

NUCLEACIÓN APLICADA GUÍA DE RESTAURACIÓN PARA BOSQUES TROPICALES

AUTORES

Sarah Jane Wilson

Escuela de Estudios Ambientales, Universidad de Victoria, Canadá

Nikola S. Alexandre

Conservación Internacional; Líder de Restauración, Centro de Soluciones Climáticas Naturales

Karen D. Holl

Departamento de Estudios Ambientales, Universidad de California, Santa Cruz

J. Leighton Reid

Escuela de Ciencias Ambientales y Vegetales, Virginia Tech

Rakan Zahawi

Lyon Arboretum y escuela de Ciencias de la Vida, Universidad de Hawái en Manoa

Danielle Celentano

Conservación Internacional, Brasil; Alianza para la Restauración del Amazonas, Brasil; Posgrado en Agroecología, UEMA, Brasil

Starry Sprenkle-Hyppolite

conservación internacional; Director, Ciencias de la Restauración, Centro de Soluciones Climáticas Naturales

Leland Werden

Lyon Arboretum, Universidad de Hawái en Manoa

Los datos presentados en este informe son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de los contratistas.

Desarrollado por:

Sarah Jane Wilson
Escuela de Estudios Ambientales, Universidad de Victoria, Canadá; sjwil@umich.edu

Con la ayuda de:

la Conservación Internacional,
Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional
Starry Sprenkle-Hyppolite, Directora,
Ciencias de la Restauración;
ssprenkle-hyppolite@conservation.org

Marzo de 2021

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO	04
INTRODUCCIÓN	07
Cuadro 1: Orientación para planificar e implementar la plantación de árboles para la restauración forestal	
SECCIÓN 1: NUCLEACIÓN APLICADA: ¿QUÉ ES Y POR QUÉ UTILIZARLA?	13
SECCIÓN 2: DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES SOCIALES Y CULTURALES PARA LA NUCLEACIÓN APLICADA.	18
Cuadro 2: Utilizar la nucleación aplicada a escalas más grandes	
SECCIÓN 3: ¿CUÁNDO Y DÓNDE DEBE UTILIZARSE LA NUCLEACIÓN APLICADA (VS. OTRAS TÉCNICAS)?	23
SECCIÓN 4: TAMAÑO, FORMA, ESPACIO Y CONFIGURACIÓN DE LA ISLA DE ÁRBOLES	28
SECCIÓN 5: SELECCIÓN DE ESPECIES Y MATERIALES VEGETALES	33
SECCIÓN 6: MANTENIMIENTO PARA LA NUCLEACIÓN APLICADA.	37
SECCIÓN 7: MONITOREO	40
SECCIÓN 8: APRENDIENDO DE LA PRÁCTICA - CREANDO 'EXPERIMENTOS' DE CAMPO.	43
SECCIÓN 9: RECURSOS:	47
SECCIÓN 10: EJEMPLOS DE CASOS	49
Ejemplo de caso 1: Islas de los árboles en el bosque premontano tropical en el sur de Costa Rica	
Ejemplo de caso 2: Nucleación para evaluar el efecto de la densidad de plantación y el tamaño de la hoja en la regeneración de la aulaga (<i>Ulex europaeus</i>) y el rendimiento de la plantación	
Ejemplo de caso 3: Nucleación aplicada para recuperar poblaciones de especies maderables localmente amenazadas	
Ejemplo de caso 4: Nucleación aplicada para restaurar el bosque ribereño en la granja escuela de la Universidad de Maranhão, Brasil	
Ejemplo de caso 5: Adaptación de la nucleación aplicada a la amenaza de incendios forestales en el este de Madagascar	
Ejemplo de caso 6: Comparación de tres diseños de plantación de árboles para la restauración del bosque atlántico en Brasil	
REFERENCIAS	72

RESUMEN EJECUTIVO

Para cumplir con los compromisos globales y el potencial de la restauración, se necesitan con urgencia soluciones innovadoras y rentables. La nucleación aplicada (NA) es una técnica que integra la plantación de árboles y la sucesión natural para restaurar y regenerar los bosques. Los árboles se plantan en islas, en lugar de en todo el sitio, lo que reduce los costos y la mano de obra. La nucleación aplicada mejora la recuperación de los bosques naturales y depende de las especies animales para dispersar los árboles nativos, lo que puede crear bosques con una alta biodiversidad nativa. Tiene un gran potencial para restaurar bosques a gran escala en los trópicos y subtrópicos.

A pesar de su promesa, NA no se ha implementado ampliamente. Los políticos, los donantes y los profesionales generalmente no conocen la práctica, se han documentado pocos ejemplos a gran escala y, hasta la fecha, existe poca orientación para implementarla. También hay desafíos sociales para su adopción: los hábitats jóvenes en recuperación, especialmente aquellos bajo NA, a menudo se consideran en desuso o "tierras baldías". Educar tanto a las comunidades locales como a los niveles más altos de gobierno/políticas sobre el proceso de NA es fundamental para el éxito. Esta guía defiende

la NA y proporciona orientación práctica sobre dónde usarla, diseñar y planificar, implementar y mantener/monitorear los sitios restaurados.

Cuando se usa en contextos apropiados, la nucleación aplicada:

1. **Es rentable.** Es más barato que plantar árboles, pero más rápido que la regeneración natural sola.
2. **Produce resultados comparables a una plantación más intensiva.** Cuando las condiciones ecológicas permiten cierta recuperación del bosque natural, se ha



descubierto que la NA es tan eficaz como la plantación de árboles durante varios años.

- 3. Es susceptible de implementación a escala.** Debido al menor esfuerzo requerido, NA puede hacer que los esfuerzos de plantación de árboles se extiendan más a través del paisaje.
- 4. Combina los mejores elementos de la plantación de árboles y la regeneración natural (RN).** La plantación de árboles puede proporcionar oportunidades para la participación social y la integración de árboles "útiles" a nivel local, mientras que RN amplía los esfuerzos de plantación de árboles en el paisaje.
- 5. Es aplicable en una amplia gama de contextos tropicales.** La nucleación aplicada se ha utilizado tanto en áreas tropicales como templadas, y en una amplia gama de elevaciones. Existen grandes áreas de los trópicos donde la sucesión natural podría mejorarse y, por lo tanto, son adecuadas para NA.

Diseñar e implementar NA requiere una serie de pasos, que incluyen:

- 1. Decidir dónde y cuándo se debe usar NA** (en lugar de RN o plantaciones). Identificar áreas adecuadas para NA, donde 1) es posible cierta recuperación pero 2) podría acelerarse es un primer paso clave.
- 2. Comprender el contexto político** y cómo se puede usar la NA como una forma rentable de restaurar los bosques en lugares donde los propietarios de tierras o las empresas están legalmente obligados a restaurar los bosques.
- 3. Evaluar las necesidades y experiencias locales con los bosques en regeneración.** La nucleación aplicada puede ser menos apropiada que las plantaciones tradicionales en áreas donde las personas necesitan ingresos directos de la tierra.

- 4. Decidir dónde y cómo deben colocarse los árboles en el paisaje,** incluyendo el tamaño y el espaciado de las islas, en un contexto determinado. Más islas más grandes probablemente significan resultados más rápidos, pero a un costo más alto.
- 5. Seleccionar especies** que crezcan bien, expandan rápidamente la cubierta del dosel y atraigan a los dispersores de semillas al sitio.
- 6. Planificación del mantenimiento y la supervisión.** Esto generalmente incluye el cuidado de las plántulas plantadas y el manejo de la vegetación, los incendios, etc. en áreas que se están regenerando naturalmente entre las islas de árboles.



INTRODUCCIÓN

PROPÓSITO Y ALCANCE

La nucleación aplicada (NA) es una estrategia de restauración en la que se plantan islas de árboles (también llamados núcleos o grupos) para acelerar la recuperación del hábitat forestal. La nucleación aplicada puede ser un componente de la "regeneración natural asistida" (RNA), en la que los profesionales ayudan a acelerar los procesos de recuperación de los bosques naturales mediante la protección, la gestión y/o el mantenimiento de los bosques en regeneración (1, 2). Existen otros métodos para crear núcleos, como sembrar semillas directamente en racimos, pero esta guía se enfoca exclusivamente en usar árboles plantados en "islas". La guía abarca por qué, cómo, cuándo y dónde usar NA para restaurar bosques tropicales, incluidos elementos de planificación y diseño, consideraciones logísticas y orientación específica de NA para el mantenimiento y monitoreo del sitio. También brinda orientación para aprender de la práctica e incluye ejemplos de casos.

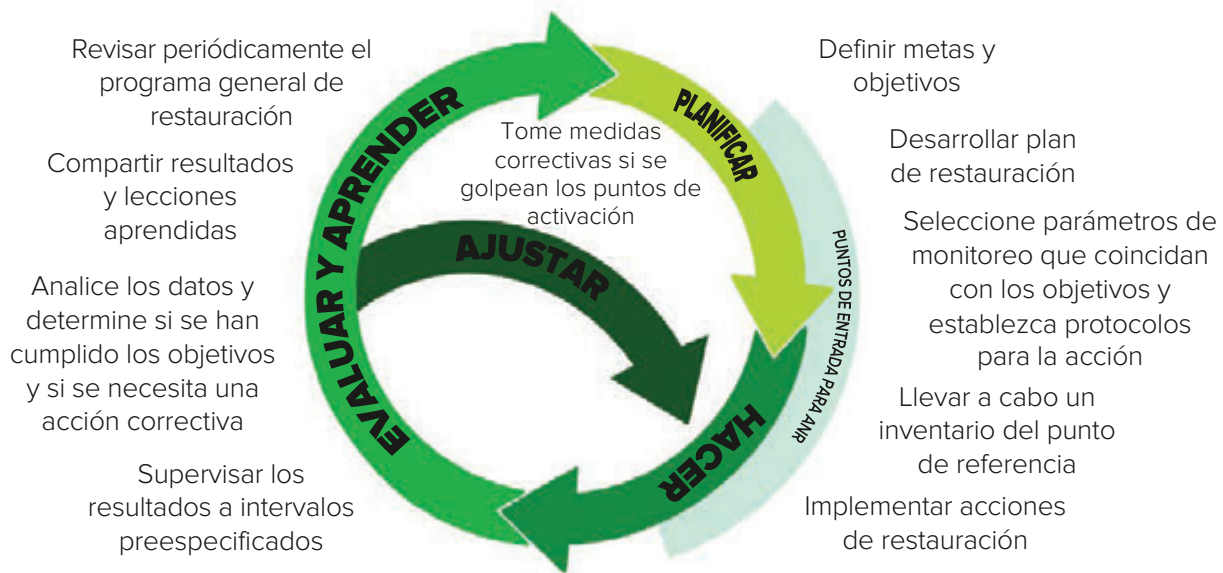


Figura 1. El proceso de restauración basado en un ciclo de manejo adaptativo (modificado de (4)). La nucleación aplicada se puede considerar como un método posible en las etapas de planificación e implementación, según los objetivos del proyecto, los recursos financieros y las condiciones ecológicas del sitio. Esta guía proporciona información detallada para integrar la NA en el proceso de restauración más grande.



La nucleación aplicada es una técnica que debe ubicarse dentro de un marco de restauración más amplio (Figura 1) que incluye procesos para la selección del sitio, la participación de las partes interesadas, el establecimiento de objetivos, la implementación y el monitoreo. Estos componentes críticos de la restauración (3) están bien cubiertos en la sección 9: Recursos.

LA NECESIDAD DE ESTA GUÍA

La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró 2021-2030 la Década de las Naciones Unidas para la Restauración de Ecosistemas, con el objetivo de “ampliar masivamente los esfuerzos de restauración de ecosistemas degradados y destruidos como una medida comprobada para combatir la crisis climática y

mejorar la seguridad alimentaria, el suministro de agua y la biodiversidad”. (5).

La mayoría de los bosques originales del mundo han sido destruidos o degradados (6, 7). Dado el papel fundamental que desempeña la conservación y restauración de los bosques en la mitigación y adaptación al cambio climático, en los últimos años se lanzaron importantes compromisos de plantación de árboles y restauración de bosques: el Acuerdo de París, al menos tres esfuerzos de "Trillion Trees"¹ (8) y el Desafío de Bonn proponen reforestar y restaurar paisajes a gran escala. Al mismo tiempo, el apoyo y la publicidad de los esfuerzos de plantación de árboles está aumentando en los sectores público, privado y empresarial.

¹ [1t.org](https://trilliontrees.org/) trillion trees effort; Trillion Trees (<https://trilliontrees.org/>) (esfuerzo conjunto entre WWF, WCS y Birdlife International) y Plant for the Planet (<https://www.trilliontreecampaign.org/>).

La atención y el apoyo a la plantación y restauración de árboles están impulsando una demanda proporcional de técnicas de implementación efectivas. Hoy en día, los recursos asignados para la restauración son insuficientes para cumplir con los objetivos globales, y se necesitan fondos adicionales y formas más rentables de restaurar los bosques (9). La nucleación aplicada hace que los recursos y esfuerzos de plantación de árboles lleguen más lejos: utiliza la plantación de árboles, pero a una intensidad y costo mucho menor que los métodos tradicionales. En lugar de plantar árboles en la totalidad de un sitio, los árboles se plantan en islas estratégicas que ayudan a que los bosques se recuperen en el resto del sitio.

APROVECHAR AL MÁXIMO EL MOVIMIENTO MUNDIAL DE PLANTACIÓN DE ÁRBOLES

A pesar de la atención y los recursos sin precedentes para plantar árboles, no se ha pensado lo suficiente sobre cuándo, dónde y cómo se plantan los árboles, y cómo evaluar el "éxito" (10, 11). La mayoría de los esfuerzos de plantación de árboles se basan únicamente en la plantación de árboles al estilo de una plantación, a menudo sin evaluar si los bosques se regenerarían naturalmente sin plantar, o cuánta plantación se requiere para ayudar a la recuperación

del bosque natural (12). La plantación de árboles es fundamental en algunas áreas donde la tierra está muy degradada o bajo ciertas condiciones sociales (Fig. 2). Pero donde los bosques pueden volver a crecer, la plantación de árboles también es costosa en comparación con dejar que los bosques se regeneren naturalmente y puede dar como resultado bosques más homogéneos, pero también podría dar lugar a especies diversas pero mal adaptadas al sitio, dependiendo de la diversidad y los requisitos del sitio/etapa de sucesión de las especies plantadas (13). La plantación de árboles también tiene una huella ecológica mayor que la regeneración natural. Al momento de plantar árboles, los profesionales predeterminan las especies dominantes de un sitio durante años o décadas, a veces con consecuencias negativas para el hábitat de la vida silvestre o el ciclo de nutrientes (14, 15). Los esfuerzos de plantación de árboles diseñados de manera ineficiente representan un uso ineficaz de recursos limitados (Cuadro 1). Por ejemplo, un estudio mostró que en los pastizales en el centro de Brasil, los árboles que se regeneraban naturalmente resultaron dañados por la plantación de árboles, por lo que la plantación de árboles no aumentó la cantidad de árboles en crecimiento en general. En este caso en particular, plantar semillas de especies que no rebrotaron naturalmente (en lugar de plántulas) podría



haber sido una opción mejor y menos laboriosa (16).

La plantación de árboles es solo una opción para la restauración y funciona mejor en algunos contextos que en otros (10, 17, 18) (Cuadro 1; Fig. 2). Los profesionales, donantes y otras personas que apoyen la plantación de árboles deben evaluar y seleccionar estrategias de restauración basadas en las condiciones ecológicas del sitio (suelo, nivel de degradación, tipo de bosque, etc.), la cantidad de bosque que queda cerca, el historial de uso de la tierra, las necesidades o requisitos del hábitat. Especies clave

y necesidades y objetivos sociales y económicos locales (17). Puede ser suficiente proteger las áreas de regeneración donde los bosques pueden regenerarse naturalmente (19). La plantación de árboles al estilo de las plantaciones puede ser necesaria donde los bosques no pueden regenerarse naturalmente, donde las especies invasoras dominan la regeneración natural y/o donde los terratenientes requieren ingresos directos de la tierra (18, 20, 21). La NA es más apropiada en áreas donde es posible cierta recuperación natural, pero podría acelerarse con la plantación estratégica de árboles (14, 22) (Fig. 2).

Regeneración Natural



En muchos lugares, los bosques pueden regenerarse de forma natural, y **la recuperación del bosque se puede lograr simplemente protegiendo estos bosques que vuelven a crecer.**

Plantaciones



La plantación de árboles al estilo de una plantación, **donde se planta una diversidad de especies de árboles nativos en hileras espaciadas regularmente en toda el área de restauración**, puede ser especialmente eficaz en áreas degradadas y/o áreas lejos de bosques nativos remanentes, que no pueden o tardan en recuperarse sin ayuda.

Nucleación Aplicada



La nucleación aplicada **implica plantar islas estratégicas de árboles para acelerar la recuperación de los bosques naturales.** Este método es más apropiado en áreas donde es posible cierta recuperación natural y puede hacer que los esfuerzos de plantación de árboles lleguen más lejos en una variedad de contextos tropicales.

Figura 2: La nucleación aplicada se comparó con otras técnicas comunes de restauración forestal, la regeneración natural y la plantación estilo plantación.

CUADRO 1: ORIENTACIÓN PARA PLANIFICAR E IMPLEMENTAR LA PLANTACIÓN DE ÁRBOLES PARA LA RESTAURACIÓN FORESTAL

La plantación de árboles debe planificarse y ejecutarse cuidadosamente, incluyendo la participación de las partes interesadas locales en los procesos de establecimiento de objetivos; asignar recursos para cuidar y controlar los sitios restaurados; y abordar las causas de la pérdida de bosques (23). La siguiente guía puede ayudar a que la plantación de árboles sea más efectiva en una variedad de contextos. Consulte también la sección "recursos" para obtener herramientas y orientación adicionales.

- 1. Identificar y tomar medidas para detener las causas de la deforestación.** La plantación de árboles efectiva requiere que los profesionales evalúen si los bosques aún se talan en la misma región y, de ser así, trabajen para comprender los factores que impulsan la pérdida de bosques y detener una mayor deforestación. Los bosques nativos e intactos tienen una mayor biodiversidad, almacenan más carbono y albergan especies más raras o endémicas que los bosques en regeneración, y es casi imposible recrear el bosque que había antes (24–26) (Fig. 3). Los bosques intactos también son importantes para los esfuerzos de restauración y actúan como fuentes de semillas y fauna para los bosques cercanos en regeneración (20, 27, 28). Es probable que la restauración sea más rápida y que los bosques restaurados sean más ricos en especies cuando se protegen los bosques restantes. Un ejemplo de cómo lograr esto (sugerido por el Programa de Compensaciones de Empresas y Biodiversidad) es comprometerse a que por cada área restaurada, se debe conservar un área equivalente de bosque intacto (29).
- 2. Evaluar si es necesario plantar árboles para cumplir con los objetivos del proyecto.** Los planificadores, implementadores y donantes deben considerar cuidadosamente dónde, cómo y si es necesario plantar árboles para lograr los objetivos del proyecto (10, 12, 30). Para decidir qué estrategia de restauración es la más adecuada, se deben establecer claramente los objetivos de restauración para que la plantación no se convierta en un objetivo en sí mismo (10). Con demasiada frecuencia, se utilizan métricas como "número de árboles plantados" o "área plantada con árboles" para informar el éxito de un proyecto de plantación de árboles. Pero para que los árboles brinden secuestro de carbono, biodiversidad y otros beneficios, a menudo se requieren varias décadas. Si el objetivo final es un bosque resiliente autosuficiente, este objetivo debe guiar el proceso de planificación y las métricas utilizadas para informar el éxito. Los objetivos del proyecto deben desarrollarse en colaboración con las partes interesadas pertinentes, incluidas las comunidades y los pueblos locales (10, 31, 32). Desde una perspectiva ecológica, la tierra podría dejarse en barbecho durante un par de años para ver si los bosques se regeneran bien de forma natural y determinar si es necesario plantar (33).
- 3. Comprender el uso de la tierra y el contexto del paisaje,** incluido el uso de la tierra pasado y actual, y lo que hay actualmente en el paisaje (incluidos los árboles remanentes y la fauna para el componente de dispersión de semillas). Esto ayudará a determinar si es necesario plantar árboles y, de ser así, con qué intensidad (34).
- 4. Buscar soluciones en las que la plantación de árboles mejore los sistemas de producción y los medios de subsistencia locales.** Es esencial comprender cómo la plantación de árboles puede adaptarse a los medios de vida y los sistemas agrícolas locales. Sin el apoyo de la población local, los esfuerzos de plantación de árboles suelen fracasar debido a la falta de mantenimiento y/o protección (35). Por otro lado, vincular la plantación de árboles con prácticas agrícolas sostenibles e implementarlas de una manera que aborde las amenazas percibidas para la agricultura puede ayudar a generar apoyo y aumentar la adopción de estas prácticas ampliamente (31, 36).
- 5. Establezca un compromiso y financiación a largo plazo para garantizar que los árboles plantados sobrevivan y crezcan.** El financiamiento sostenible es fundamental para lograr una restauración exitosa (10, 37). Comienza con el reconocimiento y la planificación de los costos totales para establecer árboles, incluyendo 1) el costo de evaluar las condiciones ecológicas y sociales antes de que comience la plantación, 2) el mantenimiento del sitio después de plantar los árboles (a menudo durante 2 a 5 años, hasta que se establezcan los árboles) y 3) desarrollar estrategias, como protección contra incendios y ganado, para garantizar la salud y la persistencia a largo plazo del bosque. A menudo, estos costos

esenciales no se consideran; por ejemplo, muchos programas de plantación de árboles ofrecen un precio fijo por árbol (como \$ 1 USD) que explícitamente no cubre el costo total de establecer y mantener árboles. Estas iniciativas desvinculan los costos de planificación y mantenimiento de los costos de plantación y dejan a los profesionales con la difícil tarea de asegurar el financiamiento para mantener los árboles después de plantarlos. Esto tiene el efecto aditivo de disminuir el costo percibido de la plantación de árboles en el mercado, lo que dificulta la obtención de fondos para la plantación efectiva de árboles.

- 6. Abordar la posibilidad de "fugas", donde la restauración en un lugar conduce a la deforestación en otro lugar.** Comprender cómo la reforestación en un lugar puede afectar el uso de la tierra en otro, por ejemplo, si provoca el desplazamiento de la agricultura u otro uso de la tierra, es importante para garantizar que los impactos de la restauración sean "aditivos".

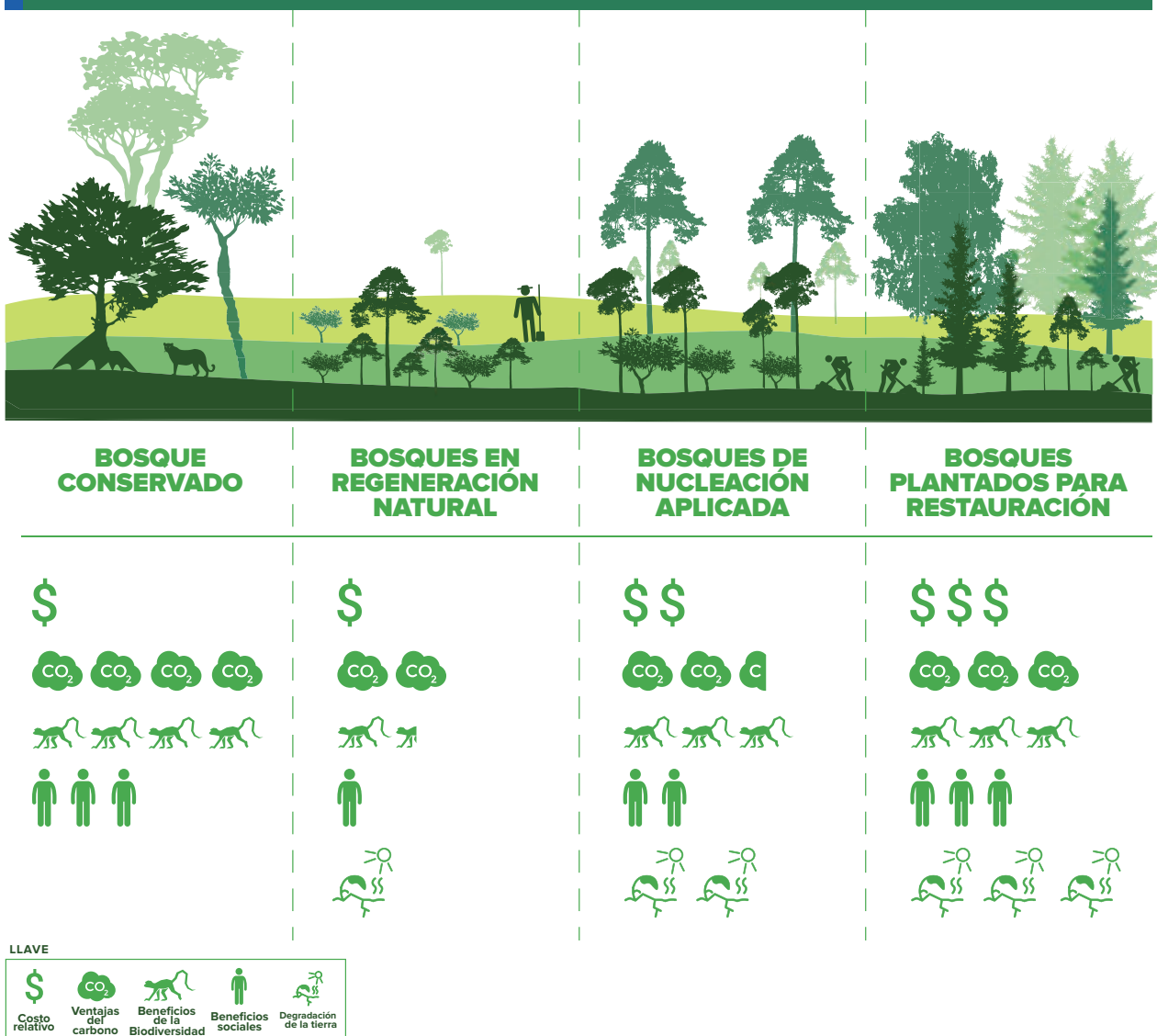


Figura 3: Resumen de los costos y beneficios de las diferentes técnicas de restauración comúnmente utilizadas durante los primeros 15 a 20 años (adaptado de 2). Tenga en cuenta que los beneficios y los costos dependen del contexto: en algunos sitios degradados, la regeneración natural es lenta o no puede ocurrir y mostraría muchos menos beneficios. En esta figura se supone que el sitio sería susceptible de cualquiera de las tres técnicas de restauración. La métrica de degradación de la tierra sugiere cuándo se deben aplicar intervenciones de regeneración natural en comparación con la nucleación aplicada y plantaciones (a lo largo de un gradiente de degradación creciente).



SECCIÓN 1:

NUCLEACIÓN APLICADA: ¿QUÉ ES Y POR QUÉ UTILIZARLA?

¿QUÉ ES LA NUCLEACIÓN APLICADA Y CÓMO FUNCIONA?

