



Rentabilidad de la regeneración por el método de árboles padre VS regeneración asistida

Profitability of seed tree regeneration method vs assisted regeneration

Juan Manuel Torres-Rojo¹ y Alejandro Velázquez-Martínez^{2*}

¹ Universidad Iberoamericana. Centro Transdisciplinario Universitario para la Sustentabilidad. Ciudad de México, México.

² Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Texcoco, Estado de México, México.

* Autor de correspondencia. alejvela@colpos.mx

RESUMEN

Se realizó una evaluación de la rentabilidad económica del uso del método de regeneración de árboles padre para poblaciones arboladas en contraste con el uso de una plantación. La comparación proporciona información sobre la eficiencia económica de ambos métodos de regeneración que es útil para la toma de decisiones. La evaluación se basa en un algoritmo para estimar el número de árboles padre que se deben dejar en pie de acuerdo con la calidad de sitio, variable que integra factores ambientales e intrínsecos de cada especie. Se muestra un ejemplo de calibración del modelo y, a través de una simulación Monte Carlo, variando parámetros del modelo y costos, se evalúa el valor presente neto, tanto de la regeneración natural en un periodo de t años, como de la realización de una plantación. Los resultados muestran que, si no existen limitantes fisiológicas de la especie y de sitio para que se regenere a través de plantación, esta es más rentable que una repoblación natural. Se discuten algunas variables económicas y sociales que influyen en la decisión final de un productor de adoptar la regeneración asistida. Se concluye que la regeneración asistida es más rentable y potencialmente más eficiente que la regeneración natural.

PALABRAS CLAVE: métodos de regeneración, plantación, regeneración asistida, regeneración natural, rentabilidad, simulación Monte Carlo.

ABSTRACT

A comparison of the profitability of the seed tree regeneration method versus planting is carried out. The comparison provides useful information on the economic efficiency of both methods of regeneration which is useful for decision making. The evaluation is based on an algorithm to estimate the number of seed trees to left standing based on-site quality, variable that accounts for environmental and species intrinsic factors. An example of model calibration is shown and through a Monte Carlo simulation varying several model and costs parameters, the net present value is evaluated for both, regeneration, and planting methods over a period of t years. Results show that if there are no physiological constraints for the species regeneration through planting, this method is more cost effective than natural regeneration. Some economic and social variables that influence the producer's final decision to adopt planting are discussed. It is concluded that assisted regeneration is more cost-effective and potentially more efficient than natural regeneration.

KEYWORDS: regeneration methods, forest plantation, assisted regeneration, natural regeneration, profitability, Monte Carlo simulation.

INTRODUCCIÓN

La regeneración de una población forestal coetánea se puede realizar de manera natural o a través de una plantación (Nyland et al., 2016). En México, para lograr la regeneración natural, es común utilizar el método de árboles padre, considerando la tolerancia y las características de las especies, usualmente sometidas a un régimen de manejo coetáneo (Musálem et al., 1994).

Hasta 2019, cerca de 35% de los planes de manejo forestal autorizados utilizaban este método de regeneración natural^a; incluso, sistemas de manejo como el de Desarrollo Silvícola, recomiendan este método (Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca [Semarnap], 1994) con la sugerencia de dejar hasta 25 árboles por hectárea en pie.

Algunos autores han demostrado que la aplicación del método de árboles padre permite generar una regeneración exitosa en varias especies (Chacón et al., 1998; Hernández et al., 2019). Sin embargo, la estimación del número de árboles padre que asegure un adecuado cubrimiento de semilla en el sitio ha sido un problema tradicional de silvicultura y sigue siendo controversial, sobre todo porque la decisión debe considerar las características de la regeneración producida en términos de calidad y vigor, y los costos asociados a su establecimiento, como el costo de oportunidad de dejar a los árboles padre en pie y el costo de la corta de liberación (Puettman et al., 2015).

La definición del número óptimo de árboles padre depende de la interacción de múltiples factores (Nyland et al., 2016). Varios autores clásicos (Assmann, 1970; Hawley y Smith, 1972; Daniel et al., 1979; Oliver y Larson, 1990; Smith et al., 1997; Ashton y Kelty, 2018) han identificado tres grupos de factores que determinan la cantidad de árboles a dejar en pie: factores intrínsecos de la especie (altura del árbol, cobertura de copa, peso, tamaño y forma y viabilidad de la semilla, entre otros), del sitio (calidad de sitio, fisiografía) y del entorno ambiental (depredadores, vientos, clima, etc.) (Smith, et al., 1997; Nyland et al., 2016).

La interacción de todos estos factores hace que la estimación empírica del número óptimo de árboles padre por sitio y por especie enfrente un problema de dimensionalidad en el número de alternativas a evaluar. De aquí que las recomendaciones genéricas son variadas; por ejemplo, considerando el diámetro normal, se recomiendan hasta 74 árboles por hectárea con diámetros de 25 cm para *Pinus taeda* L. y *Pinus elliottii* Engelm, mientras que para rodales con diámetros de 40 cm se recomiendan 25 árboles (Barnett y Baker, 1991).

Para especies con semilla pequeña como *Pseudotsuga menziesii* Doug., se recomienda de 15 a 20 árboles por hectárea. Sin embargo, la densidad de árboles padre puede bajar incluso a siete árboles por hectárea en especies como *Larix occidentalis* Nutt., cuya semilla cuenta con una alta capacidad de dispersión al ser pequeña y ligera (Schmidt et al., 1976). El problema de dimensionalidad dificulta la realización de un número tal de experimentos que cubran todas las condiciones y sus interacciones, por lo que los resultados obtenidos de las evaluaciones sobre la eficiencia del método solo han sido aplicados al área de influencia de los experimentos, limitando su extrapolación a las áreas operativas (Barnett y Baker, 1991).

En contraste, la regeneración a través de plantación tiene un costo mayor, dado que requiere inversión en planta, así como en el establecimiento de la plantación (Dlugosiewicz, Zajac y Wysocka-Fijore, 2019; Dlugosiewicz, Zajac, Wysocka-Fijore y Sulkowska, 2019). Esta inversión generalmente representa una restricción al momento en que los productores toman la decisión entre regenerar o no, artificialmente. Por lo anterior, la decisión resulta altamente sensible a la magnitud de los costos de reforestación, a la disponibilidad de apoyo gubernamental, a la asistencia técnica existente y a la disponibilidad de insumos para la reforestación (Royer, 1987). Adicionalmente, cuando se trata de regeneración asistida, es necesario tener control de la calidad de planta que se utiliza, la cual debe provenir de colectas de semilla en árboles de la

^a Comunicación personal, Gerencia de Desarrollo Forestal, Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2021.



zona a regenerar con características fenotípicas deseables (Ashton y Kelty, 2018). A pesar de ello, la plantación puede tener ventajas económicas, como el aprovechamiento de los árboles padre al momento de la corta de regeneración, que se refleja, en una ganancia inmediata y un menor costo futuro de extracción, así como en una reducción de los costos asociados al posible daño a la regeneración al momento de realizar la corta de liberación (Barnett y Baker, 1991; Stokes et al., 2020).

