

Manejo y aprovechamiento de recursos

## Evaluación de la regeneración natural en bosques templados con cubierta forestal continua en el noroeste de México

### *Assessment of natural regeneration in temperate forests under continuous forest cover in northwestern Mexico*

Ricardo Martínez-Casas <sup>a</sup>, José Carlos Monárrez-González <sup>b</sup>,  
Juan Torres-Rojo <sup>c</sup> y Gustavo Perez-Verdin <sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Durango, Sigma Núm. 119, Fracc. 20 Noviembre II, 34220 Durango, Durango, México

<sup>b</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle del Guadiana, Km 4.5 Carr. El Mezquital, 34170 Durango, Durango, México

<sup>c</sup> Universidad Iberoamericana, Centro Transdisciplinar Universitario para la Sustentabilidad, Prolongación Paseo de Reforma Núm. 880, Lomas de Santa Fe, 01219 Ciudad de México, México

\*Autor para correspondencia: guperezv@ipn.mx (G. Perez-Verdin)

Recibido: 9 mayo 2024; aceptado: 7 noviembre 2024

#### Resumen

La regeneración natural está influida por una interacción entre factores ambientales y genéticos. Se evaluó la regeneración de bosques templados con cubierta forestal continua, sujetos al tratamiento de selección individual en el noroeste de Durango, México. Se establecieron 27 sitios experimentales (1,000 m<sup>2</sup>) donde se registraron variables dasométricas del arbolado y regeneración natural, diversidad, presencia de ganado y disturbios. En cada sitio, se cuantificó en 2 periodos el número de individuos que cumplen con la condición de regeneración; ésto es, menores a 7.5 cm de diámetro y mayores a 5 cm de altura. Se estimaron los índices de diversidad de Shannon-Wiener, Simpson y Margalef del arbolado adulto y regeneración. Los resultados muestran una dominancia de los géneros *Quercus* y *Pinus*. Sin embargo, no existen diferencias significativas en la diversidad de especies entre el arbolado y regeneración. Las variables más significativas que influyen positivamente en la densidad de la regeneración son el índice de diversidad de Simpson y negativamente la conductividad del suelo y la presencia de ganado, entre otros. Este estudio puede contribuir a la gestión forestal con referencias ambientales que aseguren la densidad y la diversidad de la regeneración en los bosques templados de México.

*Palabras clave:* Cobertura forestal; Cortas de selección; Método diferencias-en-diferencias; Diversidad arbórea; Manejo forestal; Tratamientos silvícolas

## Abstract

Natural regeneration is influenced by a complex interaction between environmental and genetic factors. The natural regeneration under continuous cover forestry, subject to the individual selection treatment, was evaluated in temperate forests of northwestern Durango, Mexico. Twenty-seven experimental sites (1,000 m<sup>2</sup>) were established, where dasometric variables of trees and regeneration, ecological conditions, diversity, and presence of livestock and disturbances were recorded. In each site, the number of individuals that met the regeneration condition, that is, less than 7.5 cm in diameter and taller than 5 cm, was quantified in 2 time periods. The Shannon-Wiener, Simpson, and Margalef diversity indices of the adult trees as well as the regeneration were estimated. Results showed a greater abundance of species of the genus *Quercus* and *Pinus*. However, there are no significant differences in the diversity and composition of species between trees and regeneration. The most significant variables that influence the density of natural regeneration are the Simpson diversity index, soil conductivity, and the presence of livestock, among others. This study will contribute to forest management by providing ecological references that ensure the density and diversity of the natural regeneration in temperate forests of Mexico.

**Keywords:** Forest cover; Selection cutting; Difference-in-differences method; Tree diversity; Forest management; Silvicultural treatments

## Introducción

La regeneración natural es el reemplazo de árboles adultos por nuevos individuos a través de semillas o reproducción vegetativa (Crouzeilles et al., 2017). El reemplazo puede ser espontáneo o asistido a través de tratamientos silvícolas y complementarios. Muchos estudios sugieren que la regeneración natural es mejor que el reemplazo mediante plantación; no obstante, frecuentemente se opta por este último debido a la incertidumbre asociada a la regeneración natural, el tiempo requerido para el establecimiento, las posibles variaciones en las condiciones de germinación de la semilla, así como la incertidumbre sobre la disponibilidad de agua y nutrientes en las primeras fases de desarrollo de la planta (Crouzeilles et al., 2020; Torres-Rojo y Velázquez-Martínez, 2023). Sin embargo, la regeneración natural brinda resultados aceptables bajo una supervisión cuidadosa, particularmente en bosques templados multiespecíficos y multietáneos o bien, cuando se aplican tratamientos de regeneración con un alto nivel de protección al renuevo como son las cortas sucesivas y selección (Pensado-Fernández et al., 2014; Latawiec et al., 2016).

El establecimiento de la regeneración natural depende de varios factores bióticos y abióticos. La humedad y fertilidad del suelo, precipitación, temperatura, pendiente, exposición, presencia de incendios y ganado, así como la aplicación de técnicas y tratamientos silvícolas son algunos de ellos (Flores Rodríguez et al., 2021; Leyva-López et al., 2010). Las buenas prácticas de manejo y tratamientos silvícolas permiten enriquecer las condiciones apropiadas para el establecimiento y desarrollo de la regeneración. Algunos ejemplos son las prácticas para reducir el riesgo de incendios, exclusión de pastoreo y el fomento de la

diversidad arbórea y de la regeneración, de manera que no se comprometa la presencia de ciertas especies por preferencias comerciales (Crouzeilles et al., 2017; Leyva-López et al., 2010). En particular, se ha documentado que los incendios moderados en bosques templados, a través de quemas controladas propician una mayor regeneración natural (Flores-Rodríguez et al., 2021), mientras que la aplicación de cortas intensivas de regeneración (como el tratamiento de árboles padres) no tiene efectos aparentes en la composición y diversidad de especies (Hernández et al., 2019; Leyva-López et al., 2010).

Las características de la regeneración natural resultado de la aplicación del tratamiento silvícola de selección en bosques templados de México han sido poco estudiadas. Este tratamiento consiste en la remoción individual o de grupos de individuos en cuyos huecos o claros se desarrolla la regeneración, propiciando una cubierta forestal continua (Gustafsson et al., 2020). Los bosques tratados con esta práctica tienen diferentes intensidades de corta acorde a la densidad, calidad del sitio, factores climáticos y tipo de especies. La regeneración se establece en mosaicos o parches con diferentes edades según el área descubierta formando bosquetes incoetáneos (Torres-Rojo y Orois-Sánchez, 2005). El tratamiento silvícola de selección se ha aplicado, desde la década de 1940, en cerca de 50% de la superficie forestal bajo manejo en México y en alrededor de 65% en el estado de Durango (Hernández-Díaz et al., 2008; Moreno-Sánchez y Torres-Rojo, 2010).

A diferencia de otros tratamientos más intensivos (como el de árboles padres o semilleros), la remoción de árboles varía entre 20 y 50% de las existencias volumétricas, causando un menor impacto al bosque. El efecto de este tratamiento se traduce en la formación de bosques irregulares donde la mayoría de los árboles

se encuentran en las categorías diamétricas inferiores y pocos adultos en las categorías mayores. Este patrón de crecimiento genera una distribución de frecuencias de tamaño tipo exponencial (*J* invertida), de tal manera que los excedentes de árboles en cada categoría son removidos en periodos de 10-15 años (Seedre et al., 2018). La remoción de árboles se hace con base en la distribución espacial de los árboles, proporción de especies y las condiciones de terreno (Monárrez-González et al., 2020; Torres-Rojo et al., 2016). Una vez que se remueven los árboles, los que se dejan en pie son los responsables de proporcionar la semilla que formará el nuevo bosque (Torres-Rojo y Orois-Sanchez, 2005). Dado el tamaño del claro que se forma, la poca intensidad de remoción y la baja densidad de plantación, es difícil y costoso establecer una regeneración artificial, por lo que el reinicio del bosque bajo el tratamiento de selección es comúnmente natural.

