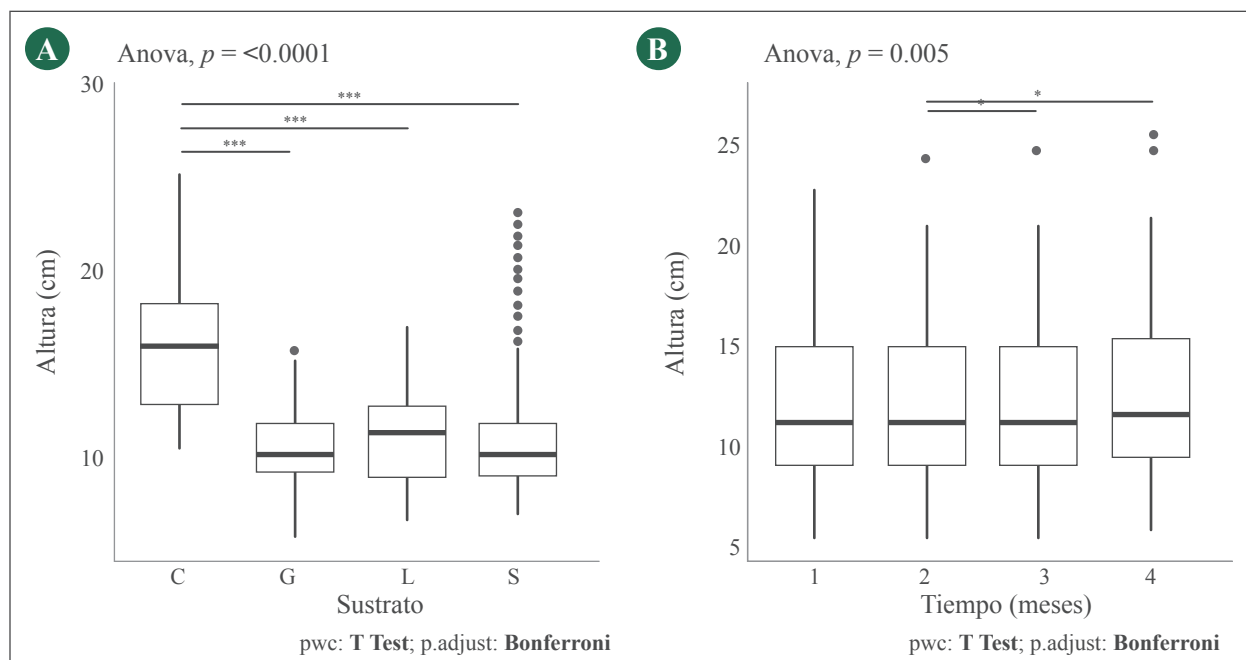


Figura 4. Efecto del sustrato (A) y tiempo de monitoreo (B) en el crecimiento de plántulas de *Persea donnell-smithii* bajo condiciones de vivero durante 4 meses. Sustratos evaluados: C = control o plántulas creciendo en condiciones naturales, G = gallinaza, L = lombricompost, S = suelo.

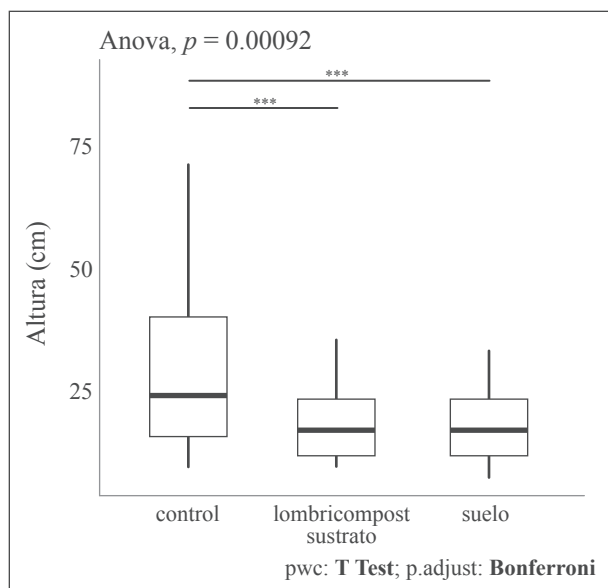


Figura 5. Efecto del tipo de sustrato en el crecimiento de *Ocotea eucuneata* bajo condiciones de vivero durante 4 meses. Sustrato gallinaza no fue incluido en el análisis ya que solo dos individuos sobrevivieron al último mes de monitoreo.