Lo anterior sugiere que la plantación podría ser más deseable que la regeneración natural en algunas circunstancias, ello sin considerar las probables ventajas técnicas vinculadas a una ganancia en el tiempo de establecimiento, mejora de las características genéticas y una ganancia de vigor de la planta establecida, entre otras (Rums et al., 2020). Cabe señalar que, en sitios con buena productividad, la regeneración natural podría producir poblaciones de mayor vigor y crecimiento que una plantación (Falfán-Cortés et al., 2021).

Estas ventajas y desventajas de ambos métodos de regeneración (plantación o natural) hacen evidente la necesidad de evaluar, bajo una amplia gama de condiciones, la rentabilidad de regenerar a través de una plantación en comparación con la regeneración natural, bajo el supuesto de que la primera podría tener al menos las mismas ventajas desde el punto de vista técnico que la regeneración natural.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fue evaluar la rentabilidad del método de regeneración natural a través del sistema silvícola de árboles padre respecto a la regeneración por plantación, bajo una amplia gama de condiciones de sitio y económicas, usando un modelo de simulación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El procedimiento para contrastar los costos de una regeneración natural contra una plantación se llevó a cabo en cuatro etapas: 1) Desarrollo de un algoritmo para estimar el número de árboles padre con base en atributos del sitio y de la población; 2) Calibración (identificación de valores

idóneos para los parámetros del modelo) del algoritmo con base en información disponible; 3) Definición de la estructura de costos y beneficios de ambos procedimientos de regeneración a lo largo de un periodo de regeneración; y 4) Estimación de la rentabilidad de diferentes condiciones de sitio y económicas de ambos métodos de regeneración y la generación de una distribución de probabilidades empírica de las diferencias en utilidades de ambos métodos.

Desarrollo del algoritmo de estimación del número de árboles padre

Se idealizó un rodal cuadrado de una hectárea de superficie (100 m × 100 m) con una distribución regular de N árboles padre a dejar en pie en la superficie de interés. N es el mínimo número de árboles padre requeridos de acuerdo con las características de cada especie para una condición de sitio particular. Se consideró que la distribución de los N árboles en la superficie fue:

$$N = A \times A \quad (1)$$

donde:

A = número de árboles distribuidos en los 100 m de longitud de cada lado del cuadrado considerado (Fig. 1)

Para definir el valor de A , se tomó en cuenta que está inversamente relacionado con la altura, dado que a mayor altura mayor área de dispersión de semillas. También se consideró que la altura a una edad reproductiva depende en gran medida de la calidad de sitio, misma que se puede aproximar por el índice de sitio (IS) y que, a su vez, IS se define como una altura estandarizada dada una calidad de sitio. De acuerdo con las consideraciones anteriores, se approximó A como:

$$A = \frac{100}{IS} \quad (2)$$

Donde:

IS = índice de sitio

A = número de árboles en el lado del cuadrado idealizado

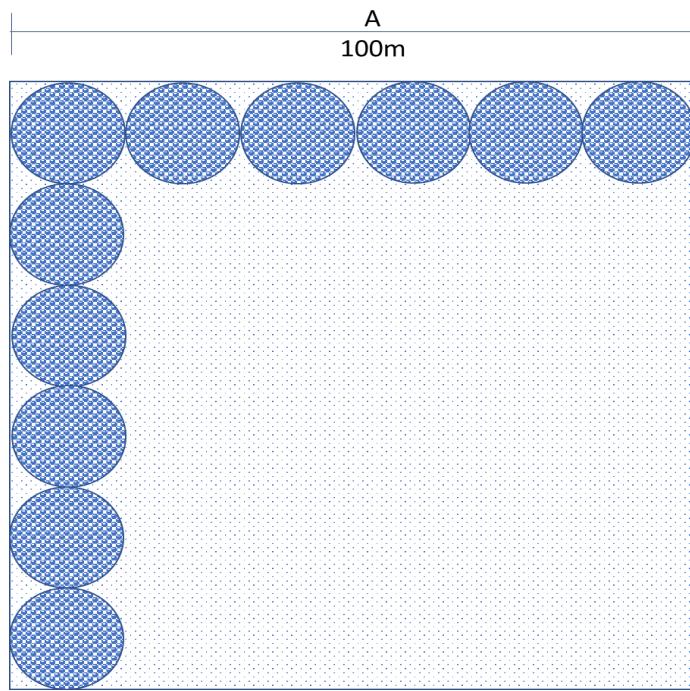


FIGURA 1. Modelo teórico de distribución de árboles padres.
Fuente: Elaboración Propia

La ecuación 2 estima el número de árboles padre en 100 m, separados por una distancia igual al IS . No obstante, este modelo no considera que, a medida que incrementa la altura, la cantidad de semilla dispersada tiene incrementos marginales decrecientes hasta, quizás, alcanzar un valor asintótico máximo de distancia de dispersión de semilla de un solo árbol. Esta consideración se añadió al modelo incorporando un exponente, α , al índice de sitio (Ecuación 3) con la restricción de que solo tome valores en el intervalo (0, 1). Este exponente permite incorporar el efecto del entorno ambiental (vientos, pendiente, fisiografía, entre otros) en la estimación del número de árboles padre. Un valor muy pequeño implicaría que el incremento en la altura del arbolado tiene poco efecto en asegurar una adecuada dispersión de la semilla; por el contrario, valores de α cercanos a la unidad identificarían especies y situaciones de sitio donde la altura del arbolado tiene un fuerte efecto en asegurar una adecuada dispersión de semilla.

$$A = \frac{100}{(IS)^\alpha} \quad (3)$$

donde:

α = parámetro del modelo

El modelo se puede afinar aún más, al incluir un parámetro que incorpore el efecto de los agentes de disturbio y factores intrínsecos de la especie, mismos que podrían obligar al silvicultor a dejar un número mínimo de árboles padre conforme a la especie y el entorno ambiental. Ejemplos de ello pueden ser la cantidad de roedores, como ardillas, o plagas que puedan reducir la cantidad de semilla disponible para regeneración (Velázquez-Martínez y Musálem, 1986; Nuñez et al., 2008; Steele y Yi, 2020). El efecto de estos agentes y factores puede considerarse añadiendo un parámetro más como se muestra en la ecuación 4:

$$A = \frac{100}{\beta (IS)^\alpha} \quad (4)$$

donde:

β = Factor de ajuste para considerar el número mínimo de árboles a dejar en pie en una condición de sitio dada