La nucleación aplicada (NA), también llamada "islas de árboles" o "plantación en racimo", consiste en plantar pequeñas islas de árboles que 1) crean un hábitat para los dispersores de semillas, 2) brindan sombra para suprimir el crecimiento de plantas amantes del sol y otras condiciones que mejoran el crecimiento de los árboles, y 3) exportan semillas de los árboles plantados al paisaje circundante (Fig. 4). La nucleación aplicada imita el proceso natural de sucesión, y estos atributos ayudan a que el área circundante se regenere más rápidamente que mediante la regeneración natural sola. Los árboles se pueden plantar en islas pequeñas, o en franjas u otras configuraciones (consulte el estudio de caso 6), según el ecosistema, el paisaje y los objetivos del proyecto (39). La nucleación aplicada solo funciona si los bosques pueden regenerarse naturalmente (p. ej., si las condiciones abióticas y bióticas son adecuadas), en cuyo caso puede facilitar y acelerar el proceso.

1**2****3**

Después de una perturbación, los parches aislados de las primeras especies de árboles pioneros comienzan a regresar. Debajo de sus copas escasas, el clima es más frío y húmedo que el área circundante, lo que crea condiciones más favorables para las especies más longevas. Los doseles atraen pájaros y otros animales clave que dispersan semillas que defecan de las ramas y se suman a la reserva de semillas de los árboles. Con el tiempo, estas copas de árboles dispersos actúan como viveros, y otros árboles germinarán y crecerán debajo y alrededor de los bordes, expandiendo el tamaño del parche de árboles. Eventualmente, los parches se unen, cerrando el dosel y formando un bosque continuo.

Figura 4: El proceso de sucesión/regeneración natural del bosque ocurre de forma irregular a través del establecimiento y la propagación de grupos de árboles.

La nucleación aplicada se basa en el modelo de sucesión de nucleación, un patrón en el que la vegetación se recupera en parches después de una perturbación, como un incendio o una tormenta de viento. Las primeras plantas que regresan al sitio perturbado modifican el entorno para hacerlo más favorable para las llegadas posteriores, por lo que con el tiempo los parches de vegetación en desarrollo se expanden y se fusionan (40) (Fig. 4, Fig. 5). La nucleación aplicada se basa en los bosques y árboles alrededor del sitio como fuentes de semillas y acelera este proceso al establecer esos primeros parches de árboles a través de la plantación de árboles. Cuando no hay parches de bosque cercanos, los árboles aislados en los campos o las cercas vivas en los paisajes agrícolas pueden proporcionar fuentes de semillas (a veces incluso de especies de sucesión tardía), por lo que también es importante proteger estos árboles.

¿POR QUÉ UTILIZAR NUCLEACIÓN APLICADA?

Cuando las condiciones son adecuadas, la NA puede ayudar a restaurar los bosques tan bien o incluso mejor que la plantación tradicional de árboles, pero a un costo menor por área. El esfuerzo requerido en comparación con la plantación tradicional de árboles es bajo: Por ejemplo, en un experimento de NA a largo plazo, las parcelas que se plantaron con solo el 27 % de los árboles utilizados en las parcelas cercanas al estilo de plantación mostraron grados similares de recuperación después de 10 a 15 años (22). El porcentaje apropiado de área de tierra para plantar depende de 1) los recursos disponibles y 2) qué tan rápido los bosques pueden regenerarse naturalmente.

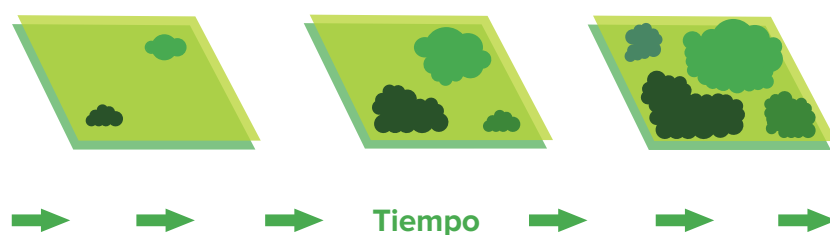


Figura 5: Regeneración natural a través del **modelo de sucesión de nucleación** visto desde arriba (adaptado de (41)). La nucleación aplicada acelera este proceso al establecer esas primeras islas de árboles a través de la plantación de árboles, en lugar de esperar a que se establezcan naturalmente (lo que puede no suceder nunca en sitios especialmente degradados). El tiempo real requerido para la recuperación de la cubierta arbórea variará mucho según las condiciones del sitio, el espacio y el tamaño de las islas arbóreas.

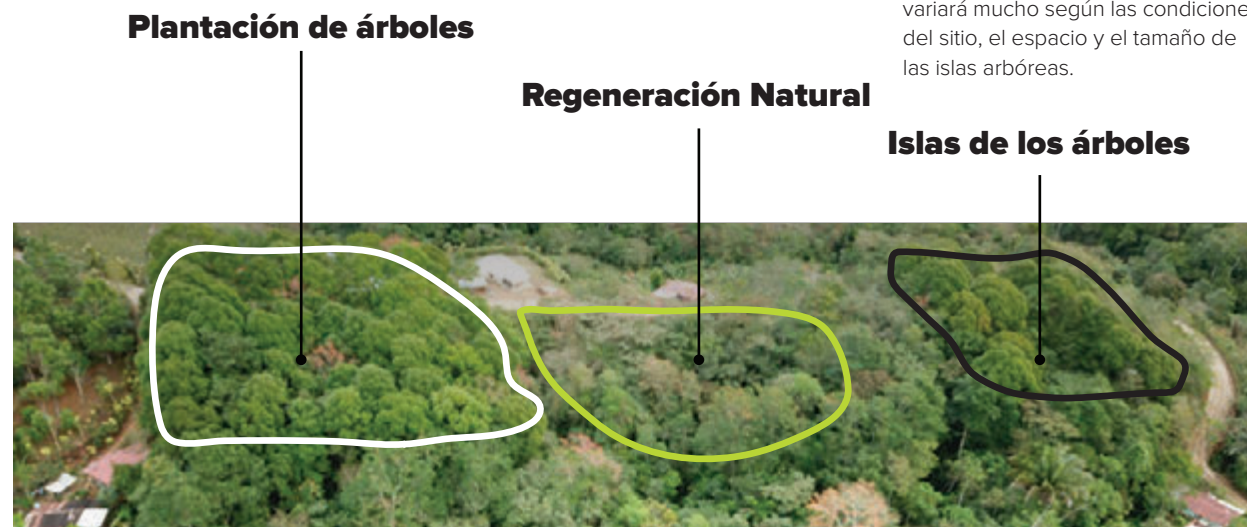


Figura 6: Sitios de estudio de nucleación aplicada en Costa Rica después de 7 u 8 años (adaptado de (41)).

La nucleación aplicada se ha estudiado en varios ecosistemas, incluidos los bosques tropicales y templados, los bosques de tierras bajas y premontanos/de elevación media, los matorrales secos y los pastizales (p. ej., (22, 42–44). Sin embargo, solo unos pocos estudios compararon los resultados de la NA con la plantación de árboles al estilo de una plantación, la regeneración natural y un sitio de referencia de bosque primario, lo que limita la comparación de los resultados de la NA en relación con otros métodos (22) (Fig. 3, Fig. 6). Pero estos estudios muestran que, si se usa

en las condiciones apropiadas, la nucleación aplicada puede producir un cierre del dosel, el reclutamiento de árboles (árboles nuevos que crecen en el sitio), la riqueza de especies de árboles y los procesos de dispersión de semillas similares a los de la plantación estilo plantación (22, 45). Los experimentos a pequeña escala sugieren que la NA podría ser una buena opción para cumplir con los compromisos de restauración forestal a gran escala (22), pero se necesitan pruebas de este método a mayor escala.



A

Viejos campos invadidos por *Megathyrsus maximus* antes de plantar las islas de árboles



B

Futura Isla de árbol despejada de *Megathyrsus maximus* justo antes de plantar



C

Limpieza de mantenimiento de invasoras no nativas pastos alrededor de 3-6 meses después de la siembra



D

25 meses después de la siembra. Las filas de *Heliocarpus americanus* árboles son visibles

Figura 7: Los resultados de NA en el campo después de solo dos años de rebrote en el bosque premontano, Colombia (ejemplo de caso 3).

COSTO

La NA es menos costosa que los métodos tradicionales de plantación de árboles (46). En NA, muchos costos están escalados al área sembrada, lo que significa que un área de NA sembrada con el 20% del número de árboles costaría una quinta parte de lo que costaría una plantación (47-49). Los costos fijos, como la protección de los bosques, el monitoreo, la compensación a los propietarios, los costos de la tierra, la planificación de proyectos,

etc., seguirían siendo similares para la NA, la plantación de árboles y la regeneración natural, y deberían estimarse por separado para calcular el costo total (Fig. 8). Si bien las comparaciones varían, la NA es generalmente rentable y puede hacer que las inversiones en plantación de árboles se extiendan más, siempre que se utilice en las condiciones sociales y ecológicas apropiadas.

Categoría de costo	RN	NA	Plantar	Notas:
Compromiso comunitario, planificación y educación	\$	\$	\$	NA y RN pueden requerir más explicación porque son menos familiares.
Tierra	\$	\$	\$	Puede haber costos ligeramente más altos para NA y RN si no se considera que ofrecen los beneficios de la plantación de árboles.
Monitoreo	\$	\$	\$	
Materiales vegetales	–	\$	\$\$\$	Depende de la densidad de árboles plantados para NA.
Mano de obra de siembra	–	\$	\$\$\$	Depende de la densidad de árboles plantados para NA.
Mantenimiento: deshierbe alrededor de los árboles plantados	–	\$	\$\$	Puede ser más laborioso despejar alrededor de parches de árboles que no están plantados en hileras; las plantas que no son del bosque pueden tardar más en quedar sombreadas.
Exclusión de pastoreo	\$\$	\$\$	\$	Puede ser mayor para RN y NA porque el pasto de pasto persiste por más tiempo.
Protección contra incendios	\$\$	\$\$	\$	Puede ser mayor para RN y NA porque la vegetación entre islas es más inflamable.
Uso/cosecha ilegal de la tierra	\$\$	\$\$	\$	Puede ser mayor para RN y NA porque los árboles confieren propiedad/demuestran uso; la gente puede hacer pastar al ganado en la hierba. Cuando los árboles plantados son más grandes, esto puede revertirse a medida que las personas cosechen los árboles plantados.

Figura 8: Costos relativos de la nucleación aplicada (NA) en comparación con la plantación tradicional estilo plantación (Plantación) y la regeneración natural (RN). Tenga en cuenta que los costos 'fijos' por unidad de área no varían con el área restaurada, mientras que los 'escalables' sí lo hacen. (Adaptado de (50)). Los costos son relativos a lo largo de cada fila, pero no por columna.



SECCIÓN 2:

RETOS SOCIALES Y CULTURALES Y OPORTUNIDADES PARA LA NUCLEACIÓN APLICADA.

La nucleación aplicada aún no se usa ni se reconoce ampliamente como técnica de restauración, por lo que su implementación puede presentar desafíos culturales, legales y políticos. Alinear los objetivos de restauración con las necesidades de la población local a través de la participación de las partes interesadas y el diseño de planificación participativa es clave para garantizar que la restauración sea aceptada, protegida y persista en el tiempo. Entender quién usa la tierra y cómo; el impacto de las políticas nacionales sobre el uso local de la tierra; el establecimiento de metas; y considerar cómo NA puede encajar en un paisaje de trabajo son todos críticos. Una discusión completa sobre la participación de las partes interesadas está más allá del alcance de esta guía, pero hay muchos recursos disponibles (consulte el final de la sección).

Mucha gente espera que la restauración sea ordenada y vea resultados rápidos. Plantar árboles en hileras cumple con esas expectativas si los árboles sobreviven y crecen bien. Por otro lado, las áreas que se regeneran naturalmente generalmente toman tiempo para convertirse en algo que parece un "bosque" (51). Al principio, estas áreas a veces se consideran no utilizadas o estériles, y pueden correr el riesgo de ser recuperadas o utilizadas para fines no forestales (22, 52). En NA, las áreas entre las islas de árboles que se someten a regeneración natural a menudo se perciben como "desordenadas": más arbustivas y menos ordenadas, lo que puede no alinearse con las normas y preferencias culturales (22, 51). Es posible que los bosques jóvenes en regeneración tampoco se consideren "bosques" según las políticas o los propietarios locales hasta que alcancen cierto tamaño, cubran un área determinada o hasta que regresen especies clave (Wilson, datos no publicados) (11, 53). Hasta que se cumplan estos criterios, la vegetación en regeneración corre un mayor riesgo de ser talada (54, 55). Permitir que los bosques se regeneren naturalmente también requiere poca acción por parte de los terratenientes aparte de proteger la tierra, que es muy diferente de la inversión requerida y el orden de la agricultura o la plantación de árboles al estilo de las plantaciones y puede representar un cambio importante en la forma de pensar sobre el uso de la tierra y gestión (36, 56, 57). Por lo tanto, puede ser necesario proporcionar un refuerzo adicional a los propietarios en las primeras etapas de implementación, para ayudarlos a ver el importante proceso que ocurre dentro del "desorden". Los sitios de demostración donde las personas pueden ver cuán efectiva puede ser la NA de primera mano son útiles para educar a los terratenientes locales sobre la técnica (56) (estudio de caso 4 de esta guía).

La nucleación aplicada puede hacer uso del componente activo de plantación de árboles para superar algunos de los desafíos que enfrenta la regeneración natural. La plantación de árboles hace que la restauración sea más atractiva para los propietarios porque:

1. Es práctico, activo, requiere trabajo e inversión, y otorga a los terratenientes cierto control sobre los resultados.
2. Muestra que se está utilizando la tierra, lo que puede reducir las intrusiones y, en algunos contextos, indica propiedad (formal o informal). Por ejemplo, en Filipinas, la plantación de árboles puede conferir derechos formales e informales a la tierra a través del Certificado de Propiedad de Plantación de Árboles una vez que las áreas han sido plantadas con árboles.
3. Se puede utilizar para establecer especies beneficiosas.
4. Es reconocido por muchos gobiernos y agencias como la principal forma de restaurar los bosques.

Para hacer el mejor uso de la plantación de árboles en NA, los profesionales deben involucrar a los propietarios locales y otras partes interesadas para diseñar el área de NA; y trabajar para comprender las políticas (pasadas y actuales) sobre reclamos de tierras a través del uso. Algunas soluciones a modo de ejemplo son:



Figura 9: Miembros de la comunidad local procesando semillas y seleccionando especímenes de semillas sanas y de alta calidad para la restauración de una especie localmente amenazada en Colombia (Fotos de Angélica Cogollo) (Ejemplo de caso 3).



Figura 10: Desafíos sociales y oportunidades que plantea la nucleación aplicada como técnica de restauración, y posibles formas de superarlos. (a) a menudo se considera que la restauración es desordenada, o la tierra se considera sin uso o estéril en las primeras etapas de la regeneración. Las posibles soluciones potenciales son: b) plantar árboles a lo largo de los límites de la propiedad; c) plantar especies localmente útiles en islas para la cosecha; d) utilizar la plantación de árboles para involucrar a las comunidades y las partes interesadas.

2. Los profesionales podrían considerar cómo demostrar que la tierra se está utilizando en el diseño de la plantación alterando la configuración de las plantaciones para, por ejemplo, definir los límites de propiedad o demostrar intencionalidad de otro modo.
 3. Las especies de valor local podrían plantarse en islas de árboles y en áreas de regeneración; se ha descubierto que la plantación de especies comercializables aumenta el apoyo de la comunidad y aumenta el sentido de propiedad en áreas de regeneración natural (57, 58).
 4. La plantación de árboles se puede utilizar para involucrar a las comunidades y proporcionar empleo local para aumentar el apoyo a la restauración.
- Los estudios de caso presentados en esta guía brindan ejemplos de cómo NA involucró intencionalmente a las comunidades marginadas para hacer el trabajo, incluyendo la capacitación y el desarrollo de capacidades, y el impacto social positivo que esto tuvo (Ejemplos de casos 2 y 4) (Fig. 9). NA, al igual que otras actividades de restauración activa, puede convertirse en una oportunidad para proporcionar empleo significativo y construir

una comunidad, con una planificación reflexiva e inclusiva (Fig. 10).

HERRAMIENTAS Y RECURSOS

Para el proceso general de comprensión del uso local y participación de las partes interesadas:

- [Una guía para la metodología de evaluación de oportunidades de restauración \(ROAM\): Evaluar las oportunidades de restauración del paisaje forestal a nivel nacional o subnacional.](#) IUCN: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y WRI: Instituto de Recursos Mundiales, 2014. (Consulte las páginas 58 a 63 para conocer la herramienta priorización de intervenciones de restauración por parte de las partes interesadas y otra información relevante).
- [Guía de diálogo sobre el uso de la tierra: El diálogo como herramienta para los enfoques paisajísticos de los desafíos ambientales.](#) TFD: *The Forests Dialogue*, 2020. (para obtener más información, visite <https://theforestdialogue.org/initiative/land-use-dialogues-luds>).
- [Manual de Capacitación en Análisis Participativo para la Acción Comunitaria \(PACA\) del Cuerpo de Paz.](#) Peace Corp, 2007. (Orientado al uso a nivel comunitario).
- [Buenas prácticas en mapeo participativo: Una reseña preparada para el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola \(FIDA\).](#) IFAD, 2009.
- Diagnóstico Rural Rápido y Diagnóstico Rural Participativo: Un manual para trabajadores de campo y socios de CRS. Freudenberger, K. S., CRS: *Servicios Católicos de Ayuda*, 2008.

Para elegir especies:

- [Domesticación de árboles agroforestales: Una cartilla](#) Dawson et al., ICRAF: *Centro Mundial de Agrosilvicultura*, 2012
- [En la misma medida: Una guía de usuario para el análisis de género en la agrosilvicultura.](#) Catacutan et al. (Eds), ICRAF: *Centro Mundial de Agrosilvicultura*, 2014

Para comprender cómo hacer que RNA sea más relevante para los usuarios locales de la tierra:

- Regeneración Natural Asistida: Métodos, resultados y temas relevantes para la participación sostenida de las comunidades. Dugan, P. [En Restauración forestal para la conservación de la vida silvestre.](#) Elliott, et al. (Eds), ITTO: *Organización Internacional de las Maderas Tropicales y FORRU: La Unidad de Investigación de Restauración Forestal*, 2000.

CUADRO 2: UTILIZAR LA NUCLEACIÓN APLICADA A ESCALAS MÁS GRANDES

La nucleación aplicada tiene un buen potencial para restaurar bosques a escala, con menos costo y esfuerzo que la plantación tradicional de árboles dentro de plazos comparables (22). Hasta la fecha, solo existen unos pocos ejemplos en los que se ha implementado la NA a mayor escala, incluida la Península de Osa en Costa Rica (Conservación de Osa) y en Madagascar (Green Again Madagascar, Estudio de caso 5) (22), y los resultados aún no se han publicado. Los estudios de NA a escalas más grandes (por ejemplo, de 1000 a 5000 ha) serían muy valiosos para informar los esfuerzos futuros.

En ausencia de datos de campo, la guía práctica para adaptar NA a escalas más grandes incluye:

1. **Dentro de un área más grande (como un paisaje), determine qué áreas son más adecuadas para NA y dónde otras técnicas podrían ser más apropiadas.** Consulte la sección 4, a continuación.
2. **La NA podría ubicarse estratégicamente o combinarse con otras formas de restauración para cumplir con diferentes objetivos sociales y requisitos legales para la restauración.** El uso de esta técnica en algunas áreas y una restauración más intensiva y/o orientada a los medios de vida en otras podría ayudar a generar apoyo para la restauración en general. Por ejemplo, usar NA para restaurar áreas de cuencas hidrográficas y bosques/plantaciones/sistemas agroforestales en y alrededor de tierras agrícolas en funcionamiento.
3. **La configuración o el tamaño de las islas de árboles pueden modificarse en áreas más grandes,** según los objetivos del proyecto, los plazos, las condiciones del sitio, la elección de especies y el tipo de bosque. (Consulte la sección 6 a continuación).

Ejemplo de un proyecto de NA implementado en 2019 por Laura Toro y Fundación Natura. Se establecieron 42 hexágonos en un pastizal de 7 ha utilizado anteriormente para la agricultura y el pastoreo durante más de 50 años. Los hexágonos median 35 m de ancho y estaban separados por 15 m. Dentro de cada 271 árboles individuales se plantaron 11 especies, con una separación de 1 m. Las fotos fueron tomadas durante y poco después de la siembra. Crédito de la foto: Fundación Natura y Laura Toro.



A



B



C

SECCIÓN 3:

¿CUÁNDO Y DÓNDE DEBE UTILIZARSE LA NUCLEACIÓN APLICADA (VS. OTRAS TÉCNICAS?)

La nucleación aplicada es más efectiva donde los bosques pueden regenerarse naturalmente hasta cierto punto, pero la regeneración es lenta (Fig. 2, Fig. 11). El uso anterior de la tierra, la proximidad a bosques existentes o árboles solitarios y el tamaño de los parches de bosque remanente afectan la regeneración y, por lo tanto, el potencial de NA (17, 21, 59, 60). La nucleación aplicada funciona al crear 1) áreas donde los dispersores de semillas pueden encontrar refugio y viajar de una isla a la siguiente, y 2) condiciones favorables para que las semillas se establezcan (14) (Fig. 3). Las áreas que carecen de estos núcleos (árboles remanentes o parches) podrían beneficiarse particularmente de la NA (22).

REGENERACIÓN NATURAL



NUCLEACIÓN APLICADA



PLANTACIÓN



Figura 11: El proceso y los resultados de la regeneración natural, la nucleación aplicada y la plantación estilo plantación a lo largo del tiempo (adaptado de (14)). En aras de la simplicidad, solo se ilustra un tipo de árbol como plantado, y todas las demás especies colonizan naturalmente. En realidad, tanto los núcleos de árboles como las plantaciones idealmente incluirían múltiples especies.

Los sitios alejados de los bosques donde la tierra está más degradada/lenta para recuperarse naturalmente pueden requerir una plantación de árboles más intensiva, mientras que en áreas donde los bosques pueden regenerarse bien sin ayuda, la regeneración natural puede ser suficiente para la recuperación del bosque (Fig. 11). Esta sección brinda orientación para evaluar si la nucleación aplicada podría ser una buena opción en función de las condiciones locales del sitio (Fig. 13).

1. La nucleación aplicada es compatible con las necesidades y objetivos de los propietarios locales. NA puede ser una buena opción cuando los objetivos de restauración tienen como objetivo restaurar la cubierta de bosque nativo y para la protección de cuencas hidrográficas o suelos. Cuando los propietarios de tierras requieran cosechas de ingresos/alimentos

de áreas reforestadas, la plantación más intensa de árboles valiosos y/o la instalación de sistemas agroforestales pueden ser mejores opciones. O bien, estos sistemas podrían combinarse con NA a escala de paisaje. La plantación de enriquecimiento en áreas NA o RN también se puede utilizar para integrar especies valiosas.

2. Los bosques en regeneración son valorados/culturalmente aceptados. Las áreas de bosques en regeneración a menudo se consideran no reclamadas o no utilizadas, lo que puede generar problemas con los derechos de uso y las reclamaciones de tenencia (52) (consulte la sección 2, más arriba). La nucleación aplicada puede ser una mejor opción donde es culturalmente más probable que se acepte, o si no, donde existen los recursos y el potencial para sitios de capacitación o demostración, educación

Condiciones del sitio	Estrategias recomendadas en determinadas condiciones		
	RN	NA	Plantaciones
Recuperación de especies forestales cuando la tierra se deja en barbecho durante 1-2 años	Rápida recuperación	Cierta recuperación pero lenta/obstaculizada	Poca/ninguna recuperación
Presencia de dispersores de semillas	Presente/probablemente presente	Presente/probablemente presente	No presente / muy pocos
Fuentes de semillas (bosques remanentes, árboles de pasto) presentes en el paisaje	Árboles y/o bosque remanente cercano	Árboles y/o bosque remanente cercano	Pocos o ningún bosque remanente o árboles presentes
Presencia de especies supresoras de árboles, por ejemplo, especies competitivas amantes del sol como la hierba de pasto	Pocos / menos densos	Abundante a moderado	Abundante a moderado
Uso de la tierra en el pasado; ciclos de quema.	Sitios de uso moderado a ligero, sin quema/ciclos largos de fuego	Sitios de uso moderado; algunos quemando bien	Sitios muy utilizados con quemaduras repetidas
Objetivos del proyecto y otras consideraciones			
Proporcionar ingresos a los terratenientes	La generación de ingresos no es esencial	Generación de ingresos un objetivo secundario/no esencial	La generación de ingresos es importante
Compatibilidad con otros objetivos de propietarios de tierras	Restaurar la cubierta de bosque nativo	Restaurar la cobertura de bosque nativo, la cuenca o la protección del suelo. Posibilidad de plantar especies valiosas en cantidades más pequeñas	Posibles cosechas de alimentos o madera a través de plantaciones o sistemas agroforestales
Área a plantar, fondos disponibles	Fondos por unidad de superficie mínima	Fondos por unidad de área limitada	Financiamiento relativamente alto por área a restaurar

Figura 12: Cuándo usar NA versus otras técnicas comunes según las condiciones del sitio y los objetivos del proyecto.

y/o cambio de política. El diálogo con las organizaciones locales es necesario para comprender cómo ven y utilizan los propietarios de tierras los bosques en regeneración. Las grandes áreas protegidas con financiación limitada y donde la gente local no necesita ganar dinero con la tierra podrían ser candidatas especialmente buenas (por ejemplo, tierra degradada que se agregó recientemente a una reserva o parque nacional; y/o donde la financiación para restaurar grandes áreas es limitada (22)). Consulte la sección 2, más arriba, para obtener herramientas y orientación para comprender los medios de vida y el uso de la tierra y las necesidades, objetivos y percepciones de los propietarios.

3. La recuperación del bosque puede ocurrir, pero generalmente es lenta o retrasada. Si el sitio ya tiene muchas plántulas de árboles nativos, esta es una buena indicación de que puede ocurrir una regeneración natural. Pero si no, considere ejecutar lo siguiente:

A. Pruebe el potencial de regeneración natural permitiendo que la tierra se recupere durante 1,5 a 2 años. La cantidad de recuperación después de 1,5 años es un buen indicador de la recuperación futura (33). Si las especies forestales comienzan a regresar después de un período de barbecho de 1 a 2 años, el sitio puede ser un buen candidato para RN o NA.

i. Para evaluar si un sitio se está recuperando bien, se debe medir el % de cobertura de pasto, el % de cobertura de dosel y la densidad de plántulas de árboles. Por ejemplo, una cubierta de dosel de >10 % y una cubierta de hierba de <70 % después de 1,5 años se asoció con una mayor recuperación ocho años después en Costa Rica. Otros sistemas pueden tener proporciones diferentes, y el tipo de césped también influye. Para obtener orientación adicional, consulte (33) (y también la sección a continuación sobre "tratamiento del sitio").