Para evaluar el éxito de la regeneración natural se utilizan diversos parámetros ecológicos como la densidad, diversidad, vigor y distribución de las plantas (Aguirre-Mendoza et al., 2021; Krebs, 1999). La densidad indica el número de árboles establecidos por unidad de área, mientras que la diversidad se refiere al número y composición de especies presentes en la regeneración. El vigor es una propiedad de las plantas para resistir o adaptarse a posibles disturbios en el entorno. La distribución espacial indica el patrón de ubicación de los árboles que por lo general sigue 3 tipos: agregada, uniforme y aleatoria (Romahn-Hernández et al., 2020). Idealmente, las distribuciones uniformes o aleatorias son más eficientes que la distribución por grupos debido a que la superficie sin renuevo que se forma es menor (Moreno-González et al., 2007).

El estado de Durango tiene una superficie total de aproximadamente 12.3 millones de ha, de las cuales 55% está cubierta por diversos tipos de vegetación y 45% por bosques templados de coníferas y latifoliadas. El área se divide en 13 unidades de manejo, de acuerdo al régimen de manejo forestal, como el método de ordenación, flujo de abastecimiento de productos forestales, composición de especies, etc. (Novo-Fernández et al., 2018). Particularmente, el estudio se desarrolló en la zona noroeste de la entidad, donde existen asociaciones de pino, encino y otras especies de latifoliadas. El objetivo de este trabajo fue evaluar la regeneración natural en bosques con cobertura continua a diferentes niveles de densidad residual. Específicamente, se estimó la diversidad, distribución espacial y densidad de la regeneración natural en áreas con diferentes intensidades de manejo y se evaluó el efecto que tienen variables como la cobertura, volumen, área basal y diversidad de la vegetación arbórea sobre la regeneración natural.

## Materiales y métodos

El área de estudio tiene una superficie total de 120,000 ha, en las cuales se identificaron los siguientes ejidos: Los Ojitos, Salpica el Agua, Laguna de la Chaparra, Potrero de Chaidez, Los Altares, Quebrada de Cebollas, El Negro, Las Hacienditas y Salto de Camellones, municipios de Santiago Papasquiaro y Otáez, Durango (fig. 1). El área está cubierta por bosques de pino, encino y una combinación de ambos con otras latifoliadas (González-Elizondo et al., 2012). El clima de la región es templado, subhúmedo, con lluvias moderadas en el verano y parte de diciembre. La precipitación anual varía entre 850 y 1,450 mm, con un promedio ponderado de 910 mm y una temperatura promedio anual de 13.3 °C (Silva-Flores et al., 2014). El terreno es accidentado con elevaciones entre 1,500 y 3,000 m snm y pendientes entre 10 y 60%. En su gran mayoría, los bosques son tratados con el método de selección usando diferentes intensidades de corta que varían entre 20 y 40% del área basal.

Los predios seleccionados forman parte de una red de monitoreo de servicios ecosistémicos en la región establecidos en 2017 y remedidos en el 2023. Además de la regeneración natural, también se monitorean los flujos de agua, la diversidad vegetal, la cosecha de madera, el almacén de carbono, la erosión del suelo y la fauna silvestre. En cada predio, se establecieron 3 sitios experimentales de 1,000 m<sup>2</sup> (radio = 17.84 m), con un total de 27 sitios de investigación. La selección y ubicación de estos sitios en cada predio se hizo con base en las características del arbolado, terreno y accesibilidad. En particular, se requirió que esos sitios hubieran sido intervenidos con el tratamiento de selección, que tuvieran diferentes niveles de pendiente y, además, fueran relativamente fáciles de acceder (para el monitoreo y medición de todas las variables que integran el estudio). Se recolectó información dasométrica a nivel de especie/árbol y características de sitio como regeneración, pendiente, exposición, altitud sobre el nivel del mar, entre otras. A cada árbol se le midió la altura, diámetro normal (a 1.30 m de altura), edad y diámetro de copa. Con esta información se estimaron otras variables como el área basal, volumen, biomasa y diversidad de especies. Adicionalmente, se colectaron 3 muestras de suelo, hasta 30 cm de profundidad, para evaluar la conductividad, potencial de hidrógeno (pH), sales solubles, nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y calcio. Los análisis se hicieron conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. La estimación de materia orgánica se hizo a través del método de calcinación (Schulte y Hopkins, 1996), en donde las partículas del suelo se sometieron a una temperatura de 105 °C por un periodo

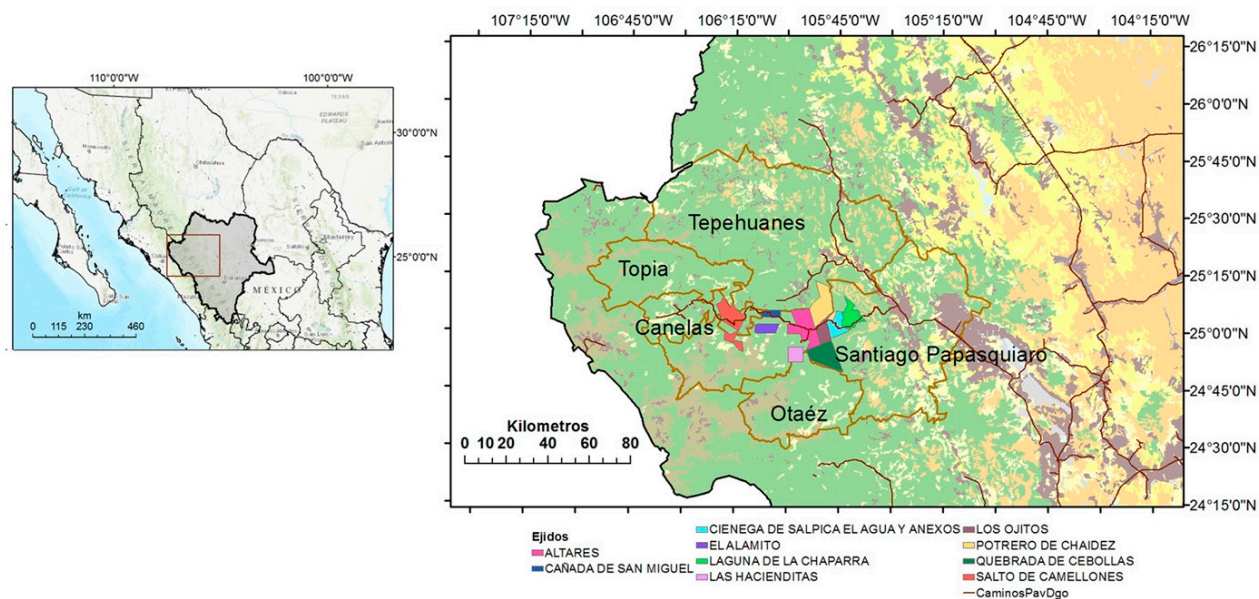


Figura 1. Ubicación de los predios participantes en la evaluación de la regeneración natural en el noroeste de Durango, México. Fuente: elaboración propia del autor responsable.

de 24 horas. Luego, se depositaron en un desecador de plástico para ser pesadas y, posteriormente, se introdujeron a una mufla a una temperatura de 360 °C por 5 h. El porcentaje de materia orgánica en el suelo se calculó como la diferencia entre el peso inicial y final dividido por el peso de la muestra inicial (Izquierdo-Bautista y Arévalo-Hernández, 2021). Finalmente, en cada sitio se realizaron evaluaciones cualitativas sobre presencia de ganado, afectaciones por incendios y presencia de plagas o enfermedades en los 2 periodos de medición.