Un valor grande de β resulta en un menor número de árboles padre, lo que reflejaría un limitado efecto negativo de la condición de sitio sobre N . De esta forma, el algoritmo para calcular el número de árboles padre se traduce en:

$$N = A \times A = \frac{10\,000}{\beta (IS)^\alpha} \quad (5)$$

Calibración de parámetros

La calibración del modelo (5) se puede realizar por un ajuste de regresión en el caso de contar con varias observaciones (caso poco común), o bien approximando los parámetros α y β a partir de un par de observaciones. Para exemplificar este segundo caso se idealizó un rodal con índice de sitio para la especie X de 10 m (10 m a la edad de 50 años). En estas condiciones de sitio, las recomendaciones sobre densidad de árboles padre señalan que $N = 30$ árboles por hectárea garantizan que la especie X se regenera naturalmente en forma apropiada dentro del periodo de

regeneración recomendado. Dado que no se cuenta más que con un par de referencias sobre la densidad reomendada de árboles padre, se hipotetiza un valor de α , por ejemplo $\alpha=0.25$. Con esta información y utilizando la ecuación (5) se aproxima el factor de ajuste β con la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{10\,000}{N(IS)^\alpha} \quad (6)$$

De esta forma, dado el valor de β estimado con la ecuación 6, se puede calcular el número mínimo de árboles padre para el $IS=10$ y $\alpha = 0.25$. La figura 2 muestra varias trayectorias del número de árboles padre para diferentes valores de α e IS . El modelo 5 permite cambiar la forma y la escala de la tendencia, de aquí que la calibración requerirá que la selección de los valores de α y β sea tal que la trayectoria de N se aproxime a los valores de N que señalan las recomendaciones disponibles de densidad de árboles padre.

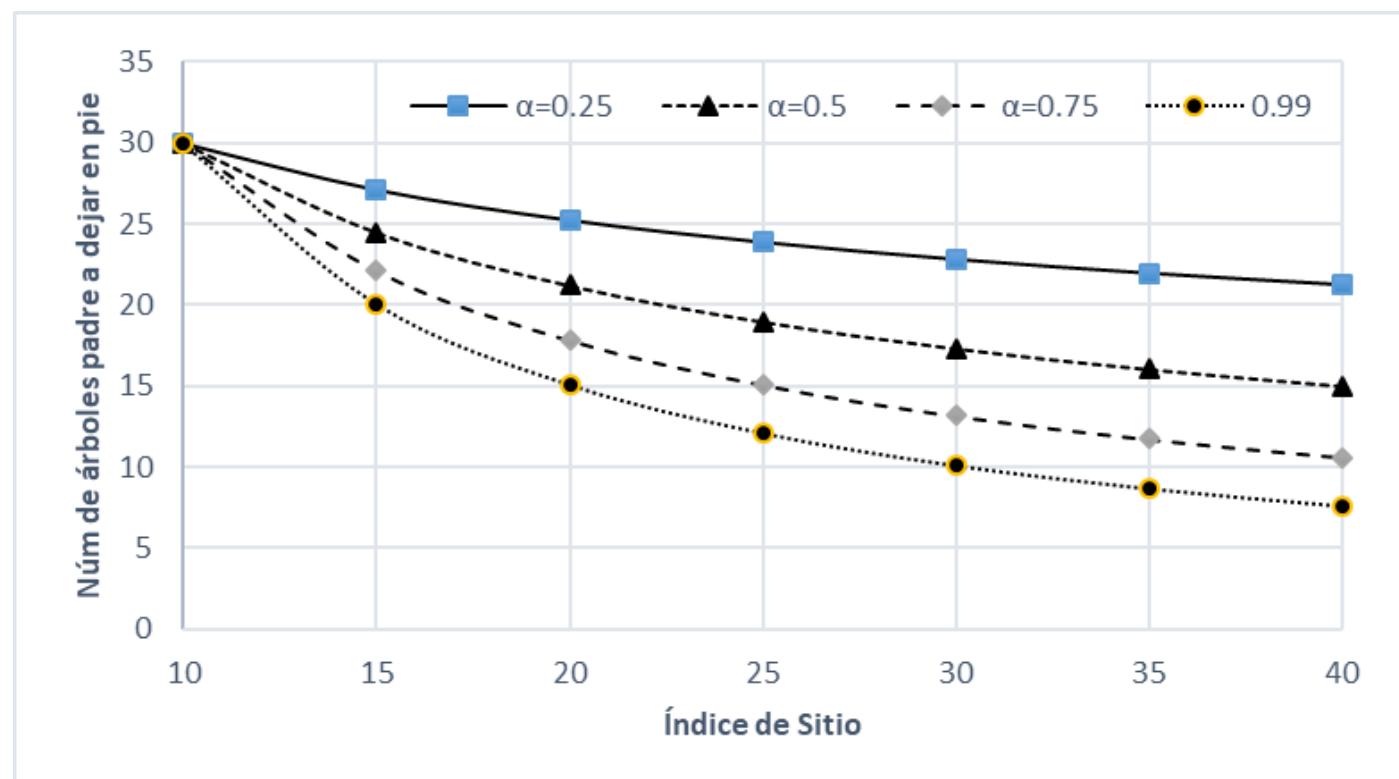


FIGURA 2. Número de árboles padre para diferentes valores de α y de índice de sitio (IS).
Fuente: Elaboración propia

Estructura de costos y beneficios entre sistemas de regeneración

Los costos considerados para estimar el costo de regeneración natural fueron: el costo de oportunidad del valor de la cosecha durante el periodo de regeneración y el costo de un mantenimiento adicional de la infraestructura para realizar la extracción durante la liberación (m). El valor de la cosecha dejada en pie expresado como función de N se approximó de la siguiente forma:

$$VC \cong pk(IS)N \cong pk(IS) \frac{10\,000}{\beta(IS)^\alpha} = pk \frac{10\,000}{\beta} (IS)^{1-\alpha} \quad (7)$$

donde:

VC = valor de la cosecha dejada en pie (MXN ha⁻¹)

p = precio por metro cúbico del volumen comercial en pie (MXN m⁻³)

k = factor de corrección (m³ m⁻¹) que transforma la altura definida por el índice de sitio (IS) en volumen comercial

N = número árboles padre a dejar en pie

α y β = parámetros del modelo

La ecuación 7 muestra que VC aumenta con el precio y con el volumen (aproximado por $k(IS)$) y se reduce con β y α . Aún más, dada una β fija (número mínimo N), $VC \cong$

$Kp(IS)^{1-\alpha}$ (considerando un cambio de variable $K = k/\beta$). Es importante notar que, a pesar de que N se reduce al aumentar IS , el VC aumenta con el IS en tanto $\alpha < 1$ y cercano a cero, tal y como se esperaría (Fig. 3). El costo de mantenimiento (m) se asume único al momento de la corta de liberación.