Germinación en *Haematoxylum brasiletto* (árbol de Brasil)

Las plántulas de *Haematoxylum brasiletto* empezaron a emerger al segundo día, después de un mes la tasa de germinación fue del 64%. Después de tres meses, el rango de altura fue entre 3.2 a 24.4 cm. La sobrevivencia de los individuos fue del 100% en condiciones de vivero.

Discusión

Germinación, sobrevivencia y crecimiento en robles/encinos

Los tratamientos pre-germinativos evaluados no parecen influir significativamente en la tasa de germinación de encinos, al menos para *Q. sapotifolia* y *Q. acutifolia*. Este resultado es similar al encontrado en *Q. castanea* en donde el tratamiento pre-germinativo (remojar las semillas durante 24 horas antes de ser sembradas)

no influyó en una tasa de germinación significativamente mayor al tratamiento control (Martínez-Pérez et al., 2006). La no incidencia de los tratamientos pre-germinativos en las especies de encinos aquí evaluadas puede estar asociada a la característica recalcitrante de sus semillas. Las semillas recalcitrantes en encinos empiezan a perder agua desde el momento en que las bellotas son dispersadas y esta pérdida de humedad reduce su viabilidad, por lo que el tiempo de germinación debe ser relativamente rápido (Salomón et al., 2012; González-Salvatierra et al., 2013; Parra-Aldana et al., 2011). Por otro lado, las semillas ortodoxas tienen la capacidad de reducir hasta un 12% su contenido de humedad y no perder su viabilidad (Pasquini et al., 2011), por lo que los tratamientos pre-germinativos podrían ser una alternativa para reducir y romper su latencia y con esto acelerar e incrementar la tasa de germinación.

Los tratamientos pre-germinativos tampoco influyeron significativamente en el crecimiento de las plántulas ya que presentaron alturas menores o similares al control, pero la tendencia general observada en las dos especies fue a un incremento en la altura de las plántulas en el tiempo que duro la evaluación. Algo importante de mencionar es la variabilidad en los tamaños de las plántulas observada en las dos especies que podría estar relacionada a la variación en tamaño y peso de las semillas en encinos. El tamaño y peso de la bellota es muy variable dentro de un mismo árbol y entre localidades (M. Pérez, observación personal), esta variación podría influir en diferencias en el crecimiento tanto de la parte verde como del sistema radicular pero estas variables no fueron analizadas en el presente estudio. Sin embargo, no se descarta que dicha variación en los tamaños de las plantas se relacione a las condiciones del vivero temporal en donde se realizó el experimento, ya que la incidencia de luz y sombra no fue homogénea, siendo factores no controlados en el experimento.

Por lo tanto, se recomienda la continuidad de estudios incluyendo el peso y tamaño de las bellotas como variables para poner a prueba esta hipótesis.

Los encinos blancos y rojos incluidos en este estudio forman parte de los dos linajes principales en América (filogenéticamente distantes entre sí), que evolucionaron paralela y simpátricamente, lo que se tradujo en la coocurrencia de especies de estos dos linajes en casi toda su distribución (Hipp et al., 2018). Esta coexistencia a largo plazo de varias especies de encino se debe probablemente a mecanismos ecológicos que reducen la competencia, que promueven el establecimiento de otros encinos, o que reducen la presión de plagas y patógenos (Cavender-Bares et al., 2018; Cavender-Bares, 2019). Por lo tanto, la repartición de recursos espacial o temporalmente, a través de diferencias en fenología, regeneración, propagación, resistencia a sequía o fuego es de esperarse entre especies de estos dos linajes que comparten hábitat; sin embargo, estas dinámicas ecológicas aún no han sido muy estudiadas en Mesoamérica. En el presente estudio no se observó una diferencia entre los tiempos promedios de germinación entre encinos blancos y rojos, ambos promedios estuvieron en un rango de 1 a 1.5 meses, aproximadamente. Este resultado es contrario a lo reportado por García-De la Cruz et al. (2016) en donde los encinos blancos germinaron entre los primeros 10 días y más rápidamente que los encinos rojos. Esta diferencia la asocian al ataque de herbívoros que suele ser mayor en encinos blancos por tener semillas más grandes, con mayor contenido de cotiledón y presentar menor contenido de taninos, por lo tanto, acelerar la germinación es una forma de reducir la tasa de herbivoría (Fox, 1982). Durante los viajes de campo se observaron agujeros en las superficies de las bellotas de ambos tipos de encinos que sugieren presencia de herbivoría, sin embargo, no se cuenta con datos cuantitativos que nos permita una comparación entre los grupos de

encinos evaluados, por lo que se recomienda integrar esta variable en estudios posteriores para poder evaluar esta hipótesis.