*Densidad y distribución espacial de la regeneración.*

Para fines de este estudio, se definió como regeneración a aquel tipo de vegetación leñosa no arbustiva, cuyo origen haya sido por semilla o vegetativo, con una altura mayor a 5 cm y con diámetro normal menor a 7.5 cm (Cruz-García et al., 2019). Se eligió el método de la parcela  $T^2$  (o llamado también método del vecino más cercano o parcela 0) para evaluar la densidad y distribución espacial de la regeneración, por lo que la densidad se expresa como el número de plantas por superficie (número de individuos/ha) mientras que la distribución espacial evalúa la forma en que se distribuye la regeneración en el sitio. Las parcelas  $T^2$  son sitios circulares de tamaño desigual, pero sin plantas (de ahí su nombre como parcela 0). Los círculos se convierten en sitios de muestreo al tomar la distancia radial desde el centro hasta el renuevo más cercano. Por tanto, una categoría de parcela 0 de menor superficie significa una mayor cantidad de estos círculos

por hectárea y una mayor densidad de la regeneración (Krebs, 1999).

El procedimiento consiste en ubicar el punto central que fue identificado dentro de cada sitio experimental y medir la distancia al individuo (regeneración) más cercano (X) (Cruz-García et al., 2019). Después, se mide la distancia al siguiente individuo más cercano (Z) (fig. 2).

La densidad (D, número de individuos/m<sup>2</sup>) se estimó con la expresión:

$$D_{i=1}^n = \frac{n^2}{2 \sum x_i [\sqrt{2} \sum z_j]} \quad (1)$$

donde  $n$  es número de puntos de control,  $x_i$  es la distancia al renuevo más cercano X y  $z_j$  representa la distancia al siguiente árbol más cercano Z (fig. 3a). Con los resultados de la ecuación anterior, el procedimiento requiere probar la hipótesis nula para determinar el tipo de distribución de la regeneración por especie (pinos, encinos y otras especies). Dicha hipótesis se formula para conocer si la regeneración en cada sitio se distribuye de manera aleatoria o tiene otra forma de distribución. Se usó el estadístico de Hines ( $H_d$ ) para evaluar tal hipótesis, el cual se expresa como:

$$H_d = \frac{2n[2 \sum x_i^2 + \sum z_j^2]}{[(\sqrt{2} \sum x_i + \sum z_j)]^2} \quad (2)$$

En este caso, valores bajos del estadístico Hines (< a 1) indican un patrón de distribución uniforme mientras que



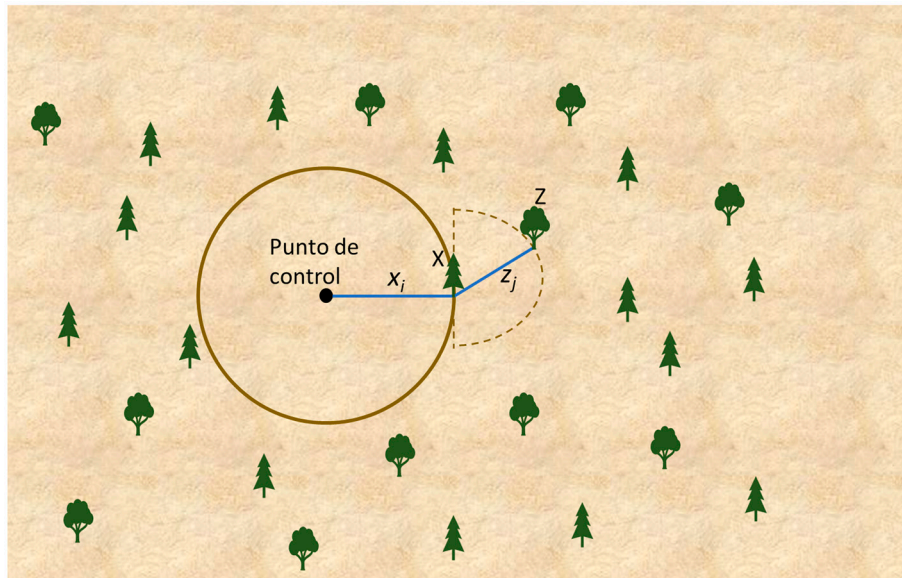


Figura 2. Método de la parcela T2. El método requiere que el ángulo formado por los individuos X y Z sea mayor a  $90^\circ$  (Krebs, 1999). Como punto de control se eligió el centro de evaluación de la regeneración dentro de los sitios experimentales.

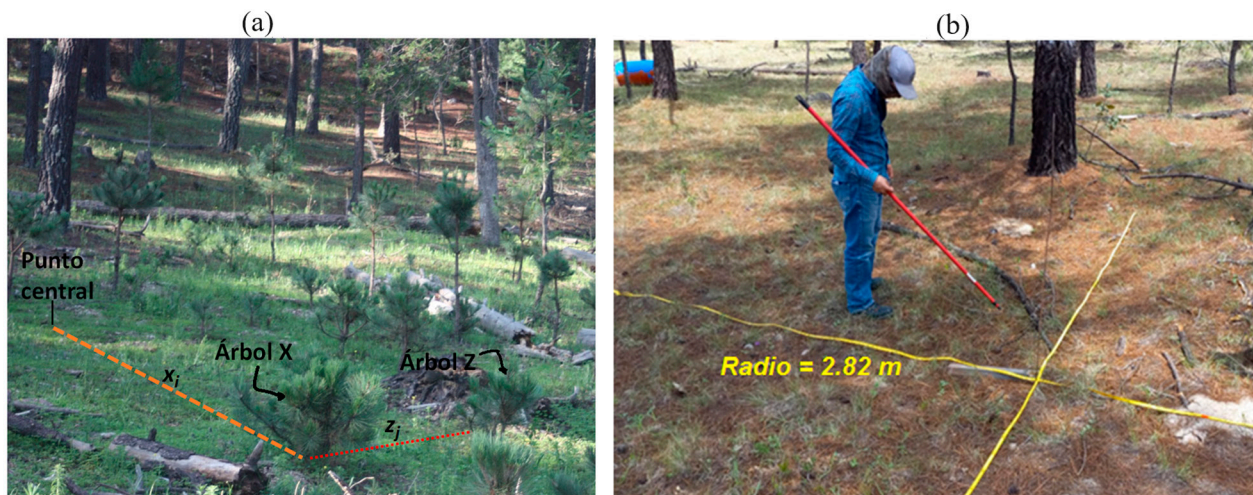


Figura 3. Delimitación de los sitios de muestreo para evaluar la regeneración natural de bosques templados en el noroeste de Durango. a, Delimitación con el método de T2; b, delimitación con un círculo de  $25 \text{ m}^2$ .

valores altos ( $> 1$ ) sugieren una distribución agregada o agrupada. El valor encontrado se compara con valores críticos para determinar si la hipótesis nula de que la regeneración se distribuye aleatoriamente es verdadera o no (Krebs, 1999). También, se utilizó un círculo de  $2.82 \text{ m}$  de radio (área =  $25 \text{ m}^2$ ) para contar directamente el número de árboles de cada especie y evaluar su vigor (fig. 3b).

Los tratamientos se definieron por diferentes intensidades de corta del tratamiento silvícola de selección. A cada sitio le fue administrado una intensidad de remoción de acuerdo con las existencias volumétricas, que en promedio fue de 28%. Además, se separaron los sitios con base en la presencia de incendios y ganado vacuno. Con los datos del arbolado y renuevo se procesaron otras variables para estimar los índices de diversidad de

Shannon, Margalef y valor de importancia (IVI), con el fin de determinar cambios en la composición de especies entre tratamientos Monárrez-González et al., 2020).

*Cambios en la densidad temporal de la regeneración.* Con base en los datos de densidad recabados durante la instalación de las parcelas (2017), se reevaluó la densidad en el año 2023 para establecer una línea base y cambios en la densidad de regeneración. Se utilizaron los mismos sitios experimentales y métodos de muestreo, reportando los cambios en la regeneración que se encontraron antes y después del periodo de medición. Se contabilizó el número de árboles por hectárea de cada género.