Por su parte, el costo de plantación (CP) está compuesto por un costo fijo (c), más un costo variable (b), definido por las características del sitio, mismas que también se pueden aproximar por el índice de sitio. El costo fijo incluye componentes como el costo de la planta (bajo el supuesto de una densidad de plantación constante) y el mantenimiento inicial de la plantación, mientras que en el componente de costo variable se incluyen el costo de preparación de sitio, el transporte de brizales y el plantado, los cuales están relacionados con el IS .

Regularmente, el costo variable es menor en la medida que el sitio tiene mejores características, por lo cual este costo es inversamente proporcional al IS , lo cual se puede aproximar por $b(IS)$, donde b es un escalar negativo. Por tanto, el CP se expresa como:

$$CP = c + b(IS) \quad (8)$$

donde:

CP = costo de plantación (MXN ha⁻¹)

b = costo variable de plantación (MXN ha⁻¹)

c = costo fijo de plantación (MXN ha⁻¹)

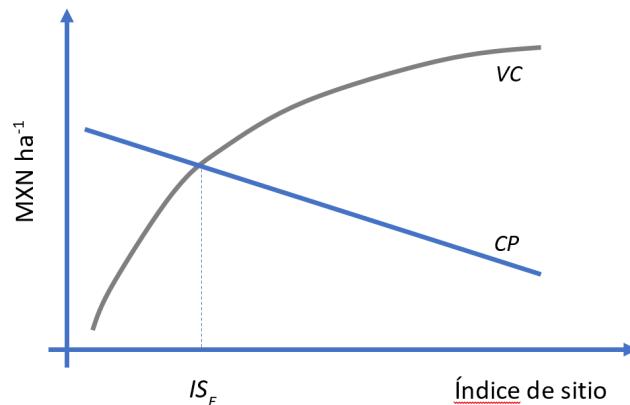


FIGURA 3. Relación entre costos de plantación y valor de la cosecha dejada como árbol semillero.

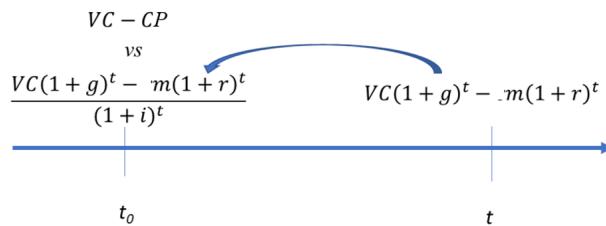


FIGURA 4. Línea de tiempo donde se verifican las ganancias de la regeneración asistida *vs* la regeneración por árboles padre.

Bajo los supuestos de este modelo, la trayectoria del *CP* como función del *IS* es una línea con pendiente negativa (Fig. 3). Es importante notar que las trayectorias de *CP* y *VC* muestran que debe existir una calidad de sitio, *IS_E*, tal que para mejores condiciones de sitio no resulta económico dejar arbolado en pie y debe optarse por la regeneración asistida.

La figura 4 muestra una línea de tiempo para el año *t₀*, momento en que se cosecha todo el arbolado para el caso de la plantación, o bien la cosecha obtenida por la corta de regeneración con el método de árboles padre. La línea de tiempo también muestra el año *t*, momento en que se hace la corta de liberación para el caso de la regeneración por árboles padre. Para el caso de la plantación, la ganancia considera el valor de la cosecha total de los árboles padre y el costo corresponde al *CP*. De esta forma, la utilidad neta derivada de la plantación (π_P) en *t₀* corresponde al valor de la cosecha de los árboles padre (*VC*) menos el costo de ésta (*CP*); esto es, $\pi_P = VC - CP$.

En contraste, la regeneración por árboles padre implica que no se realiza inversión alguna en el año *t₀*, mientras que los beneficios de la cosecha de los árboles padre se obtienen hasta el año *t*, año en que se realiza la corta de liberación. Para poder comparar ganancias de la plantación *vs* el método de árboles padre se han hecho las siguientes consideraciones: 1) los árboles padres tendrán un crecimiento adicional y el valor de la cosecha deberá aumentar, aunque sea marginalmente; 2) en el año *t* existirá

un costo adicional por mantenimiento de caminos (*m*), que será más alto a medida que la regeneración toma más tiempo; 3) estos cambios suceden en el año *t*, por lo que para compararse con las ganancias de la regeneración asistida deben actualizarse al año *t₀* calculando su valor presente neto. La inclusión de estas consideraciones asume que el crecimiento adicional se puede expresar como un crecimiento anual porcentual, *g*, sobre el valor de la cosecha. Este valor es regularmente muy pequeño (0%-4%) debido a que los árboles padre son arbolado maduro que regularmente muestra un crecimiento reducido. Como referencia se puede citar que, en especies de rápido crecimiento e índices de sitio de buena calidad, el crecimiento porcentual puede alcanzar un promedio de 6% hacia la edad del turno (Peters y Jarpa, 1982).

Para el costo adicional por mantenimiento (*m*) se presume un aumento anual con una tasa *r*. Por tanto, el valor presente neto de la utilidad neta derivada de la cosecha de los árboles padre (π_{AP}) en el año *t* se puede expresar como:

$$\pi_{AP} = \frac{VC(1+g)^t + m(1+r)^t}{(1+i)^t} \quad (9)$$

donde:

m = costo de mantenimiento de vías de saca (MXN ha⁻¹)

R = tasa de aumento en el costo de mantenimiento posterior a la corta de regeneración (MXN ha⁻¹ año⁻¹).

i = tasa de descuento usada para convertir el valor futuro a un valor presente^b

^b Esta estimación asume que el precio real de la madera en pie es constante, lo cual no es tan alejado de la realidad.

La tasa de descuento i se puede aproximar con una tasa de interés bancario o bien a través de una tasa social de descuento (Edwards, 2016).

Comparación de la utilidad neta de los sistemas de regeneración

La comparación de la utilidad neta derivada de la regeneración natural (π_{AP}) con aquella de la plantación (π_P) se realizó con una simulación Monte Carlo con 20 000 pruebas; la variable de respuesta de la simulación fue la diferencia entre utilidades netas (D) de la plantación respecto de la regeneración natural, esto es:

$$D = \pi_{AP} - \pi_P \quad (10)$$

donde:

π_{AP} = beneficio neto derivado de la regeneración natural (MXN ha⁻¹)

π_P = beneficio neto derivado de la plantación (MXN ha⁻¹)

La simulación se realizó variando todos los parámetros que se han identificado en la estructura de costos y el modelo de número de árboles padre, considerando un periodo de regeneración t . Para cada parámetro del modelo se definió una distribución de probabilidades uniforme dentro de un intervalo de valor máximo y mínimo (Tabla 1). A partir de esta simulación se construyó una distribución de frecuencias relativas para la diferencia entre utilidades netas (D), dado un periodo de regeneración t . Ello permitió estimar la probabilidad de que las utilidades de uno método de regeneración puedan ser mayores que las de otro para cada periodo de regeneración considerado.