B. Cuando no sea posible esperar 1 o 2 años, considere la intensidad del

uso anterior de la tierra y el paisaje circundante para evaluar el potencial de regeneración.

i. Intensidad del uso de la tierra

en el pasado: Áreas que han sido despejadas por períodos más largos; han sido borrados repetidamente; donde los suelos están degradados/erosionados; y donde el fuego se ha utilizado repetidamente para despejar los bosques, es menos probable que se recuperen naturalmente, es menos probable que tengan un banco de semillas robusto y pueden requerir métodos más intensivos.

- **Historia de incendios repetidos:** ¿Se ha quemado repetidamente la tierra (por ejemplo, durante varios ciclos de barbecho?) → si es así, la recuperación del bosque puede verse impedida debido a la falta de un banco de semillas y otros propágulos (61-63). Los incendios forestales frecuentes también pueden dificultar la restauración de un sitio con NA, porque la vegetación entre islas puede ser altamente inflamable (más que los bosques) (64).
- **Malas condiciones del suelo:** ¿Se han erosionado o compactado severamente los suelos? → si es así, el establecimiento natural de plántulas será muy limitado hasta que los suelos se recuperen, y la plantación de árboles al estilo de una plantación de especies que sean tolerantes a dichos suelos, fijadores de nitrógeno y/o el enriquecimiento del suelo con compost antes de la plantación puede ser necesario para una restauración efectiva.
- **Hace mucho tiempo desde que se despejó:** ¿Cuándo se limpió el sitio? → Las duraciones más largas del uso antropogénico de la tierra a menudo se asocian con una recuperación más pobre (61) ya que los suelos se vuelven menos fértiles con el uso continuo y el banco de semillas disminuye con el tiempo.
- **Especies invasoras:** Las especies altamente invasivas tolerantes a la sombra (especialmente los árboles

invasores) en el sitio podrían significar que la nucleación aplicada no funcionará, especialmente si llenan todo el espacio intersticial entre las islas (14). El dominio de las especies invasoras (p. ej., en Hawái) puede impedir la expansión de la NA y limitar la eficacia.

ii. Los bosques/árboles remanentes están presentes en el paisaje agrícola.

Los bosques remanentes pueden servir como importantes fuentes de semillas y hábitat para los dispersores de semillas, al igual que los árboles remanentes intercalados en el paisaje agrícola.

iii. Los dispersores de semillas están presentes y pueden usar islas. Tener abundantes dispersores de semillas en un sitio es favorable para la NA. Pero los dispersores de semillas no siempre son fáciles de observar, por lo que este paso no debe usarse para descartar NA.

- *Herramientas y orientación para evaluar la presencia de dispersores de semillas: la presencia de dispersores de semillas se puede evaluar rápidamente en el campo a través de la observación directa de las visitas de la vida silvestre en los sitios, incluidos los conteos (recuentos de puntos o conteos de áreas cronometrados) y cámaras trampa. Las observaciones de la vida silvestre no requieren mucha asistencia, pero sí requieren el conocimiento de las especies dispersoras potenciales; sería útil involucrarse con las comunidades locales y los naturalistas. Para interpretar los resultados de las observaciones de vida silvestre:*

- Si hay aves más pequeñas, omnívoras o frugívoras, es probable que las especies pioneras de semillas pequeñas se estén dispersando. (Los lugares donde no esperaría ver esto incluyen vastas plantaciones de monocultivos o islas donde están en gran parte ausentes (como la isla de Guam, por ejemplo, (65)).
- Si hay presentes aves frugívoras grandes (p. ej., tucanes, cálaos) o

mamíferos (p. ej., monos, lémures, zorros voladores), pueden servir para dispersar las especies de plantas con semillas más grandes que se encuentran en el área (66, 67).

- Tenga en cuenta que algunos animales que dispersan semillas pueden pasar desapercibidos, como los murciélagos de nariz de hoja (68).

4. La vegetación circundante es predominantemente de especies autóctonas.

Debido a que el bosque en regeneración depende de las semillas dispersadas de los árboles cercanos, la calidad del bosque o los árboles cercanos también es importante. Aunque la cubierta forestal puede aumentar con una gama de diferentes niveles de cubierta forestal/ árbol, la composición de especies del bosque en regeneración se ve fuertemente afectada por el bosque existente en el paisaje (Zahawi, datos no publicados/en proceso). La nucleación aplicada es una estrategia deficiente en lugares donde las semillas que se dispersan provienen principalmente de especies invasoras.

5. Otros factores estresantes (herbívora, incendios forestales, etc.) que podrían destruir la vegetación en regeneración se pueden manejar.

El nuevo crecimiento secundario a menudo se elimina dentro de los años o décadas posteriores al comienzo de la regeneración (55, 69). Para que la nucleación aplicada o cualquier estrategia de restauración forestal sea efectiva, las amenazas a los bosques en regeneración (especialmente cuando son jóvenes) deben gestionarse/eliminarse (17).

HERRAMIENTAS Y RECURSOS

- [Reglas prácticas para predecir la recuperación de los bosques tropicales.](#) Holl et al., *Ciencia aplicada de la vegetación*, 21(4), 2018.
- Consulte también las herramientas y los recursos sobre la participación de las partes interesadas de la sección 2.



SECCIÓN 4:

TAMAÑO DE ISLA DE ÁRBOL, FORMA, ESPACIO Y CONFIGURACIÓN

TAMAÑO Y ESPACIO DE LA ISLA

Para un esfuerzo de plantación dado, ¿deberían los profesionales plantar menos islas, más grandes o más islas más pequeñas? Hay ventajas y desventajas entre el tamaño de la isla y la distancia entre islas para el mismo esfuerzo de plantación. Las islas más grandes y cercanas tienden a funcionar mejor y aumentan la velocidad de recuperación hasta cierto punto, pero el tamaño de la isla y el espacio entre islas también depende de los objetivos, los plazos y el presupuesto del proyecto. Los resultados de Costa Rica y Honduras, donde las islas estaban separadas por ~8-20 m (CR) y 12 m (Honduras) muestran buenos resultados, pero la recuperación fue más lenta cuando los núcleos estaban espaciados a distancias mayores. Dado que pocos estudios evalúan directamente la distancia óptima entre islas, un espacio predeterminado puede ser de 8 a 12 m según estudios anteriores, pero se requieren más experimentos.

¿CUÁL ES EL TAMAÑO ÓPTIMO DE LA ISLA DEL ÁRBOL?

Las islas de árboles deben ser lo suficientemente grandes para atraer pájaros y otros dispersores de semillas (70) y dar sombra a los pastos. El tamaño óptimo depende del contexto local y del tipo de bosque. En Costa Rica y Honduras, las islas más pequeñas (28 y 50 m²) tendieron a tener más pasto en el sotobosque (45, 59), y fueron más afectadas por la muerte de incluso un árbol plantado (especialmente el del centro, que deja pequeñas islas núcleo restante). Las islas más grandes (64 y 144 m² de área sembrada) recibieron más visitas de aves, más semillas dispersadas por animales y facilitaron más el reclutamiento de árboles que las islas más pequeñas (22, 59, 60, 70, 71), por lo que se recomendó un tamaño mínimo de 64 m² (22, 59). Sin embargo, los casos presentados al final de esta guía demostraron que la NA aún aumentó la recuperación forestal sobre la regeneración natural utilizando islas circulares de solo 2 m de diámetro (3,14 m²) en Brasil (estudio de caso 4) y 6 m de diámetro (28,3 m²) en el bosque nuboso montano alto en Colombia (estudio de caso 3) (en ambos casos, los árboles se plantaron muy densamente dentro de las islas, a 0,5 y 1,1 m de distancia respectivamente). Se requiere investigación adicional para determinar el tamaño mínimo en otros tipos de bosques, como el bosque seco tropical.

En última instancia, por encima de un umbral mínimo, el tamaño máximo de la isla **depende en gran medida de los recursos del proyecto, el tipo de bosque y el área total a restaurar.**

Las islas más grandes cubren más terreno y pueden proporcionar un hábitat ligeramente mejor, pero también requieren más recursos. Equilibrar el área total cubierta, el espacio entre islas y el tamaño de cada isla es una consideración clave.

¿CUÁNTA ÁREA SE DEBE PLANTAR Y CÓMO SE DEBEN ESPACIAR LAS ISLAS? CONSIDERE ESTOS FACTORES:

1. **Evaluar el grado de perturbación/degradación en el sitio.** Los sitios más alterados y degradados requerirán una plantación de árboles más intensiva, lo que podría significar que las islas estén más juntas entre sí.

2. **Estime la tasa de crecimiento del dosel.**

Las islas plantadas con árboles que desarrollan copas amplias rápidamente pueden significar que las islas pueden estar más espaciadas; crecimiento más lento, más cerca.

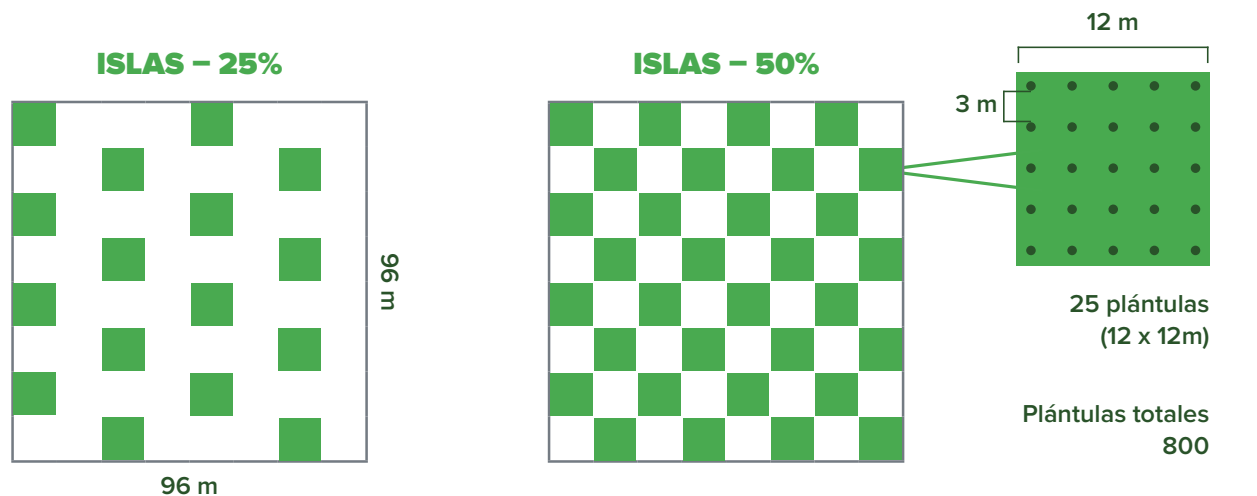
3. **Considere los recursos disponibles para la plantación de árboles.** Plantar un mayor porcentaje de un sitio de restauración con islas probablemente resultará en una recuperación más rápida, pero más árboles plantados aumentan el costo del proyecto. En cierto punto, la ventaja relativa de la NA sobre la plantación tradicional de árboles se perderá si la plantación de árboles se vuelve demasiado intensiva.

¿QUÉ FORMA DE ISLA ES LA MÁS ADECUADA EN UN CONTEXTO DADO?

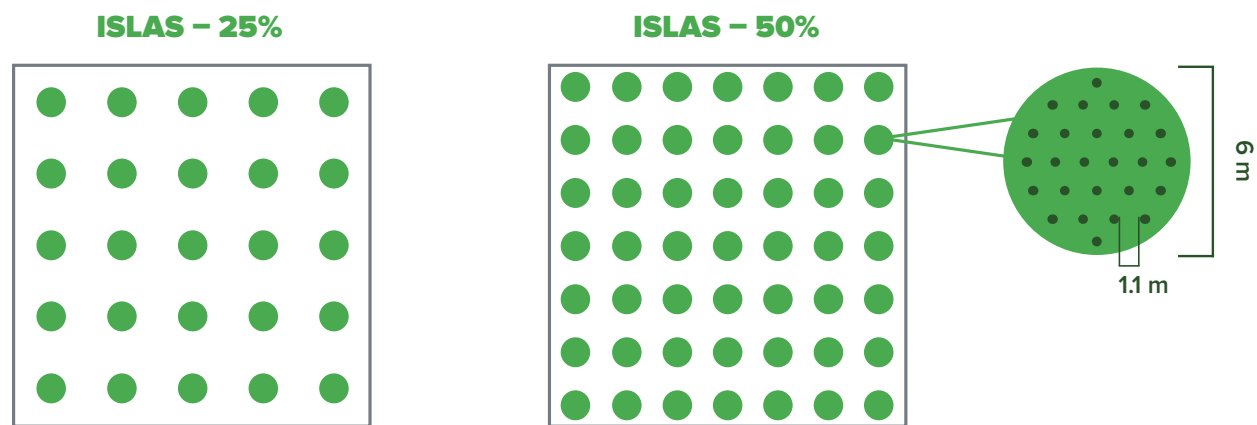
Los cuadrados o círculos son los más utilizados (Fig. 13). Los círculos producen la mejor relación borde/bosque interior, pero los bordes pueden ser más difíciles de ubicar y mantener (p. ej., las plántulas plantadas pueden ser taladas por error). También se pueden usar otras formas siempre que creen un hábitat sombreado dentro de las islas. Por ejemplo, las franjas son más fáciles de plantar y mantener porque hay menos esquinas para ubicar en la densa vegetación secundaria, y muchas prácticas forestales tradicionales usan esta configuración. En Brasil, los árboles se plantaron en franjas, y las observaciones después de tres años sugieren que la recuperación del bosque es similar en áreas plantadas con islas y franjas, pero que las franjas fueron mucho más fáciles de instalar (ejemplo de caso 6).

¿QUÉ TAN CERCA DEBEN PLANTARSE LOS ÁRBOLES DENTRO DE LAS ISLAS?

La respuesta depende en gran medida de los objetivos del proyecto, los recursos disponibles y las tasas de crecimiento de las especies utilizadas (72, 73). La plantación de árboles de estilo tradicional para la restauración ha mostrado buenos resultados utilizando una amplia gama de espacios (a menudo de 1 a 4 m). Un estudio que probó la regeneración natural bajo árboles plantados encontró que los árboles plantados más juntos (2x2 m) dieron lugar a una mayor diversidad de plántulas en regeneración que los árboles más separados (3x3m),



Plantación de baja densidad
Se sembraron 25% 200 plántulas y al 50% se sembraron 400 plántulas



Siembra de alta densidad
Se sembraron 25% 525 plántulas y al 50% se sembraron 1029 plántulas

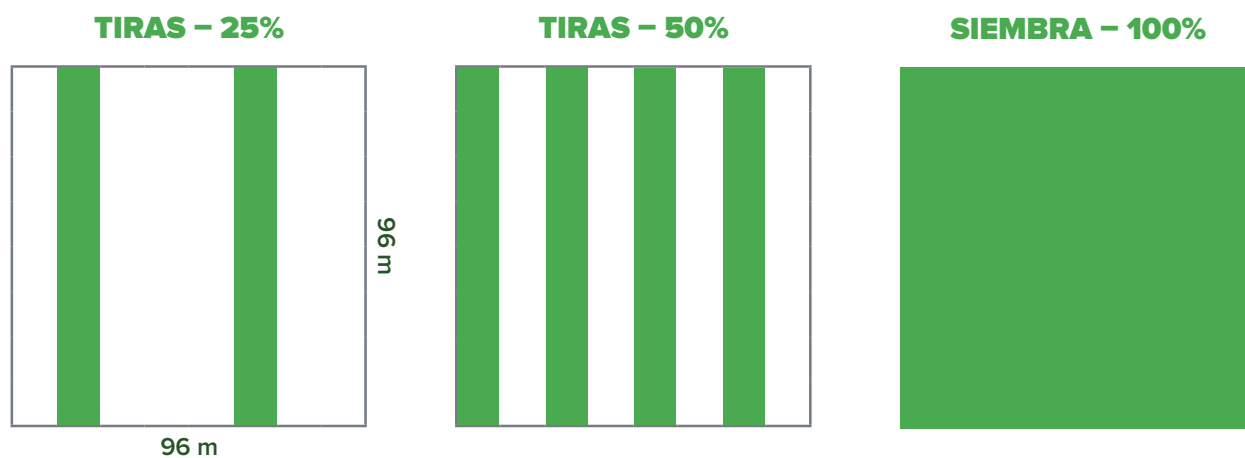


Figura 13: Ejemplos de diseños alternativos para la nucleación aplicada. Tenga en cuenta que en esta figura, los cuadrados proporcionan un ejemplo de plantación de "baja densidad" (árboles más espaciados dentro de cada isla) y los círculos son un ejemplo de plantación de "alta densidad". Cuadrados, círculos y tiras están representados en los ejemplos de casos de esta guía (cuadrados, casos 1 y 5; círculos, casos 2, 3 y 4; y tanto cuadrados como tiras, en el caso 6).

pero la abundancia de individuos fue similar (74). Se encontró que las plantaciones mixtas con un espaciamiento de 3x3m para restaurar la vegetación nativa en la sabana brasileña fueron exitosas en términos de crecimiento, especialmente para la acumulación de biomasa y las reservas de carbono.

Las ventajas de un espaciamiento más amplio (> 2 m, típicamente 3 m) son que 1) utiliza menos recursos del proyecto ya que se plantan menos árboles en cada isla, 2) puede promover el crecimiento de árboles más altos, un buen atributo si eventualmente se cosechan algunos árboles; y 3) produce árboles con un diámetro de tronco más ancho (75–77). Se utilizan espaciamientos más reducidos (menos de 2 m) para fomentar la competencia forestal y la diversidad (73). Esta práctica también se utiliza en microbosques urbanos para crear estratos densos de varias capas (78). Las ventajas de un espaciamiento más cercano incluyen 1) cerrar el dosel dentro de las islas más rápidamente; 2) crear potencialmente condiciones forestales más "naturales" desde el principio; 3) producir más biomasa más rápidamente (1,5-2 m) (79, 80); y 4) reducir el espacio disponible para especies invasoras.

Una de las principales ventajas de la NA sobre la plantación tradicional de árboles es que utiliza menos recursos. Debido a que la cantidad de árboles en las islas es el cuadrado de la distancia entre los árboles, la cantidad total de árboles necesarios aumenta rápidamente cuando se reduce el espacio. En Madagascar y Colombia se obtuvieron buenos resultados con un espaciamiento de 1 m, y en Madagascar, se están realizando ensayos para probar islas 'baratas' (plantación de baja densidad) versus islas 'densas' (plantación de mayor densidad) (estudio de caso 5). Un caso en Colombia probó explícitamente la densidad de plantación (0,9 vs. 1,1 m) y encontró un crecimiento más rápido de los árboles en un espacio menos denso, lo que también redujo el gasto del proyecto en aproximadamente un 30 % (estudio de caso 2). En Brasil, plantar árboles separados por 0,5 m en islas pequeñas también produjo buenos resultados (Estudio de caso 4), y en Costa Rica también se obtuvieron buenos resultados usando árboles separados por 3 m (Estudio de caso 1). Las especies de crecimiento más rápido

con copas más grandes significan que los bosques pueden volverse más densos más rápidamente, lo que hace que sea apropiado un mayor espaciamiento.



A

Vista aérea de las plantaciones.



B

Toma de drones de las hileras de *eucaliptos* intercaladas con hileras de especies nativas



C

Especies de árboles nativos plantados después de la cosecha de eucaliptos para beneficio de los medios de subsistencia. La anticipación es que las especies nativas se regenerarán naturalmente en el área talada

Un ejemplo de ampliación de plantaciones en franjas de especies nativas mixtas y eucaliptos en 77ha en Brasil, plantadas en hileras para facilitar la plantación, el mantenimiento y la cosecha. Crédito de la foto Pedro Brancalion. Véase también el ejemplo de caso 6.



TRABAJAR CON CARACTERÍSTICAS DEL PAISAJE

Para un esfuerzo de plantación determinado (p. ej., 20 %), ¿en qué parte del paisaje se deben plantar árboles? Los árboles se pueden plantar estratégicamente para ofrecer múltiples beneficios dentro del paisaje. Algunas consideraciones generales incluyen:

- 1. Plante islas en áreas donde hay menos regeneración natural.** Asignar un mayor esfuerzo de plantación en las áreas más degradadas 1) apunta a lugares donde es menos probable que ocurra la regeneración natural y 2) establece islas de árboles que pueden acelerar la regeneración natural en el resto del sitio.
- 2. Plante islas en áreas que protejan recursos importantes.** Por ejemplo, favorecer islas a lo largo de áreas ribereñas para minimizar la erosión, o a lo largo de los límites de una propiedad para hacer que el uso de la tierra parezca más intencional (ver sección 2).
- 3. Plante islas para crear conectividad** (es decir, entre dos fragmentos de bosque) para mejorar los procesos del paisaje.
- 4. Elija la ubicación de las especies en función del contexto del paisaje.** Por ejemplo, si hay una parte más ventosa de la parcela y las especies plantadas se dispersan por el viento, plántelas allí

(81). Si una especie se dispersa en el agua, colóquela más cerca del agua, o si depende de los dispersores de fauna, siembre donde haya excrementos u otros signos de dispersores.

LAS BUENAS PRÁCTICAS DE PLANTACIÓN DE ÁRBOLES SON ESENCIALES PARA OBTENER BUENOS RESULTADOS (10, 23)

Las parcelas de nucleación aplicada requieren técnicas efectivas de plantación de árboles para aumentar la supervivencia y el crecimiento, incluida la sincronización de la plantación con los ciclos de lluvia locales para evitar el riego costoso. Las mejores prácticas de plantación de árboles están fuera del alcance de estas pautas, pero hay muchos recursos disponibles que incluyen:

- [Restauración de bosques tropicales: Una guía práctica.](#) Elliott et al., *Royal Botanic Gardens, Kew*, 2013.
- [Implementación de la restauración del paisaje forestal: Una guía para profesionales.](#) Stanturf et al., *IUFRO: Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal*, 2017.
- [Directrices para la restauración, gestión y rehabilitación de bosques tropicales secundarios y degradados.](#) ITTO: *Organización Internacional de las Maderas Tropicales*, 2002.



SECCIÓN 5:

SELECCIÓN DE ESPECIES Y MATERIALES VEGETALES

Pocos estudios comparan la elección de especies entre diferentes tratamientos. Esta sección proporciona principios pragmáticos basados en la experiencia de campo para seleccionar árboles y otras especies de plantas (Fig. 14). Todas las especies seleccionadas deben ser adecuadas para las condiciones del sitio, incluido el rango de altitud, la precipitación, la estacionalidad, el tipo y el aspecto del suelo, sobre el cual se llevará a cabo la restauración.

CONSIDERACIONES ECOLÓGICAS

1. Elija combinaciones de especies que incluyan:

A. **Al menos una especie de crecimiento rápido** capaz de establecerse al aire libre, con un dosel que se extiende (la propagación a través de ramificaciones es una forma importante en que NA cierra el dosel). Las especies que crecen rápido y luego mueren (p. ej., *Inga edulis* en el caso del ejemplo 1), dejando espacio para especies de sucesión media-tardía, son especialmente útiles (22). Garibello (ejemplo de caso 3) también encontró que en el bosque montano bajo de Colombia, los núcleos plantados con árboles *Heliocarpus americanus* o Fabaceae (*Inga marginata*, *Inga* sp.

y *Erythrina poeppigiana*) fueron más efectivos para facilitar la supervivencia de los árboles en peligro de extinción, en comparación con los núcleos formados por arbolitos que comúnmente colonizan campos viejos (*Miconia* sp., *Piper aduncum*, *Vismia baccifera*).

B. **Algunas especies de crecimiento medio y lento** (sucesión media), en particular especies que es poco probable que colonicen sitios por sí mismas, como especies dispersadas por gravedad o especies con grandes, semillas dispersadas por animales. Las especies de semillas grandes de sucesión posterior tienden a estar ausentes o regresan lentamente a las parcelas restauradas sin asistencia adicional (22, 46, 82, 83). Estos también se pueden introducir a través de la plantación de enriquecimiento en la fase de mantenimiento del proyecto (Sección 7, a continuación).

C. Cuando se hayan cumplido los criterios anteriores, considere también elegir especies que:

i. Son fáciles de producir en viveros locales y/o crecen bien a partir de esquejes (las existencias de viveros pueden ser un factor limitante grave en los proyectos de restauración tropical);

ii. Tienen una alta tasa de renovación: las partes (hojas, ramitas, ramas y raíces, etc.) se mudan y vuelven a crecer con frecuencia, lo que crea materia orgánica y mejora los suelos.

iii. Tener una alta capacidad para brotar rápida y repetidamente después de un daño físico (tala parcial y/o quema).

2. Incluir árboles frutales para especies dispersadas por animales:

Los árboles plantados atraen a los animales al proporcionarles alimento, refugio de los depredadores, áreas de anidación y sombra (84). Los árboles frutales pueden aumentar las visitas de fauna, la dispersión de semillas y el reclutamiento de plántulas en comparación con los árboles dispersados por el viento (85). Los árboles con frutos consumidos por una gran variedad de animales dispersores de semillas pueden atraer a más dispersores (86). Los higos (*Ficus* spp.) se recomiendan para plantaciones donde son nativos porque están muy extendidos y sus frutos son consumidos por una gran variedad de animales (87–89).

3. Utilice especies autóctonas cuando sea posible y evite elegir especies que compitan con las especies de árboles autóctonos y eviten su establecimiento.

Seleccione especies nativas cuando sea posible, ya que es probable que estas especies permanezcan en el ecosistema, y evite especies especialmente competitivas o supresoras de árboles (22, 90). Por ejemplo, se encontró que las plantaciones de teca en los pastizales de Costa Rica suprimen el crecimiento de los árboles en comparación con la regeneración natural sin árboles plantados (91).

4. Incluir especies fijadoras de nitrógeno en sitios donde la infertilidad del suelo limita la regeneración de árboles nativos.

Múltiples estudios han encontrado buenos resultados utilizando árboles fijadores de nitrógeno, que a menudo crecen rápidamente y aumentan la disponibilidad de nitrógeno (p. ej., familia Fabaceae; *Inga* spp. y *Erythrina poeppigiana*) (92) (ejemplo de caso 3).

5. Considere diseños de islas "resistentes al fuego" en áreas propensas a incendios frecuentes (además de los cortafuegos).

Teóricamente, los árboles resistentes al fuego plantados en el borde pueden proteger más especies sensibles al fuego en el interior. Las especies a usar y las dimensiones de las "capas resistentes al fuego" requeridas dependerán en gran medida del contexto, y aún no hay evidencia experimental concluyente para probar esto. Es un área importante para la investigación continua (véase el ejemplo de caso 5).

6. Seleccione especies no arbóreas según corresponda en diferentes contextos. Los arbustos podrían ser especies adecuadas para agregar a una mezcla de especies de NA junto con los árboles, y las hierbas también podrían ser importantes para recuperar un complemento completo de especies en algunos contextos.