Se utilizó el método de diferencias en diferencias (DiD) para comparar los cambios observados en la densidad de regeneración en el periodo estudiado. El método compara los efectos de la intensidad de corta después de su implementación a partir de la línea base. Su principal objetivo es estimar los efectos causales de una práctica de manejo a partir de comparaciones transversales de tratamiento-control y estudios de antes y después (Fredriksson y Oliveira, 2019; Stuart et al., 2014). A menudo, estas prácticas no afectan a todos al mismo tiempo y de la misma manera (Lechner, 2011). En este caso, se utilizó el período de inicio en el momento en que se aplicó el tratamiento y el período de finalización al año de la segunda medición.

El método DiD se puede diseñar en una tabla de 2x2, con una tercera fila y columna que muestran la diferencia en tratamiento y tiempo, respectivamente (tabla 1) (Stuart et al., 2014). El tratamiento se refiere a los predios que recibieron el tratamiento de selección en los últimos 5 años (1), mientras que el grupo de control incluye aquellos predios que no fueron intervenidos en ese periodo (0). La muestra resultó en 14 sitios sin tratamiento reciente y 13 con tratamiento (menos de 5 años). Se estableció un periodo de 5 años, que corresponde al lapso de tiempo en que las semillas tienen mayor viabilidad de germinación (Granstrom, 1987) y, en promedio, es el tiempo que la regeneración alcanza una altura de 1.3 m (o la altura a la cual se mide el diámetro normal). Además, se ha observado que las actividades inmediatas de extracción forestal incrementan las posibilidades de germinación al remover el suelo y eliminar la competencia por la luz solar (Li et al., 2022; Sukhbaatar et al., 2019). El efecto tiempo incluye la condición inicial de la regeneración (v) o la situación al inicio del estudio, y la condición final se refiere a la cantidad actual de renuevo en la fecha de evaluación más reciente (w). Todos los cambios en la densidad de regeneración estimados a través de la expresión de la parte inferior derecha de la tabla, se atribuyen a diversos factores que se analizan más

Tabla 1

Diseño del método de diferencias-en-diferencias para evaluar la regeneración natural en bosques templados del noroeste de México.

Tiempo (R)	Tratamiento (T)		Diferencia
	Sin Corta	Con corta	
Densidad inicial	$v_1^1$	$v_1^0$	$A = v_1^1 - v_1^0$
Densidad final	$w_2^1$	$w_2^0$	$B = w_2^1 - w_2^0$
Diferencia	$C = w_2^1 - v_1^1$	$D = w_2^0 - v_1^0$	$DiD = (A - B) - (C - D)$

Modificado de Stuart et al. (2014), pag. 169.

adelante. La tabla 1 muestra el diseño de DiD, donde  $T$  representa el efecto del tratamiento de selección ( $T = 1$  si recibieron el tratamiento en los últimos 5 años y  $T = 0$  si no recibió el tratamiento),  $R$  es el efecto del tiempo ( $R = 0$  representa el inicio de la regeneración, mientras  $R = 1$  es el estado final).

Se estimaron los errores estándar y niveles de significancia del método DiD. En este caso, se probó la hipótesis nula en la que el efecto promedio del tratamiento en el número de individuos por hectárea del año 2017 no fue diferente al del año 2023. El efecto promedio del tratamiento (ATET, por sus siglas en inglés) elimina la posible presencia de errores no observables por el tiempo al incluir la condición original de la variable bajo estudio (densidad de regeneración) (Lechner, 2011). Cuando el número de muestras es bajo, algunos autores recomiendan utilizar técnicas de remuestreo (“wild bootstrap”) (Roodman et al., 2019); sin embargo, los resultados a veces son más inciertos que los originales debido a que los intervalos de confianza de los coeficientes de las variables se relajan y son menos precisos. En este estudio, no hubo grandes diferencias en la aplicación de esta técnica, por lo que se optó por utilizar los resultados sin remuestreo.

A fin de probar el efecto del tratamiento en la regeneración natural, se probó un modelo incluyendo variables de control para explicar la relación entre la densidad actual de regeneración ( $D_{reg}$ ) y ciertos factores antropogénicos ( $FA$ ) (como la presencia de incendios y ganado), dasométricos ( $DT$ ) (altura, área basal, cobertura de copa y volumen), diversidad arbórea ( $IDV$ ) y, desde luego, el tratamiento ( $T$ ).

$$D_{reg} = \beta_0 + \beta_1(FA) + \beta_2(DT) + \beta_3(IDV) + \beta_4(T) + \varepsilon \quad (3)$$

Algunas de esas variables se integraron por revisión en la literatura como la presencia de ganado (Pensado-Fernández et al., 2014), incendios (Flores-Rodríguez et al., 2022), cobertura de copa (Toledo-Aceves et al., 2009), diversidad vegetal (Leyva-López et al., 2010; Graciano-Ávila et al., 2017; García-García et al., 2019). Otras,

fueron incluidas con base en observaciones de campo y experiencias de los autores, como variables dasométricas y propiedades del suelo.

Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para probar la normalidad de las variables. Particularmente, la variable dependiente regeneración total fue transformada usando el logaritmo natural ( $\ln$ ), cuya prueba de Shapiro-Wilk mostró que, con esta transformación, existe alta probabilidad de que los datos provengan de una distribución normal ( $z = -0.726$ ,  $p = 0.766$ ). También, se hizo un análisis de la correlación entre las variables independientes y con la dependiente para detectar posibles asociaciones extremas. Posteriormente, se hizo el análisis de regresión multivariante por pasos (“stepwise”) para evaluar las combinaciones de variables independientes que mayor influencia tienen sobre la densidad de regeneración (variable dependiente). El procedimiento se acompañó de un análisis de datos atípicos con el comando “rstudent” (residuales estandarizados) y descartar valores mayores a 2, que sugieren la presencia de esos datos, así como una prueba de colinealidad usando el factor de inflación de la varianza (FIV) y una prueba de White para evaluar la homocedasticidad del modelo (Tabachnick y Fidell, 2013). Los datos se procesaron con el software Stata®.

## Resultados

El área basal residual del arbolado varió desde los 6 hasta 32 m<sup>2</sup>/ha, lo que representa un gradiente de densidad amplio para estudiar el efecto del tratamiento en el establecimiento de la regeneración natural. Se registraron especies de regeneración natural, pertenecientes a 4 familias: Pinaceae, Fagaceae, Ericaceae, y Cupressaceae y 4 géneros: *Pinus*, *Quercus*, *Arbutus* y *Juniperus*. Pinaceae fue la familia más representada, y el género *Pinus* el que tuvo un mayor número de especies. La regeneración también varió desde los 4,896 individuos hasta más de 20,000, lo que demuestra la capacidad de regeneración después del tratamiento (tabla 2).

El tipo de distribución espacial de la regeneración natural fue mayormente uniforme. Esto significa que la distancia entre los renuevos es corta, sistemática y motivada por la presencia de árboles al borde del claro. En menor cantidad, se registró la distribución de tipo aleatoria y agregada (fig. 4).

Se estimaron índices de diversidad para evaluar cambios en la composición de especies, particularmente los índices de Shannon, Margalef, Simpson y valor de importancia para el estrato adulto y la regeneración. La figura 5 indica que no existen diferencias significativas en los 3 índices al comparar la diversidad del arbolado y la de regeneración natural.

Las especies de mayor importancia (IVI) que componen la regeneración natural fueron: *Quercus sideroxylla* con 32.1%, *Juniperus deppeana* con 15.4% y *Pinus teocote* con 11.1%. Por su parte, las especies de mayor importancia que componen el estrato adulto fueron: *Pinus cooperi* con 21.3%, *P. leiophylla* con 17.9% y *Quercus sideroxylla* con 13.1%, las cuales acumulan poco más de 50% del valor de importancia en la zona de estudio. En la categoría de género, se encontró un IVI de la regeneración de 44.9% y 26.7% de *Quercus* y *Pinus*, respectivamente. Mientras en el estrato adulto, el género *Pinus* tuvo un IVI de 54.7% y *Quercus* de 21.5%.