Cabe señalar que la variación del periodo de regeneración t se consideró realizando las 20 000 pruebas para cada periodo de regeneración asumido. La simulación se realizó con la aplicación RISK-SIMULATOR (Real Option Valuation [ROV], 2019).

TABLA 1. Valores mínimos y máximos usados para la simulación Monte Carlo de la diferencia del valor presente de las ganancias de la plantación *vs* la regeneración por árboles padre.

Parámetro	Distribución	Valor mínimo	Valor máximo	Unidad
β	Uniforme	80	120	factor
α	Uniforme	0.3	0.6	factor
<i>IS</i> (Indice de Sitio)	Uniforme	15	30	metros
p (Precio del volumen en Pie)	Uniforme	1100	1300	MXN (2022)
k (fator de conversión altura-volumen en pie)	Uniforme	0.1	0.25	factor
b (costo variable de reforestación)	Uniforme	-120.00	-340.00	MXN (2022)
i (tasa de descuento)	Uniforme	0.05	0.15	factor
r (tasa de aumento costo de rehabilitación)	Uniforme	0.02	0.04	factor
m (Costo de rehabilitación de vías de extracción)	Uniforme	12 000.00	23 500.00	MXN (2022)
c (Costo fijo de reforestación)	Uniforme	22 000.00	43 500.00	MXN (2022)
g (tasa anual de crecimiento del arbolado en pie)	Uniforme	0.01	0.04	factor



RESULTADOS

Los resultados de cada simulación permitieron construir una distribución empírica de frecuencias para la variable D , en cada periodo de regeneración (t) evaluado. La figura 5 muestra la distribución empírica de frecuencias de la variable D para un periodo de regeneración, $t = 6$. La distribución resultante es una distribución con asimetría negativa (coeficiente de asimetría = -0.9) que muestra la alta probabilidad de tener valores muy pequeños para D (diferencia entre el valor presente neto de la ganancia neta de la regeneración natural menos la ganancia neta de la plantación), que se traducen en utilidades netas de la plantación mayores que aquellas obtenidas con la regeneración por árboles padre. La línea roja mostrada en la distribución empírica (Fig. 5) muestra el parteaguas entre

valores positivos y negativos de D ; valores negativos reflejan $\pi_{AP} < \pi_P$, por lo que la plantación es más deseable desde el punto de vista económico.

La asimetría de las distribuciones obtenidas para cada periodo, t , varió muy poco. Las distribuciones de D fueron marginalmente más simétricas para períodos de regeneración cortos que para períodos de regeneración largos. Adicionalmente se observó que las distribuciones para períodos de regeneración largos tuvieron mayor variación (desviación estándar) que las distribuciones para los períodos cortos. Ambos resultados muy probablemente están vinculados al mayor efecto de las tasas de descuento grandes que pudieron haberse seleccionado de manera aleatoria, lo que a su vez se asocia al mayor riesgo (costo) vinculado a períodos de regeneración largos.

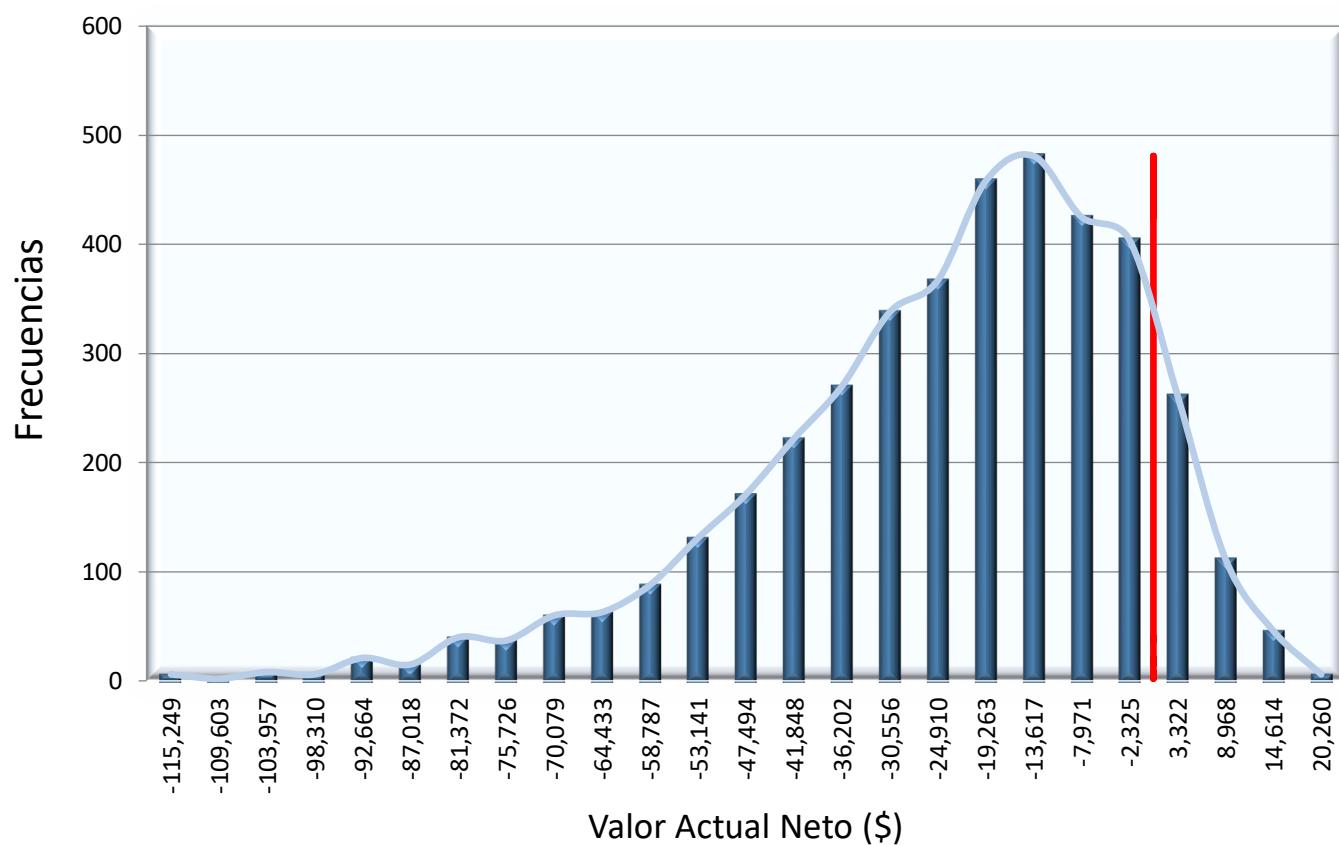


FIGURA 5. Distribución de frecuencias del valor presente neto (VPN) de la diferencia de beneficios entre la regeneración natural y la plantación ($t = 6$) considerando 20 000 simulaciones.

