

La nucleación: Una alternativa para la restauración ecológica de bosques neotropicales

JULIÁN E. DÍAZ-TRIANA[✉]; ORLANDO VARGAS-RÍOS & NELLY RODRÍGUEZ-ERASO

Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

RESUMEN. La deforestación y la degradación de tierras debido al uso intensivo del suelo son amenazas predominantes para los bosques neotropicales. En este marco, la restauración ecológica (RE) se plantea como una alternativa para contrarrestar la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos, lo cual continúa siendo un reto y una prioridad global. La nucleación es una técnica que busca formar microhábitats que faciliten la regeneración natural y amplíen las interacciones entre organismos, promoviendo la sucesión ecológica. Aunque la formación de islas de árboles (nucleación aplicada) se usa a menudo por su relación costo-efectividad en comparación con otras alternativas de RE, su implementación en bosques neotropicales enfrenta desafíos que van desde la definición de objetivos precisos hasta su escalamiento a grandes áreas. En nuestro trabajo presentamos un panorama de las alternativas de nucleación para restaurar áreas de bosques tropicales, y evaluamos 1) sus fundamentos, condiciones y beneficios; 2) los estudios teóricos y experimentales, y 3) los desafíos para aplicarla en diferentes escenarios de restauración. Observamos que la nucleación es un modelo de restauración adaptable a escenarios con variabilidad en el potencial de recuperación y que abarca múltiples objetivos mediante diversas técnicas. Pese a que los estudios se han centrado en comparar resultados a corto plazo entre la nucleación aplicada y otras estrategias, la composición y la selección de especies, las configuraciones alternativas para la combinación de técnicas y el escalamiento a grandes áreas son temas que permanecen poco abordados. Sugerimos la implementación y el monitoreo de la nucleación deben orientarse hacia la experimentación dentro de los proyectos, y que la investigación futura debería considerar tratamientos alternativos con miras a una gestión adaptativa.

[Palabras clave: experiencias de nucleación, Neotrópico, nucleación aplicada, nucleación complementaria, facilitación, gestión adaptativa en paisajes, sucesión por parches, técnicas de nucleación]

ABSTRACT. **Nucleation: An alternative to ecological restoration of neotropical forests.** Deforestation and land degradation resulting from intense land use activities pose a significant threat to neotropical forests. Ecological restoration (ER) as an alternative to mitigate the loss of biodiversity and ecosystem services remains a global challenge and priority. Nucleation is a technique aimed at creating microhabitats that facilitate natural regeneration and expand interactions among organisms, promoting ecological succession. Although the formation of tree islands (applied nucleation) is frequently used due to its cost-effectiveness compared to other ER alternatives, the implementation of nucleation in neotropical forests faces challenges that range from defining precise objectives to scaling up in large areas. Our work provides a comprehensive overview of nucleation alternatives for restoring tropical forest areas, evaluating 1) their rationale, conditions and benefits; 2) theoretical and experimental studies, and 3) challenges for their application in different restoration scenarios. We have found that nucleation is an adaptable restoration model suitable for scenarios with varying recovery potential and capable of achieving multiple objectives through different techniques. While current studies have primarily focused on short-term comparisons between applied nucleation and other strategies, issues such as species composition and selection, alternative configurations for combining techniques, and large-scale implementation have received little attention. We recommend that the implementation and monitoring of nucleation be guided by experimentation within projects and that future research should focus on incorporating alternative treatments for adaptive management.