Utilizando la base de datos del 2017, se evaluó el cambio en la densidad de los árboles al año actual 2023 con el método de diferencias-en-diferencias. Las diferencias en el tratamiento (con y sin tratamiento reciente) y periodo de evaluación (antes y después) fueron significativas para las especies de *Pinus* spp. y *Arbutus* spp. El número de árboles promedio de *Pinus* spp. en los sitios sin tratamiento reciente (> 5 años) en el 2017 fue de 540 individuos/ha, mientras que en el 2023 bajó a 171 individuos/ha. En los sitios con tratamiento, la regeneración de estas especies bajó ligeramente de 1,570 a 1,477 individuos/ha. De manera combinada, la regeneración de todas las especies bajó de 4,914 a 1,771 individuos/ha en los sitios sin tratamiento reciente, pero se incrementó de 4,129 a 6,461 individuos/ha en aquellos con tratamiento. Sin embargo, la diferencia general (DiD) no fue significativa en ningún género. Esto sugiere que la densidad de regeneración no es afectada por el tiempo (antes y después) y el tratamiento (con y sin tratamiento reciente) (tabla 3). Si se compara únicamente el efecto individual del tratamiento en la densidad de la regeneración, todas las especies, excepto las de *Quercus*, tuvieron significativamente una mayor densidad en los sitios tratados que en los no tratados. Por ello, el efecto del tratamiento se incluyó en el modelo de regresión que se describe a continuación.

El modelo que explica la relación entre la densidad actual de la regeneración y el conjunto de variables independientes tuvo un coeficiente de determinación ajustado de 96.1%, lo que significa que gran parte de la varianza está correctamente explicada por ese conjunto de variables ( $F(16, 8) = 38.5$ ,  $p < 0.01$ ). Aquellas con mayor significancia positiva fueron el índice Simpson de diversidad del estrato adulto y el tratamiento, mientras que las variables con signo negativo fueron la conductividad del suelo y presencia de ganado. La prueba de White para evaluar la varianza del modelo reveló que ésta es constante y no existen problemas de heterocedasticidad ( $\chi^2 = 25.0$ ,  $p = 0.406$ ). Ninguna de las variables del modelo ajustado acusó problemas de multicolinealidad ( $FIV < 10$ ) (tabla 4).



Tabla 2

Caracterización de los sitios experimentales en el análisis de la regeneración natural en el periodo actual en el estado de Durango ( $n = 27$ ).

Variable (unidades de medida)	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Diámetro del arbolado (cm)	19.4	3.7	13.6	30.1
Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	21.4	5.9	9.0	32.5
Altura del arbolado (m)	10.1	2.4	5.5	15.4
Volumen arbolado (m <sup>3</sup> /ha)	203.1	83.9	58.4	395.9
Cobertura arbórea (%)	57.2	11.3	36.5	78.2
Hojarasca (mm)	17.3	5.33	8	28
Regeneración pino (núm arb/ha)	800	1,327	0	4,400
Regeneración encino (núm arb/ha)	2,459	3,174	0	12,400
Regeneración otras spp (núm arb/ha)	770	1,423	0	5,600
Regeneración total (núm arb/ha)	4,029	4,896	0	20,400
Tratamiento (sí = 1, no = 0)	0.48	0.51	0	1
Altitud (m snm)	2,602	171	2,318	2,936
Pendiente (%)	17.2	11.3	2	45
Presencia de ganado (sí = 1, no = 0)	0.67	0.48	0	1
Profundidad materia orgánica (cm)	1.86	0.47	1.0	3.0
pH	5.26	0.46	4.50	6.40
Conductividad (µs/cm)	0.04	0.04	0.0	0.16
Sales solubles (mg/l)	29.01	29.13	0.78	148.20
Nitrógeno (kg/ha)	7.97	7.23	0.56	29.68
Fósforo (kg/ha)	51.62	43.46	8.40	173.60
Potasio (kg/ha)	38.10	6.92	22.40	56.00
Calcio (kg/ha)	358.53	100.31	176.96	580.16
Magnesio (kg/ha)	46.19	3.80	38.08	56.00

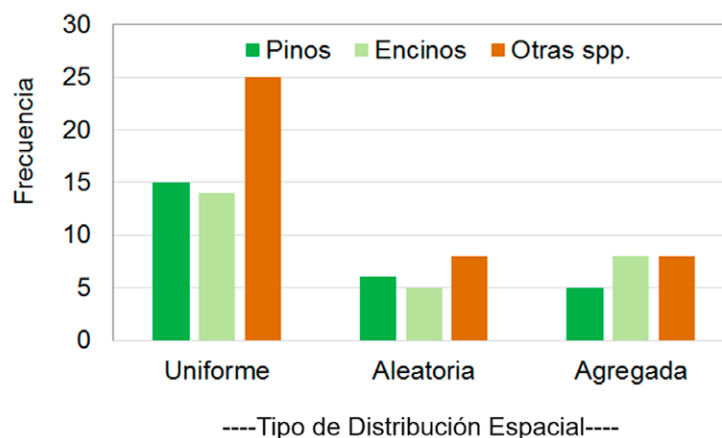


Figura 4. Tipos de distribución espacial de la regeneración natural en el área de estudio de bosques templados del noroeste de Durango, México. La frecuencia es mayor que el número de sitios debido que se hace por grupos de especies.



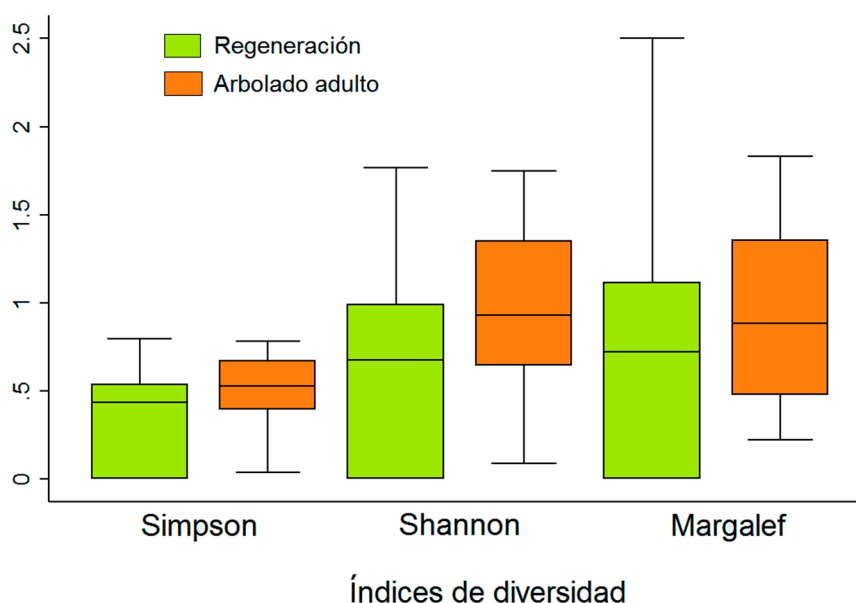


Figura 5. Índices de diversidad del arbolado adulto y regeneración natural en bosques templados del noroeste de Durango, México.

## Discusión

De acuerdo con los resultados, los géneros *Quercus* y *Pinus* dominan la regeneración natural. Zavala-Chávez (2004) sugiere que la dominancia de *Quercus* podría deberse a la capacidad que tienen las especies de este género para adaptarse y competir bajo métodos de regeneración que involucran pequeños disturbios. En particular, el método de cortas de selección favorece a especies tolerantes y semitolerantes a la sombra (Ortiz-

Colín et al., 2017; Shields et al., 2007). Rüger et al. (2007) encontraron que este tipo de tratamiento, aunque ofrece menor producción de madera, favorece mejor el desarrollo de especies tolerantes debido a que el tamaño de los claros no es muy grande. Calva-Soto et al. (2022) y Seedre et al. (2018) también atribuyen la presencia del género *Quercus* a su forma de reproducción primordial, la cual es en gran parte por reproducción vegetativa, mientras que el género *Pinus* se reproduce primordialmente por semilla (Luna-Robles et al., 2020). La reproducción por semilla

Tabla 3

Prueba de diferencias-en-diferencias para evaluar el efecto del tratamiento de selección en la densidad de regeneración natural de bosques templados en el noroeste de Durango.