La línea roja representa un $VPN = 0$.

TABLA 2. Indicadores de D (diferencia entre el valor presente neto de la ganancia neta de la regeneración natural menos la ganancia neta de la plantación) para diferentes períodos de regeneración.

Período de regeneración (años)	Diferencia promedio (MXN 2022)	Probabilidad de que la diferencia sea menor que cero (%)
1	8460.31	13
2	2753.81	36
3	-2513.12	54
4	-7367.60	66
5	-11 855.96	75
6	-16 003.06	81
7	-19 838.28	85
8	-23 387.61	88
9	-26 674.78	91
10	-29 721.26	92

La tabla 2 resume dos indicadores de interés obtenidos a partir de la distribución de probabilidad para cada período de regeneración simulado: promedio de la variable D y probabilidad de que esta diferencia sea menor o igual a cero, estimación realizada con base en la distribución empírica de la variable D obtenida por simulación (Fig. 5). Ambos atributos muestran claramente que, bajo una amplia gama de condiciones de sitio y de supuestos de regeneración, la rentabilidad económica de la regeneración asistida es superior a la regeneración natural para períodos de regeneración superiores a dos años, dado que $D < 0$ con una probabilidad superior a 54% y, como se esperaría, aumenta a medida que el período de regeneración se alarga. El resultado sugiere que, si no existen limitantes ecológicas, de sitio y de especie (tolerancia), es recomendable, desde el punto de vista económico, realizar una plantación para regenerar una población (rodal) a la que se la haya aplicado una corta de regeneración.

DISCUSIÓN

El modelo de estimación del número de árboles padre asume que la estimación con base en el índice de sitio y los parámetros del modelo aseguraría una producción de semillas en cantidad y calidad que permitirán una regeneración adecuada. Sin embargo, lograr este objetivo requiere una calibración más precisa para cada especie y condición de sitio. Esto es posible de lograr con información de inventarios poscosecha y el uso de algoritmos de imputación de estimaciones de regeneración como el documentado por Ek et al. (1996) o procesos de simulación con información parcial (Ribbens et al., 1994). El algoritmo aquí presentado difiere de las metodologías tradicionales de predicción de regeneración natural a partir de modelos regresión que proyectan la incorporación con base en calidad de sitio y algunas otras características del rodal (Solomon, 2002). Estos modelos son muy dependientes de la calidad de datos y carecen de una



estructura que permita estimaciones robustas (Bravo et al., 2019) y que pueda evolucionar a una estimación con base en procesos.

En este contexto, el único algoritmo estructural o modelo basado en procesos para estimar regeneración natural posterior a una corta de regeneración (bajo tratamientos de cortas sucesivas o protección) parecido al algoritmo aquí propuesto es el desarrollado por Merganič y Fabrika (2011). Este último algoritmo es más sofisticado que el de este estudio, pues asocia variables climáticas, de sitio y del rodal (diámetro cuadrático promedio y la densidad relativa del rodal) a la producción de semillas viables y su calibración se realiza a través de datos de inventario poscosecha. Ello muestra que existe una ventana de oportunidad para mejorar el algoritmo aquí propuesto para incluir variables adicionales que permitan mejorar la estimación del número de árboles padre y de las características de la regeneración producida con base en el número de árboles padre proyectado, como los principios y modelos propuestos por Nathan y Muller-Landau (2000) o con el uso de modelos determinísticos (Hernández-Rivera et al., 2020) o probabilísticos (Nathan et al., 2002). Refinamientos de este tipo podrían generar recomendaciones más precisas sobre la densidad de árboles padre para regenerar apropiadamente un área, tema de sumo interés sobre todo en regiones tropicales (Holl, 1999). Estos refinamientos sin duda proporcionarán recomendaciones puntuales por sitio, especie y condición de mercado. Sin embargo, la evaluación de la utilidad neta de uno y otro método de regeneración a través de experimentos de campo requiere de un tamaño de muestra muy grande para incluir todo el conjunto de variantes de especie, sitio y variables económicas que determinan la aplicación de cada método. Por ello, la simulación, con base en un modelo fiable es una aproximación robusta para estimar la probabilidad de ocurrencia de un resultado que es determinado por un número muy grande de variables.

El principal resultado de este estudio muestra que, desde el punto de vista económico y bajo una amplia gama de condiciones de sitio y especie (variables del modelo), es más rentable realizar una plantación que regenerar al rodal

con el método de árboles padre. La mayor rentabilidad de la primera es atribuible fundamentalmente a la depreciación del valor del arbolado dejado en pie a lo largo del periodo de regeneración y los mayores costos de posponer la cosecha. Sin embargo, el resultado no considera que hay variables que tienen un gran peso en la toma de decisiones del productor como: apoyos del estado, condiciones de mercado, atributos del propio productor (edad, ingreso, conocimiento técnico, objetivos de manejo de su predio) y características de la propiedad. Estas últimas pueden ser muy relevantes ya que algunos autores han señalado que, en condiciones de buena calidad de sitio, la regeneración natural puede ser mejor opción que la plantación (Dlugosiewicz, Zajac y Wysocka-Fijore, 2019; Dlugosiewicz, Zajac, Wysocka-Fijore y Sulkowska, 2019; Falfán-Cortés et al., 2021), bajo tasas de descuento moderadas (Chudy et al., 2022).

Varios estudios han mostrado que la disponibilidad de apoyos gubernamentales y asistencia técnica se encuentra consistentemente relacionada con la aplicación de una regeneración asistida o plantación (Kilgore et al., 2007). Si bien el efecto positivo de los apoyos gubernamentales en inducir la plantación es variable a lo largo del tiempo y depende de múltiples factores de mercado, sitio y características de los productores (Sun, 2007), es innegable que la disponibilidad de apoyos para plantar un área cosechada inducen a que más productores participen en este tipo de actividades, sobre todo si están acompañados de asesoría (Ovaskainen et al., 2017) y organización para la producción de insumos de reforestación como viveros y uso compartido de maquinaria y equipo (Sun, 2007). Además, otros autores han demostrado que estos apoyos tienen efectos multiplicativos, en tanto inducen a los productores vecinos a adoptar estrategias de manejo más intensivas en términos de rendimiento maderable y rentabilidad (Jones et al., 2010), lo que genera un círculo virtuoso de mejora en los sistemas de producción y bienestar para los propietarios del bosque.

En relación con el efecto de las variables de mercado que inducen la selección de una regeneración asistida por parte de los productores, otros autores han documentado

que variables como: mejores precios de la madera, bajas tasas de interés a corto plazo (Sun, 2007) y un valor alto de la tierra favorecen la elección de una plantación (Beach et al., 2005). Dentro de las variables de la propiedad que mayormente influyen en la decisión a favor de esta están la calidad del sitio (Zhang y Pearse, 1997), las especies comerciales dentro de la propiedad y la estructura de costos de plantación definida por la calidad de la tierra (Ovaskainen et al., 2006). Finalmente, en el otro extremo del espectro, también se ha documentado que algunos atributos del productor, como su nivel de ingreso y diversidad de actividades económicas influyen para que este opte por realizar la plantación (Beach et al., 2005).