Un dato interesante es que, aunque el tiempo de inicio de la germinación fue similar entre tipos de encinos (aproximadamente 37 días), los encinos rojos presentaron porcentajes de germinación significativamente más altos (50.24%) que los encinos blancos (28.26%). Este resultado es opuesto a lo reportado en México bajo condiciones de invernadero, en donde los encinos blancos, generalmente de semillas más grandes y con mayor peso, presentaron mayores tasas de germinación que los encinos rojos (Sánchez-Montes de Oca et al., 2018). Aunque no contamos con datos del tamaño y peso de semillas, las semillas de los encinos rojos son, en promedio, más pequeñas (promedio: 2 cm) que la de encinos blancos (promedio: 2.8 cm; Harriet López, INAB, comunicación personal, 2019). Sin embargo, este posible patrón de germinación es similar a lo reportado en zonas templadas en Virginia del Oeste, U.S.A, en donde los encinos con semillas más pequeñas presentaron tasas de germinación mayores (Olson y Boyce 1971), así como para otras especies como la leguminosa *Copaifera langsdorffii* (Lopes-Souza y Fagundes, 2014). Otro factor a considerar es que la viabilidad de las semillas de encinos puede estar relacionada a la temporalidad en la producción de frutos. Por ejemplo, en *Q. hintonii* una tasa de germinación menor al 10% se relacionó a temporadas de baja producción de frutos, mientras que en tiempos de abundancia la tasa de germinación sobrepasó el 90% (Díaz-Pontones y Reyes-Jaramillo, 2009). Por lo tanto, es necesario replicar el estudio utilizando semillas de distintas temporadas, de esta forma ampliar el conocimiento sobre la dinámica reproductiva de los encinos rojos y blancos en el país.

Con relación a las plantas sembradas en el área a restaurar, el tamaño inicial de las plántulas de encinos no parece tener una relación con la sobrevivencia un mes después de haber

sido trasplantadas al campo. Sin embargo, estos resultados deben de ser interpretados con cautela ya que el tiempo evaluado fue demasiado corto y podría estar ocultando una posible relación. La sobrevivencia de algunas especies puede ser relativamente alta durante los primeros meses, siendo necesario un tiempo de dos años para observar y evaluar una tendencia a mediano y largo plazo (Tsakaldimi et al., 2012). El monitoreo se detuvo después de un mes por la ocurrencia de un incendio en el área de estudio, sin embargo, permitió evaluar la relación de tamaño inicial de la plántula con la sobrevivencia desde otro contexto: determinar si el tamaño inicial de la plántula influye en la sobrevivencia después de un disturbio natural o antropogénico. Los modelos estadísticos realizados sugieren que plántulas de *Q. purulhana* con tamaños mayores a 15 cm presentan mayor probabilidad de sobrevivir con base a datos recolectados al primer y segundo mes de haber ocurrido el disturbio (e.g., incendio). Estos resultados son bastante parecidos a los encontrados para otros encinos como *Q. ilex* y *Q. coccifera*, en donde se evidenció una relación positiva de sobrevivencia con la altura o diámetro (Tsakaldimi et al., 2012), o con el tamaño inicial de las semillas (Gallo-Macera et al., 2017). Aunque este estudio no consideró el tamaño inicial de cada semilla con la vigorosidad de plántulas (interpretada en términos de sobrevivencia, crecimiento y capacidad de rebrote), se puede deducir que las especies con semillas más grandes tienen mayor probabilidad de sobrevivir, y se evidenció con la capacidad de rebrote en *Q. purulhana* y a la no sobrevivencia de individuos de *Q. acutifolia* que presentan semillas más pequeñas. Sin embargo, se necesita realizar mayor investigación para evaluar esta hipótesis.