[Keywords: applied nucleation, complementary nucleation, facilitation, landscape adaptive management, Neotropic, nucleation experiences, nucleation techniques, patch succession]

INTRODUCCIÓN

Los bosques del Neotrópico abarcan una amplia gama de ecosistemas que se extienden desde el sur de México y de Florida hasta el sur de Brasil y el norte de la Argentina, incluyendo el Caribe (Hartshorn 2002). A nivel global, estos ecosistemas son importantes en términos de biodiversidad, captura de carbono, regulación climática e hídrica, polinización y calidad del aire, entre otros servicios (Díaz-Gallegos and Mas-Causel 2009) fundamentales para el bienestar de la sociedad (Balvanera 2012). Sin embargo, la cobertura boscosa se ha reducido al menos un 53% (Díaz-Gallegos and Mas-Causel 2009) y la región enfrenta tasas elevadas de deforestación (Armenteras and Rodríguez 2014), problemas de degradación de tierras, pérdida de biodiversidad y efectos negativos del cambio climático (García-Barrios et al. 2009; FAO and PNUMA 2020). Ante este panorama, la restauración ecológica (RE) se convierte en una prioridad global (Stanturf and Mansourian 2020) y es esencial para

lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible (UN 2015). Varias iniciativas como el desafío de Bonn y la iniciativa 20x20, con miras a recuperar la funcionalidad ecológica y mejorar el bienestar de la población (Lambin et al. 2014; Stanturf and Mansourian 2020; Abilash 2021) se desarrollan en América Latina y el Caribe, donde los bosques neotropicales fueron identificados como prioritarios para emprender acciones de RE (Strassburg et al. 2020).

La ejecución de iniciativas de restauración de bosques varía de manera considerable en su escala, dimensión y propósito; se centra en uno o en múltiples objetivos (Sabogal et al. 2015) e incluye recuperar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Murcia et al. 2017), aumentar la cobertura vegetal o recuperar procesos ecológicos (Romijn et al. 2019). En los bosques neotropicales se implementaron diversas estrategias de restauración (Tabla 1), desde el uso de la regeneración natural hasta la restauración asistida, comprendiendo desde

Tabla 1. Definiciones importantes el contexto de la restauración ecológica (basado en Aguilar-Garavito (2014) y Gann et al. [2019]).

Table 1. Important definitions the context of ecological restoration (based on Aguilar-Garavito (2014) and Gann et al. [2019]).

Término	Definición
Actividad (acción) de restauración	Cualquier acción, intervención o tratamiento implementado para promover la recuperación de un ecosistema o alguno de sus componentes
Estrategia de restauración	Selección y aplicación de técnicas en forma racional y organizada para alcanzar los objetivos planteados en un proceso o proyecto
Manejo adaptativo	Proceso continuo para mejorar el manejo de políticas y prácticas aplicando conocimiento aprendido de la evaluación de experiencias pasadas. Es la práctica de la revisión de decisiones de manejo a la luz de nueva información
Potencial de regeneración (recuperación) natural	Capacidad de los atributos de un ecosistema para retornar a un estado mediante regeneración natural
Reclutamiento	Producción de una generación subsecuente de organismos. Es medido por el número de organismos que se desarrollan como individuos independientes en una población
Reconstrucción (restauración asistida)	Aproximación en la que la llegada de biota apropiada es entera o parcialmente dependiente de la gestión humana debido a que no puede regenerarse o recolonizar en marcos de tiempo factibles, aun después de intervenciones expertas por regeneración asistida
Regeneración asistida	Aproximación a la restauración que se enfoca en impulsar activamente cualquier capacidad de regeneración de la biota remanente en un sitio o cerca de este
Regeneración natural	Germinación, nacimiento o reclutamiento de biota que no involucra intervención humana, proveniente de colonización, dispersión o de procesos in situ. La aproximación desde la regeneración espontánea comprende el enfoque de restauración ecológica que solo se basa en el incremento natural de individuos de una o más especies luego de eliminar las causas de degradación
Resiliencia ecosistémica	Grado, manera y ritmo de recuperación de las propiedades de un ecosistema luego de disturbios naturales o humanos. Depende de las adaptaciones de las especies a disturbios y estrés
Sucesión ecológica	Proceso o patrón de reemplazamiento de especies o desarrollo de un ecosistema luego de un disturbio
Técnica de restauración	Conjunto de medidas o acciones de cualquier campo del conocimiento o la ingeniería, para mitigar los factores limitantes, o eliminar o controlar los factores tensionantes que impiden la recuperación de un ecosistema degradado