Lo anterior sugiere que, a pesar de que la plantación parece una estrategia técnica y económicamente más atractiva que la regeneración natural, los productores podrían estar lejos de adoptarla si no concurre un conjunto de factores de política pública, mercado, condición del sitio y perfil del productor que incentiven su aplicación. Tales factores podrían fomentarse a través de la dotación de incentivos directos o en especie, la disponibilidad de asistencia técnica especializada, así como el desarrollo de mercados de productos y servicios intermedios (producción de planta, renta de maquinaria/equipo de reforestación, fomento de un mercado laboral capacitado), entre otros.

Finalmente, es importante señalar que la plantación no solo resultará en una mejora en el nivel de producción y bienestar del propietario, sino que promoverá el desarrollo de otras actividades productivas (producción de semilla y planta de calidad y provisión de bienes y servicios para plantación) generadoras de círculos virtuosos de producción y bienestar local, sin olvidar los beneficios vinculados al aumento de productividad de los sistemas forestales y el incremento de los incentivos para conservarlos. De aquí que la inversión en estrategias de apoyo directo o en especie dirigidas a promover la regeneración por plantación (cuando es factible técnicamente) en bosque manejados conlleva un triple propósito: mejora productiva, mejora de bienestar local y eficiencia económica.

CONCLUSIONES

A diferencia de lo que usualmente se especula, la plantación es una opción económicamente más factible que la regeneración natural con periodos de regeneración cortos (menores a tres años) y bajo una amplia variedad de condiciones de sitio y características de especie, las cuales fueron modeladas a partir de un algoritmo basado en el índice de sitio y una extensa simulación de condiciones de sitio y mercado. La probabilidad asociada a favor de la plantación es de, al menos, 54% y este valor aumenta a medida que se alarga el periodo de regeneración. Además de las ventajas técnicas que podrían vincularse a la plantación y el potencial aumento en la productividad forestal de largo plazo derivado de su aplicación, esta actividad promueve el desarrollo de otras actividades productivas (producción de bienes y servicios vinculados al establecimiento de plantaciones) que mejoran el bienestar de los productores y detonan el desarrollo local en beneficio de una población más grande.

REFERENCIAS

- Ashton, M.S., & Kelty, M.J. (2018). *The practice of silviculture. Applied forest ecology*. John Wiley and Sons.
- Assmann, E. (1970). *The principles of forest yield study*. Elsevier.
- Barnett, J. P., & Baker, J. P. (1991). Regeneration methods. En M. Duryea, P. M Dougherty (Eds.), *Forest regeneration manual* (pp. 35-50). Kluwer Academic Publishers. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Ds3hRk4Nff8C&oi=fnd&pg=PR7&dq=Regeneration+methods.+In:+Duryea,+M.,+P.M.+Dougherty+&ots=ZB22x-krRD&sig=Pj3LsMjC_8iKqGDdHTKroY0M6FI#v=onepage&q=Regeneration%20methods.%20In%3A%20Duryea%2C%20M.%2C%20P.M.%20Dougherty&f=false
- Beach, R. H., Pattanayak, S. K., ChenYang J., Murray, B. C., & Abt, R.C. (2005). Econometric studies of non-industrial private forest management: a review and synthesis. *Forest Policy and Economics*, 7(3), 261–281. [https://doi.org/10.1016/s1389-9341\(03\)00065-0](https://doi.org/10.1016/s1389-9341(03)00065-0)
- Bravo, F., Fabrika, M., Ammer, C., Barreiro, S., Bielak, K., Coll, L., & Bravo-Oviedo, A. (2019). Modelling approaches for mixed forests dynamics prognosis. Research gaps and opportunities. *Forest Systems*, 28(1), eR002. <http://doi.org/10.5424/fs/2019281-14342>



- Chacón S., J. M., Velázquez, A., & Musálem, M. A. (1998). Comportamiento de la repoblación natural de *Pinus arizonica* Engelm., bajo diferentes coberturas. *Madera y Bosques*, 4(2), 39-44. <https://doi.org/10.21829/myb.1998.421358>
- Chudy, R., Cubbage, F., Siry, J., & Chudy, J. (2022). The profitability of artificial and natural regeneration: A forest investment comparison of Poland and the US South. *Journal of Forest Business Research*, 1(1), 1-20.
- Daniels, T. W., Helms, J. A., & Baker, F. S. (1979). *Principles of Silviculture*. McGraw-Hill.
- Dlugosiewicz, J., Zajac, E., & Wysocka-Fijore, E., (2019). Evaluation of the natural and artificial regeneration of Scots pine *Pinus sylvestris* L. stands in the Forest District Nowa Dęba. *Forest Research Papers*, 80(20), 105-116. <https://doi.org/10.2478/frp-2019-0009>.
- Dlugosiewicz, J., Zajac, E., Wysocka-Fijore, E., & Sulkowska, M. (2019). Comparative analysis of natural and artificial regeneration in Nowa Dęba Forest District. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 61(3), 230–24. <https://doi.org/10.2478/ffp-2019-0022>
- Edwards, G. (2016). Estimación de la tasa social de descuento a largo plazo en el marco de los sistemas nacionales de inversión. Caso chileno. *El Trimestre Económico*, 83(329), 99-125. <https://www.eltrimestreeconomico.com.mx/index.php/te/article/view/193>.
- Ek, A. R., Robinson, A. P., Radtke, P. J., & Walters, D. K. (1996). *Regeneration imputation models and analysis for forests in Minnesota*. Staff paper Series No. 115. Dept. For. Res. U. of Minnesota. <https://hdl.handle.net/11299/36798>
- Falfán-Cortés, A., Velázquez-Martínez, A., Reyes-Hernández, V. J., Fierros-González, A., Ramírez-Valverde, G., & Vargas-Hernández, J. (2021). Growth and water potential for *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. seedlings in the Ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(2), 73-86. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.09.061>
- Hawley R. C., & Smith D. S. (1972). *Silvicultura práctica*. (Traducción al español por Ramón Elizondo Mata). Ediciones Omega.
- Hernández, F., Deras-Avila, A. G., Deras-Avila, N. I., & Colín, J. C. (2019). Influence of the seed tree method on the diversity of regeneration in a mixed forest in Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 219-234. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.09.066>
- Hernández-Rivera, J., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., González-Flores, G., Goche-Telles, J. R., Prieto-Ruiz, J. Á., & Pérez-Hernández, J. F. (2020). Regeneración natural de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 7(2) ,12-18. <http://www.reibci.org/publicados/2020/oct/4000108.pdf>
- Holl, K. D. (1999). Factors limiting tropical rain forest regeneration in abandoned pasture: Seed rain, seed germination, microclimate, and soil. *Biotropica*, 31(2), 229-242. <https://www.jstor.org/stable/2663786>
- Jones, P. D., Grado, S.C., & Demarais, S. (2010). Financial analysis of intensive pine plantation establishment. *Journal of Forest Economics*, 16(2), 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2009.09.001>
- Kilgore, M. A., Greene, J. L., Jacobson, M. G., Straka, T. J., & Daniels, S. E. (2007). The influence of financial incentive programs in promoting sustainable forestry on the nation's family forests. *Journal of Forestry*, 105(4), 184-191. <https://pubag.nal.usda.gov/download/3144/PDF>
- Merganič, J., & Fabrika, M. (2011). Modelling natural regeneration in SIBYLA tree growth simulator. *Verband Forstlicher Forschungsanstalten: Sektion Ertragskunde, Jahrestagung*, 6(8). http://sektionertragskunde.fvabw.de/band2011/Tag2011_01.pdf
- Musálem S., M. A., Acosta, M., & Velázquez, A. (1994). Regeneración natural de los bosques de coníferas en la región central de México. *Méjico y sus Bosques*, 22(1), 23-26.
- Nathan, R., & Muller-Landau, H. C. (2000). Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment. *Trends in Ecology and Evolution*, 15(7), 278-285. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)01874-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)01874-7)
- Nathan, R., Katul, G. G., Horn, H. S., Thomas, S. M., Oren, R., Avissar, R., & Levin, S. A. (2002). Mechanisms of long-distance dispersal of seeds by wind. *Nature*, 418(6896), 409-413. <https://doi.org/10.1038/nature00844>
- Nuñez, M. A., Simberloff, D. & Relva, M. A. (2008). Seed predation as a barrier to alien conifer invasions. *Biological Invasions*, 10, 1389 – 1398. <https://doi.org/10.1007/s10530-007-9214-x>
- Nyland, R. D., Kenefic, L. S., Bohn, K. K., & Stout, S. (2016). *Silviculture: Concepts and application* (3a ed.), Waveland Press.
- Oliver, Ch. D., & Larson, B. C. (1990). *Forest stand dynamics*. Mc Graw Hill.
- Ovaskainen, V., Hänninen, H., Mikkola, J., & Lehtonen, E. (2006). Cost-sharing and private timber stand improvements: a two-step estimation approach. *Forest Science*, 52(1), 44-54. <https://doi.org/10.1093/forestscience/52.1.44>
- Ovaskainen, V., Hujala, T., Hänninen, H., & Mikkola, J. (2017). Cost sharing for timber stand improvements: Inducement or crowding