CONSIDERACIONES SOCIALES Y ECONÓMICAS

7. Integrar el conocimiento indígena y local e involucrar a la población local en el proceso de selección de especies.

La población local puede identificar especies que cumplan con los objetivos/criterios sociales y ecológicos para la NA, especialmente en lugares con un historial de uso forestal/sistemas agroforestales (93). La población local participó en la selección de especies en varios de los casos presentados en esta guía (ejemplos de casos 2, 3, 4 y 5, en Brasil, Colombia y Madagascar).

8. Considere la posibilidad de plantar con especies que cumplan objetivos sociales, económicos y ecológicos específicos.

Suponiendo que se cumplan los requisitos ecológicos mínimos, las especies pueden elegirse por su valor económico o cultural, o por su potencial de secuestro de carbono.

Característica	Descripción y Justificación
Tasas de crecimiento	Rápida ganancia de biomasa para el almacenamiento de carbono; copa de los árboles que se forma rápidamente para sombrear la vegetación de sucesión temprana que demanda luz; Planta especies con diferentes tasas de crecimiento, por lo que algunas se establecen rápidamente y otras viven más tiempo.
Forma de crecimiento: por ejemplo, hierba, arbusto, árbol	Las formas de crecimiento seleccionadas afectarán la estructura y diversidad de la vegetación.
Tolerancia de suelos bajos en nutrientes y fijación de N	Capaz de crecer y mejorar las condiciones del suelo en sitios degradados.
Tolerancia a condiciones climáticas estresantes y cambiantes	Tolerante a condiciones variables de temperatura y humedad para poder establecerse en sitios degradados y sobrevivir en un clima cambiante.
Características que atraen a la fauna	Frutos que atraen fauna que dispersa semillas, fuentes de néctar o especies que proporcionan una estructura de hábitat para la fauna.
Preocupación por la conservación	Especies que son raras y el foco de los esfuerzos de conservación.
Probabilidad de establecerse naturalmente	Especies de plantas que es poco probable que colonicen naturalmente para aumentar la diversidad.
Factible de recolectar y propagar/ disponible en viveros locales	Aumenta la rentabilidad y la facilidad de restauración.
Conveniencia como madera, productos forestales no maderables u otras razones económicas o culturales	Proporciona ingresos, alimentos u otros productos, lo que aumenta el incentivo para que los propietarios de tierras planten y mantengan la vegetación.

Figura 14: Características potenciales a considerar en la selección de especies de plantas para la restauración (Modificado de (4)).

HERRAMIENTAS Y RECURSOS

- [Características funcionales de plantas y selección de especies en la restauración de bosques tropicales.](#) Lachlan C. S., *Ciencia de la conservación tropical*, 11(1), 2020.
- [Domesticación de árboles agroforestales: Una cartilla](#) Dawson et al., *ICRAF: Centro Mundial de Agrosilvicultura*, 2012
- [Herramienta de restauración de servicios ecosistémicos \(REST\): Un programa informático para seleccionar especies para proyectos de restauración utilizando un enfoque de rasgos funcionales.](#) Rayome et al., *USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos*, 2019.
- [Preparación para plantar árboles tropicales.](#) Longman, K. A., *Secretaría de la Commonwealth*, 1995.
- [Especies de árboles plantados para la restauración del Bosque Atlántico: Un análisis florístico y funcional \(Espécies arbóreas plantadas na restauração da Mata Atlântica\).](#) Almeida et al., *LASPEF-UFSCar: Laboratório de Silvicultura e Pesquisas Florestais*, 2020. (En portugués, las tablas tienen subtítulos en inglés).
- [Imprimación para Restauración Ecológica.](#) Holl, K., *Island Press*, 2020.



© ATELOPUS - STOCK.ADOBE.COM



SECCIÓN 6:

MANTENIMIENTO PARA LA NUCLEACIÓN APLICADA

La nucleación aplicada a menudo requiere mantener tanto los árboles plantados como los que se establecen naturalmente. El mantenimiento debe respaldar los objetivos del proyecto, incluirse en los presupuestos y alinearse con el monitoreo para permitir intervenciones adaptativas (1, 94). La nucleación aplicada tiene como objetivo restaurar la cubierta de dosel con especies forestales nativas; como mínimo, el mantenimiento en los sistemas de NA debería facilitar la regeneración de los bosques nativos, pero la cantidad de mantenimiento depende de los objetivos del proyecto y las condiciones locales del sitio (1, 57). Esta sección describe las actividades clave de mantenimiento para los sistemas NA. Los recursos de orientación sobre el mantenimiento de áreas plantadas con árboles y RN asistida se aplican a NA y se proporcionan al final de este capítulo.

- 1. Asegúrese de que el área esté protegida** de los factores estresantes que podrían dañar los bosques en regeneración, como los incendios, el pastoreo, la herbivoría y la tala de árboles para la cosecha (a menos que la cosecha de árboles seleccionados sea parte de la estrategia). La protección del sitio es esencial para garantizar el éxito a largo plazo. Mantener cercas, cortafuegos y hacer cumplir las reglas locales de uso de la tierra son actividades importantes. En algunos lugares, la depredación de roedores también puede afectar la regeneración (como se observó en un proyecto GEF-CI en los altos Andes, también (95)). La protección contra el pastoreo (p. ej., el mantenimiento de cercas) es particularmente importante en NA porque la vegetación que crece entre los parches de árboles a menudo es apetecible para el ganado, especialmente durante la estación seca cuando el forraje puede escasear en otros lugares (52). La protección contra incendios también es clave: la vegetación entre islas puede ser más inflamable alrededor de las islas, lo que provoca un mayor daño a los árboles en su perímetro (ejemplo de caso 5, Madagascar). Las actividades de mantenimiento se pueden adaptar a diferentes entornos y contextos: por ejemplo, se pueden utilizar cortafuegos 'verdes' de vegetación inflamable plantada, que requieren menos mantenimiento que los cortafuegos de suelo desnudo (96).
- 2. Fomente el crecimiento de árboles plantados y en regeneración** en y entre islas de árboles. En áreas donde los árboles parecen estar regenerándose bien, la protección de la tierra podría ser suficiente. Cuando hay plantas muy competitivas que aman el sol, como la hierba de pasto plantada, es posible que se necesite una limpieza periódica antes y después de la plantación entre islas y dentro de ellas hasta que se establezcan las plántulas plantadas y en regeneración. La duración del mantenimiento depende de las tasas de crecimiento de los árboles y de la vegetación del sitio, pero en muchos contextos tropicales, limpieza mecánica (p. ej., con machete u otro instrumento cortante; evite usar fuego y

productos químicos, ya que pueden dañar los árboles en regeneración) 2 a 4 veces al año durante 2-3 años es común (1, 58, 92). Una vez que se establece la cobertura del dosel, ya no es necesario despejar porque las islas en expansión dan sombra a otra vegetación. (Como se señaló anteriormente, las especies tolerantes a la sombra altamente invasivas, especialmente las especies de árboles, podrían significar que la nucleación aplicada no funcionará, ya que no quedarán sombreadas por las islas en expansión (14)).

El proceso general para despejar entre islas es: 1) identificar los árboles en regeneración que deben protegerse, 2) despejar la vegetación alrededor de las plántulas en regeneración, y 3) aplicar fertilizante cuando sea necesario (1, 57). Limpiar la vegetación alrededor de las plántulas plantadas puede ser un desafío, especialmente cuando los árboles son pequeños. Marcar con cuidado los límites de plantación de árboles de las islas puede ayudar a prevenir el corte accidental de plántulas de árboles plantados.

- 3. Proteja a los dispersores de semillas** de la caza y otras amenazas. Los dispersores de semillas son clave para ayudar en el proceso de regeneración natural. Esto puede implicar trabajar con las comunidades locales para limitar la caza (1). Esto también podría implicar mantener a los gatos o perros fuera de los sitios de restauración.
- 4. Replantar árboles en islas** si muere una cantidad considerable de árboles. Un cierto porcentaje de mortalidad de árboles y replantación debe incluirse en el presupuesto del proyecto.
- 5. Controle los insectos** que dañan los árboles plantados o en regeneración (como las hormigas cortadoras de hojas) si es necesario.
- 6. El riego o la fertilización** pueden ser necesarios para mejorar la supervivencia y el crecimiento de los árboles plantados inicialmente en áreas donde existe escasez de agua o la calidad del suelo es baja.
- 7. Practicar la plantación de enriquecimiento en sitios**

regeneración para cumplir objetivos ecológicos y sociales. Tanto en la plantación estilo plantación como en NA, las especies de semillas grandes de sucesión tardía tienden a estar en números bajos o ausentes de las parcelas restauradas (17, 22, 46). En Costa Rica, un estudio de 15 años mostró que las parcelas de estilo NA y de plantación tenían un mayor número de árboles de semillas grandes reclutados que las parcelas de regeneración natural, pero una densidad mucho menor de especies de semillas grandes que los bosques de referencia cercanos más antiguos (45). Estos resultados muestran que los recursos para el mantenimiento a largo plazo y el manejo adaptativo son importantes para determinar si se necesita una plantación de enriquecimiento una vez que se establece el dosel (Cuadro 3).

HERRAMIENTAS Y RECURSOS

- [Restauración de paisajes forestales mediante la regeneración natural asistida \(RNA\) - Manual práctico.](#) FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2019.
- [Aplicación de regeneración natural asistida para restaurar tierras forestales tropicales degradadas.](#) Shono et al., *Ecología de la Restauración*, 15(4), 2007. (Proporciona una guía detallada para realizar la regeneración

natural asistida en el campo, incluida la identificación y el cuidado de los árboles en regeneración).

- [Una guía para la metodología de evaluación de oportunidades de restauración \(ROAM\): Evaluar las oportunidades de restauración del paisaje forestal a nivel nacional o subnacional.](#) IUCN: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y WRI: Instituto de Recursos Mundiales, 2014.
- [Principios y estándares internacionales para la práctica de la restauración ecológica, segunda edición.](#) Gann et al., *SER: Sociedad para la Restauración Ecológica*, 2019.
- [Directrices para la restauración, gestión y rehabilitación de bosques tropicales secundarios y degradados.](#) ITTO: Organización Internacional de las Maderas Tropicales, 2002. (Incluye el mantenimiento como un paso clave para las prácticas exitosas de plantación de enriquecimiento. Las actividades de mantenimiento se pueden adaptar a diferentes entornos y contextos (como el uso de cortafuegos "verdes", compuestos de vegetación inflamable plantada, que requieren menos mantenimiento que las opciones de suelo descubierto)).

CUADRO 3: CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES DE ÁRBOLES IDEALES PARA LA “PLANTACIÓN DE ENRIQUECIMIENTO” (MODIFICADO DE (96))

Floración y fructificación regular; Amplias amplitudes ecológicas; Tolerancia al estrés por humedad; Especies de semillas más grandes que no se establecen naturalmente; Tienen una mayor tasa de supervivencia cuando se plantan bajo un dosel abierto; Especies amenazadas o localmente amenazadas; Especies con alto valor cultural

Si los árboles van a producir beneficios económicos directos (PFNM, madera) también considere:

Producir maderas de alto valor o PFNM; Rápido crecimiento en altura; Buena forma de tallo natural; Libre de plagas y enfermedades; Bajo diámetro de copa

Las especies que no son árboles también son importantes para la ecología de muchos bosques. Considere plantar:

Epífitas: tardan en recolonizar los bosques secundarios, pero desempeñan un papel importante en el suministro de alimentos, agua y control del clima para los organismos que habitan en el dosel (28, 97); Arbustos forestales o arbustos de alto valor ecológico, económico o cultural.



SECCIÓN 7:

MONITOREO

El seguimiento de la NA es esencial para orientar las intervenciones de gestión y evaluar los resultados. A continuación, incluimos una guía específica de NA, que incluye indicadores relevantes para el seguimiento. Muchos recursos describen cómo desarrollar protocolos de monitoreo para la regeneración natural (Guía general en 1, 57, 94) y para la restauración de bosques/restauración de bosques y paisajes de manera más amplia (4, 31, 98). Consulte también las herramientas y los recursos enumerados al final de esta sección.

Monitoreo general y gestión adaptativa

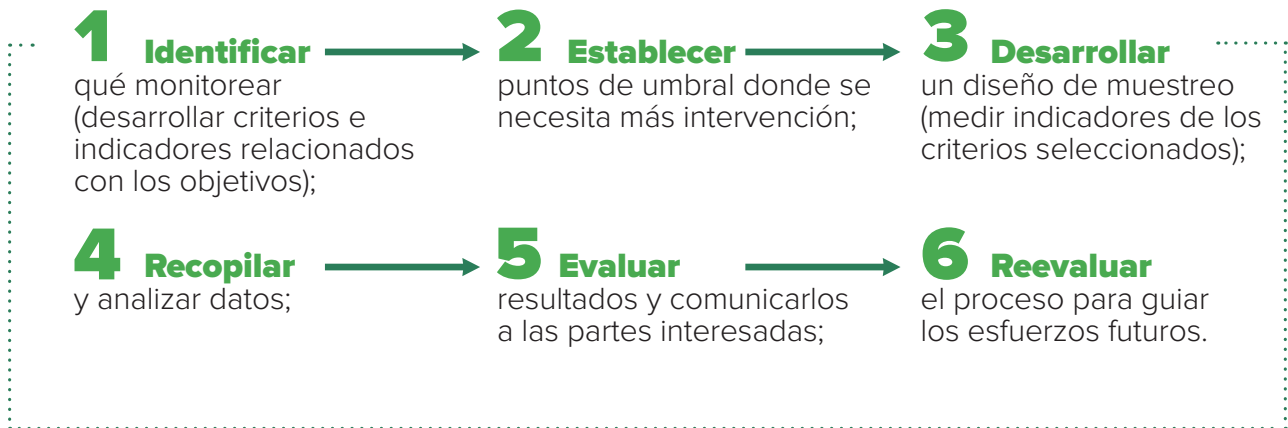


Figura 15: Pasos clave en el seguimiento y la gestión adaptativa. (Adaptado de Stanturf et al., 2017 (pg. 67).

DESARROLLO DE UN PLAN DE SEGUIMIENTO

Un programa de seguimiento comienza en las etapas de planificación de un proyecto cuando se definen los objetivos y metas. Estos deben combinarse con indicadores apropiados para 1) evaluar si el trabajo se está moviendo en una dirección que cumple con algunos o todos los objetivos del proyecto, y 2) capturar atributos adicionales importantes para los resultados del proyecto (Figura 1, Figura 15). El proceso de establecimiento de metas y monitoreo debe desarrollarse en colaboración con los propietarios de tierras y/o la comunidad en general, y debe verse como una forma de involucrarlos estratégicamente a lo largo del proceso. En la medida en que el monitoreo y el mantenimiento puedan proporcionar capacitación, desarrollo de capacidades y empleo local, pueden fortalecer en gran medida la inversión a largo plazo y la sostenibilidad del proyecto (98).

INDICADORES POTENCIALES PARA PROYECTOS DE NA

Los indicadores se derivarán de los criterios/metast/objetivos de un proyecto de restauración específico. Varios que podrían aplicarse a los proyectos de NA con el objetivo principal de ayudar y acelerar los procesos naturales de sucesión son:

- **La supervivencia y el diámetro del tallo (que se puede utilizar para calcular la biomasa) de los árboles plantados.**
- **El número y la identidad de las especies de reclutas recién establecidos en y entre islas.** Si son pocas, es posible que se necesiten intervenciones adicionales (como limpiar alrededor de plántulas en regeneración o plantar árboles adicionales).
- **Porcentaje de cobertura del dosel** a los 3 años. Si el dosel no está bien establecido en ese punto, se deben tomar medidas para aumentar la cobertura del dosel y se debe monitorear la cobertura a intervalos regulares. Un dosel cerrado es importante para crear las condiciones que permitirán el establecimiento de especies de sucesión posterior.
- **Extensión de la isla de los árboles (p. ej., cuánto se ha expandido el dosel entre las islas).** Incluso si se establece un dosel cerrado dentro de la isla, si las islas no aparecen, es posible que se necesite una plantación adicional. La dispersión de islas se puede medir como un cambio en el tiempo en la distancia hasta el borde del dosel desde el tronco de un árbol plantado en el borde de la plantación.
- **Presencia/ausencia de especies vegetales clave.** Cuando corresponda,

será importante monitorear la presencia de especies que han sido identificadas como importantes para fines ecológicos o sociales. Tenga en cuenta que si hay especies clave que deben incluirse, deben plantarse inicialmente o mediante una plantación de enriquecimiento.

- **La sobreabundancia de malezas o especies invasoras que podrían superar a los reclutas.** Este es un indicador negativo que sugiere que es necesaria una mayor intervención.
- **Las plántulas en regeneración son diversas y representativas de las especies que se encuentran en los sitios de referencia.** La comparación de los árboles en regeneración con los bosques de referencia es valiosa tanto para comprender qué tan bien está trabajando la NA para restaurar el bosque nativo, como para contribuir a la investigación en este campo (consulte la sección 9). El monitoreo de la proporción de especies dispersadas por el viento frente a animales también es útil para comprender si la NA está atrayendo con éxito a los dispersores al sitio.

Si el apoyo a los medios de subsistencia locales es un objetivo del proyecto, también podrían aplicarse los siguientes indicadores:

- **Productos forestales no madereros** medidos como 1) presentes en el sitio (cosechas potenciales) y 2) cantidades reales cosechadas (cosechas/rendimientos reales).
- **Número de puestos de empleo locales creados** y durante qué período de tiempo. Esto podría incluir empleos relacionados con la planificación, plantación, monitoreo, mantenimiento y cosecha de sitios restaurados.
- **Contribución del proyecto al ingreso familiar** a través de salarios por siembra, monitoreo y mantenimiento, y/o productos cosechados en el sitio.
- **Valor y distribución (p. ej., cuántos hogares, porcentaje de contribución a los ingresos del hogar, medida de equidad de distribución) de cualquier pago por servicios ambientales**, como agua o captura de carbono?

HERRAMIENTAS Y RECURSOS

- [Monitoreo a Procesos de Restauración Ecológica Aplicado a Ecosistemas Terrestres](#). Aguilar-Garavito, M., & Ramírez, W. (Eds), *IAvH: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*. 2015.
- [Implementación de la restauración del paisaje forestal: Una guía para profesionales](#). Stanturf et al., *IUFRO: Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal*, 2017.
- [Monitoreo Participativo en el Manejo de Bosques Tropicales: Una revisión de herramientas, conceptos y lecciones aprendidas](#). Evans, K., & Guariguata, M. R., *CIFOR: Centro para la Investigación Forestal Internacional*, 2008. (Describe un proceso para el monitoreo colaborativo que involucra a las comunidades y otras partes interesadas, que podría ser apropiado en áreas con comunidades que están usando activamente la tierra).
- [Principios y estándares internacionales para la práctica de la restauración ecológica, segunda edición](#). Gann et al., *SER: Sociedad para la Restauración Ecológica*, 2019. (Contiene una guía básica para un proceso de monitoreo y señala que el monitoreo debe comenzar en la fase de planificación de los proyectos y orientarse hacia indicadores de éxito fáciles de medir, un proceso que será útil al involucrar a las partes interesadas).
- [Imprimación para Restauración Ecológica](#). Holl, K., *Island Press*, 2020. (Contiene un capítulo que describe el proceso y las principales consideraciones para el monitoreo y mantenimiento para la restauración ecológica).



SECCIÓN 8:

APRENDIENDO DE LA PRÁCTICA – CREANDO 'EXPERIMENTOS' DE CAMPO

A pesar de su promesa y rendimiento como técnica de restauración, todavía existen importantes lagunas en la investigación para informar la práctica de la NA. Planificar la implementación y el monitoreo de una manera que permita recopilar datos sin comprometer los resultados del proyecto sería extremadamente valioso para avanzar en el campo. Esta sección describe seis preguntas principales de investigación y una guía para usar la implementación de campo para abordarlas.

1. **¿Cuáles son las mejores combinaciones de especies de árboles para usar?** Poca investigación ha probado el impacto del uso de diferentes combinaciones de especies en islas de árboles (pero vea (85) y el ejemplo de caso 3). El trabajo futuro podría probar diferentes combinaciones de especies con diferentes rasgos funcionales.
 - ¿Cuál es el equilibrio óptimo de especies sucesionales tempranas versus tardías en islas de árboles?
 - ¿Se pueden obtener beneficios significativos al agregar más especies?
 - ¿Existe un beneficio adicional al incorporar plantas que no son árboles, como arbustos, hierbas y epífitas en las plantaciones de NA?
2. **¿Qué tan importante es plantar especies dispersadoras de semillas para atraer a los animales dispersores?** Trabajos anteriores han encontrado que los animales todavía dispersan semillas en parcelas sin especies que proporcionen buenos frutos (22), y un efecto mínimo de plantar árboles dispersados por el viento en comparación con los animales en el reclutamiento de plántulas (99). Pero es lógico pensar que los recursos alimentarios aumentarían la eficacia de la NA. Se necesitan más ejemplos y comparaciones en diferentes contextos.
3. **¿Cómo afectan las diferentes configuraciones de plantación a la regeneración dentro y fuera de las islas de árboles?**
 - ¿Cómo afectan las diferentes formas de islas de árboles a los resultados ecológicos?
 - ¿Cómo se compara la recuperación forestal en áreas plantadas con 'islas de árboles' versus franjas lineales?
 - ¿La distancia entre las islas de los árboles afecta la expansión de las islas de los árboles?
 - ¿La distancia de los árboles entre los árboles plantados dentro de las islas afecta la expansión de las islas de árboles?
4. **¿Cómo y qué tan bien funciona la NA en una variedad de tipos de bosques tropicales?** (por ejemplo, bosque alto, bosque seco, manglar)? La mayor parte de la investigación sobre NA se ha realizado en bosques premontanos o montanos bajos (47, 100). Las preguntas sobre el espaciamiento pueden variar en diferentes tipos de bosques o regiones biogeográficas.
 - ¿Cuál es el espaciado y la configuración óptimos de las islas de árboles?
 - ¿Debería ser un espacio igual o grupos de islas de árboles?
 - ¿A qué distancia se pueden espaciar las islas?
5. **¿Qué tan bien funciona la NA a escalas más grandes** (es decir, áreas ideales de más de 5000 ha); pero también serían útiles los estudios a mediana escala (>100 ha). Actualmente no hay estudios que analicen qué tan bien funciona la NA a escalas más grandes.
 - ¿Qué condiciones del paisaje son las más apropiadas para usar NA a escala?
 - ¿Qué relación entre el tamaño del parche y el espaciamiento es mejor para la NA a gran escala?
6. **¿Qué tan rápido se propagan los núcleos en diferentes ecosistemas?** Una forma potencial de evaluar esto sería usar imágenes y sobrevuelos de drones para estimar el área de dosel en diferentes años. Esto será más útil en los primeros años cuando esté claro qué es y qué no es dosel.

CONFIGURANDO AN COMO UN EXPERIMENTO APLICADO

Cada esfuerzo de restauración puede servir como un experimento para informar el trabajo futuro. A menudo, los proyectos se implementan sin planificación ni seguimiento para aprender de la práctica. Pero como parte de un programa de monitoreo, los proyectos pueden mejorar su capacidad de contribuir al campo con una cantidad mínima de esfuerzo adicional.

El objetivo debe estar integrado en la etapa de planificación.

CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA CONFIGURAR AN COMO UN EXPERIMENTO APLICADO:

1. Para comprender qué tan bien funciona la NA en comparación con otros métodos de restauración comunes, **la implementación debe incluir tres tratamientos básicos:**
 - A. Un control de regeneración natural (RN),
 - B. Un área sembrada utilizando plantaciones de estilo de plantación estándar y/o plantaciones en franjas.

Deben registrarse las especies utilizadas y otros métodos.

C. Un área con tratamientos de NA. Se debe registrar el diseño así como las especies utilizadas.

También se deben registrar los costos de cada técnica. Tenga en cuenta que no es necesario que el área de cada uno sea la misma; incluso se pueden usar áreas pequeñas de RN y plantaciones para comparar con NA.

2. **Los tratamientos deben aplicarse en áreas con características ambientales similares**, en la medida de lo posible, como



© TROND LARSEN

el historial de uso del suelo, la distancia a los remanentes de bosque, la pendiente, el aspecto y la elevación. Todos estos atributos deben registrarse, junto con el tipo de bosque, la precipitación pluvial y otros atributos ecológicos relevantes del sitio. Alternativamente, debería haber suficientes replicaciones (sitios) que puedan dar cuenta de la variabilidad en el paisaje.

- 3. Para comprender las diferentes configuraciones de islas de árboles** (por ejemplo, diferentes distancias entre islas) **o ensamblajes de especies plantadas** (por ejemplo, usando diferentes combinaciones de especies), las parcelas de NA deben dividirse en diferentes tipos de NA. Consulte también ejemplos de casos al final de esta guía.

- 4. Como mínimo, los experimentos ecológicos requerirán monitoreo:**

- A. Cubierta del dosel
- B. Número e identidad de especies de árboles en regeneración a los cinco años (e idealmente a intervalos más largos, p. ej., 10-15).

Idealmente, los experimentos ecológicos también:

- C. Identificar regenerantes por mecanismo de dispersión para comprender el efecto de NA en los procesos de sucesión. También podría ser útil clasificar el "estado de sucesión" si la información está disponible.
- D. Supervisar otros aspectos de la recuperación forestal, particularmente si existe experiencia local que se pueda utilizar (p. ej., estudios de aves, plantas o artrópodos).
- E. Registrar el costo de implementar y mantener los tratamientos, incluidos los suministros, la mano de obra y el transporte.

- 5. Hasta la fecha, los elementos sociales de la aplicación de NA no han sido examinados sistemáticamente.** Sería útil recopilar datos sobre:

- A. Cómo perciben esta técnica las comunidades locales,
- B. Con qué rapidez y en qué circunstancias se adopta (por ejemplo, en fincas privadas),
- C. Los desafíos específicos para implementar la NA en una variedad de contextos, y
- D. Los resultados para los medios de vida y el uso de la tierra.

Registrar el proceso de implementación es un paso importante hacia la obtención de datos sociales. Las técnicas de evaluación participativa, importantes para las fases de planificación en muchos contextos, también se pueden utilizar para evaluar los puntos de referencia y medir el seguimiento después de la implementación. Incluso si no es posible establecer proyectos con un componente experimental, es importante realizar un seguimiento regular utilizando procedimientos estandarizados para aprender de proyectos individuales y comparar entre proyectos.

SECCIÓN 9:

RECURSOS:

A continuación se muestra una lista de las herramientas y los recursos proporcionados en las otras secciones de esta guía, además de otros recursos generales.

RESTAURACIÓN DE BOSQUES PARA LA MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO. CI: CONSERVACIÓN INTERNACIONAL, PRÓXIMAMENTE.

[Base de datos de proyectos de la Sociedad para la Restauración Ecológica \(SER\).](#) *SER.*

Este recurso proporciona una base de datos de proyectos de restauración en diferentes regiones y ecosistemas y está destinado a ser un recurso para posibles interesados y profesionales. La base de datos se puede buscar o filtrar por bioma, región, país, ecosistema o causa de degradación. Las descripciones de los proyectos generalmente incluyen una descripción general, el marco de tiempo, una definición del problema, la planificación y el diseño, las actividades y los resultados del proyecto, las lecciones clave, la gestión a largo plazo y la financiación.