aislamientos de áreas hasta plantaciones simples o tradicionales (Griscom and Ashton 2011; Ceccon 2013). Los diferentes niveles de esfuerzo y costos a largo plazo de la RE dependen tanto de la dinámica de recuperación de cada ecosistema boscoso (Ceccon 2013) como de los mecanismos de financiación para la implementación de este tipo de proyectos (Romijn et al. 2019).

En la implementación de proyectos de RE, establecer y diseñar el tipo de intervención es un principio básico (Vargas 2011; Lindig-Cisneros 2017). La RE se puede llevar a cabo con diferentes estrategias (i.e., regeneración natural, nucleación, plantaciones, sistemas agroforestales), cuya elección se basa sobre las condiciones ecológicas, sociales y económicas a nivel local del ecosistema y de su entorno (Shimamoto et al. 2018). Un enfoque integrador que permite múltiples objetivos, contemplando en simultáneo beneficios ecológicos y socio-económicos en la RE, es la restauración del paisaje forestal (Stanturf and Mansourian 2020). Según Méndez-Toribio et al. (2021), las intervenciones de restauración se diferencian en tres niveles: 1) intervenciones mínimas (restauración no asistida), que incluyen acciones para remover los disturbios severos; permiten que la sucesión natural proceda y se las considera costo-efectivas en grandes escalas; 2) intervenciones intermedias (regeneración natural asistida), que reducen las barreras a la sucesión o eliminan fuentes de disturbio para acelerar los procesos de sucesión natural; son menos costosas y más efectivas en escenarios con degradación intermedia, y 3) intervenciones máximas (restauración asistida), que involucran el uso de siembras (e.g., semillas o plántulas) que, aunque representan costos mayores por la selección de especies y medios para su colecta o propagación, resultan más efectivas en la recuperación de la biodiversidad. Con base en esta clasificación, la nucleación puede considerarse dentro las intervenciones de nivel intermedio a máximo.

La nucleación en estrategias de RE busca imitar los procesos naturales observados en la sucesión ecológica de ecosistemas terrestres, con énfasis en aquellos con limitaciones abióticas (Corbin and Holl 2012; Hulvey et al. 2017). A partir del análisis de experiencias en la última década, algunos autores indican que la nucleación es una alternativa prometedora en la restauración de los bosques degradados (Zahawi et al. 2013; Boanares and de Azevedo 2014; Holl

et al. 2017; Holl et al. 2020; Rojas-Botero et al. 2020; Bechara et al. 2021) y que facilita el reclutamiento de árboles y las interacciones ecológicas mediante el mejoramiento de las condiciones abióticas (microclima y suelos) y la conectividad del paisaje (Bechara et al. 2016; Hulvey et al. 2017; Barrera et al. 2022). Pese a que se ha incursionado desde el siglo pasado en su conocimiento y aplicación (Yarranton and Morrison 1974), aún existen dificultades y vacíos de conocimiento para su implementación y uso (Wilson et al. 2021).

Actualmente, la falta de integración entre las diferentes perspectivas de nucleación originadas en Latinoamérica (Reis et al. 2010; Bechara et al. 2016) dificulta su aplicación en iniciativas dirigidas a la restauración de grandes áreas y con diversos escenarios de degradación de los bosques (Torres-Rodríguez et al. 2019). El objetivo de este trabajo fue sintetizar el conocimiento sobre la nucleación en bosques del Neotrópico mediante una revisión de literatura y una discusión sobre el tema. Se emplearon los buscadores Web of Science y Google Scholar, introduciendo en diferentes combinaciones los términos 'nucleation', 'tropical forest', 'restoration' y 'succession', además de sus equivalentes en Español. En particular, nos centramos en su conceptualización y práctica a fin de visibilizar los fundamentos y las condiciones detrás de su uso en estrategias de RE, explorando los aportes teóricos y las principales experiencias desarrolladas. Finalmente, mostramos los desafíos que implica optar por la nucleación en proyectos de RE y presentamos una propuesta de nucleación complementaria, evidenciando la necesidad de explorar alternativas flexibles a la luz del manejo adaptativo para distintos escenarios de degradación.