En resumen, aunque se hipotetiza que el peso de las semillas se relaciona positivamente al éxito de germinación y vigorosidad de las plántulas (Sánchez-Montes de Oca et al., 2018; Rodríguez-Trejo y Pompa-García, 2016), esta

relación se evidenció sólo parcialmente en el presente estudio. Las semillas con mayor peso (encinos blancos en este caso) no presentaron tasas de germinación mayores al ser comparadas con las otras especies de encinos evaluadas, pero las plántulas del encino blanco *Q. purulhana* fueron más resistentes y presentaron mayor capacidad de rebrote después del incendio ocurrido en el área de estudio. *Q. purulhana* (encino blanco, 10 semillas = 51.2 g) reportó una sobrevivencia del 24% después de ocurrido un incendio en el área de estudio; mientras que los individuos de *Q. acutifolia* (encino rojo, 10 semillas = 16.5 g) no sobrevivieron al disturbio y no se reportó ningún tipo de rebrote después de dos meses de monitoreo. Aunque en encinos blancos la tasa de germinación fue menor, se podría retribuir con tener plantas más vigorosas con mayor probabilidad de rebrote después de un disturbio natural o antropogénico, al menos con las características del incendio ocurrido en el área de estudio (intensidad moderada y poca duración).

Sobrevivencia y crecimiento en aguacatillos

En general, los resultados de este estudio sugieren que las plántulas de aguacatillos pequeñas (5 - 25 cm) mostraron alta probabilidad de sobrevivencia (> 50%) al ser trasladadas a condiciones de vivero, pero esta se redujo en individuos mayores a 30 cm aproximadamente. En condiciones naturales (tratamiento control) esto podría ser un comportamiento usual debido a la alta competencia intraespecífica por humedad y nutrientes del suelo que se intensifica cuando los individuos alcanzan mayor altura, como se ha observado en especies de zonas templadas (Collet y Le Moguedec, 2007). En el caso de las plántulas trasplantadas a otro sustrato, la mayor sobrevivencia de plántulas de menor altura podría estar relacionado a la disminución de nutrientes en los recipientes utilizados, por el consumo de la plántula misma, y por la pérdida

de nutrientes por efecto de la lixiviación (e.g., nutrientes que se lavan por el movimiento de agua de lluvia, que en el Biotopo del Quetzal es abundante; López-González, 2014). Otro aspecto para considerar es el posible efecto de la excavación para extraer las plántulas en la sobrevivencia de éstas. Por ejemplo, individuos más grandes presentan un sistema radicular más desarrollado, por lo tanto, la probabilidad de sufrir algún daño en sus raíces durante el trasplante se incrementa y podría influir en un aumento de la mortalidad a corto plazo (Benson y Shepherd, 1977). Por el contrario, individuos más pequeños tienen un sistema radicular menos desarrollado, siendo más fácil su extracción del suelo sin generar daño y esto podría influir en una alta sobrevivencia. Sin embargo, reconocemos que el período de tiempo evaluado en el presente estudio fue corto y los resultados deben interpretarse con cautela. Se recomienda mantener el monitoreo a largo plazo de la especie para tener un mejor conocimiento de la dinámica de las plántulas de las tres especies de aguacatillo evaluadas.

La sobrevivencia de plántulas de *Ocotea eucuneata* en los sustratos evaluados en vivero fue mucho menor que la reportada en las otras especies de aguacatillo y al compararlas con las plántulas en condiciones naturales, las cuales mostraron sobrevivencia del 100%. Aunque se conoce poco sobre la biología reproductiva de la especie, este resultado podría sugerir una mayor susceptibilidad del efecto de extracción, transporte y manejo de las plántulas, o que las condiciones del vivero no fueron óptimas en términos de humedad, temperatura e intensidad de luz (factores no controlados en el presente estudio). Un resultado a resaltar es la baja sobrevivencia de plántulas en el sustrato gallinaza, una posible explicación es que la concentración utilizada en este estudio no pudo haber sido la adecuada para la especie (855gr/plántula) generando un efecto negativo por posible toxicidad. Por ejemplo, en el caso de cacao (*Theobroma cacao* L.) se ha reportado que las diferencias en la cantidad de gallinaza

aplicada a árboles afectan la producción de frutos (Orozco y Thienhaus, 1997). Otra posible explicación de una alta mortalidad de plántulas en el sustrato gallinaza, es que la cantidad de gallinaza utilizada puede haber generado efectos negativos en el microbioma del suelo por toxicidad de sales generadas por este fertilizante (Montenegro-Gómez et al., 2017). Por lo tanto, es posible que la alta mortalidad de plántulas de *O. eucuneata* observada en este tipo de sustrato se haya debido a la toxicidad de la gallinaza, o a que las aplicaciones realizadas no fueron las óptimas para la especie, mientras que en las otras dos especies de aguacatillo (*P. donnell-smithii* y *N. longicaudata*) la gallinaza no tuvo un efecto significativo en la sobrevivencia en comparación al control. Sin embargo, más estudios comparativos son necesarios para entender mejor la relación de este sustrato con el crecimiento de las especies de aguacatillos, datos que serán relevantes para establecer acciones de restauración en ecosistemas del bosque nuboso de la región.