- out of private investment? *Forest Policy and Economics*, 74, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.10.014>
- Peters, R., & Jarpa, M. (1982). Tablas de rendimiento para pino insignie. INFOR.
- Puettmann, K. J., McG Wilson, S., Baker, S. C., Donoso, P. J., Drössler, L., Amente, G.,
- Harvey, B. D., Knoke, T., Lu, Y., Nocentini, S., Putz, F. E., Yoshida, T., & Bauhus, J. (2015). Silvicultural alternatives to conventional even-aged forest management - what limits global adoption? *Forest Ecosystems*, 2, 8. <https://doi.org/10.1186/s40663-015-0031-x>
- Real Option Valuation [ROV] (2019). *Risk Simulator. Real Option Valuation*. <https://www.realoptionsvaluation.com/risk-simulator/>
- Ribbens, E., Silander Jr, J. A., & Pacala, S. W. (1994). Seedling recruitment in forests: calibrating models to predict patterns of tree seedling dispersion. *Ecology*, 75(6), 1794-1806
- Royer, J. P. (1987). Determinants of reforestation behavior among southern landowners. *Forest Science*, 33(3), 654-667. <https://doi.org/10.1093/forestscience/33.3.654>
- Rums, O., Straupe, I., & Zdors, L. (2020). Comparison of regeneration of scots pine *Pinus sylvestris* L. in Myrtillosa and Hylocomios forest types after shelterwood cuttings. *Research for Rural Development*, 35, 54-60. <https://doi.org/10.22616/rrd.26.2020.008>
- Schmidt, W. C., Shearer, R. C., & Roe, A. L. (1976). *Ecology and silviculture of Western Larch forests*. Tech. Bull. 1520. US Forest Service. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=H1woAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA11&dq=ecology+and+silviculture+of+western+larch&ots=3OffL6Polo&sig=MkUE5oq8DssTzlCfsSz5SvQ9ZoA#v=onepage&q=ecology%20and%20silviculture%20of%20western%20larch&f=false>
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca [Semarnap] (1994). Guía técnica para la aplicación del Método de Desarrollo Silvícola. Dirección General Forestal.
- Smith, D. M., Larson, B. C., Kelty, M. J., & Ashton, M. S. (1997). *The practice of silviculture: applied forest ecology* (9a ed.). John Wiley and Sons.
- Solomon, D. S. (2002). *Modeling the regeneration of northern hardwoods with FOREGEN* (Vol. 719). US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=e_20ZSrM_oA
- C&oi=fnd&pg=PP3&dq=Modeling+the+regeneration+of+northern+hardwoods+with+FOREGEN&ots=XW1j5y1HMt&sig=6QQKetCK0591zrAgbS6aRB5oFUs#v=onepage&q=Modeling%20the%20regeneration%20of%20northern%20hardwoods%20with%20FOREGEN&f=false
- Steele, M. A., & Yi, X. (2020). Squirrel-seed interactions: The evolutionary strategies and impact of squirrels as both seed predators and seed dispersers. *Frontiers in Ecology Evolution*, 8, 259. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00259>
- Stokes, V., Kerr, G., & Connolly, T. (2020). Underplanting is a practical silvicultural method for regenerating and diversifying conifer stands in Britain. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(2), 219–231. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpa027>
- Sun, C. (2007). Variation of federal cost-share programs in the United States and the inducement effects on tree planting. *Journal of Forest Economics*, 12(4), 279-296. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2006.09.002>
- Velázquez-Martínez, A., & Musálem, M. A. (1986). Comportamiento de la viabilidad de la semilla de *Pinus hartwegii* Lindl. en el piso forestal. *Agrociencia*, 64, 141-146.
- Zhang, D., & Pearse, P. H. (1997). The influence of the form of tenure on reforestation in British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 98, 239– 250. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00085-6)

Manuscrito recibido el 26 de abril de 2021

Aceptado el 06 de marzo de 2023

Publicado el 19 de agosto de 2023

Este documento se debe citar como:

Torres-Rojo, J. M., & Velázquez-Martínez, A. (2023). Rentabilidad de la regeneración por el método de árboles padre vs regeneración asistida. *Madera y Bosques*, 23(1), e2312366. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2912366>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.