LA NUCLEACIÓN EN LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA

¿Qué es la nucleación y qué la sustenta?

La nucleación se concibe como un proceso natural en la recuperación espontánea de la vegetación, en la que las especies pioneras siguen un patrón discreto de colonización y sucesión que origina agregaciones de plantas (parches) alrededor de las que se pueden establecer plantas de otras especies (Franks 2003; Corbin and Holl 2012). En este proceso, los colonizadores iniciales son conocidos como núcleos, mientras la expansión de las agregaciones (o parches de vegetación)

constituye la nucleación propiamente dicha (Yarranton and Morrison 1974; Corbin and Holl 2012) (Figura 1). Una vez que los colonizadores primarios se establecen y persisten, su crecimiento y reproducción (sobre todo, clonal) producen la ampliación de los núcleos hacia el exterior, capturando propágulos transportados por diferentes agentes de dispersión e incorporándose individuos de especies de etapas sucesionales subsiguientes (Holl et al. 2011; Corbin and Holl 2012; Zahawi et al. 2013; Bechara et al. 2016).

La hipótesis de nucleación más conocida fue planteada por Yarranton y Morrison (1974) mediante un modelo básico que establece una secuencia de cambios en el patrón espacial de la sucesión vegetal, implicando dos etapas: la

persistencia y la colonización de ciertas especies. Reis et al. (2003) enfatizaron sobre la capacidad diferencial de las especies para modificar factores ambientales, así como en la importancia de elementos bióticos o abióticos para formar nichos de colonización y regeneración. Luego, Tres y Reis (2007) y Reis et al. (2010) consideraron la nucleación desde el punto de vista de los paisajes, y enfatizaron la dinámica de donador-receptor entre núcleos y parches, con referencia a los flujos ecológicos. Por último, Peterson et al. (2014) expandieron su concepto hacia la hipótesis de 'matriz de discontinuidad', involucrando la diversidad de micrositios y de parches de hábitat que, en diferentes escalas espaciales, proveen nichos de regeneración (Grubb 1977) donde se concentra el reclutamiento de especies.