Género	$p >  t $ * Inicio	$p >  t $ * Final	CPET**			
			Coefficiente	Error est.	t	$p >  t $
<i>Pinus</i>	0.022	0.004	275.34	615.62	0.45	0.66
<i>Quercus</i>	0.297	0.279	4,666.79	3,072.78	1.52	0.13
<i>Arbutus</i>	0.019	0.031	-33.45	237.32	0.14	0.89
<i>Prunus</i>	-	0.035	61.54	40.08	1.54	0.13
<i>Juniperus</i>	0.769	0.014	504.97	318.64	1.58	0.12
Total	0.741	0.052	5,475.19	3,334.25	1.64	0.11

\* Indican la significancia en la diferencia de la densidad de la regeneración por efecto del tratamiento en cada fase (inicio y final).  
 \*\*El CPET se refiere al coeficiente promedio de la diferencia entre tratamientos. El género *Prunus* no tuvo registros de regeneración al inicio de la evaluación.

Tabla 4

Relación entre la regeneración natural actual y otras variables en bosques templados del noroeste de Durango (variable dependiente: logaritmo natural de la densidad de regeneración natural, n = 27).

Variable*	Coef.	Error est.	t	p > t	95% Int. Conf		FIV**
					Min	Max	
Pendiente	0.017	0.008	2.31	0.05	0.000	0.035	3.65
Simpson A	3.620	0.561	6.46	0.00	2.328	4.913	6.48
Hojarasca	0.022	0.013	1.75	0.12	-0.007	0.051	2.22
Ca	-0.005	0.001	-4.92	0.01	-0.008	-0.003	5.24
Humus	1.045	0.297	3.51	0.01	0.359	1.731	3.35
Presencia de ganado	-0.352	0.118	-2.98	0.02	-0.625	-0.080	5.27
Área basal actual	0.178	0.023	7.71	0.00	0.125	0.231	9.80
Trat	2.163	0.251	8.63	0.00	1.585	2.741	8.23
Mat org	0.709	0.194	3.65	0.01	0.261	1.157	4.23
pH	1.786	0.321	5.57	0.01	1.046	2.526	9.17
Conductividad eléctrica del suelo	-17.76	2.912	-6.1	0.00	-24.481	-11.05	6.43
Sales del suelo	0.013	0.005	2.78	0.02	0.002	0.024	7.99
Mg	0.110	0.020	5.44	0.01	0.063	0.156	3.07
P	0.007	0.002	3.21	0.01	0.002	0.013	4.68
K	0.035	0.010	3.47	0.01	0.012	0.058	2.57
Constante	-12.934	2.822	-4.58	0.01	-19.441	-6.426	

\* Trat, tratamiento de selección (1, con tratamiento; o, sin tratamiento); Simpson A, índice Simpson de estrato adulto. Otras variables están definidas en la tabla 1. \*\*FIV, Factor de inflación de la varianza, es una medida de la multicolinealidad.

de los pinos generalmente requiere de claros grandes que permitan la entrada de la luz solar para poder germinar. Sin embargo, como se mencionó, los claros dejados por la remoción de los árboles no son suficientemente amplios, por lo que la regeneración de encinos domina en las primeras etapas de la regeneración. Calva-Soto et al. (2022) encontraron densidades similares de regeneración en áreas con tratamiento de corta de selección en la sierra Madre Occidental.

Se ha observado que la ocurrencia de incendios moderados afecta positivamente la incidencia de regeneración natural de las especies intolerantes. Flores-Rodríguez et al. (2022) concluyeron que el establecimiento de la regeneración natural de pino, está influenciado por factores como la cobertura del suelo, sotobosque y relieve; después de que el bosque ha sido afectado por incendios forestales. Flores-Rodríguez et al. (2021) encontraron que la densidad de este tipo de especies puede alcanzar hasta 160,000 individuos por hectárea. Los incendios moderados limpian el estrato inferior y favorecen la geminación de las semillas y desarrollo de la planta. En este estudio, el

número máximo de plantas fue de 20,400, pero reiterando que la presencia de incendios ha sido baja o nula.

Otro factor importante en el establecimiento y desarrollo de la regeneración es el pastoreo. Los animales pisotean o se alimentan de las yemas vegetativas en proceso de crecimiento, eliminando muchas plantas; por ello, a veces es necesario cercar las áreas en proceso de regeneración. La tabla 4 muestra que existe una relación negativa y significativa entre la presencia de ganado y la regeneración. En promedio, la densidad fue 4.8 veces mayor en las áreas que tuvieron ausencia de ganado. En un resultado similar, Pensado-Fernández et al. (2014) encontraron que en los bosques del Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, la regeneración natural fue 3.2 veces mayor en las áreas que fueron excluidas del ganado. Otro efecto que tiene la presencia de ganado es la compactación del suelo, lo cual reduce la aireación, infiltración y otras propiedades del suelo como la conductividad eléctrica (Pereira et al., 2022). La tabla 4 muestra también que la regeneración es mayor en suelos con baja conductividad.

Los índices de diversidad mostraron que no existen diferencias significativas en la composición de especies del estrato arbóreo y la regeneración. Esto sugiere que el tratamiento de selección, esto es, la remoción del arbolado adulto, no tiene efectos de corto plazo en la diversidad de la regeneración por el hecho de que algunas especies son preferibles debido a la buena calidad de su madera. El efecto de la diversidad depende de las condiciones del área y de los tratamientos silvícolas aplicados. García-García et al. (2019) compararon la diversidad del arbolado con el tratamiento de selección y sin tratamiento en bosques templados de Chihuahua. Ellos no encontraron diferencias significativas y sugieren que dicho tratamiento puede mantener la diversidad estructural y de especies. Ortiz-Colín et al. (2017), también en bosques tratados con el método de selección, encontraron mucha similitud en la composición de especies entre el arbolado adulto y la regeneración y, ésta última, fue dominada por especies tolerantes como *Quercus* spp. En un estudio de los bosques de pino en Oaxaca, Leyva-López et al. (2010) encontraron que la aplicación del tratamiento corta de regeneración de árboles padres, mantiene la misma riqueza de especies. Sin embargo, a diferencia de este trabajo, el mayor IVI de la regeneración lo tuvieron las especies del género *Pinus* seguido de otras latifoliadas. Pérez-López et al. (2020) encontraron que el método de árboles padres podría mantener la diversidad y estructura del arbolado en bosques poco intervenidos, pero compromete su composición florística original.

Una posible explicación de que el tratamiento silvícola de selección no modifica la composición de especies es que la remoción de árboles no está sujeto a preferencias comerciales, sino a la proporción de especies que existen en el sitio (Monárrez-González et al., 2020). Además, debido al reducido espacio que dejan los árboles removidos, se fomenta el desarrollo vegetativo (retoños) de las especies de *Quercus*, que son las que dominan en las primeras etapas de la regeneración. Esta forma de reproducción, que se origina de las especies adultas, hace que la diversidad en uno y otro estrato sea similar (Mejstřík et al., 2024). Una práctica común en los bosques de esta región es el “cinchado” de los árboles de *Quercus* para eliminarlos lentamente, lo cual ocasiona espacios de sombra para las especies tolerantes. Una vez que estos árboles tiran su follaje y pequeñas ramas, se incrementa la luz solar y la reproducción por semilla y el desarrollo de las especies de *Pinus* empieza a manifestarse.

Además, cuando la diversidad es alta, generalmente hay una menor proporción de especies dominantes y las de menor importancia (IVI) están influenciadas por las prácticas silvícolas, ya que su regeneración, depende de factores que afectan su entorno de crecimiento (Oliver

y Larson, 1996). Otros estudios confirman que las especies de los géneros *Pinus* y *Quercus* dominan en la regeneración natural de bosques templados. Graciano-Ávila et al. (2017) y Monárrez-González et al. (2020) reportaron altos valores de importancia (IVI) para estos géneros.