En general, las tres especies de aguacatillos en condiciones de vivero presentaron un crecimiento de plántulas menor al del grupo control (condiciones naturales), independientemente del tipo del sustrato implementado. Esto podría explicarse desde dos perspectivas. Primero, la colecta, transporte y resiembra de las plántulas pudieron haber influido en un crecimiento más lento. En este caso, como se mencionó anteriormente, las raíces pudieron haber sufrido lesiones al momento de extraer la plántula, o haberse transportado con poco suelo, o no tuvieron suficiente humedad hasta el momento de la siembra en vivero. Por ejemplo, un mal manejo en el desarrollo y transporte de las plántulas y condiciones no adecuadas de humedad y aireación durante la siembra son factores que reducen el crecimiento y sobrevivencia de plántulas en *Pinus radiata* (Ortega et al., 2006). Segundo, la baja intensidad lumínica en el vivero pudo haber limitado el crecimiento de plántulas de aguacatillo. La intensidad de luz a la que está expuesta una planta

es un factor crucial en el crecimiento de especies del trópico incluyendo *Nectandra ambigens* (García-Guzmán y Benítez-Malvido, 2003) y *N. membranacea* (Kuptz et al., 2010). Por ejemplo, las plántulas de las tres especies de aguacatillo estudiadas fueron colectadas en ambientes abiertos, los árboles padres se localizaron a orilla de la carretera o en potreros en donde la intensidad lumínica es mayor comparada con la luminosidad del sitio en donde se ubicó el vivero, debido a una mayor cobertura arbórea y a la infraestructura del vivero mismo (e.g., el vivero estaba cubierto con sarán). Por lo tanto, contar con sustratos que liberen mayor cantidad de nutrientes no siempre se relaciona a un efecto positivo en el crecimiento de plántulas (Coq et al., 2012), más bien podría estar generando una respuesta negativa a causa de la toxicidad por el exceso de nutrientes. Sin embargo, el período de tiempo aquí evaluado y los factores arriba descritos podrían estar oscureciendo una posible relación entre crecimiento y tipo de sustrato en estas especies de aguacatillo. Se recomienda mantener el monitoreo de las plántulas en el vivero hasta el momento de su trasplante a campo definitivo, y promover nuevos estudios que integren los sustratos aquí evaluados con variaciones en intensidad de luz para identificar una posible interacción entre intensidad lumínica y tipo de sustrato en el crecimiento de plántulas. La identificación de los factores que influyen en el crecimiento de plántulas de las especies de aguacatillo en condiciones de viveros podría ser relevantes para identificar los posibles microhábitats que incrementarían el éxito de sobrevivencia y crecimiento, y, por lo tanto, obtener mayor éxito en los procesos de restauración activa en la región (Kuptz, et al., 2010).

Germinación en Hematoxylum brasiletto (árbol de brasil)

El tiempo de inicio de germinación (2 días) y tasa de germinación (64%) aquí reportado para *H. brasiletto* es similar a lo reportado

para la especie en México (e.g., una tasa de germinación del 64% con una velocidad máxima de emergencia de plántulas durante el día 5 y 6; Cervantes-Sánchez y Sotelo Boyás 2002). Considerando que la especie es importante para restaurar suelos y utilizada por la comunidad por su uso medicinal y maderable, se recomienda incluirla en procesos de restauración activa para los ecosistemas secos del país (Ariano Sánchez, 2018), uso que le han dado en otros países de la región como México (Bonfil y Trejo, 2010).

Implicaciones para el manejo

El desarrollo de iniciativas de restauración forestal a nivel de paisaje requiere de la generación de información científica detallada sobre la propagación de plantas nativas (germinación, sobrevivencia y crecimiento inicial; Bonfil y Trejo 2010). Aunque los resultados fueron diversos entre las especies estudiadas, todas tienen un alto potencial de propagarse en condiciones de vivero y campo. Teniendo en cuenta el alcance y las limitaciones del presente estudio, presentamos a continuación algunas recomendaciones generales. Los tratamientos pre-germinativos no parecen incrementar la tasa de germinación de encinos rojos (*Quercus acutifolia* y *Q. sapotifolia*), lo que resulta en una ventaja de propagación en áreas rurales al no ser necesaria la implementación de este tipo de tratamientos previo a su siembra (menos esfuerzo y tiempo de producción, y menos costos). Para los ecosistemas de pino-encino recomendamos utilizar varias especies de encinos, blancos y rojos que cohabitan naturalmente (por ejemplo, *Q. purulhana*, *Q. peduncularis*, *Q. acutifolia*, *Q. sapotifolia*), en la restauración del paisaje ya que promueve la diversidad de rasgos funcionales, tales como, encinos con mayores tasas de germinación (caso de los encinos rojos) y encinos con alta resistencia y capacidad de rebrote después de un disturbio (caso de encinos blancos como *Q. purulhana*), atributos que contribuyen a la resiliencia de los ecosistemas