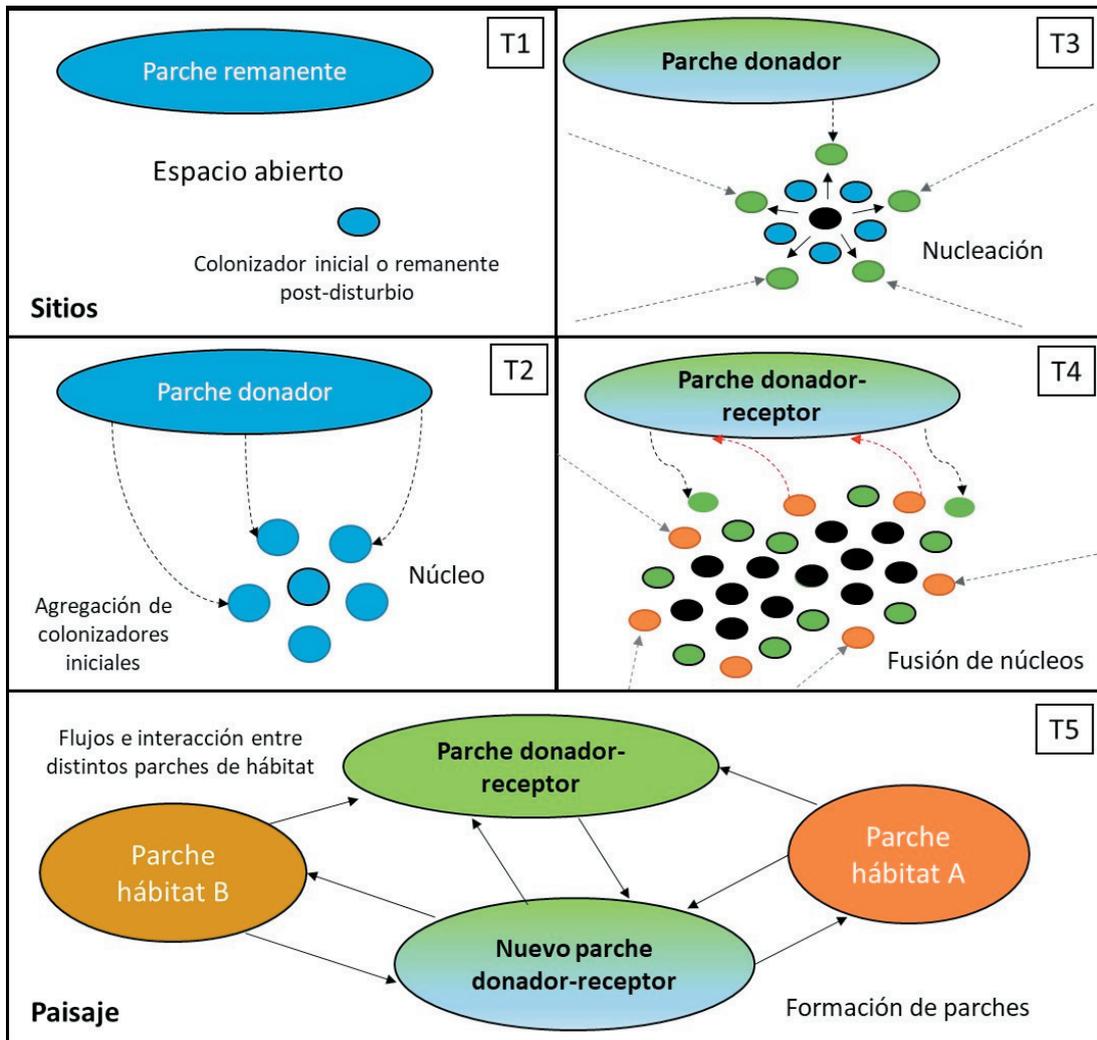


Figura 1. Representación del proceso natural de nucleación en cinco tiempos.

Figure 1. Representation of the natural nucleation process in five stages.

La nucleación se puede presentar en procesos de sucesión primaria y tener distintas vías en procesos de sucesión secundaria (Yarranton and Morrison 1974). En los bosques tropicales, después de episodios de disturbio, una primera vía es la colonización de sustratos disponibles para la ocupación de plantas pioneras y la formación de agregaciones de individuos en espacios como los claros (Hunter et al. 2015). Una segunda vía es la constitución de focos de regeneración alrededor de árboles remanentes (Peterson et al. 2014; Bechara et al. 2016), en los que tras los procesos de dispersión y regulación microclimática se establecen plántulas de otras especies leñosas y diferentes formas de vida del sotobosque (Filho et al. 2013; Derroire et al. 2016; Rojas-Botero et al. 2020).