[Metodología de Evaluación de Oportunidades de Restauración \(ROAM\).](#) *IUCN: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y WRI: Instituto de Recursos Mundiales.*

ROAM proporciona un marco, proceso y herramientas para ayudar a identificar áreas prioritarias para la restauración a nivel nacional o subnacional y analizarlas para el mejor tipo de intervención. Para cada tipo de intervención posible, una evaluación puede cuantificar los costos y beneficios, estimar los valores de secuestro de carbono, analizar las opciones de financiamiento, determinar la "preparación para la restauración" y abordar los bloqueos institucionales o de políticas existentes para mejorar la planificación e implementación de la restauración.

Directrices para la restauración del paisaje forestal en los trópicos. ITTO: *Organización Internacional de las Maderas Tropicales*, 2020.

Estas directrices, que se basan en las Directrices de la OIMT de 2002 para la restauración, ordenación y rehabilitación de bosques tropicales secundarios y degradados, proporcionan conocimientos técnicos y sobre políticas para quienes implementan la RPF o están interesados en ella. Se presentan una serie de elementos de orientación para estructurar las intervenciones y las acciones recomendadas a fin de seguir los seis principios básicos de la RPF. También incluye 18 estudios de caso de restauración de todas las regiones tropicales, y hay un resumen de políticas afiliado.

Imprimación para Restauración Ecológica. Holl, K., *Island Press*, 2020.

Este libro presenta los conceptos básicos de la planificación, el seguimiento y la gestión adaptativa de un proyecto de restauración ecológica. Explica los factores abióticos, como los accidentes geográficos, el suelo y la hidrología, y cubre otros temas, como las especies invasoras y las consideraciones legales y financieras. También se incluyen lecturas recomendadas o referencias adicionales para cada capítulo, una lista de estudios de casos y otros recursos de aprendizaje.

Implementación de la restauración del paisaje forestal: Una guía para profesionales. Stanturf et al., *IUFRO: Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal*, 2017.

Una guía para un enfoque sistemático de RPF desde la implementación hasta el monitoreo principalmente a nivel de paisaje con un enfoque en la mitigación y adaptación al cambio climático presentada por IUFRO. Esto brinda una guía práctica para los profesionales y las partes interesadas en un contexto local. Está organizado en módulos que cubren "primeros pasos", navegar por los desafíos de la gobernanza, diseñar un proyecto de restauración, aspectos técnicos de implementación, monitoreo y más.

Caja de herramientas de gestión forestal sostenible (SFM). FAO: *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*.

La caja de herramientas de OFS de la FAO es un centro de información para las partes interesadas que invierten en la gestión forestal sostenible. Incluye una variedad de herramientas, casos y otros recursos organizados en módulos. Los módulos incluyen temas técnicos, como agrosilvicultura, restauración de bosques y paisajes, o planificación de la gestión forestal, junto con módulos no técnicos sobre gobernanza forestal, gestión colaborativa de conflictos y más.

El Mecanismo de Restauración de Bosques y Paisajes. FAO: *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*.

La FAO estableció el Mecanismo de Restauración de Bosques y Paisajes (FLRM) en 2014 para apoyar las actividades de planificación, implementación y monitoreo de RPF en los países como una contribución para lograr el Desafío de Bonn y las Metas de Biodiversidad de Aichi. El FLRM incluye comunidades de práctica interactivas en línea para facilitar la comunicación y el intercambio de conocimientos, una biblioteca de recursos y oportunidades para tomar cursos.

Reforestación, Viveros y Recursos Genéticos. USDA: *Departamento de Agricultura, Servicio Forestal y Extensión Forestal de la Región Sur de los Estados Unidos*

Este programa, patrocinado por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de EE. UU., proporciona información para aquellos que cultivan plántulas con fines forestales o de conservación. Su sección de Viveros Tropicales incluye una lista de publicaciones y varios manuales para guiar el trabajo con plantas tropicales.

Enlace al documento de referencias del estudio de caso: <https://docs.google.com/document/d/1sYnH0GUfCjBxpBWNZVCR-TceKU12C8A2eOCVA084-10/edit?usp=sharing>



SECCIÓN 10:

EJEMPLOS DE CASOS

EJEMPLO DE CASO 1:

Islas de los árboles en el bosque premontano tropical en el sur de Costa Rica Karen Holl (Universidad de California, Santa Cruz); Rakan Zahawi (Lyon Arboretum y escuela de ciencias de la vida, Universidad de Hawái en Manoa).

Contexto: Este experimento se inició en el sur de Costa Rica entre 2004 y 2006 para comparar la eficacia ecológica a largo plazo de la nucleación aplicada con la regeneración natural y con la plantación de árboles más intensiva al estilo de una plantación. El estudio se estableció principalmente como un experimento científico, pero los autores trabajaron con numerosos terratenientes locales que aceptaron permitir que el experimento se estableciera en sus tierras y han estado involucrados en varios programas de divulgación educativa en la región. La región de estudio es un paisaje principalmente agrícola con extensos pastizales y algunas fincas cafetaleras con parches de bosque remanente intercalados. Todos los sitios utilizados en el experimento se habían utilizado anteriormente para la agricultura durante más de 18 años (principalmente pastoreo de ganado o producción de café), y en el momento de la implementación estaban cubiertos de pastos exóticos o una mezcla de pastos, hierbas y helechos.

Implementación y diseño y costos de nucleación aplicada: El experimento se llevó a cabo en la zona de bosque premontano en el sur de Costa Rica en sitios que oscilan entre 1100 y 1430 m de elevación y reciben 3500-4000 mm de lluvia al año. Originalmente se establecieron un total de 18 sitios de 1 hectárea, con 12 aún activos a partir de 2020. En cada sitio se establecieron tres parcelas de 50 x 50 m cada una con un tratamiento: nucleación aplicada, arborización o regeneración natural sin intervención (Figura 1). Se plantaron tres tamaños diferentes de islas de árboles dentro de cada parcela de nucleación aplicada (4 x 4, 8 x 8 y 12 x 12 m). Se plantaron cuatro especies de árboles, dos especies nativas, *Terminalia amazonia* y *Vochysia guatemalensis*, y dos especies naturalizadas fijadoras de nitrógeno de uso común en sistemas de cultivo intercalado, *Erythrina poeppigiana* e *Inga edulis* (Holl et al., 2017, 2020). Estas cuatro especies fueron seleccionadas en base a 1) altas tasas

de supervivencia y crecimiento, además de proporcionar una cubierta de dosel sustancial en sus primeros años, 2) disponibilidad en viveros locales y 3) uso común en sistemas agroforestales u otra restauración en América Central (Holl et al., 2011). Las plántulas tenían una altura de 20-30 cm en el momento de la siembra. En total, se plantaron 313 plántulas en parcelas de plantación, 86 en parcelas de islas de árboles y 0 en parcelas de control. La vegetación se eliminó de las parcelas antes de la siembra y se eliminó continuamente a intervalos de aproximadamente 3 meses durante los primeros 2,5 años para ayudar al crecimiento de las plántulas sobre pastos. Holl y Zahawi (2018) estiman los costos de plantación y mantenimiento para la nucleación aplicada en USD 357-620 por hectárea frente a USD 1462-2282 por hectárea para las plantaciones.

Los autores han recopilado una gran cantidad de datos durante los últimos 15 años sobre la recuperación de la vegetación, incluida la supervivencia y el crecimiento de los árboles plantados; reclutamiento, supervivencia, crecimiento y estructura de la vegetación leñosa; y riqueza de especies epífitas. También han recopilado datos sobre la abundancia, la riqueza y la composición de aves, murciélagos e insectos de la hojarasca, así como la dispersión de semillas, la herbivoría de insectos en las plántulas y la biomasa y los nutrientes de la hojarasca, cuyos resultados se resumen en Holl et al. (2020)

Resultados: Los resultados mostraron que la nucleación aplicada fue mucho más efectiva que las parcelas de regeneración natural y similar a las parcelas de plantación, en términos de cobertura de dosel, reclutamiento de especies y otras métricas clave (Holl et al., 2020). La regeneración natural tuvo la densidad más baja de semillas y reclutas de árboles grandes dispersados por animales, y bosques de referencia los sitios circundantes fueron los más altos mientras que las

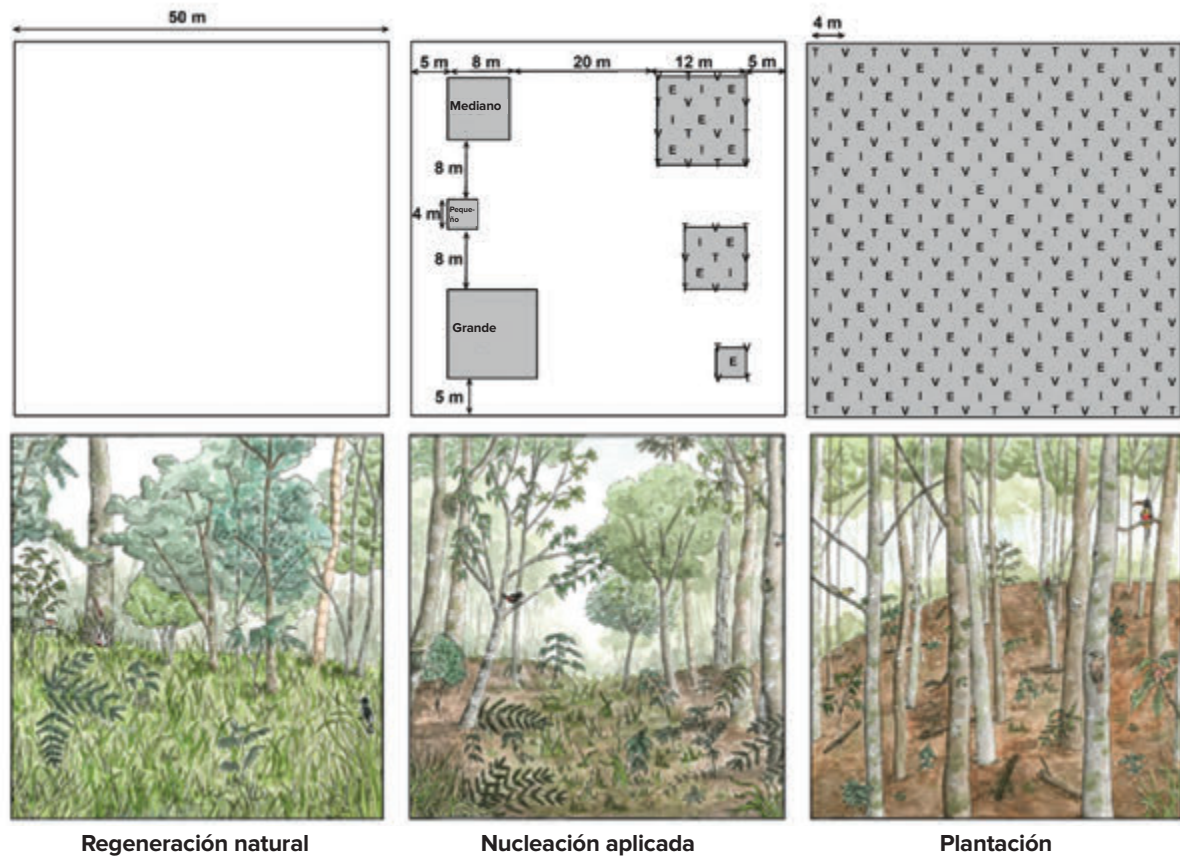


Figura 1: De Holl et al. (2020). Los paneles superiores detallan el diseño de plantación original y los paneles inferiores ilustran las parcelas después de 15 años mostrando tanto la vegetación plantada como la naturalmente reclutada. En los paneles superiores, las áreas grises se plantaron con *Erythrina poeppigiana* (E), *Inga edulis* (I), *Terminalia amazonia* (T) y *Vochysia guatemalensis* (V). Sm = pequeño; Medio = medio. Crédito del artista: Michelle Pastor



Figura 2: Parcela de nucleación aplicada. La vegetación es una mezcla de árboles plantados y de crecimiento natural. Crédito de la foto: Karen D. Holl

plantaciones aplicadas y ambos estaban en niveles intermedios (ver Figura 3). Después de 15 años, todavía se encontraron pocas especies de sucesión tardía dentro de todas las parcelas de tratamiento, pero esto indica en gran medida el proceso evolutivo y de varias décadas de regeneración forestal. La abundancia de aves y murciélagos, los artrópodos de la hojarasca, la riqueza de epífitas, la producción de hojarasca y los aportes de nutrientes de la hojarasca fueron similares o equivalentes entre las plantaciones y las parcelas de nucleación aplicada, y más altas que las parcelas de regeneración natural (Figura 3).

Los resultados de este estudio y de Zahawi y Augspurger (2006), quienes estudiaron la nucleación aplicada en los bosques tropicales de Honduras, muestran que los núcleos de árboles más grandes (64 y 144 m² de área plantada) tienen tasas mucho más altas de visitas de aves, dispersión de semillas dispersadas por animales y reclutamiento de plántulas que los núcleos más pequeños (4 y 16 m²) (Fig. 4A y B). Este resultado probablemente se debió a un mayor porcentaje de cobertura de dosel en núcleos grandes y medianos, que atrae a los dispersores de semillas y hace sombra a los pastos de pasto altamente competitivos y que demandan luz). A pesar de

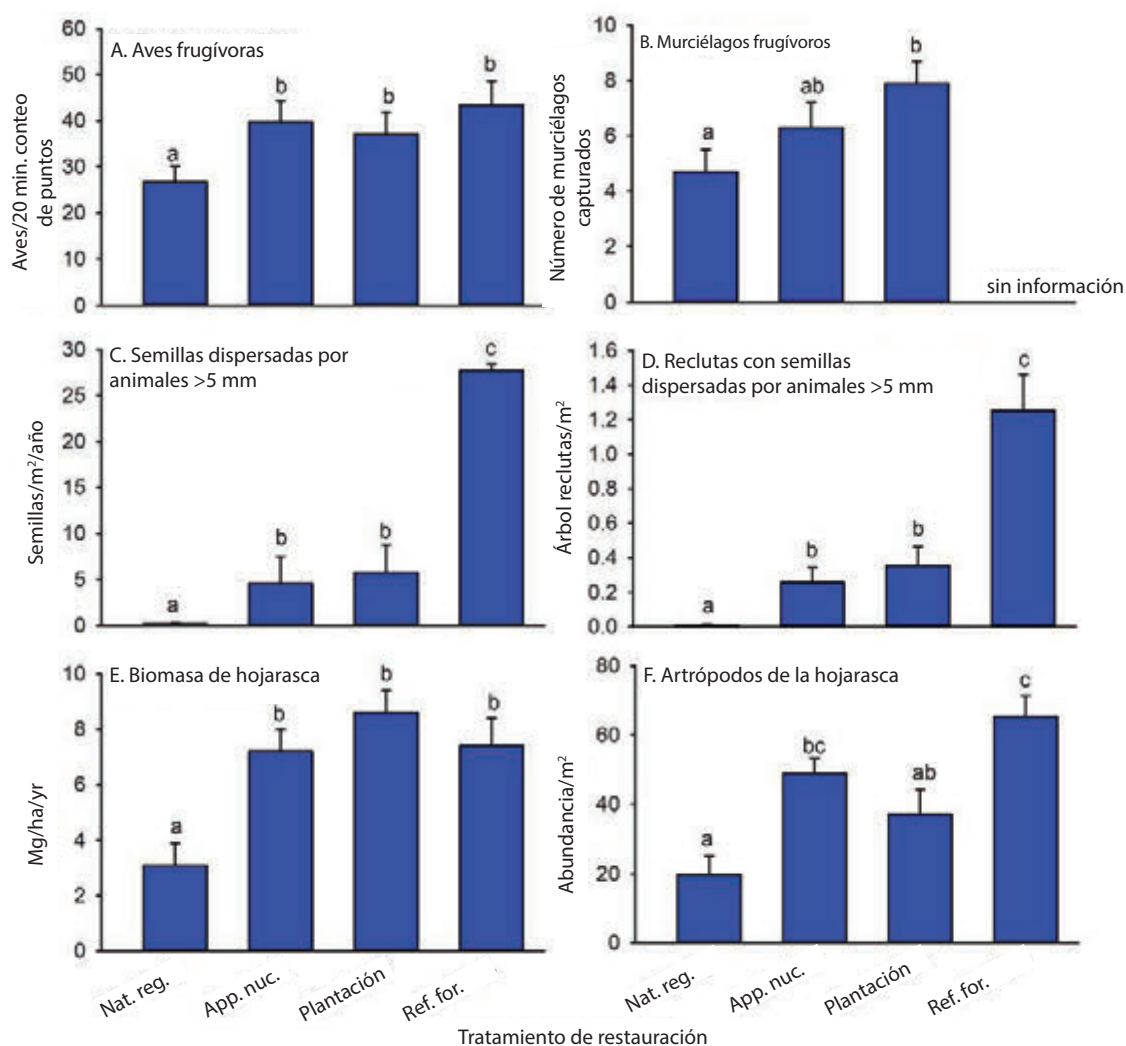


Figura 3: Modificado de Holl et al. (2020). Respuestas de variables ecológicas a tratamientos de restauración forestal. (A) Abundancia de aves frugívoras; (B) Abundancia de murciélagos frugívoros (C) Abundancia de semillas dispersadas por animales >5 mm (D) Abundancia de reclutas con semillas dispersadas por animales >5 mm; (E) Biomasa de hojarasca (F) Artrópodos de hojarasca en 2012. Los valores son $M \pm 1$ SE. Medias con la misma letra no difieren significativamente usando la prueba de comparación múltiple de Tukey entre tratamientos.

plantar solo el 27 % del número de plántulas de árboles en las parcelas de nucleación aplicada, la cobertura de dosel >2 m había aumentado sustancialmente hasta el $45,5 \pm 9,0$ % en estas parcelas, en comparación con el $14,2 \pm 6,1$ % en las parcelas de regeneración natural y el $78,2 \pm 9,1$ % en las plantaciones. parcelas después de 7-9 años.

Lecciones aprendidas: En general, este estudio demostró que la nucleación aplicada puede mejorar el reclutamiento de árboles y la diversidad de especies en comparación con la regeneración natural, con resultados ecológicos similares a la plantación de árboles estilo plantación, pero a un costo mucho menor. Se encontró que la cubierta forestal circundante tiene poco efecto en el reclutamiento y, en cambio, las condiciones locales del sitio se consideraron un factor más importante, lo que indica que la nucleación aplicada podría ser potencialmente efectiva

en diferentes contextos paisajísticos (Holl et al. 2017).

Si bien es ecológicamente eficaz, algunos terratenientes percibieron la nucleación aplicada y la regeneración natural como un uso de la tierra "desordenado" y no tan "productivo" como la plantación de árboles en toda el área. Tuvimos que estar atentos para evitar la entrada de ganado, particularmente en las parcelas de regeneración natural y nucleación aplicada, donde los agricultores percibían que la hierba más abundante no se usaba. Por lo tanto, la nucleación aplicada es probablemente más apropiada en grandes propiedades que están designadas con fines de conservación y requerirá discusiones extensas con los propietarios para utilizarlas en los paisajes de trabajo.

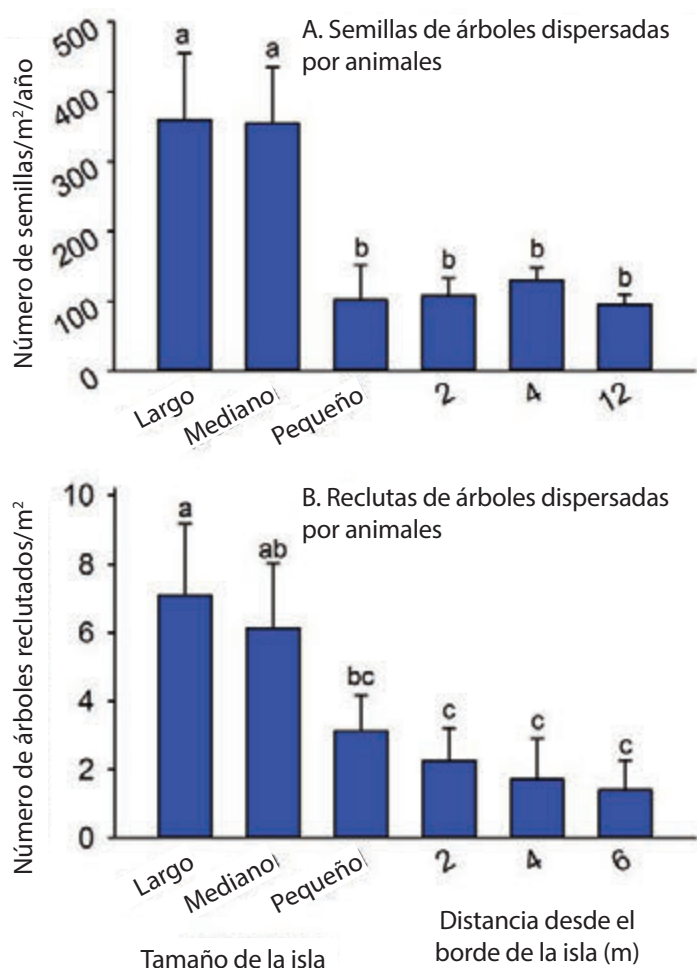


Figura 4: Modificado de Holl et al. (2020). Número de (A) semillas dispersadas por animales, (B) árboles reclutados.

Para obtener más información y publicaciones, visite holl-lab.com/tropical-forests.html y puede ver el video del proyecto en [inglés](#) o [español](#)

Referencias:

Holl, K. D., Zahawi, R. A., Cole, R. J., Ostertag, R., & Cordell, S. (2011). Plantación de plántulas en islas de árboles frente a plantaciones como estrategia de restauración de bosques tropicales a gran escala. *Ecología de la Restauración*, 19(4), 470–479. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00674.x>

Holl, K. D., Reid, J. L., Chaves-Fallas, J. M., Oviedo-Brenes, F., & Zahawi, R. A. (2017). Las estrategias locales de restauración de bosques tropicales afectan el reclutamiento de árboles más fuertemente que la cobertura forestal del paisaje. *Revista de Ecología Aplicada*, 54(4), 1091–1099. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12814>

Holl, K. D., & Zahawi, R. A. (2018). La nucleación aplicada es un enfoque de restauración forestal sencillo y rentable: Reply to Ramírez-Soto et al. (2018). *Ecología de la restauración*, 26(4), 618–619. <https://doi.org/10.1111/rec.12701>

Holl, K. D., Reid, J. L., Cole, R. J., Oviedo-Brenes, F., Rosales, J. A., & Zahawi, R. A. (2020). La nucleación aplicada facilita la recuperación de bosques tropicales: Lecciones aprendidas de un estudio de 15 años. *Revista de Ecología Aplicada*, 57, 2316–2328. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13684>

Reid, L. (2016, nov. 3). Islas de árboles para la restauración de bosques tropicales: el panorama es prometedor después de 10 años. *Historia Natural de la Restauración Ecológica*. <https://mbgecologicalrestoration.wordpress.com/2016/11/03/tree-islands-for-tropical-forest-restoration-the-outlook-is-rosy-after-10-years/>

Zahawi, R. A., & Augspurger, C. K. (2006). Restauración de Bosques Tropicales: Islas de árboles como focos de reclutamiento en tierras degradadas de Honduras. *Aplicaciones ecológicas*, 16(2), 464–478. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[0464:TFRTIA\]2.O.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[0464:TFRTIA]2.O.CO;2)

EJEMPLO DE CASO 2:

Nucleación para evaluar el efecto de la densidad de plantación y el tamaño de la hoja en la regeneración de la aulaga (*Ulex europaeus*) y el rendimiento de la plantación Iván Rodríguez (Universidad Distrital); Juan Garibello (Instituto Humboldt); Ángela Parrado (Universidad Distrital).

Contexto: El experimento se llevó a cabo en las colinas al este de Bogotá, Colombia, a 3200 m.s.n.m., en el ecotono entre el bosque nuboso montano alto y el matorral del Páramo bajo. La precipitación anual es de 1200 mm y los suelos son volcánicos. El sitio es propiedad del municipio pero fue ocupado ilegalmente para la producción de papa y ganado entre 2000 y 2012. Como resultado, hubo una fuerte invasión de aulagas (*Ulex europaeus*) en 19 Ha. Los objetivos de gestión incluyen eliminar los matorrales de aulagas en diferentes estados de desarrollo, mitigar la regeneración de aulagas, introducir vegetación nativa que pueda superar a las aulagas y facilitar la participación y el empoderamiento de los miembros de la comunidad local.

Implementación y diseño y costos de nucleación aplicada: Nuestro experimento se estableció en 2017. Antes de esto, a partir de 2012, el gobierno local había estado restaurando el sitio mediante la limpieza periódica de aulagas y la plantación de árboles nativos. Utilizamos la nucleación aplicada en base a su costo-efectividad, y al bajo rendimiento de los árboles previamente sembrados (en el patrón tradicional con cinco a diez metros entre individuos). El área de estudio cubrió 19 ha, y la nucleación

se aplicó en 5 ha e incluyó 200 "islas de árboles" o núcleos. Cada isla circular tenía 6 m de diámetro con una distancia de 6 a 10 m entre islas (Figura 1), y densamente arbolada. Instalamos seis réplicas de cada tratamiento con una combinación de dos factores: 1) densidad de plantación (1,1 m y 0,9 m de separación) y 2) composición del ensamble de especies según el tamaño de la hoja. La regeneración de aulagas puede verse afectada por plantaciones densas (Díaz & Vargas, 2009), por lo que probamos diferentes densidades de plantación: 0.9 y 1.1 m entre árboles plantados (Figura 2). La menor densidad utiliza un 33% menos de árboles y reduce los costos de implementación. Plantamos plántulas de árboles nativos proporcionadas por viveros locales administrados por el gobierno. Utilizamos el área o el tamaño de la hoja, evaluado inicialmente a simple vista, como indicador de otras características como el tamaño de la planta (Pérez-Harguindeguy et al., 2016), que a su vez podría estar relacionado con la capacidad competitiva (Reynolds, 1999). Se sembraron islas con tres tratamientos de tamaño de hoja: (1) especies de hojas grandes ($\approx 36,7$; S.E.= 4,7 cm²), (2) pequeñas especies con hojas ($\approx 3,2$; S.E.= 0,5 cm²) y (3) una combinación de ambas ($\approx 22,0$; S.E.= 2,6 cm²).



Figura 1: Vista panorámica de los núcleos y el sitio de estudio en el límite entre el casco urbano de Bogotá y sus cerros orientales (Foto de Iván Rodríguez en 2018 un año después de la plantación).