Moreno-González et al. (2007) estudiaron el establecimiento de la regeneración natural a través del método modificado de “parcela 0” en bosques de Jalisco. Ellos encontraron que la distribución espacial del renuevo sigue mayoritariamente un patrón de agregación (68%), seguido de aleatorio (11%) y uniforme (2%). A diferencia de ellos, en este estudio se encontró que el tipo de distribución espacial más común fue uniforme (57%), seguido de agregado (22%) y aleatorio (20%). Estas diferencias pueden deberse al tipo de tratamiento que se aplicó; Moreno-González et al. (2007), evaluaron el tratamiento de árboles padre, mientras que en este estudio fue el de selección individual. En el primer caso, la regeneración tiende a agruparse alrededor de los árboles semilleros y, por lo general, los claros son más grandes. Mientras que en el tratamiento de selección, los claros son más pequeños y la semilla proviene de los árboles que están en el borde del claro, generando una distribución más uniforme.

Los sitios tratados con el método de selección tuvieron, con excepción del género *Quercus*, una mayor densidad de individuos que los no tratados (control). Esto sugiere que las actividades de extracción de la madera, como la remoción del suelo y limpia de residuos, pueden favorecer el establecimiento de la regeneración natural, especialmente a base de semillas. Este resultado coincide con el de Sukhbaatar et al. (2019), quienes en su estudio con *Pinus sylvestris* L. concluyeron que con el método de cortas selectivas, incluso de otros tratamientos de baja intensidad, la densidad de regeneración incrementó por encima de áreas no tratadas. Ellos atribuyen esta diferencia a la competencia por la luz solar obstaculizada por los árboles grandes y arbustos, los cuales son reducidos o eliminados durante la corta.

Existen otros factores que no fueron considerados en este estudio. La temperatura, cobertura herbácea y arbustiva, el banco de semillas que existe en el suelo antes y después de la aplicación de los tratamientos silvícolas, son algunos de ellos. Aunque no directamente, la precipitación fue considerada utilizando alternantes como la altitud y calidad de sitio. Sitios con mayor altitud generan condiciones para una mayor condensación, humedad (Collados-Lara et al., 2018) y, eventualmente, de calidad de sitio. Sin embargo, ambas no fueron significativas. En estudios futuros, es recomendable incluir datos de precipitación aprovechando la información

que se ha reunido en las estaciones climáticas de la región. Es importante también la continuación de este tipo de estudios para analizar cambios futuros en la regeneración y la incorporación de los individuos a categorías superiores en diámetro y altura.

Finalmente, podemos concluir que la cantidad promedio de la regeneración en los sitios estudiados varió desde 4,000 hasta 20,000 individuos por hectárea. No se detectaron diferencias significativas en la composición de especies de la regeneración natural en las condiciones de densidad residual del arbolado que se analizaron, por lo que el tratamiento de selección (cobertura continua) no tiene un efecto en la diversidad de regeneración. El tipo de distribución espacial más común fue uniforme y el género más importante fue *Quercus* seguido por *Pinus*. Las variables que más influyen en la densidad de la regeneración natural fueron el índice Simpson de diversidad del estrato adulto, la aplicación del tratamiento (selección), conductividad del suelo y la presencia de ganado. Sin embargo, es necesario considerar otros factores que también influyen en la regeneración, como la precipitación, temperatura, humedad y vegetación arbustiva. Los resultados pueden ayudar a entender el comportamiento de la regeneración natural en un tratamiento que minimiza el impacto en la biodiversidad y funcionamiento del ecosistema forestal.

### Agradecimientos

A la Unidad Forestal Santiago Papasquiario por los apoyos recibidos en la toma de información, especialmente a Fernando Salazar Jiménez y Luis Fernando Salazar Herrera. Al IPN por el financiamiento recibido a través de los proyectos SIP 2023-0326 y 2024-1367.

### Referencias

- Aguirre-Mendoza, Z., Encarnación-Criollo, A., Aguirre-Mendoza, Z. y Encarnación Criollo, A. (2021). Evaluación de parámetros poblacionales y regeneración natural de *Podocarpus oleifolius* D. Don (Podocarpaceae) en dos relictos boscosos del sur del Ecuador. *Arnaldoa*, 28, 199–216. https://doi.org/10.22497/arnaldoa.281.28112
- Calva-Soto, K., Pavón, N. P. y Ramírez-Marcial, N. (2022). Banco de semillas de un bosque de encinos de *Quercus delgadoana* en la zona centro de la Sierra Madre Oriental, México. *Acta Botanica Mexicana*, 129, e1973. https://doi.org/10.21829/ABM129.2022.1973
- Collados-Lara, A. J., Pardo-Igúzquiza, E., Pulido-Velázquez, D. y Jiménez-Sánchez, J. (2018). Precipitation fields in an alpine Mediterranean catchment: inversion of precipitation gradient with elevation or undercatch of snowfall? *International Journal of Climatology*, 38, 3565–3578. https://doi.org/10.1002/joc.5517
- Crouzeilles, R., Beyer, H. L., Monteiro, L. M., Feltran-Barbieri, R., Pessôa, A. C. M., Barros, F. S. M. et al. (2020). Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration. *Conservation Letters*, 13, e12709. https://doi.org/10.1111/conl.12709
- Crouzeilles, R., Ferreira, M. S., Chazdon, R. L., Lindenmayer, D. B., Sansevero, J. B. B., Monteiro, L. et al. (2017). Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science Advances*, 3, e1701345. https://doi.org/10.1126/sciadv.1701345
- Cruz-García, F., Monárrez-González, J. C. y Pérez-Verdin, G. (2019). Manual para el establecimiento de parcelas de monitoreo de servicios ecosistémicos en bosques templados de pino-encino con manejo forestal. *Vid supra*, 11, 36–64.
- Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R. y Ruíz-Guzmán, E. (2021). Regeneración natural de pino y encino bajo diferentes niveles de perturbación por incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12, 1–23. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.776
- Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa Villaseñor, P., Mena-Munguía, S., Lomelí-Zavala, M. E. y Cadena-Zamudio, D. A. (2022). Variables ambientales que determinan la regeneración natural de pinos en ecosistemas alterados por incendios. *Ecología Aplicada*, 21, 25–33. https://doi.org/10.21704/rea.v21i1.1872
- Fredriksson, A. y Oliveira, G. M. de. (2019). Impact evaluation using Difference-in-Differences. *RAUSP Management Journal*, 54, 519–532. https://doi.org/10.1108/RAUSP-05-2019-0112
- García-García, S. A., Narvaez-Flores, R., Olivas-García, J. M. y Hernández-Salas, J. (2019). Diversidad y estructura vertical del bosque de pino-encino en Guadalupe y Calvo, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10, 41–63. https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.173
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L. y López-Enríquez, I. (2012). Vegetación de la sierra madre occidental, México: Una síntesis. *Acta Botanica Mexicana*, 100, 351–404.
- Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E. y Lujan-Soto, J. E. (2017). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4, 535–542.
- Granstrom, A. (1987). Seed viability of fourteen species during five years of storage in a forest soil. *Journal of Ecology*, 75, 321–331. https://doi.org/10.2307/2260421
- Gustafsson, L., Bauhus, J., Asbeck, T., Augustynczik, A. L. D., Basile, M., Frey, J. et al. (2020). Retention as an integrated biodiversity conservation approach for continuous-cover forestry in Europe. *Ambio*, 49, 85–97. https://doi.org/10.1007/s13280-019-01190-1