En la nucleación, el mecanismo de facilitación juega un rol esencial (Franks 2003; Reis et al. 2003; Reis et al. 2010; Vieira et al. 2013) dado que es el efecto positivo de una especie o cierto tipo de vegetación sobre la supervivencia y el crecimiento y desarrollo de otra(s) especie(s) (Connell and Slatyer 1977; Gómez-Aparicio et al. 2004). Esta interacción contribuye a mejorar la colonización y el establecimiento de plantas en áreas donde la sucesión está detenida o alterada por restricciones físicas o bióticas que limitan la regeneración natural y la dispersión de semillas (Albornoz et al. 2013). Un ejemplo ilustrativo lo proveen las plantas nodrizas (Löf et al. 2014; Badano et al. 2016), que amortiguan condiciones poco óptimas presentadas en estados de degradación severos (Padilla and Pugnaire 2006) al mejorar la disponibilidad de recursos y mitigar o reducir factores de estrés o de mortalidad, protegiendo a otras plantas de efectos nocivos externos (Padilla and Pugnaire 2006; Vieira et al. 2013; Lindig-Cisneros 2017).

La nucleación como técnica de restauración ecológica

A menudo, la nucleación se encuentra referida en la literatura científica como una técnica o estrategia de RE. Autores como Boanares y de Azevedo (2014), Bechara et al. (2016) y Corbin et al. (2016) parecen considerarla una técnica, mientras que Corbin y Holl (2012) y Holl et al. (2021) la clasifican como una estrategia. La nucleación es una técnica empleada para superar barreras relacionadas con la dispersión y el establecimiento (Vargas et al. 2007; Lindig-Cisneros 2017); dentro de la restauración asistida, puede ser el eje central o formar parte de una estrategia junto con otras acciones. Como técnica, consiste

en propiciar la formación de microhábitats (sitios nucleadores) para el arribo de especies vegetales y animales donde aumente la probabilidad de ocupación de otras especies y la ocurrencia de interacciones interespecíficas (Reis et al. 2010; Ceccon 2013).

La técnica de nucleación pretende estimular o imitar la colonización de individuos pioneros y el establecimiento, en el mediano o largo plazo, de parches de hábitat en sitios específicos (Reis et al. 2010; Rojas-Botero et al. 2020), produciendo en el tiempo cambios en la conformación, la función y la complejidad de las comunidades biológicas. De este modo, y usando el potencial de elementos naturales disponibles de manera local (Filho et al. 2013), la nucleación puede ayudar al ensamble de especies para dirigir la recuperación de un ecosistema degradado, desde sus posibilidades iniciales de regeneración, influenciando no solo la trayectoria sucesional, sino la velocidad de la restauración de un área (Corbin and Holl 2012).

Se han propuesto diversas técnicas para efectuar la nucleación, desde aquellas basadas solo en el uso de especies vegetales (i.e., herbáceas, arbustivas, arbóreas) hasta aquellas basadas en el uso de elementos abióticos para atraer o brindar refugio a la fauna (Tabla 2). Se incluyen la trasposición de suelo con bancos de semillas desde áreas naturales conservadas a áreas degradadas, la incorporación de residuos vegetales o rocas en apilados, así como las siembras directas (uso de semillas) o por trasplante de especies de diferentes formas de vida (uso de plántulas) (Reis et al. 2003; Reis et al. 2010; Ceccon 2013). Cuanto más grande es la diversidad de formas y de funciones de los núcleos implementados, así como la combinación de técnicas, la efectividad de las estrategias de restauración puede ser mayor (Reis et al. 2010; Bechara et al. 2016).

La nucleación en gran parte de los casos se implementó sembrando árboles, arbustos y plántulas o juveniles (Corbin and Holl 2012), lo cual involucró su propagación en viveros y posterior trasplante. A pesar de la posibilidad de formar núcleos incorporando suelo o materiales inertes, estas técnicas recibieron menos atención y se las contempla, sobre todo, como opciones complementarias que se suman a las acciones dominadas por las siembras (Rojas-Botero et al. 2020). Esto se debe a que las siembras por trasplante pueden acelerar una trayectoria sucesional, ayudando a recuperar rápido la estructura; sin embargo,

Tabla 2. Técnicas de nucleación definidas y empleadas en estrategias de restauración ecológica.**Table 2.** Nucleation techniques defined and used in ecological restoration strategies.