de pino-encino. En este sentido, se recomienda que las plantas desarrolladas en viveros se trasplanten al menos con una altura de 15 cm, ya que con base a nuestro modelo fueron las que presentaron mayor capacidad de rebrote al incendio ocurrido en el área de estudio.

Para las especies de aguacatillo estudiadas, el uso de los sustratos de lombricompost y gallinaza, con las concentraciones aquí utilizadas, no beneficiaron la sobrevivencia o el crecimiento de las plántulas, y en el caso de *O. eucuneata* disminuyeron su sobrevivencia. El modelo generado para estas especies sugiere que, en las áreas donde se realice manejo de la regeneración y enriquecimiento de áreas degradadas, se trasplanten plántulas menores a 25 cm para aumentar la probabilidad de sobrevivencia. Individuos mayores a 30 cm de altura tienen sistemas radicales más complejos que podrían dañarse al momento de la excavación para extraer y transportar la plántula.

Hematoxylum brasiletto presentó alto porcentaje de germinación, además de que la germinación se da en un tiempo corto, por lo que la especie tiene alto éxito de propagación bajo condiciones de vivero. Estas características favorecen una alta producción de plántulas para realizar programas de restauración del paisaje en los ecosistemas de bosque seco, principalmente en áreas en donde se priorice la restauración de suelos. Sin embargo, se recomienda realizar una evaluación de la vegetación circundante y condiciones de degradación del sitio para priorizar especies y técnicas de restauración.

Las especies evaluadas presentan alto valor ecológico (e.g., aguacatillos como alimento del Quetzal y otras especies de fauna nativa y endémica a la región), y son importantes también para las poblaciones humanas del área, por su uso tradicional como recurso energético (Encinos [Rodas Duarte et al., 2018] y árbol de brasil [Yescas Albarrán et al., 2016]). Por

lo anterior, las especies aquí estudiadas, no sólo pueden ser utilizadas para recuperar la estructura y diversidad de bosques degradados, sino también funcionarían como alternativa para diversificar sistemas agrícolas (e.g., sistemas agroforestales) y silvospastoriles (e.g., aguacatillos como cercos vivos). La relativa facilidad de propagación de dichas especies, su importancia ecológica y cultural, hacen que su uso sea recomendado en programas de restauración del paisaje forestal de la región de las Verapaces. Además, recomendamos realizar un análisis de la vegetación circundante y condiciones de degradación del sitio a restaurar para priorizar especies de encinos y técnicas de restauración.

Agradecimientos

Este artículo recopila datos de prácticas profesionales de estudiantes de la Universidad de San Carlos de Guatemala y Universidad Rafael Landívar, prácticas que fueron financiadas a través del Proyecto -PD765/14 REv.4 (F) Fase I- titulado “Creación de un programa de restauración del paisaje forestal en Guatemala, tomando como base las directrices de la OIMT”. Proyecto ejecutado por Fundación para la Conservación de los Recursos Naturales y Ambiente en Guatemala (FCG) en colaboración con el Instituto Nacional de Bosques (INAB). Agradecemos a la directora subregional II-4 del INAB y directora del Biotopo Universitario para la Conservación del Quetzal, por facilitar un espacio para el establecimiento de viveros en los cuales se desarrollaron los experimentos. Gracias a María Magdalena Santa Cruz, por habernos facilitado un área degradada dentro de su propiedad para la siembra y monitoreo de encinos. Agradecimiento especial a los revisores y Liza García, por las recomendaciones realizadas al artículo que contribuyeron a mejorarlo significativamente.