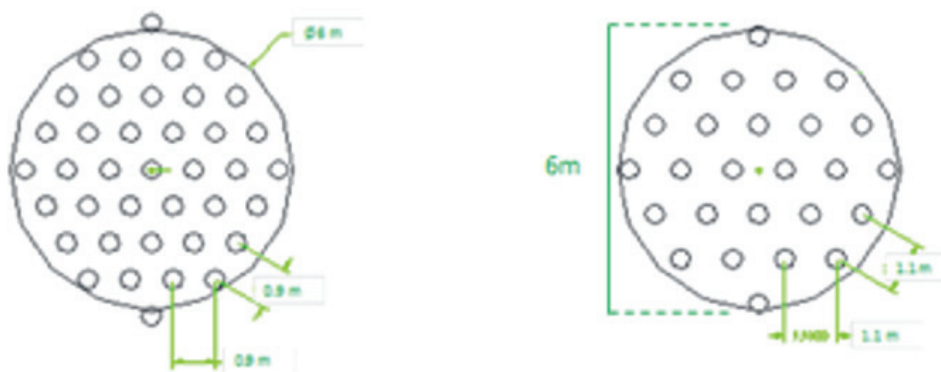


Figura 2: Diagrama de núcleos plantados. Izquierda. Núcleo de alta densidad (0,9 m entre plántulas). Derecha. Núcleo de menor densidad (1,1 m entre plántulas)

También establecimos parcelas de control donde no hubo siembra. Tanto en los sitios de control como en las islas de árboles, la aulaga se eliminó justo antes de la siembra, 15 meses después y dos años después del monitoreo. El costo de establecer 200 núcleos fue de aproximadamente US\$ 23.000. Esta cantidad incluye personal, propagación y transporte de árboles, pero no seguimiento.

Para implementar su Programa de Restauración en Bogotá, el gobierno local contrata a una población vulnerable que incluye minorías sin hogar, desempleadas, afro, indígenas y LGBT. Gracias a este enfoque, varias de las personas empleadas han obtenido títulos técnicos en temas ambientales para ascender dentro del Programa y avanzar en sus carreras.

Resultados: sociales y ecológicos Medimos la regeneración de aulagas, el reclutamiento de árboles y el rendimiento de los individuos plantados. Después de los análisis de datos con modelos lineales, a continuación se muestran los resultados ecológicos 24 meses después de la siembra:

- NA trabajó para aumentar el reclutamiento de árboles: los árboles jóvenes se reclutaron debajo de islas de árboles, pero no en áreas de regeneración natural.

- Diferentes tratamientos tuvieron diferentes niveles de reclutamiento de árboles y cobertura de pasto reducida: Los núcleos de alta densidad con especies de hojas grandes (= 23,7; S.E = 8,4) y los núcleos de baja densidad con combinación de tamaños de hojas (= 7,2; S.E = 2,9 brotes por núcleo) tuvieron la mayor abundancia de árboles reclutados. La cobertura de césped también se redujo entre un 11 y un 29 % en los núcleos plantados en comparación con la regeneración natural ($p < 0,0001$). Los controles de regeneración natural están co-dominados por pastos no nativos *Holcus lanatus* y *Pennisetum clandestinum*.
- Los árboles crecieron más altos en núcleos de menor densidad con especies de hojas más grandes (= 100,8; S.E = 9,6 cm) y fueron más bajos en núcleos densos con especies de hojas pequeñas (= 56,7; S.E = 2,9 cm). Los árboles en todos los demás tratamientos tenían una altura similar (= 75,6; S.E = 2,7 cm).³
- La NA aumentó el reclutamiento de aulagas en comparación con los controles de regeneración natural, probablemente porque la eliminación del pasto y la alteración del suelo para la plantación de

² después de regresión lineal con distribución binomial de errores

³ según comparaciones pareadas tras regresión lineal ($F=; 7,194 p<0,0001$).

árboles crearon condiciones favorables para las aulagas.

- De los tratamientos de NA, los núcleos con menor densidad y las especies de hojas pequeñas tienen el mejor potencial para mantener la regeneración de aulagas en niveles más bajos (Figura 3).
- La restauración en el área de estudio ha empleado aproximadamente a 120 personas de minorías vulnerables desde 2017. Treinta estudiantes de secundaria también participaron para desarrollar habilidades de investigación y compromiso con los temas ambientales (Figura 4), y más de 20 grupos de miembros de la comunidad local fueron capacitados para controlar aulagas fuera del área de estudio, y también para detectar y reportar incendios.

Desafíos y lecciones aprendidas: Asesoramiento basado en estos hallazgos para el trabajo futuro de NA.

- Los núcleos menos densos (densidad de plantación de 1,1 m) son mejores para controlar la regeneración de aulagas y tienen tasas de crecimiento de árboles más rápidas. Los núcleos menos densos también cuestan ~30 % menos que los núcleos más densos, pero debido a los impactos sociales positivos del esfuerzo, recomendamos plantar áreas más grandes con los mismos recursos. La regeneración de las aulagas fue menor en las especies de hojas pequeñas, pero las especies con hojas más grandes parecen crecer más rápido. Es necesario realizar un seguimiento adicional para determinar si existe un conjunto de especies ideal.
- Ocasionalmente se vieron vacas en los sitios; se necesitan negociaciones con algunos miembros de la comunidad local para detener la entrada de ganado.
- Por el impacto social de generar empleo a través de su programa de restauración, el gobierno de Bogotá recientemente

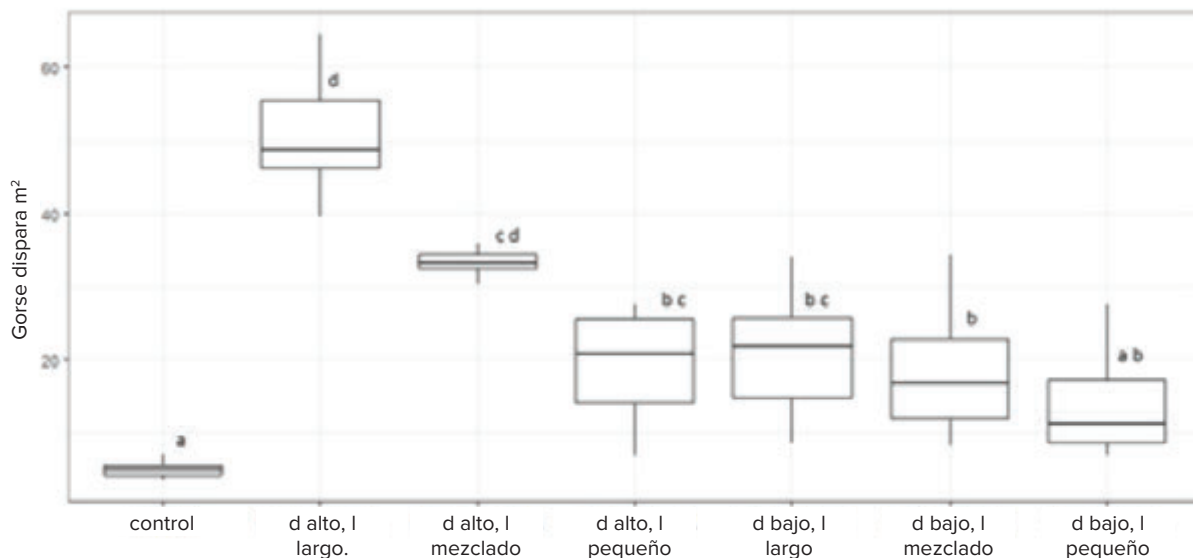


Figura 3: Diagrama de caja de la densidad de los brotes de aulaga en núcleos de control y sembrados dos años después de la siembra; En el eje horizontal, "d" representa la densidad y "l" representa las hojas de las plántulas plantadas; "mixto" es la combinación de ambos tipos de hojas. Las letras indican diferencias después de las comparaciones post hoc de la prueba de Tukey.

aumentó el apoyo financiero a las agencias ejecutoras del programa (Gobierno de Bogotá, 2020), manteniendo la tendencia de incrementos sostenidos desde que se creó el programa de restauración en el año 2000 (Murcia et al., 2017).

Referencias:

Díaz, A., & Vargas, O. (2009). Efecto de la siembra de leguminosas herbáceas y arbustivas sobre el control en el establecimiento de la especie invasora *Ulex europaeus* L.(Fabaceae), en los alrededores de Chisacá (localidad de Usme. Bogotá DC). In O. Vargas, O León & A Diaz (Eds.), *Restauración ecológica en zonas invadidas por retamo espinoso y plantaciones forestales de especies exóticas* (pp. 93-130). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Gobierno de Bogotá (2020). Proyecto de acuerdo no 123 de 2020 segundo debate. http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/edici_n_3001_pa_123_sd_de_2020.pdf

Murcia, C., Guariguata, M. R., Peralvo, M., & Gálmez, V. (2017). *La restauración de bosques andinos tropicales: Avances, desafíos y perspectivas del futuro*. Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR). <https://doi.org/10.17528/cifor/006524>

Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., Vos, A. C. de, ... Cornelissen, J. H. C. (2016). Corrección a: Nuevo manual para la medición estandarizada de rasgos funcionales de plantas en todo el mundo. *Revista australiana de botánica*, 64(8), 715–716. https://doi.org/10.1071/bt12225_co

Reynolds, H.L. (1999). Interacciones de plantas: Competencia. En: Pugnaire, FI & Valladares, F. (Eds.), *Manual de ecología vegetal funcional* (págs. 649–676). Marcel Dekker, Inc.



Figura 4: Estudiantes de secundaria plantando núcleos en el área de estudio. (Foto por Juan Garibello)

EJEMPLO DE CASO 3:

Nucleación aplicada para recuperar poblaciones de especies maderables localmente amenazadas Juan Garibello (Instituto Humboldt); Iván Rodríguez (Universidad Distrital); Ignacio Barrera (Universidad Javeriana).

Introducción y contexto: Se realizó una restauración en el bosque tropical montano bajo (1200-1350 msnm) en el lado occidental de la Serranía de Los Yárigües, Colombia, declarado Parque Nacional en 2005. La restauración fue parte de una compensación corporativa para la construcción de una represa hidroeléctrica en la Provincia de Santander en Colombia. La precipitación anual es de ~2.500 mm. Toda la región se vio fuertemente impactada por el conflicto entre guerrillas, grupos paramilitares y Fuerzas Oficiales. El terreno fue despejado en 1977 y se utilizó para la agricultura -cría de ganado y cultivos de cacao, café, aguacate y cítricos- hasta 2012 cuando el Servicio de Parques Nacionales compró la finca. De 2012 a 2014, el sitio se vio afectado por la caza furtiva y la tala ocasional.

Restauramos dos áreas diferentes: 1) antiguos campos (antiguos potreros), y 2) vegetación leñosa (en adelante bosque secundario) en diferentes estados de recuperación. Junto con la comunidad local, establecimos dos objetivos principales: 1) Recuperar poblaciones de especies amenazadas por la tala (en bosques) y 2) en los antiguos campos, establecer un bosque secundario completamente funcional para el 2025. Comparamos el desempeño de tres especies arbóreas amenazadas en bosque secundario y en núcleos plantados en campos antiguos. Elegimos la nucleación en lugar de un patrón de plantación tradicional principalmente porque era una forma más rentable de superar a los pastos no nativos a través de la generación rápida de un dosel denso.

Implementación, diseño y costos de nucleación aplicada: El proyecto se implementó entre 2014 y 2016, en dos sitios ubicados en la misma cuenca. Una ONG con sede en Bogotá estuvo a cargo de la implementación bajo la supervisión del Servicio de Parques Nacionales y la empresa responsable de la compensación. Las

comunidades locales fueron contratadas de acuerdo con las políticas gubernamentales para la siembra, la recolección de semillas y la producción de plántulas, pero se unieron al proyecto antes para reconstruir la historia del uso de la tierra y definir las prioridades y estrategias de restauración.

Establecimos 48 núcleos en un campo antiguo (11 - 13 ha) rodeado de bosque secundario y maduro. Los núcleos fueron círculos de 25 m de diámetro (área de 491 m²), sembrados con 567 plántulas de 9 a 12 especies y colocados a una distancia de 30 a 40 metros. Los árboles plantados se espaciaron a 1 m de distancia para crear rápidamente una cubierta de dosel que pudiera superar a los pastos no nativos *Megathyrsus maximus* y *Brachiaria radicans*. El 96% de las plántulas fueron especies pioneras; el 4% restante eran especies comúnmente taladas que los lugareños identificaron como amenazadas por la sobreexplotación. Los pastos se limpiaron antes de plantar y una vez al mes durante tres meses después de la plantación (Kettenring & Adams, 2011; Gaertner et al., 2012; consejo de miembros de la comunidad). Plantamos diferentes especies en cuatro tipos diferentes de núcleos: Tipo 1: especies abundantes en los bordes y claros de los bosques; Tipo 2 - arbolitos que comúnmente colonizan campos viejos; Tipo 3: árboles de Fabaceae que se encuentran comúnmente en bosques secundarios; y Tipo 4 - (mixto) que combina especies de todos los demás (Cuadro 1). En los bosques secundarios también se sembraron especies amenazadas a 10 m de distancia en hileras monoespecíficas. La implementación de todo el proyecto fue de US \$ 824 440 (alrededor de \$ 2550/ha) (tipo de cambio de moneda US \$ 1 = 3748 pesos colombianos; 323 ha; plantación de 102 000 plántulas). El monitoreo fue de aproximadamente US\$51,500.

	Núcleos 1	Núcleos 2	Núcleos 3	Núcleos mixtos
Especies pioneras	<i>Heliocarpus americanum</i> (tr) <i>Solanum aphyodendrum</i> (tl) <i>Urera bacciferat</i> (tl)	<i>Miconia</i> sp. (tl) <i>Piper aduncum</i> (tl) <i>Vismia bacciferat</i> (tl)	<i>Erythrina poeppigiano</i> (tr) <i>Inga marginata</i> (tr) <i>Inga</i> sp. (tr)	Especies incluidas en todos los demás núcleos
Especies objetivo		<i>Carapa</i> cf. <i>guianensis</i> (tr) <i>Caryodaphnopsis</i> sp. (tr) <i>Margaritaria nobilis</i> (tr) <i>Matisia</i> cf. <i>cordata</i> (tr) <i>Nectandra</i> sp. (tr) <i>Tabebuia rosea</i> (tr)		

Tabla 1: Conjuntos de especies que forman diferentes tipos de núcleos en el área de estudio. (tr) significa árboles y (tl) significa arbolitos.

Resultados: sociales y ecológicos:

- 19 a 26 meses después de la siembra, los núcleos con copas formados principalmente por *Heliocarpus americanus* y los núcleos co-dominados por árboles de Fabaceae (*Inga marginata*, *Inga* sp. y *Erythrina poeppigiana*) fueron más efectivos para facilitar la supervivencia de nuestra especie objetivo en comparación con los núcleos formados por arbolitos, los cuales comúnmente colonizan campos viejos (*Miconia* sp., *Piper aduncum*, *Vismia baccifera* entre otros) y núcleos incluyendo todas las especies mencionadas (Cuadro 2).
- La supervivencia de las especies objetivo (*Carapa* cf. *guianensis*, *Margaritaria nobilis* y *Nectandra* sp.) fue similar entre los núcleos exitosos y el bosque secundario, pero los núcleos promovieron un crecimiento más rápido (Figura 1).
- El proyecto que incluye estos resultados involucró a 121 personas de las comunidades locales. Su participación en la selección de especies de plantas y el diseño de estrategias de restauración fue una parte clave del éxito del proyecto (Figura 2).

Desafíos y lecciones aprendidas:

Asesoramiento basado en estos hallazgos para el trabajo futuro de NA.

- La plantación de núcleos con especies de árboles altos y de rápido crecimiento funcionó mejor que las especies que colonizan campos antiguos y promueven la supervivencia y el crecimiento de las especies objetivo.
- Tamaño de núcleos de 25 m de diámetro, densidad de plantación de 1 m entre árboles y varios desmontes de especies invasoras dieron buenos resultados.
- Los bosques secundarios son adecuados para promover la supervivencia pero no el crecimiento de nuestras especies objetivo. Sin embargo, sostenemos que también se debe incluir esta vegetación para recuperar poblaciones de este tipo de especies como una forma de contribuir al funcionamiento del bosque.

Un video en español que describe el proyecto está disponible en https://youtu.be/k7_jvheKXR0

Referencias:

Gaertner, M., Fisher, J., Sharma, G., & Esler, K. (2012). Perspectivas sobre la ecología de la invasión y la restauración: Es hora de colaborar hacia un enfoque holístico para abordar las invasiones biológicas. *NeoBiota*, 12, 57–76. <https://doi.org/10.3897/neobiota.12.2123>

Kettenring, K. M., & Adams, C. R. (2011). Lecciones aprendidas de los experimentos de control de plantas invasoras: Una revisión sistemática y metanálisis. *Revista de Ecología Aplicada*, 48(4), 970–979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.01979.x>

	Bosque secundario	Núcleos 1	Núcleos 2	Núcleos 3	Núcleos mixtos
<i>Carapa cf. guianensis</i>	0,87 (30)	1,00 (20)	0,56 (16)	1,00 (20)	0,40 (20)
<i>Margaritaria nobilis</i>	0,67 (30)	1,00 (20)	0,60 (40)	1,00 (20)	0,48 (40)
<i>Nectandra sp.</i>	0,87 (30)	1,00 (20)	0,45 (40)	1,00 (20)	0,55 (40)
Total	0,80 (90)	1,00 (60)	0,53 (96)*	1,00 (60)	0,49 (100)**

Tabla 2. Fracción de árboles sobrevivientes de especies localmente amenazadas en diferentes tipos de vegetación y número de lugares de plantación evaluados (entre paréntesis) dos años después de la plantación. * = $p < 0.05$ y ** = $p < 0.01$ después de una regresión lineal con distribución binomial de errores en la que se comparó la supervivencia en bosque secundario con la supervivencia en cada tipo de núcleo establecido en un campo de 10 ha de edad.

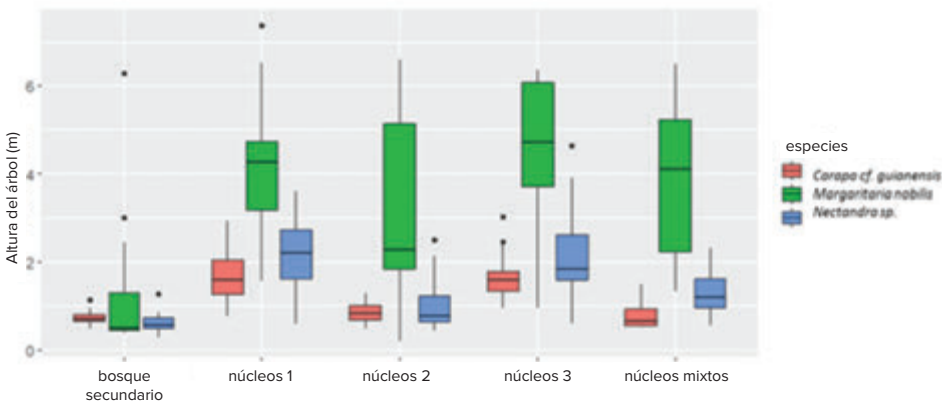


Figura 1: Diagrama de caja con altura de árboles de especies localmente amenazadas en bosque secundario y diferentes tipos de núcleos diferenciados por composición. Los árboles de los núcleos 1 y 3 son más altos que los árboles del bosque secundario según la regresión lineal (valores de $p < 0,0001$) después de dos años de plantación.



Figura 2: Miembros de la comunidad local procesando semillas y seleccionando especies para la restauración de especies localmente amenazadas. (Fotos de Angélica)

EJEMPLO DE CASO 4:

Nucleación aplicada para restaurar el bosque de ribera en la Granja Escuela de la Universidad de Maranhão, Brasil Guillaume Xavier Rousseau¹ y Danielle Celentano^{1,2}

Contexto: Este caso describe los esfuerzos de nucleación aplicados por la Universidad Estatal de Maranhão, São Luís, Estado de Maranhão, Brasil. El clima es tropical con verano seco (As) y la cubierta forestal original es selva amazónica ribereña abierta. Sin embargo, el río Paciência no es permanente en el sitio desde la década de 1980. Históricamente, la tierra se utilizó para la agricultura itinerante, pero se convirtió en agricultura intensiva desde 1985 hasta 2004, lo que eliminó la vegetación forestal y degradó el suelo. De 2005 a 2012, la tierra fue abandonada y la regeneración forestal espontánea se intercaló con pasto y se quemó accidentalmente cada dos años. El estado de Maranhão tiene un déficit de cobertura forestal de un millón de hectáreas según el código forestal de Brasil (Gobierno Federal de Brasil, 2012; Soares et al., 2014) y los bosques ribereños están muy degradados, lo que conduce a la degradación de suelos y ríos, y a la escasez de agua (Silva Junior et al., 2020). La restauración de la cubierta forestal en la región es vital, pero faltan técnicas adaptadas localmente, en particular técnicas de bajo costo para los pequeños agricultores. Este proyecto tenía como objetivo probar métodos de restauración adaptados a la región que también podrían ser atractivos para los pequeños agricultores.

Implementación y diseño de nucleación

aplicada: La nucleación aplicada (NA) se aplicó en un área de 0,54 ha, junto con el tratamiento del Sistema Agroforestal (AFS) y las parcelas de Regeneración Natural (RN) de control en un diseño de bloques completos con seis repeticiones (un total de 18 parcelas, 0,09 cada una, 1,6 Ha totales) (Fig. 1). El AFS tenía como objetivo imitar la sucesión natural con una mezcla de cultivos agrícolas anuales y arbustos y árboles perennes de interés para los agricultores locales (Celentano et al., 2020), identificados a través del trabajo

en parcelas cercanas de AFS en las fincas, donde los pequeños agricultores participaron en el diseño de la restauración y elección de especies. Esta asociación permitió el intercambio de conocimientos y mejoró las iniciativas científicas y de los agricultores.

El sitio tenía un gradiente heterogéneo de regeneración natural (Fig. 1b), y las islas de árboles se colocaron a una distancia regular (20 m) en áreas con baja y alta regeneración natural. Las parcelas de NA se distribuyeron aleatoriamente en los 6 bloques del experimento y consistieron en cuatro islas de árboles (2 m de diámetro) con 13 plántulas separadas por 0,5 m y dispuestas en cruz. *Ceiba pentandra* (*Ceiba*) siempre se plantó en el centro (Fig. 2). Otras especies plantadas fueron: *Handroanthus* sp., *Anacardium occidentale* (Cashew), *Moringa oleifera* (*Moringa*), *Gustavia augusta* (*Jeniparana*), *Hancornia speciosa* (*Mangaba*), *Inga edulis* (*Inga*), *Schizolobium amazonicum* (*Paricá*), *Mimosa caesalpinifolia* (*Sabiá*), *Samanea tubulosa* (*Bordão de velho*), *Talisia esculenta* (*Pitomba*), *Cajanus cajan* (*Guandu*), *Bixa orellana* (*Urucum*) y *Manihot esculentum* (*Manihot*) se sembraron como semillas o esquejes para proteger las plántulas y producir mantillo. Las islas se deshieron dos veces al año durante tres años después de la siembra. Las parcelas de control (tratamiento RN) solo se mantuvieron mediante la exclusión del ganado y el cortafuegos se mantuvo durante todo el experimento (Fig. 1). Ya no existen sitios de referencia de bosques primarios en la isla de São Luís, y no se habían inventariado los parches de crecimiento antiguo existentes (Serra et al., 2016).

¹ Programa de Posgrado en Agroecología (PPGAgroecologia), Universidad Estadual de Maranhão (UEMA), Av. Lourenço Vieira da Silva, 1000, Jardim São Cristóvão, 65055-310, São Luís, MA, Brazil.

² Conservación Internacional Brasil

Resultados sociales y ecológicos: A pesar de tres incendios accidentales y una alta mortalidad de plántulas (70 %), el experimento fue un "éxito": NA permitió un rápido restablecimiento de la vegetación nativa (Fig. 1 y 2). AN acumuló 11 (\pm 8) t.Ha de carbono en biomasa (2012-2018) y tuvo mayor riqueza de plantas (árboles y arbustos) (media 12 \pm 2 sp. por parcela) que RN (4 \pm 2) o AFS (8 \pm 3). La nucleación proporcionó tanto restauración estructural como enriquecimiento de especies. La NA tuvo un mayor impacto en términos de recuperación forestal en áreas donde había ocurrido poca regeneración natural, pero también aumentó la riqueza de especies en áreas con mayor regeneración natural. Los resultados del experimento de restauración han atraído mucho interés recientemente y se han publicado en proyectos de pregrado, MSc. tesis y un artículo científico (Celentano et al., 2020). El sitio es visitado regularmente por estudiantes, agentes gubernamentales, agricultores y organizaciones de la sociedad

civil. El principal resultado del proyecto es la reaparición de un manantial permanente en 2017 en el antiguo curso del río que atraviesa el área en restauración.

Lecciones aprendidas: Asesoramiento basado en estos hallazgos para el trabajo futuro de NA. NA cumplió diferentes funciones según el grado de regeneración antes de la implementación. Donde había habido un RN bajo inicialmente, las islas ayudaron a establecer la estructura y diversidad de la vegetación, pero en áreas con más RN su principal efecto fue el enriquecimiento. En los esfuerzos de restauración a gran escala, la elección de especies debe ajustarse para considerar la heterogeneidad del área a restaurar. A menudo se presenta un gradiente natural o parches de regeneración natural irregulares, así como una pequeña variación topográfica que afecta el desarrollo de las plántulas. Considerar la variaciones espaciales y ajustar la elección de las especies y el

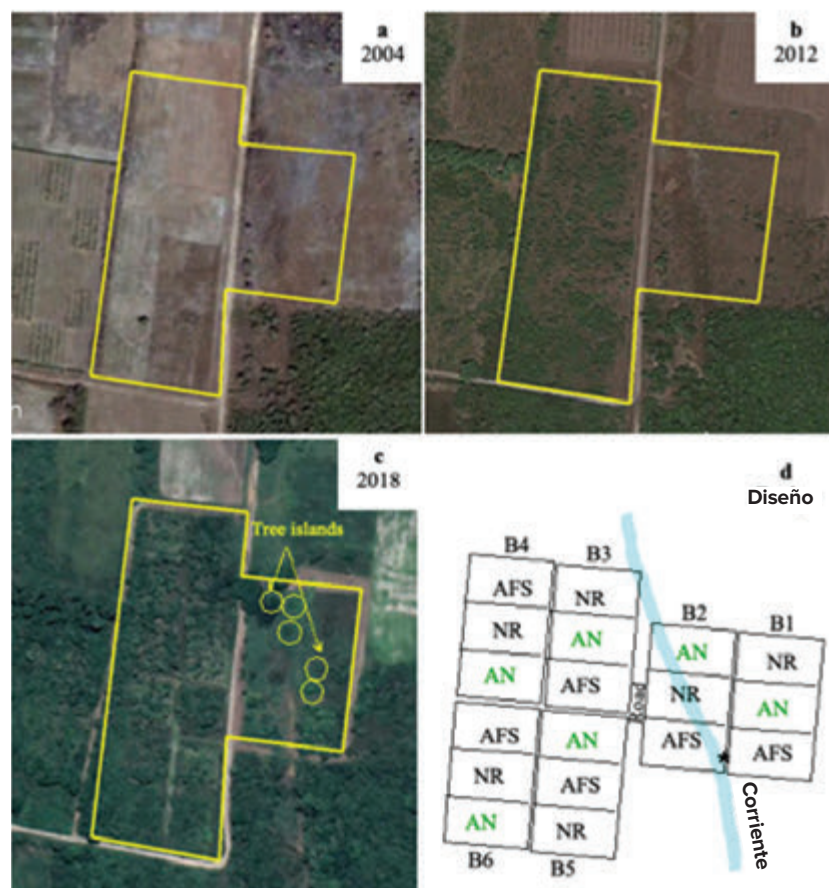


Figura 1: Cobertura del suelo del sitio experimental: a) 2004 último uso agrícola; b) instalación del experimento 2012; c) último seguimiento 2018; d) diseño experimental con ubicación de arroyo y manantial recién nacido (*) (Nucleación Aplicada=AN, Sistemas Agroforestales=AFS, Regeneración Natural=NR).

diseño de la plantación a ellas optimizaría los resultados y, por lo tanto, reduciría los costos totales. La Nucleación Aplicada está particularmente bien adaptada para este propósito, ya que las islas de árboles se pueden colocar fácilmente y la composición de especies se puede ajustar.