Nombres dados a la técnica	Descripción
Trasposición, translocación o traslado de suelo	Retiro de pequeñas cantidades de suelo superficial (1 m ²) de áreas naturales remanentes y sin disturbio, para su depósito en áreas degradadas. El suelo se puede trasladar en bloques o desmoronado, en varios puntos dispersos. Enriquece de nutrientes e introduce micro, meso y macrofauna del suelo, junto con semillas, propágulos y microorganismos. Propicia nichos de regeneración y favorece la variabilidad genética, contribuyendo a la recuperación del banco de semillas, y la biota del suelo y la hojarasca
Trasposición o translocación de lluvia de semillas	Captura de propágulos germinados en bosques nativos remanentes y su transporte a invernadero para producción de plántulas. Recomendada para áreas aisladas. Sirve para conformar pequeños núcleos o complementar núcleos grandes previamente implementados
Trasposición o translocación de lluvia de semillas con suelo en grupos de plántulas	Producción de plántulas en vivero tras la colecta conjunta de suelo y lluvia de semillas, reemplazando la colecta tradicional y usando los mismos contenedores de colecta en las labores de siembra. Proveen plántulas con sustrato original para aumentar la diversidad y facilitar costos y logística
Núcleos de semillas	Técnica similar o basada en la siembra directa. Las semillas introducidas deben representar todas las formas de vida. Incluye la instalación de trampas o colectores de semillas en matrices de paisaje relativamente conservadas. Las colectas pueden ser introducidas directamente en los sitios a restaurar. Incrementan la composición florística para representar a toda la comunidad de especies que podría participar en la sucesión ecológica
Siembra (o plantación/trasplante) de formas de vida herbáceas y arbustivas, núcleos de arbustos y otras plantas, o núcleos activos de dispersión.	Introducción de especies ruderales para generar cobertura de suelo en parches simples o mixtos que florecen y fructifican en pocos meses. Se pueden usar individuos con altura superior a 1 m y que estén en etapa de floración o de dispersión de semillas. Sirven para atraer a variedad de polinizadores y consumidores de frutos y semillas, como alimento a descomponedores, para generar microambientes, aumentar nutrientes en el suelo, o favorecer la dispersión de semillas y la regeneración
Siembra (o plantación/trasplante) de árboles nativos en grupos (de Anderson) o núcleos de plántulas (islas de árboles)	<u>Perspectiva de Anderson</u> (1931, 1951): siembra de especies de árboles en grupos adensados y con mucho espacio intermedio. Las unidades mono o heteroespecíficas, pueden estar compuestas de 5 a 13 o 37 plántulas introducidas en formato ortogonal, el espaciamiento en el interior puede variar de 0.5x0.5 m hasta 2x2 m, formando islas dispersas de diversidad <u>Perspectiva ampliada</u> : siembra agrupada de árboles en sitios estratégicos del paisaje con plantas provenientes de semillas o reproducción vegetativa, formando parches densos para cambiar rápidamente en el interior el microambiente. Multifuncionales
Uso o siembra de especies nodrizas facilitadoras	Incluye sembrar plántulas bajo de árboles, matorrales o cultivos existentes, o especies de crecimiento rápido que forman dosel en poco tiempo y mejoran condiciones del suelo al fijar nitrógeno o asociarse con micorrizas. Las especies más adecuadas son de fases intermedias de sucesión, no muy competitivas, ni que presenten fenómenos alelopáticos. Puede acompañarse de un conjunto más diverso de especies cuando no hay dispersión de propágulos en el sitio. Favorecen el reclutamiento incidiendo en las condiciones físico-químicas y biológicas de los sitios, pueden proveer sombra y generar islas de fertilidad, además de servir de protección contra herbivoría
Refugios artificiales o refugios de fauna	Acumulación de ramas, restos vegetales y piedras para formar albergues temporales para la fauna o sitios de paso. Parten del conocimiento de los requerimientos de hábitat de los dispersores o depredadores de semillas. Favorecen la dispersión zoocora y la acción de organismos descomponedores para la recuperación de suelos
Perchas artificiales	Se considera una técnica complementaria y consiste en estructuras de madera con diferentes arreglos (postes, ramas, varas de bambú y otros), de 5 a 10 m de altura, que sirven para la percha de aves y murciélagos. Pueden usarse en combinación con elementos naturales (ramas secas), siendo semi-artificiales. Sirven como sitios focales de deposición de semillas para la implantación de especies vegetales
Trampolines ecológicos (stepping-stones) con grupos funcionales	En una dimensión de paisaje, corresponde a pequeñas áreas de hábitat natural recuperadas o a la introducción de pequeños refugios de fauna dentro de una matriz agrícola, con una función de facilitación específica (e.g., frugivoría y dispersión de semillas). Son válidas las plantaciones de árboles alternadas con grupos de árboles nativos, por ejemplo, a un núcleo por hectárea. Incrementa la permeabilidad de la matriz y facilitan los flujos de intercambio entre parches de hábitat natural