Literatura citada

- Ariano Sánchez, D. (2018). Sistematización de información sobre el ecosistema estratégico del bosque seco de Guatemala. Instituto Nacional de Bosques/GIZ, 60 pp.
- Benson, A., y Shepherd, K. (1977). Effects of nursery practice on *Pinus radiata* seedling characteristics and field performance: II. Nursery root Wrenching. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 7(1): 68-76
- Bonfil, C. y Trejo I. (2010). Plant propagation and the ecological restoration of Mexican tropical deciduous forest. *Ecological Restoration*, 28(3): 369-376
- Cavender-Bares, J., Kothari, S., Meireles, J. E., Kaproth, M. A., Manos, P. S, and Hipp, A. L. (2018). The role of diversification in community assembly of the oaks (*Quercus* L.) across the continental U.S. *American Journal of Botany* 105(3): 565– 586.
- Cavender-Bares, J. (2019). Diversification, adaptation, and community assembly of the American oaks (*Quercus*), a model clade for integrating ecology and evolution. *New Phytologist*, 221: 669-692. doi:10.1111/nph.15450
- Cervantes-Sánchez, M. A., y Sotelo-Boyás, M. E. (2002). Guías técnicas para la propagación sexual de diez especies latifoliadas de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos. Special Edition 30. Zacatepec MOR: INIFAP-SAGARPA Campo Experimental Zacatepec.
- Collet, C., y Le Moguedec, G. (2007). Individual seedling mortality as a function of size, growth and competition in naturally regenerated beech seedlings. *Forestry*, 80(4): 359-370
- CONAP. (2014). V Informe nacional de cumplimiento a los acuerdos del convenio sobre la diversidad biológica. Guatemala, Documento Técnico No. 3
- Coq, S., Weigel, J., Bonal, D., y Hättenschwiler, S. (2012). Litter mixture effects on tropical tree seedlings growth – a greenhouse experiment. *Plant Biology*, 14(4): 630-640.
- Díaz-Pontones, D., y Reyes-Jaramillo, I. (2009). Producción y almacenamiento de bellotas de *Quercus hintonii* Warburg (Fagaceae) de la depresión del Balsas, México. *Polibotánica*, 27: 131-143
- Ebbert, D. (2019). Chisq.posthoc.test: A Post Hoc Analysis for Pearson's Chi-Squared Test for Count Data. R package version 0.1.2.
- Fox, J. (1982). Adaptation of gray squirrel behavior to autumn germination by white oak acorn. *Evolution*, 36(4); 1543-1554
- Gallo-Macera, L., Pereira, S. R., y Teixeira de Souza, A. L. (2017). Survival and growth of tree seedlings as a function of seed size in a gallery forest under restoration. *Acta Botanica Brasilica*, 31(4): 539-545
- García-De la Cruz, Y., López-Barrera, F., y Ramos-Prado, J. M. (2016). Germinación y emergencia de plántulas de cuatro especies de encino amenazadas. *Madera y Bosques*, 22(2): 77-87
- García-Guzmán, G., y Benítez-Malvido, J. (2003) Effect of litter on the incidence of leaf-fungal pathogens and herbivory in seedlings of the tropical tree *Nectandra ambigens*. *Journal of Tropical Ecology*, 19: 171-177
- GIMBUT. (2019). Dinámica de cobertura forestal 2010-2016. Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, Guatemala, 3 pp.
- 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
- Guerra-De la Cruz, V., y Galicia. L. (2017) Tropical and Highland temperate forest plantation in Mexico: pathways for climate change mitigation and ecosystem services delivery. *Forests*, 8: 489
- Hipp, A.L., Manos, P.S., González-Rodríguez, A., Hahn M., Kaproth, M., McVay, J.D., Avalos, S.V. and Cavender-Bares, J. (2018). Sympatric parallel diversification of major oak clades in the Americas and the origins of Mexican species diversity. *New Phytologist*, 217: 439-452. doi:10.1111/nph.14773
- Kassambara, A. (2019). Rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests. Available in: <https://CRAN.R-project.org/package=rstatix>: R package version 0.3.1.
- Kuptz, D., Grams, T. E. E., y Günter, S. (2010). Light acclimation of four native tree species in felling gaps within a tropical mountain rainforest. *Trees*, 24: 117-127
- Lopes-Souza, M., y Fagundes, M. (2014). Seed size as key factor in germination and seedling development of *Copaifera langsdorffii* (Fabaceae). *American Journal of Plant Sciences*, 5: 2566-2573
- López-González, S.E. 2014. Evaluación de fertilizantes de liberación controlada en el crecimiento de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq. var *ghana*) en la fase de vivero, diagnóstico y servicios realizados en la finca El Canaleño, Raxruhá, Alta Verapaz, Guatemala, C.A. Tesis grado licenciatura, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 121 pp.