Controlar el ganado y el fuego fueron los mayores desafíos en general. Incluso dentro de la Escuela, la comunidad no estaba de acuerdo con las medidas de conservación y restauración. Es clave involucrar a las comunidades vecinas tanto como sea posible en los primeros pasos del diseño e instalación del proyecto. El interés de la comunidad también está directamente relacionado con la evidencia para respaldar el éxito de la restauración: mostrar los resultados iniciales es importante pero reconocer que el trabajo continuará para innovar y cambiar.

Referencias:

Gobierno Federal de Brasil. (2012). Ley Federal n.12.651, de 25 de mayo de 2012. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm

Celentano, D., Rousseau, G. X., Paixão, L. S., Lourenço, F., Cardozo, E. G., Rodrigues, T. O., e Silva, H. R., Medina, J., de Sousa, T. M. C., Rocha, A. E., & de Oliveira Reis, F. (2020). Secuestro de carbono y ciclo de nutrientes en

sistemas agroforestales en suelos degradados de la Amazonía oriental, Brasil. *Sistemas Agroforestales*, 94(5), 1781–1792. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00496-4>

Serra, F. C. V., Lima, P. B., Almeida Jr, E. B. de, Serra, F. C. V., Lima, P. B., & Almeida Jr, E. B. de. (2016). Riqueza de especies en la vegetación de restinga en el este del estado de Maranhão, noreste de Brasil. *Acta Amazonica*, 46(3), 271–280. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201504704>

Silva Junior, C. H. L., Celentano, D., Rousseau, G. X., de Moura, E. G., Varga, I. van D., Martinez, C., & Martins, M. B. (2020). Selva amazónica al borde del colapso en el estado de Maranhão, Brasil. *Política de uso del suelo*, 97, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104806>

Soares-Filho, B., Rajão, R., Macedo, M., Carneiro, A., Costa, W., Coe, M., Rodrigues, H., & Alencar, A. (2014). Descifrando el Código Forestal de Brasil. *Ciencia*, 344(6182), 363. <https://doi.org/10.1126/science.1246663>



Figura 2: Desarrollo de isla de árboles con diferentes aperturas de dosel: a) dosel abierto 2016; b) marquesina semicerrada 2016; c) copa abierta 2018; d) marquesina semicerrada 2018.

EJEMPLO DE CASO 5:

Adaptación de la nucleación aplicada a la amenaza de incendios forestales en el este de Madagascar. J. Leighton Reid (Escuela de Plantas y Ciencias Ambientales, Virginia Tech); Donald Matthew Hill (Restauración Green Again, Departamento de Recursos Forestales, Universidad de Minnesota); Jean François Solofoniaina Fidy (Grupo de Fauna y Flora de Madagascar Parc Ivoloïna); Lee Frelich (Departamento de Recursos Forestales, Universidad de Minnesota); Rebecca Montgomery (Departamento de Recursos Forestales, Universidad de Minnesota).

Contexto: Las necesidades de restauración de Madagascar son agudas. Esta isla tropical es más pequeña que Texas pero alberga el 5% de las especies conocidas del mundo, el 90% de las cuales no se encuentran en ningún otro lugar de la Tierra. La deforestación es rampante en la estrecha franja de selva tropical en el tercio oriental de la isla. Si la deforestación continúa al ritmo actual, no habrá selva tropical fuera de las áreas protegidas para 2080. Uno de los desafíos críticos para la restauración forestal en Madagascar es la escasez de recursos. Madagascar se encuentra entre los países económicamente más pobres del mundo. Los administradores de tierras están interesados en estrategias de restauración como la nucleación aplicada que pueden reducir los costos del proyecto.

Nuestro proyecto de restauración se realizó en la costa este de Madagascar, 14 km al noroeste de la ciudad de Toamasina (-18.051966° lat, 49.350280° lon). Este sitio se encuentra dentro de la distribución histórica de la selva tropical de tierras bajas, que hasta hace poco cubría la costa este de la isla. La precipitación anual en el cercano aeropuerto de Toamasina oscila entre 3,0 y 3,5 m por año, con las precipitaciones más intensas entre febrero y abril durante la temporada de ciclones. La temperatura media anual es de 24°C con fluctuaciones estacionales menores. La topografía regional consiste en colinas repetidas de 100 m con pendientes de hasta 50°. Los suelos son de arcilla roja ferralítica intercalados con cantos rodados de granito.

Nuestros objetivos eran: (1) restaurar el bosque nativo en cuatro hectáreas de tierra que había sido degradada por repetidos incendios forestales como resultado del tavy, una forma de agricultura de tala y quema, y (2) estudiar la capacidad de los árboles nativos para suprimir la vegetación ruderal, particularmente el

helecho *Dicranopteris linearis*. Seleccionamos un diseño de nucleación aplicada porque era menos costoso y porque conducía a la replicación de parcelas que queríamos para nuestro experimento.

Implementación y diseño de nucleación aplicada:

Este proyecto fue implementado por una organización sin fines de lucro, Green Again Restoration, en la tierra privada del coautor Jean François Solofoniaina Fidy, el líder de Ambonivato fokontany (región de pequeñas aldeas). Jean François buscó a Green Again para restaurar su tierra porque quería crear un ejemplo positivo que inspirara a otros aldeanos a restaurar su propia tierra familiar. Esto demostró ser una estrategia eficaz. Ahora hay en docenas de proyectos de restauración en Ambonivato fokontany.

La población local participó en todos los aspectos del proyecto, desde la conceptualización hasta la implementación, el seguimiento y la interpretación. Las semillas se recolectaron de árboles en granjas locales. Equipos de madres solteras de Ambonivato realizaron el deshierbe y el riego de los viveros mientras sus hijos estaban en la escuela. Los hombres jóvenes de la aldea despejaron la tierra y plantaron árboles, y las mujeres locales hicieron las etiquetas de identificación de los árboles. Las mediciones y la entrada de datos fueron realizadas por los aldeanos locales. DMH vivió en Ambonivato durante cuatro años durante este proyecto, y su rol se limitó a la educación, verificación de datos y control de calidad.

Nuestro sitio era un campo de cuatro hectáreas en una pendiente empinada orientada al sureste, con una elevación que oscilaba entre 30 y 70 metros sobre el nivel del mar. Los aldeanos locales prepararon los sitios de plantación limpiando la vegetación solo en las áreas donde se iban a plantar árboles (Fig. 1). La vegetación circundante consistía principalmente en un helecho (*Dicranopteris linearis*) y palmera del viajero (*Ravenala madagascariensis*). Posteriormente plantaron 160 islas de árboles de 16 m² cuadrados. Cada isla de árboles constaba de 25 plántulas de una sola especie de árbol plantadas a 1 m de distancia en una cuadrícula de 5 x 5. Se plantaron un total de 4.000 árboles. Las especies de árboles incluyeron 11 especies nativas cuyas semillas fueron recolectadas localmente y propagadas en un vivero. El costo aproximado de la preparación del sitio y la plantación de árboles fue de \$1 USD por árbol (es decir, alrededor de \$4000 en total, o \$1000 por hectárea).

Resultados sociales y ecológicos: Nuestro proyecto fue plantado entre junio y septiembre de 2016. El 14 de octubre, un incendio forestal arrasó el sitio (Fig. 2). Inspeccionamos cada plántula y desarrollamos un índice de intensidad del fuego basado en la extensión del daño a las etiquetas de plántulas de



Figura 1: Los aldeanos de Ambonivato establecen una plantación de nucleación aplicada en un denso matorral de helechos. La palmera del viajero (*Ravenala madagascariensis*) es la planta de hoja grande en la parte posterior derecha. Tanto el helecho como la palma son altamente inflamables. Las posiciones de plantación están marcadas con estacas de madera, que luego se usaron para crear un índice estándar de intensidad del fuego. Foto de D. M. Hill.

plástico, postes de madera y etiquetas de parcela de aluminio. Después de varios meses, volvimos a visitar el sitio e inspeccionamos cada posición de plantación para buscar evidencia de rebrote de plántulas.

De los 4.000 árboles plantados, 379 (9,5%) sobrevivieron al incendio forestal. El porcentaje de supervivencia varió entre especies de 0% a 18% (Fig. 3). Los árboles en las esquinas y los bordes de las plantaciones de nucleación aplicada estuvieron expuestos al fuego más intenso, y la supervivencia fue más baja para los árboles plantados en esas posiciones. La supervivencia fue hasta cinco veces mayor para los árboles plantados en el núcleo de la isla.

Una de las lecciones clave de este proyecto es que las plantaciones de nucleación aplicada son particularmente vulnerables a los incendios forestales debido a su mayor densidad de bordes (por ejemplo, hay más bordes por área de bosque que en una plantación más continua). *Dicranopteris* helechos y su paja formaron la matriz entre las islas de árboles en nuestras plantaciones. Este techo de paja era altamente inflamable y, como resultado, las plántulas de árboles plantadas en los bordes de las islas sufrieron mayores daños durante el incendio forestal que las plántulas de árboles situadas en el centro de las islas.



Figura 2: Un incendio forestal que arrasó el sitio de restauración en octubre de 2016. Mató el 91,5% de las plántulas de árboles plantadas y reveló una vulnerabilidad clave de la nucleación aplicada. Foto de D. M. Hill.

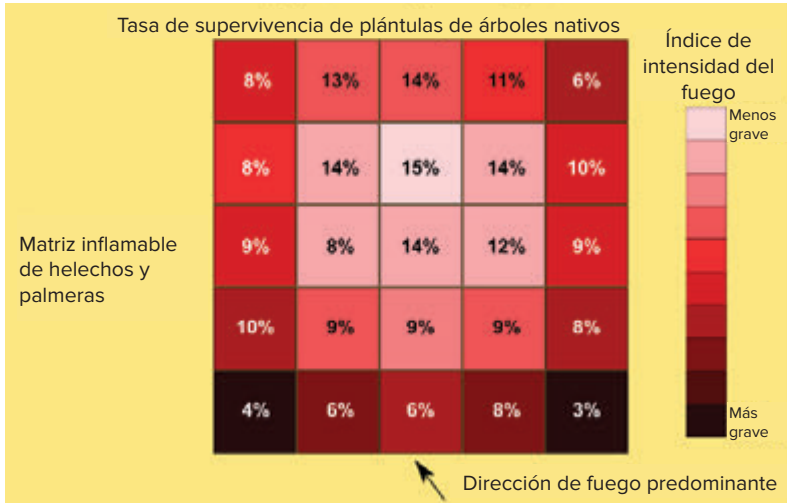


Figura 3: Promedio de supervivencia de plántulas de árboles e intensidad del fuego en 160 plantaciones de nucleación aplicada en nuestro sitio en el este de Madagascar. Las posiciones de plántulas más peligrosas fueron las esquinas y los bordes de las plantaciones de nucleación aplicada.

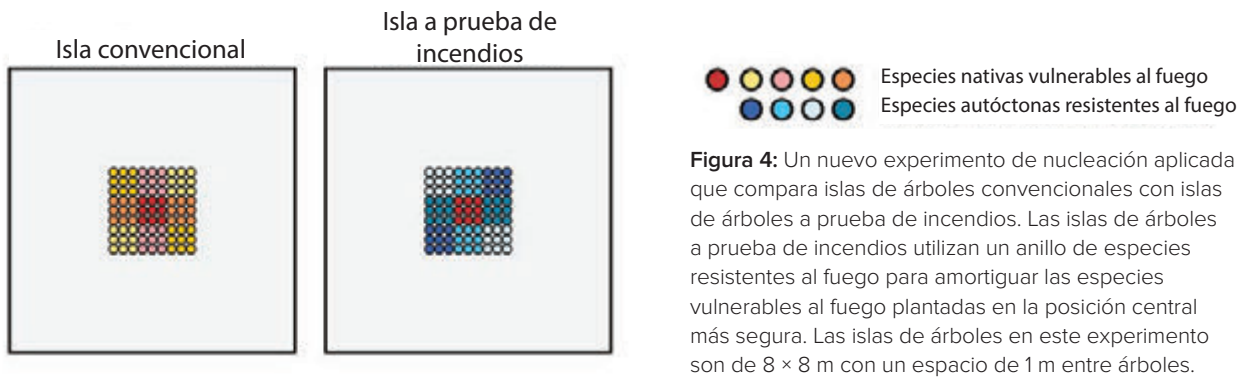


Figura 4: Un nuevo experimento de nucleación aplicada que compara islas de árboles convencionales con islas de árboles a prueba de incendios. Las islas de árboles a prueba de incendios utilizan un anillo de especies resistentes al fuego para amortiguar las especies vulnerables al fuego plantadas en la posición más segura. Las islas de árboles en este experimento son de 8 × 8 m con un espacio de 1 m entre árboles.

Para corregir este problema, ahora estamos probando islas de árboles a prueba de incendios (Fig. 4). Las islas seguras contra incendios tienen árboles resistentes al fuego plantados en la frontera, donde vimos que la intensidad del fuego fue más severa. Las especies de árboles que son sensibles al fuego se plantan en el centro de la isla, donde se protegerán de las temperaturas más altas. Hemos plantado más de dos docenas de sitios comparando islas de árboles convencionales con islas a prueba de incendios. Esperamos que los incendios forestales demuestren pronto si las islas seguras contra incendios son más resistentes a esta perturbación común. También recomendamos que cuando exista riesgo de incendios forestales, los profesionales consideren mantener franjas de protección sin vegetación alrededor de todo el sitio (no islas individuales) para minimizar el riesgo de pérdida de árboles por incendios forestales.

EJEMPLO DE CASO 6:

Comparación de tres diseños de plantación de árboles para la restauración del bosque atlántico en Brasil

Pedro H. S. Brancalion¹ & Karen D. Holl²

¹Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidad de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil

²Departamento de Estudios Ambientales, Universidad de California, Santa Cruz, CA 95064, EE. UU.

Contexto: Este ejemplo de caso de nucleación consiste en un proyecto de investigación establecido en la Estación Experimental de Ciencias Forestales de Itatinga de la Universidad de São Paulo, ubicada en Itatinga-SP, Brasil. La región tiene una temperatura media anual de 17°C, veranos húmedos y cálidos, inviernos secos y fríos, precipitación anual de ~1200 mm y déficit hídrico anual de 20 mm. El suelo se caracteriza como Latossol Distrófico Amarillo, con bajo contenido de nutrientes y pH, y textura arenosa. La vegetación natural es un ecotono entre los bosques semidecíduos estacionales (Bosque Atlántico) y los bosques de sabana (Cerrado), ambos puntos críticos para las prioridades globales de conservación. El sitio de estudio no está legalmente protegido y estuvo cubierto por un monocultivo de eucaliptos durante los últimos 70 años. Establecimos este experimento para probar la eficacia de la nucleación a escalas operativas y el uso de franjas (en lugar de las "islas" tradicionales) para distribuir árboles en el sitio de restauración.

Implementación y diseño de nucleación

aplicada: Los árboles se plantaron en franjas (3-4 líneas de árboles) similar a una plantación estilo plantación, pero dejando franjas sin plantar entre las líneas para recolonizar de forma natural. Esto es similar a un enfoque de tala en franjas que facilita la regeneración natural y la supervivencia y el crecimiento de algunas especies nativas plantadas (Ashton et al., 1998; Rondon et al., 2009). Tiene algunos beneficios potenciales: al igual que la nucleación aplicada, la siembra en franjas debería resultar en costos reducidos para plantar y

mantener las plántulas plantadas, y podría proporcionar una mayor heterogeneidad del hábitat al proporcionar áreas plantadas y no plantadas. Además, presenta menos obstáculos logísticos para plantar y encontrar plántulas para el mantenimiento, ya que volver a encontrar parches de islas de árboles recién plantados puede ser un desafío en áreas con pastizales densos (Holl et al., 2020). Además, muchas áreas que deben restaurarse según el código forestal brasileño son zonas de amortiguamiento ribereñas: la plantación en franjas puede ser adecuada para este contexto. Sin embargo, no tenemos conocimiento de ningún experimento a gran escala hasta la fecha que pruebe un enfoque de plantación en franjas para la restauración de bosques tropicales.

Establecimos un estudio de restauración forestal en agosto de 2017 para comparar la plantación de estilo de plantación (plantar toda el área con árboles), la nucleación aplicada (plantar parches/islas de árboles) y la plantación en franjas (plantar hileras de árboles separadas por franjas abiertas). El estudio se estableció de acuerdo con las prácticas forestales actuales a una escala significativa para informar los esfuerzos de restauración en el terreno. Probamos los siguientes tratamientos: 1) Islas cuadradas que cubren el 25% del área; 2) Islas cuadradas que cubren el 50% del área; 3) Árboles plantados en franjas que cubran el 25% del área; 4) Árboles plantados en franjas que cubran el 50% del área; y 5) Plantación que cubre toda el área (Fig. 1, 2). Utilizamos parcelas de 1 ha y un diseño de bloques al azar con cinco repeticiones cada una, totalizando 25 ha de experimento. No variamos el tamaño de las islas, ya que tanto Zahawi y Augspurger (2006)

⁴La Universidad de São Paulo proporcionó el sitio experimental, y la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de São Paulo y la ONG SOS Mata Atlântica proporcionaron fondos para el establecimiento y el mantenimiento a largo plazo, respectivamente. Se contrató a una empresa privada para plantar los árboles y otra empresa, compuesta por gente local, para mantenerlos.

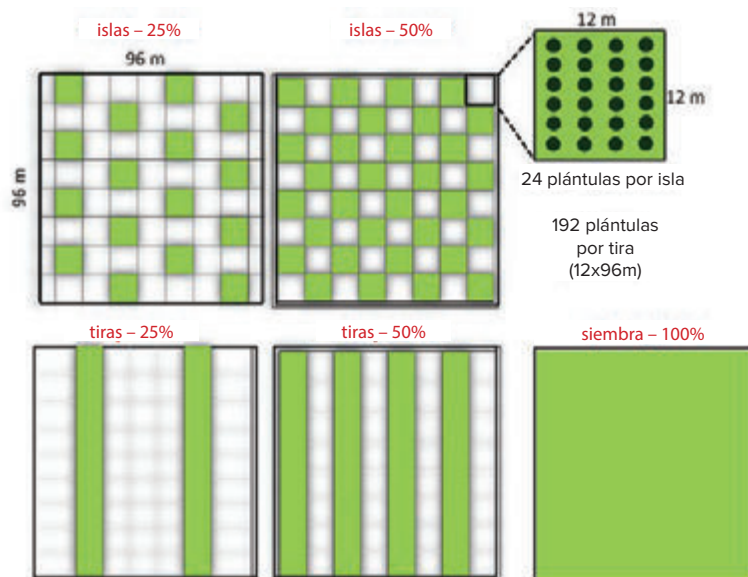


Figura 1: Tratamientos de plantación de árboles probados en el experimento.

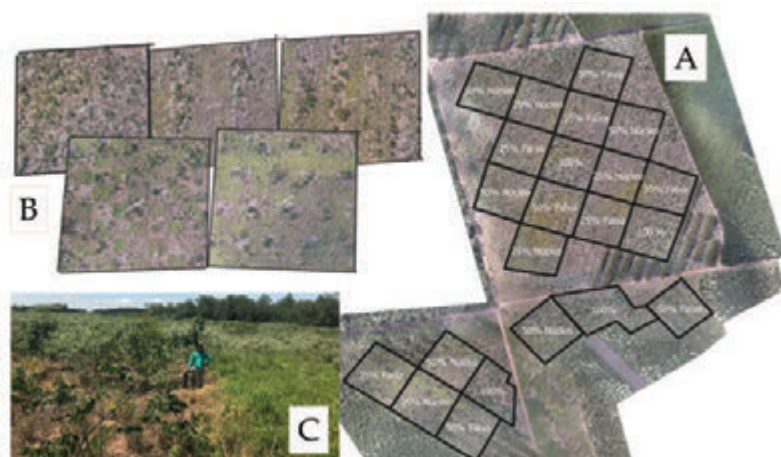


Figura 2: Vista aérea del experimento (A) y de los tratamientos (B), y el contraste entre un área sembrada y no sembrada (C), 1 año después de la siembra.

como Zahawi et al. (2013) muestran que se necesita un tamaño mínimo crítico de isla de $\sim 100 \text{ m}^2$ para atraer a los dispersores de semillas de aves y mejorar el establecimiento de plántulas. Utilizamos islas de $12 \times 12 \text{ m}$, cuatro líneas sembradas separadas 3 m entre sí.

Buscamos establecer un dosel rápidamente, proporcionar heterogeneidad en la arquitectura del dosel y atraer fauna que dispersa semillas. Todas las áreas plantadas utilizaron las mismas proporciones de especies: cinco especies de árboles nativos de dosel ancho y rápido crecimiento y 36 especies de crecimiento intermedio (la mitad de ellas dispersadas por animales y la otra mitad dispersadas por

abióticos). Seleccionamos especies fáciles de encontrar en los viveros forestales de la región. Se dio prioridad a las especies de crecimiento intermedio que pueden alcanzar un mayor tamaño individual. *Inga vera* se plantó a una densidad más alta que otras especies de árboles nativos de dosel ancho y crecimiento rápido porque tiene una notable expansión lateral del dosel y es un pionero de larga vida. El número de especies plantadas es menor que el de los proyectos de restauración del bosque atlántico de Brasil, más diversos (Rodrigues et al., 2009), pero nuestro enfoque se centró en mantener manejable el diseño general y en cómo los diferentes diseños de plantación facilitan la colonización de otras especies.

Comparamos los efectos de estos métodos de plantación en términos de (1) supervivencia y crecimiento de las plántulas plantadas, (2) regeneración natural, (3) cubierta de hierba invasiva, (4) costos de implementación y mantenimiento, y (5) rentabilidad para el carbono. secuestro, recuperación de la biodiversidad y cumplimiento legal de estándares de restauración preestablecidos. Tenemos resultados preliminares, pero aún no están listos para una presentación detallada.

Resultados: sociales y ecológicos: Las operaciones de plantación fueron mucho más rápidas y económicas para establecer líneas de plantación en comparación con las islas, ya que utilizamos un subsolador forestal. No es posible utilizar un subsolador para islas porque no se puede reubicar dentro y fuera del suelo. Después de tres años, el rendimiento de las plántulas hasta el momento es similar entre los tratamientos. Como era de esperar, el control de los pastos invasores ha sido más desafiante tanto en los núcleos de árboles como en las franjas en comparación con las plantaciones de estilo plantación. Los resultados más detallados están en proceso de ser analizados por este equipo.

Literatura citada

Ashton, P. M. S., Gamage, S., Gunatilleke, I. A. U. N., & Gunatilleke, C. V. S. (1998). Uso de pino caribe para establecer una plantación mixta: Prueba de los efectos de la remoción del dosel de los pinos en las plantaciones de especies de árboles de la selva tropical. *Ecología y gestión forestal*, 106(2), 211–222. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00314-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00314-9)

Brancalion, P. H. S., Viani, R. A. G., Calmon, M., Carrascosa, H., & Rodrigues, R. R. (2013). ¿Cómo organizar un programa de restauración ecológica a gran escala? El Marco Desarrollado por el Pacto de Restauración de la Mata Atlántica en Brasil. *Revista de silvicultura sostenible*, 32(7), 728–744. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.817339>

Corbin, J. D., & Holl, K. D. (2012). La nucleación aplicada como estrategia de restauración forestal. *Ecología y gestión forestal*, 265, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.013>

Elliott, S., Navakitbumrung, P., Kuarak, C., Zangkum, S., Anusarnsunthorn, V., & Blakesley, D. (2003). Selección de especies de árboles marco para restaurar bosques tropicales estacionalmente secos en el norte de Tailandia en función del rendimiento de campo. *Ecología y gestión forestal*, 184(1), 177–191. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00211-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00211-1)

Holl, K. D., Reid, J. L., Cole, R. J., Oviedo-Brenes, F., Rosales, J. A., & Zahawi, R. A. (2020). La nucleación aplicada facilita la recuperación de bosques tropicales: Lecciones aprendidas de un estudio de 15 años. *Revista de Ecología Aplicada*, 57(12), 2316–2328. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13684>

Holl, K. D., Stout, V. M., Reid, J. L., & Zahawi, R. A. (2013). Prueba de las relaciones heterogeneidad-diversidad en la restauración de bosques tropicales. *Oecologia*, 173(2), 569–578. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2632-9>

Holl, K. D., Zahawi, R. A., Cole, R. J., Ostertag, R., & Cordell, S. (2011). Plantación de plántulas en islas de árboles frente a plantaciones como estrategia de restauración de bosques tropicales a gran escala. *Ecología de la Restauración*, 19(4), 470–479. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00674.x>

Lamb, D. (2011). *Reverdeciendo las colinas desnudas: Restauración de bosques tropicales en la región de Asia-Pacífico*. Springer.