- Hernández, F. J., Deras-Ávila, A. G., Deras-Ávila, N. I. y Colín, J. G. (2019). Influencia del método de árboles padres en la diversidad de la regeneración de bosques mixtos de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25, 219–234. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.09.066>
- Hernández-Díaz, J. C., Corral-Rivas, J. J., Quiñones-Chávez, A., Bacon-Sobbe, J. R. y Vargas-Larreta, B. (2008). Evaluación del manejo forestal regular e irregular en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Madera y Bosques*, 14, 25–41.
- Izquierdo-Bautista, J. y Arévalo-Hernández, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Krebs, C. J. (1999). *Ecological methodology*. Menlo Park, CA: Addison-Wesley Educational, Inc.
- Latawiec, A. E., Crouzeilles, R., Brancalion, P. H. S., Rodrigues, R. R., Sansevero, J. B., Santos, J. S. et al. (2016). Natural regeneration and biodiversity: A global meta-analysis and implications for spatial planning. *Biotropica*, 48, 844–855. <https://doi.org/10.1111/btp.12386>
- Lechner, M. (2011). The estimation of causal effects by difference-in-difference methods. *Foundations and Trends® in Econometrics*, 4, 165–224. <https://doi.org/10.1561/080000014>
- Leyva-López, J. C., Velázquez-Martínez, A. y Ángeles-Pérez, G. (2010). Patrones de diversidad de la regeneración natural en rodales mezclados de pinos. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16, 227–239.
- Li, R., Yan, Q., Xie, J., Wang, J., Zhang, T. y Zhu, J. (2022). Effects of logging on the trade-off between seed and sprout regeneration of dominant woody species in secondary forests of the Natural Forest Protection Project of China. *Ecological Processes*, 11, 16. <https://doi.org/10.1186/s13717-022-00363-3>
- Luna-Robles, E. O., Cantú-Silva, I. y Yáñez-Díaz, M. I. (2020). Efectos del manejo forestal en la composición y diversidad de la regeneración natural arbórea en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Polibotánica*, 1, 19–30. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.50.2>
- Mejstřík, M., Svátek, M., Pollastrini, M., Šrámek, M. y Matula, R. (2024). Differential roles of seed and sprout regeneration in forest diversity and productivity after disturbance. *Forest Ecosystems*, 11, 100198. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100198>
- Monárrez-González, J. C., González-Elizondo, M. S., Márquez-Linares, M. A., Gutiérrez-Yurrita, P. J. y Pérez-Verdin, G. (2020). Effect of forest management on tree diversity in temperate ecosystem forests in northern Mexico. *Plos One*, 15, e0233292. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233292>
- Moreno-González, D. A., Flores-Garnica, J. G. y Benavides-Solorio, J. D. (2007). Evaluación de la regeneración en bosque de pino mediante el método de “parcela cero.” *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 32, 79–102. <https://doi.org/doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1428>
- Moreno-Sánchez, R. y Torres-Rojo, J. M. (2010). Decision support systems for forest management in Mexico: their characteristics and context for their creation and evolution. En B. Manos, K. Paparrizos, N. Matsatsinis y J. Papatthanasiou (Eds.), *Decision support systems in agriculture, food and the environment: trends, applications and advances* (pp. 74–100). Hershey, PA, USA: IGI Global.
- Novo-Fernández, A., Franks, S., Wehenkel, C., López-Serrano, P. M., Molinier, M. y López-Sánchez, C. A. (2018). Landsat time series analysis for temperate forest cover change detection in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.015>
- Oliver, C. y Larson, B. (1996). *Forest stand dynamics. Update Edition*. New York: Mac Graw-Hill, Inc.
- Ortiz-Colín, P., Toledo-Aceves, T., López-Barrera, F. y Gerez-Fernández, P. (2017). Can traditional selective logging secure tree regeneration in cloud forest? *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10, 369–375. <https://doi.org/10.3832/ifer1937-009>
- Pensado-Fernández, J. A., Sánchez-Velásquez, L. R., Pineda-López, M. R. y Díaz-Fleischer, F. (2014). Plantaciones forestales vs. regeneración natural in situ: el caso de los pinos y la rehabilitación en el Parque Nacional Cofre de Perote. *Botanical Sciences*, 92, 617–622. <https://doi.org/10.17129/botsoci.109>
- Pereira, L. C., Balbinot, L., Nnadi, E. O., Mosleh, M. H. y Tonello, K. C. (2022). Effects of Cerrado restoration on seasonal soil hydrological properties and insights on impacts of deforestation and climate change scenarios. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 882551. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.882551>
- Pérez-López, R. I., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N. y Toledo-Aceves, T. (2020). Efectos del “método de Desarrollo Silvícola” sobre la diversidad arbórea en bosques húmedos de montaña del norte de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e913326. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3326>
- Romahn-Hernández, L. F., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A., Monterroso-Rivas, A. I. y Pérez-Hernández, M. J. (2020). Rango altitudinal: factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 8, 1–15. <https://www.redalyc.org/journal/4576/457662386014/>
- Roodman, D., Nielsen, M. Ø., MacKinnon, J. G. y Webb, M. D. (2019). Fast and wild: bootstrap inference in stata using boottest. *The Stata Journal*, 19, 4–60. <https://doi.org/10.1177/1536867X19830877>
- Rüger, N., Gutiérrez, A., Kissling, W., Armesto, J. J. y Huth, A. (2007). Ecological impacts of different harvesting scenarios for temperate evergreen rain forest in southern Chile —a simulation experiment. *Forest Ecology and Management*, 252, 52–66. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.020>

- Schulte, E. E. y Hopkins, B. G. (1996). Estimation of organic matter by weight loss-on-ignition. En F. R. Magdoff (Ed.), *Soil organic matter: analysis and interpretation* (pp. 21–31). Madison, WI: SSSA Special Publication No. 46.
- Seedre, M., Felton, A. y Lindbladh, M. (2018). What is the impact of continuous cover forestry compared to clearcut forestry on stand-level biodiversity in boreal and temperate forests? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 7, 28. <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0138-y>
- Shields, J. M., Webster, C. R. y Nagel, L. M. (2007). Factors influencing tree species diversity and *Betula alleghaniensis* establishment in silvicultural openings. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 80, 293–307. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpm013>
- Silva-Flores, R., Pérez-Verdin, G. y Wehenkel, C. (2014). Patterns of tree species diversity in relation to climatic factors in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Plos One*, 9, e105034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105034>
- Stuart, E. A., Huskamp, H. A., Duckworth, K., Simmons, J., Song, Z., Chernew, M. E. et al. (2014). Using propensity scores in difference-in-differences models to estimate the effects of a policy change. *Health Services and Outcomes Research Methodology*, 14, 166–182. <https://doi.org/10.1007/s10742-014-0123-z>
- Sukhbaatar, G., Baatarbileg, N., Battulga, P., Batsaikhan, G., Khishigjargal, M., Batchuluun, T. et al. (2019). Which selective logging intensity is most suitable for the maintenance of soil properties and the promotion of natural regeneration in highly continental Scots pine forests? Results 19 years after harvest operations in Mongolia. *Forests*, 10, 141. <https://doi.org/10.3390/f10020141>
- Tabachnick, B. G. y Fidell, L. S. (2013). *Using multivariate statistics (4th Ed.)*. Needham Heights, MA: Pearson Education.
- Toledo-Aceves, T., Purata-Velarde, S. y Peters, C. M. (2009). Regeneration of commercial tree species in a logged forest in the Selva Maya, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 258, 2481–2489. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.08.033>
- Torres-Rojo, J. M., Moreno-Sánchez, R. y Mendoza-Briseño, M. A. (2016). Sustainable forest management in Mexico. *Current Forestry Reports*, 2, 93–105. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0033-0>
- Torres-Rojo, J. M. y Orois-Sánchez, S. (2005). A decision support system for optimizing the conversion of rotation forest stands to continuous cover forest stands. *Forest Ecology and Management*, 207, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.021>
- Torres-Rojo, J. M. y Velázquez-Martínez, A. (2023). Rentabilidad de la regeneración por el método de árboles padre vs regeneración asistida. *Madera y Bosques*, 29, e2912366. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912366>
- Zavala-Chávez, F. (2004). Desecación de bellotas y su relación con la viabilidad y germinación en nueve especies de encinos mexicanos. *Ciencia Ergo-Sum*, 11, 177–185.