- Lozano, F., Alfaro, O., y Pompelli, M. (2020). GerminaR: índices y gráficos para evaluar el proceso de germinación de semillas. R package version 1.4. Process. Universidad Federal Rural de Pernambuco. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=GerminaR>
- Martínez-Pérez, G., Orozco-Segovia, A., y Martorell, C. (2006). Efectividad de algunos tratamientos pre-germinativos para ocho especies leñosas de la Mixteca Alta oaxaqueña con características relevantes para la restauración. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*: 79: 9-20
- Mesa Nacional de Restauración del Paisaje Forestal de Guatemala. 2018. Oportunidades de restauración del paisaje forestal en Guatemala. 44 pp.
- Montenegro-Gómez, S. P., Gómez-Posada, S., Barrera-Berdugo, S. E. (2017) Efecto de la gallinaza sobre *Azobacter sp.*, *Azospirillum sp.* y hongos micorrizicos arbusculares en un cultivo de cebolla (*Allium fistulosum*). *Entramado*, 26: 250-257
- Olson, Jr. D. F. y Boyce, S. G. (1971). Factors affecting acorn production and germination and early growth of seedlings and seedling sprouts. In: Oak Symposium Proceedings. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 44-48.
- Orozco, M., y Thienhaus, S. (1997). Efecto la gallinaza en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en desarrollo. *Agronomía Mesoamericana*, 8(1): 81-92
- Ortega, U., Majada, J., Mena-Petite, A., Sanchez-Zabala, J., Rodriguez-Iturrizar, N., Txarterina, K., Azpitarte, J., Duñabeitia, M. (2006). Field performance of *Pinus radiata* D. Don produced in nursery with different types of containers. *New Forests*, 31: 97-112
- Parra Aldana, C. A., Díez Gómez, M. C.; Moreno Hurtado, F. H. (2011). Regeneración natural del roble negro (*Colombobalanus excelsa*, Fagaceae) en dos poblaciones de la Cordillera Oriental de los Andes, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(2): 6175-6189
- Pasquini, S., Braidot, E., Petrusa, E., y Vianello, A. (2011). Effect of different storage conditions in recalcitrant seeds of holm oak (*Quercus ilex* L.) during germination. *Seed Science and Technology*, 39: 165-177
- Pérez, H. (1994). Producción de biofertilizantes con la cría de la lombriz roja Californiana (*Eisenia foetida*), utilizando cuatro tipos de sustratos diferentes en condiciones semi-controladas. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 12: 88.
- Pérez, M.E., Gómez, J.L., Ávila Santa Cruz, R., Samayoa, K. (2020). Strengthening forest landscape restoration actions in Guatemala. *International Forestry Working Group Newsletter*, 8: 44-47
- R Core Team. (2018). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. R Foundation for Statistical Computing. Available in: <https://www.R-project.org/>.
- Rodas Duarte, L., Quezada, M. L., Valencia A., S., Marronquín Tintí, A., Hernández, B. A., Martínez, J. R. (2018). Encinos de Guatemala. Volumen I. Universidad de Guatemala, Guatemala.
- Rodríguez-Trejo, D. A., y Pompa-García, M. (2016). Tamaño, color de nuez y sombra afectan la germinación de *Quercus deserticola*. *Madera y Bosques*, 22(2): 67-75.
- Sales, E., Rodas, O., Valenzuela, O., Hillbrand, A., y Sabogal, C. (2016). On the way to restore Guatemala's degraded lands: Creating governance conditions. *World Development Perspectives*, 4: 16-18
- Salomón, R., Lorenzo, Z., Valbuena-Carabaña, M., Nicolas, J. L., y Gil, L. (2012). Seed recalcitrant behavior of Iberian Quercus: a multispecies comparison. *Austrian Journal of Forest Science*, 129(3-4): 182-201
- Sánchez-Montes de Oca, E. J., Badano, E. I., Silva-Alvarado, L. E., Flores, J., Barragán-Torres, F., y Flores-Cano, J.A. (2018). Acorn weight as determinant of germination in red and white oaks: evidences from a common-garden greenhouse experiment. *Annals of Forest Science*, 75: 12
- Tsakalidimi, M., Ganastas, P., Jacobs, D. F. (2012) Prediction of planted seedlings survival of five Mediterranean species based on initial seedling morphology. *New Forests*, DOI: 10.1007/s11056-012-9339-3
- Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data. Springer-Verlag New York, 2016.
- Yescas Albarrán, C. A., Cruz León, A. Uribe Gómez, M., Lara Bueno, A., Maldonado Torres, R. (2016). Árboles nativos con potencial dendroenergético para el diseño de tecnologías agroforestales en Tepalcingo, Morelos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16: 3301-3313