Reis, A., Bechara, F. C., & Tres, D. R. (2010). Nucleación en la restauración ecológica tropical. *Ciencia Agrícola*, 67(2), 244–250. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000200018>

Benayas, J. M. R., Bullock, J. M., & Newton, A. C. (2008). Crear islotes boscosos para conciliar la restauración ecológica, la conservación y el uso agrícola de la tierra. *Fronteras en Ecología y Medio Ambiente*, 6(6), 329–336. <https://doi.org/10.1890/070057>

Rodrigues, R. R., Lima, R. A. F., Gandolfi, S., & Nave, A. G. (2009). Sobre la restauración de bosques de alta diversidad: 30 años de experiencia en la Mata Atlántica Brasileña. *Conservación biológica*, 142(6), 1242–1251. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.12.008>

Rondon, X. J., Gorchov, D. L., & Cornejo, F. (2009). Riqueza y composición de especies arbóreas 15 años después de la tala rasa en la Amazonía peruana. *Ecología vegetal*, 201(1), 23–37. <https://doi.org/10.1007/s11258-008-9479-x>

Zahawi, R. A., & Augspurger, C. K. (2006). Restauración de Bosques Tropicales: Islas de árboles como focos de reclutamiento en tierras degradadas de Honduras. *Aplicaciones ecológicas*, 16(2), 464–478. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[0464:TFRTIA\]2.O.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[0464:TFRTIA]2.O.CO;2)

Zahawi, R. A., Holl, K. D., Cole, R. J., & Reid, J. L. (2013). Probar la nucleación aplicada como estrategia para facilitar la recuperación de los bosques tropicales. *Diario de Ecología Aplicada*, 50(1), 88–96. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12014>

REFERENCIAS

1. FAO, Restauración de paisajes forestales a través de la regeneración natural asistida (ANR) - Un manual práctico, 55 (2019).
2. R. Crouzeilles, N. Alexandre, H. Beyer, B. Bodin, M. R. Guariguata, R. L. Chazdon, Giving nature a hand: Innovaciones en la planificación para ayudar a la regeneración natural de los bosques para mitigar el cambio climático, salvar especies de la extinción y mejorar el bienestar. *CI IIS CIFOR*, 24 (2019).
3. E. J. Sterling, E. Betley, A. Sigouin, A. Gómez, A. Toomey, G. Cullman, C. Malone, A. Pekor, F. Arengo, M. Blair, C. Filardi, K. Landrigan, A. L. Porzecanski, Evaluar la evidencia de la participación de las partes interesadas en la conservación de la biodiversidad. *Biol. Conserv.* **209**, 159–171 (2017).
4. K. D. Holl, *Primer of Ecological Restoration* (Island Press, Washington, DC, 2020; <https://islandpress.org/books/primer-ecological-restoration>).
5. La nueva Década de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas ofrece una oportunidad sin precedentes para la creación de empleo, la seguridad alimentaria y la lucha contra el cambio climático. UNEP - UN Environ. Programa, (disponible en <http://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/new-un-decade-ecosystem-restoration-offers-unparalleled-opportunity>).
6. Global Forest Watch, Monitoreo forestal, uso de la tierra y tendencias de deforestación (disponible en <https://www.globalforestwatch.org/>).
7. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015: ¿cómo están cambiando los bosques del mundo?* (2015).
8. Una plataforma para la comunidad del billón de árboles. *1t.org*, (disponible en <https://www.1t.org/>).
9. F. Huwyler, J. Käppeli, K. Serafimova, E. Swanson, J. Tobin, Conservation Finance: Más allá de la financiación de los donantes hacia un enfoque impulsado por los inversores (2014), (disponible en <https://www.cbd.int/financial/privatesector/g-private-wwf.pdf>).
10. K. D. Holl, P. H. S. Brancalion, La plantación de árboles no es una solución sencilla. *Ciencia*. **368**, 580–581 (2020).
11. R. L. Chazdon, P. H. S. Brancalion, L. Laestadius, A. Bennett-Curry, K. Buckingham, C. Kumar, J. Moll-Rocek, I. C. G. Vieira, S. J. Wilson, ¿Cuándo es un bosque un bosque? Conceptos y definiciones forestales en la era de la restauración de bosques y paisajes. *Ambio*. **45**, 538–550 (2016).
12. R. Crouzeilles, H. L. Beyer, L. M. Monteiro, R. Feltran-Barbieri, A. C. M. Pessôa, F. S. M. Barros, D. B. Lindenmayer, E. D. S. M. Lino, C. E. V. Grelle, R. L. Chazdon, M. Matsumoto, M. Rosa, A. E. Latawiec, B. B. N. Strassburg -restauración forestal efectiva a escala de paisaje a través de la regeneración natural específica. *Conserv. Lett.* **13**, e12709 (2020).
13. R. Heilmayr, C. Echeverría, E. F. Lambin, Impactos de los subsidios forestales chilenos en la cobertura forestal, el carbono y la biodiversidad. *Nat. Sustain.* **3**, 701–709 (2020).
14. J. D. Corbin, K. D. Holl, Nucleación aplicada como estrategia de restauración forestal. *For. Ecol. Manag.* **265**, 37–46 (2012).
15. M. Pensa, H. Karu, A. Luud, E. Rull, R. Vaht, El efecto de las especies de árboles plantados en el desarrollo de la vegetación herbácea en un cielo abierto recuperado. *Can. J. For. Res.* **38**, 2674–2686 (2008).
16. A. B. Sampaio, K. D. Holl, A. Scariot, ¿La restauración mejora la regeneración de bosques caducifolios estacionales en pastizales en el centro de Brasil? *Restor. Ecol.* **15**, 462–471 (2007).
17. K. D. Holl, T. M. Aide, ¿Cuándo y dónde restaurar activamente los ecosistemas? *For. Ecol. Manag.* **261**, 1558–1563 (2011).
18. R. L. Chazdon, Más allá de la deforestación: Restauración de bosques y servicios ecosistémicos en tierras degradadas. *Ciencia*. **320**, 1458–1460 (2008).

19. R. L. Chazdon, D. Lindenmayer, M. R. Guariguata, R. Crouzeilles, J. M. R. Benayas, E. L. Chavero, Fomento de la regeneración de bosques naturales en antiguas tierras agrícolas a través de intervenciones económicas y políticas. *Environ. Res. Lett.* **15**, 043002 (2020).
20. K. D. Holl, M. E. Loik, E. H. V. Lin, I. A. Samuels, Restauración del bosque montano tropical en Costa Rica: Superando las Barreras a la Dispersión y el Establecimiento. *Restor. Ecol.* **8**, 339–349 (2000).
21. R. L. Chazdon, Recuperación de bosques tropicales: legados del impacto humano y perturbaciones naturales. *Perspectiva. Plant Ecol. Evol. Syst.* **6**, 51–71 (2003).
22. K. D. Holl, J. L. Reid, R. J. Cole, F. Oviedo Brenes, J. A. Rosales, R. A. Zahawi, La nucleación aplicada facilita la recuperación de bosques tropicales: Lecciones aprendidas de un estudio de 15 años. *J. Appl. Ecol.*, **57**, 2316–2329 (2020).
23. P. H. S. Brancalion, K. D. Holl, Orientación para iniciativas exitosas de plantación de árboles. *J. Appl. Ecol.* **57**, 2349–2361 (2020).
24. D. H. Dent, S. Joseph Wright, El futuro de las especies tropicales en los bosques secundarios: Una revisión cuantitativa. *Biol. Conserv.* **142**, 2833–2843 (2009).
25. S. Wilson, J. Rhemtulla, Los pequeños fragmentos de bosque nuboso montano son importantes para conservar la diversidad de árboles en los Andes ecuatorianos. *Biotropica* (2017), doi:10.1111/btp.12542.
26. J. E. M. Watson, T. Evans, O. Venter, B. Williams, A. Tulloch, C. Stewart, I. Thompson, J. C. Ray, K. Murray, A. Salazar, C. McAlpine, P. Potapov, J. Walston, J. G. Robinson, M. Painter, D. Wilkie, C. Filardi, W. F. Laurance, R. A. Houghton, S. Maxwell, H. Grantham, C. Samper, S. Wang, L. Laestadius, R. K. Runting, G. A. Silva-Chávez, J. Ervin, D. Lindenmayer, El valor excepcional de los ecosistemas forestales intactos. *Nat. Ecol. Evol.* **2**, 599–610 (2018).
27. R. L. Chazdon, S. Careaga, C. Webb, O. Vargas, Comunidad y estructura filogenética de los rasgos reproductivos de especies leñosas en bosques tropicales húmedos. *Ecol. Monogr.* **73**, 331–348 (2003).
28. J. L. Reid, J. M. Chaves-Fallas, K. D. Holl, R. A. Zahawi, La restauración del bosque tropical enriquece la recuperación de epífitas vasculares. *Appl. Veg. Sci.* **19**, 508–517 (2016).
29. Forest Trends Association, La jerarquía de mitigación - Forest Trends. *For.-Trendsorg*, (disponible en <https://www.forest-trends.org/bbop/bbop-key-concepts/mitigation-hierarchy/>).
30. B. B. N. Strassburg, H. L. Beyer, R. Crouzeilles, A. Iribarrem, F. Barros, M. F. de Siqueira, A. Sánchez-Tapia, A. Balmford, J. B. B. Sansevero, P. H. S. Brancalion, E. N. Broadbent, R. L. Chazdon, A. O. Filho, T. A. Gardner, A. Gordon, A. Latawiec, R. Loyola, J. P. Metzger, M. Mills, H. P. Possingham, R. R. Rodrigues, C. A. de M. Scaramuzza, F. R. Scarano, L. Tambosi, M. Uriarte, Los enfoques estratégicos para restaurar ecosistemas pueden triplicar la conservación ganancias y costos a la mitad. *Nat. Ecol. Evol.* **3**, 62–70 (2019).
31. J. Stanturf, S. Mansourian, M. Kleine, *Implementing Forest Landscape Restoration* (Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal, Programa Especial para el Desarrollo de Capacidades (IUFRO-SPDC), Viena, Austria, 2017).
32. P. H. S. Brancalion, R. L. Chazdon, Más allá de las hectáreas: cuatro principios para guiar la reforestación en el contexto de la restauración de bosques tropicales y paisajes: Principios de restauración de bosques y paisajes. *Restor. Ecol.* **25**, 491–496 (2017).
33. K. D. Holl, J. L. Reid, F. Oviedo-Brenes, A. J. Kulikowski, R. A. Zahawi, Reglas empíricas para predecir la recuperación de los bosques tropicales. *Appl. Veg. Sci.* **21**, 669–677 (2018).
34. S. D. Sprenkle-Hyppolite, A. M. Latimer, T. P. Young, K. J. Rice, Factores del paisaje y prácticas de restauración asociadas con el éxito de la reforestación inicial en Haití. *Ecol. Restor.* **34**, 306–316 (2016).
35. H. D. Le, C. Smith, J. Herbohn, ¿Qué impulsa el éxito de los proyectos de reforestación en los países tropicales en desarrollo? El caso de Filipinas. *Glob. Environ. Change.* **24**, 334–348 (2014).
36. S. J. Wilson, O. T. Coomes, 'Restauración de crisis' en entornos tropicales posfronterizos: Replantación de bosques nubosos en los Andes ecuatorianos. *J. Rural Stud.* **67**, 152–165 (2019).

37. J. L. Reid, S. J. Wilson, G. S. Bloomfield, M. E. Cattau, M. E. Fagan, K. D. Holl, R. A. Zahawi, ¿Cuánto tiempo persisten los ecosistemas restaurados? *Ann. Mo. Bot. Gard.* **102**, 258–265 (2017).
38. S. M. Galatowitsch, Compensaciones de carbono como restauraciones ecológicas. *Restor. Ecol.* **17**, 563–570 (2009).
39. N. Shaw, R. S. Barak, R. E. Campbell, A. Kirmer, S. Pedrini, K. Dixon, S. Frischie, Uso de semillas en el campo: entrega de semillas para el éxito de la restauración. *Restor. Ecol.* **28**, S276–S285 (2020).
40. G. A. Yarranton, R. G. Morrison, Dinámica espacial de una sucesión primaria: Nucleation. *J. Ecol.* **62**, 417–428 (1974).
41. L. Reid, Nucleación aplicada: Lo que es. *Cave Gulch Rev.* (2012), (disponible en <https://cavegulchreview.wordpress.com/2012/11/04/applied-nucleation-what-it-is/>).
42. S. Saha, C. Kuehne, J. Bauhus, Lecciones aprendidas de los ensayos de plantación de racimos de robles en Europa central. *Can. J. For. Res.* **47**, 139–148 (2017).
43. C. E. Grygiel, J. E. Norland, M. E. Biondini, Precision Prairie Reconstruction (PPR): 15 años de *Datos. Ecol. Restor.* **36**, 276–283 (2018).
44. K. B. Hulvey, E. A. Leger, L. M. Porensky, L. M. Roche, K. E. Veblen, A. Fund, J. Shaw, E. S. Gornish, Islas de restauración: ¿una herramienta para restaurar eficientemente los ecosistemas de tierras secas? *Restor. Ecol.* **25**, S124–S134 (2017).
45. K. D. Holl, J. L. Reid, J. M. Chaves-Fallas, F. Oviedo-Brenes, R. A. Zahawi, Las estrategias locales de restauración de bosques tropicales afectan el reclutamiento de árboles más fuertemente que la cobertura forestal del paisaje. *J. Appl. Ecol.* **54**, 1091–1099 (2017).
46. F. C. Bechara, S. J. Dickens, E. C. Farrer, L. Larios, E. N. Spotswood, P. Mariotte, K. N. Suding, Restauración de la selva tropical neotropical: comparación de enfoques pasivos, de plantación y de nucleación. *Biodivers. Conserv.* **25**, 2021–2034 (2016).
47. K. D. Holl, R. A. Zahawi, La nucleación aplicada es un enfoque de restauración forestal sencillo y rentable: respuesta a Ramírez-Soto et al. (2018). *Restor. Ecol.* **26**, 618–619 (2018).
48. F. Bechara, tesis, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (2006).
49. P. G. Molin, R. Chazdon, S. F. de B. Ferraz, P. H. S. Brancalion, Un enfoque de paisaje para la restauración rentable de bosques a gran escala. *J. Appl. Ecol.* **55**, 2767–2778 (2018).
50. P. H. S. Brancalion, P. Meli, J. R. C. Tymus, F. E. B. Lenti, R. M. Benini, A. P. M. Silva, I. Isernhagen, K. D. Holl, ¿Qué hace que la restauración de ecosistemas sea costosa? Una evaluación sistemática de costos de proyectos en Brasil. *Biol. Conserv.* **240**, 108274 (2019).
51. R. L. Chazdon, *Segundo crecimiento: La promesa de la regeneración de los bosques tropicales en una era de deforestación*, Chazdon (University of Chicago Press, Chicago, 2014; <https://press.uchicago.edu/ucp/libros/libro/chicago/S/bo17407876.html>).
52. R. A. Zahawi, J. L. Reid, K. D. Holl, Costos ocultos de la restauración pasiva. *Restor. Ecol.* **22**, 284–287 (2014).
53. R. Sierra, E. Russman, Sobre la eficiencia de los pagos por servicios ambientales: Una evaluación de la conservación forestal en la Península de Osa, Costa Rica. *Ecol. Econ.* **59**, 131–141 (2006).
54. M. E. Fagan, R. S. DeFries, S. E. Sesnie, J. P. Arroyo, W. Walker, C. Soto, R. L. Chazdon, A. Sanchun, Land cover dynamics after a deforestation ban in northern Costa Rica. *Environ. Res. Lett.* **8**, 034017 (2013).
55. J. L. Reid, M. E. Fagan, J. Lucas, J. Slaughter, R. A. Zahawi, Lo efímero de los bosques secundarios en el sur de Costa Rica. *Conserv. Lett.* **12**, e12607 (2019).
56. M. Elias, B. Vinceti, Restauración de tierras y medios de vida en Burkina Faso. *Approp. Technol.* **44**, 32–34 (2017).
57. K. Shono, E. A. Cadaweng, P. B. Durst, Aplicación de regeneración natural asistida para restaurar bosques tropicales degradados. *Restor. Ecol.* **15**, 620–626 (2007).

-
58. P. Dugan, en Elliott, S., Kerby, J., Blakesley D., Hardwick, K., Woods, K. y Anusarnsunthorn, V editores. *Restauración de bosques para la conservación de la vida silvestre* (Organización Internacional de las Maderas Tropicales y Unidad de Investigación de Restauración de Bosques, Universidad de Chiang Mai, Chiang Mai, Tailandia, 2000), págs. 195–200.
 59. R. A. Zahawi, C. K. Augspurger, Restauración de bosques tropicales: Islas de árboles como focos de reclutamiento en tierras degradadas de Honduras. *Ecol. Appl.* **16**, 464–478 (2006).
 60. R. A. Zahawi, K. D. Holl, R. J. Cole, J. L. Reid, Pruebas de nucleación aplicada como estrategia para facilitar la recuperación de bosques tropicales. *J. Appl. Ecol.* **50**, 88–96 (2013).
 61. C. Uhl, R. Buschbacher, E. A. S. Serrao, Pastos Abandonados en la Amazonía Oriental. I. Patrones de Sucesión Vegetal. *J. Ecol.* **76**, 663 (1988).
 62. S. L. R. Wood, J. M. Rhemtulla, O. T. Coomes, Intensificación de la agricultura tropical en barbecho: ¿Intercambio de servicios ecosistémicos por ganancias económicas en paisajes de agricultura migratoria? *Agricultura, ecosistemas y medio ambiente* **215**, 47-56 (2016).
 63. D. Lawrence, Erosión de la diversidad de árboles durante 200 años de cultivo migratorio en la selva tropical de Borneo. *Aplicaciones ecológicas* **14**, 1855-1869 (2004).
 64. D. Hill, thesis (2018). Restauración forestal en el este de Madagascar: Supervivencia posterior al incendio de especies selectas de árboles malgaches. Universidad de Minnesota.
 65. E. M. Caves, S. B. Jennings, J. HilleRisLambers, J. J. Tewksbury, H. S. Rogers, Experimento natural demuestra que la pérdida de aves conduce al cese de la dispersión de semillas nativas de bosques intactos a bosques degradados. *PLOS ONE*. **8**, e65618 (2013).
 66. J. L. Reid, R. A. Zahawi, D. A. Zárrate-Chary, J. A. Rosales, K. D. Holl, U. Kormann, La selección de hábitats a escala múltiple de frugívoros clave predice el reclutamiento de árboles de semillas grandes en la restauración de bosques tropicales (en revisión).
 67. L. C. Beltrán, H. F. Howe, La fragilidad de las plantaciones de restauración tropical. *Restor. Ecol.* **28**, 16–21 (2020).
 68. J. L. Reid, C. D. Mendenhall, R. A. Zahawi, K. D. Holl, Efectos dependientes de la escala de la restauración forestal en murciélagos frugívoros neotropicales. *Restor. Ecol.* **23**, 681–689 (2015).
 69. N. B. Schwartz, T. M. Aide, J. Graesser, H. R. Grau, M. Uriarte, Las reversiones de la reforestación en América Latina limitan el potencial de mitigación climática de los bosques tropicales. *Front. For. Glob. Change*. **3** (2020), doi:10.3389/ffgc.2020.00085.
 70. R. D. Fink, C. A. Lindell, E. B. Morrison, R. A. Zahawi, K. D. Holl, El tamaño del parche y las especies de árboles influyen en el número y la duración de las visitas de aves en las parcelas de restauración forestal en el sur de Costa Rica. *Restor. Ecol.* **17**, 479–486 (2009).
 71. R. J. Cole, K. D. Holl, R. A. Zahawi, Lluvia de semillas bajo islas de árboles plantadas para restaurar tierras degradadas en un paisaje agrícola tropical. *Ecol. Appl.* **20**, 1255–1269 (2010).
 72. J. H. G. Smith, D. L. Reukema, Efectos de la plantación y el espaciamiento juvenil en el desarrollo de árboles y rodales. *Oliver Chadwick Dearing Hanley Donald P Johns. Jay Eds Douglas-Fir Stand Manag. Future Proc. Symp. 1985 18-20 de junio Seattle WA Contrib. No 55 Seattle Coll. For. Resour. Univ. Wash.* 239-245 (1986) (disponible en <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/20031>).
 73. M. L. Anderson, Espaciado - Plantación en grupo. *Unasyuva*. 7 (1953) (disponible en <http://www.fao.org/3/x5367e/x5367e02.htm>).
 74. C. Spadeto, G. Wilson Fernandes, D. Negreiros, S. H. Kunz, Efectos facilitadores de las especies de árboles en la regeneración natural en un punto crítico de biodiversidad en peligro de extinción. *Braz. J. Bot.* **40**, 943–950 (2017).
 75. K. R. Eversole, Pruebas de espaciamiento en una plantación de abetos de Douglas. *For. Sci.* **1**, 14–18 (1955).

76. F. Hébert, C. Krause, P.-Y. Plourde, A. Achim, G. Prigent, J. Ménétrier, Efecto del espaciamiento entre árboles en el crecimiento del volumen, la morfología y las propiedades de la madera a nivel de los árboles en una plantación de *Pinus banksiana* de 25 años en el bosque boreal de Quebec. *Forests*. **7**, 276 (2016).
77. T. Strong, E. Hansen, Relaciones híbridas de espaciamiento/productividad del álamo en plantaciones de cultivo intensivo de rotación corta. *Biomasa Bioenergía*. **4**, 255–261 (1993).
78. E. E. Oldfield, A. J. Felson, D. S. N. Auyeung, T. W. Crowther, N. F. Sonti, Y. Harada, D. S. Maynard, N. W. Sokol, M. S. Ashton, R. J. Warren, R. A. Hallett, M. A. Bradford, Growing the urban forest: tree performance in response to biotic and abiotic gestion de tierras. *Restor. Ecol.* **23**, 707–718 (2015).
79. F. Schwerz, E. Eloy, E. F. Elli, B. O. Caron, El espacio de plantación reducido aumenta la eficiencia del uso de la radiación y la biomasa para energía en las plantaciones de acacia negra: Hacia sistemas de producción sostenibles. *Biomasa Bioenergía*. **120**, 229–239 (2019).
80. I. S. Alemdag, W. M. Stiehl, Espaciamiento y efectos de la edad en la producción de biomasa en plantaciones de pino rojo. *For. Chron.* **58**, 220–224 (1982).
81. A. Trakhtenbrot, G. G. Katul, R. Nathan, Modelado mecánico de la dispersión de semillas por el viento sobre terreno montañoso. *Modelización ecológica* **274**, 29-40 (2014).
82. P. H. S. Brancalion et al., Maximización de la conservación de la biodiversidad y almacenamiento de carbono en bosques tropicales restaurados. *Cartas de conservación* **11**, e12454 (2018).
83. C. Martínez-Garza, H. F. Howe, Restaurando la diversidad tropical: venciendo el impuesto del tiempo sobre la pérdida de especies. *Diario de Ecología Aplicada* **40**, 423-429 (2003).
84. C. A. Lindell, J. L. Reid, R. J. Cole, Planting Design Effects on Avian Seed Dispersers in a Tropical Forest Restoration Experiment. *Restor. Ecol.* **21**, 515–522 (2013).
85. P. H. S. A. Camargo, M. A. Pizo, P. H. S. Brancalion, T. A. Carlo, Los rasgos de la fruta de los árboles pioneros estructuran la dispersión de semillas a través de distancias en paisajes tropicales deforestados: Implicaciones para la restauración. *J. Appl. Ecol.*, 1365-2664.13697 (2020).
86. H. F. Howe, Haciendo que los síndromes de dispersión y las redes sean útiles en la conservación y restauración tropical. *Glob. Ecol. Conserv.* **6**, 152–178 (2016).
87. C. Kuaraksa, S. Elliott, El uso de especies asiáticas de ficus para restaurar ecosistemas de bosques tropicales. *Restor. Ecol.* **21**, 86–95 (2013).
88. H. E. W. Cottee Jones, O. Bajpai, L. B. Chaudhary, R. J. Whittaker, The Importance of *Ficus* (Moraceae) Trees for Tropical Forest Restoration. *Biotropica*. **48**, 413–419 (2016).
89. R. A. Zahawi, J. L. Reid, Enriquecimiento del bosque secundario tropical usando estacas gigantes de higos clave. *Perspectiva. Ecol. Conserv.* **16**, 133–138 (2018).
90. R. A. Zahawi, C. K. Augspurger, Early Plant Succession in Abandoned Pastures in Ecuador1. *Biotropica*. **31**, 540–552 (1999).
91. S. P. Healey, R. I. Gara, El efecto de una plantación de teca (*Tectona grandis*) en el establecimiento de especies nativas en un potrero abandonado en Costa Rica. *For. Ecol. Manag.* **176**, 497–507 (2003).
92. K. D. Holl, R. A. Zahawi, R. J. Cole, R. Ostertag, S. Cordell, Planting Seedlings in Tree Islands Versus Plantations as a Large-Scale Tropical Forest Restoration Strategy. *Restor. Ecol.* **19**, 470–479 (2011).
93. V. Reyes García, Á. Fernández Llamazares, P. McElwee, Z. Molnár, K. Öllerer, S. J. Wilson, E. S. Brondizio, Las contribuciones de los pueblos indígenas y las comunidades locales a la restauración ecológica. *Restor. Ecol.* **27**, 3–8 (2019).
94. G. D. Gann, T. McDonald, B. Walder, J. Aronson, C. R. Nelson, J. Jonson, J. G. Hallett, C. Eisenberg, M. R. Guariguata, J. Liu, F. Hua, C. Echeverría, E. Gonzales, N. Shaw, K. Decler, K. W. Dixon, Principios y estándares internacionales para la práctica de la restauración ecológica. Segunda edición. *Restor. Ecol.* **27**, S1–S46 (2019).
95. J. M. Rey Benayas, L. Martínez-Baroja, L. Pérez-Camacho, P. Villar-Salvador, K. D. Holl, La depredación

-
- y la aridez retrasan la propagación de islotes de bosques plantados de 21 años en tierras de cultivo mediterráneas restauradas. *New For.* **46**, 841–853 (2015).
96. Organización Internacional de las Maderas Tropicales, *Directrices de la OIMT para la restauración, ordenación y rehabilitación de bosques tropicales secundarios y degradados*. (Organización Internacional de las Maderas Tropicales, Yokohama, Japón, 2002).
 97. E. P. Fernandez Barrancos, J. L. Reid, J. Aronson, Tanque de trasplantes de bromelias como estrategia de enriquecimiento en el sur de Costa Rica. *Restor. Ecol.* **25**, 569–576 (2017).
 98. K. Evans, M. R. Guariguata, Monitoreo participativo en el manejo de bosques tropicales: una revisión de herramientas, conceptos y lecciones aprendidas. *CIFOR* (2008), doi:10.17528/cifor/002486.
 99. L. Li, M. W. Cadotte, C. Martínez-Garza, M. de la Peña-Domene, G. Du, La plantación acelera la restauración del bosque tropical pero los mecanismos de ensamblaje parecen insensibles a la composición inicial. *J. Appl. Ecol.* **55**, 986–996 (2018).
 100. A. Ramírez-Soto, C. R. Lucio-Palacio, R. Rodríguez-Mesa, I. Sheseña-Hernández, F. N. Farhat, B. Villa-Bonilla, L. Landa Libreros, G. Gutiérrez Sosa, O. Trujillo Santos, I. Gómez Sánchez, E. Ruelas Inzunza, ¿Es la nucleación aplicada un enfoque de restauración forestal sencillo y rentable? Contrarrespuesta a Holl y Zahawi (2018). *Restor. Ecol.* **26**, 620–621 (2018).

Para obtener más información sobre cómo cumplir las promesas de restauración, comuníquese con lo siguiente:

Conservación Internacional (CI)

2011 Crystal Dr #600,
Arlington, VA 22202 EE.UU.
<https://www.conservation.org>