Referencias: Reis et al. (2010), Vargas (2011), Ceccon (2013), Lindig-Cisneros (2017), Trentin et al. (2018) Rojas-Botero et al. (2020)

otras técnicas se enfocan sobre los procesos de regeneración y contribuyen a desarrollar patrones naturales de diversidad (Bechara et al. 2016).

La conformación de ‘islas de árboles’ o pequeños parches de vegetación con especies deseables, en localizaciones estratégicas, se conoce como ‘nucleación aplicada’ (Corbin and Holl 2012; Hulvey et al. 2017). Este tipo de nucleación no solo se basa en la introducción y arreglo de especies vegetales mediante trasplantes, sino que se apoya sobre los procesos de regeneración latentes en un área (Corbin and Holl 2012; Bechara et al. 2021). Por tal razón, se reconoce como una forma combinada de las aproximaciones desde la regeneración natural, la regeneración natural asistida y la reconstrucción, adaptándose a varios escenarios con variación en el potencial de recuperación (Gann et al. 2019).

Recientemente, por la asociación a los patrones espaciales de su implementación y manejo (Shaw et al. 2020), el concepto de nucleación aplicada se empleó también para referirse al uso de otras técnicas generales, incluyendo las enmiendas de suelo y los tratamientos de expresión de bancos de semillas (Filho et al. 2013). Las alternativas que no implican usar componentes vegetales y combinar acciones mixtas más allá de las siembras en marcos de tiempo específicos pueden generar la necesidad de reformular la definición de nucleación aplicada para ampliar y hacer más operativo el concepto, pese a su reciente estandarización (Gann et al. 2019).

Considerando la diversidad de los bosques neotropicales, el espectro de técnicas de nucleación depende del conocimiento de los ecosistemas y los recursos naturales disponibles asociados a diferentes estados de degradación, para hacer fácil y práctica su restauración (García-Barrios et al. 2009). Un ejemplo es el desarrollo de parches de vegetación alrededor de montículos de termiteros-hormigueros en pasturas de bosque seco tropical en Colombia (Casalla and Korb 2019), que sugiere el uso potencial de estas estructuras como centros de regeneración natural al estilo de las plantas nodrizas (Vieira et al. 2013; Löf et al. 2014; Badano et al. 2016). Un caso similar es el de las ‘rocas nodrizas’, reportadas por Carlucci et al. (2011) en Brasil, que influyen la expansión del bosque brindando sitios seguros para la colonización y establecimiento de plantas leñosas.

Condiciones que favorecen la nucleación

La composición del paisaje, su grado de fragmentación, la cantidad de tipos de hábitat y los usos de la tierra pueden afectar la dispersión y establecimiento de las especies, así como las interacciones bióticas entre los organismos y los flujos de agua y de nutrientes, incidiendo en la efectividad de la nucleación (Corbin and Holl 2012). Un paisaje con fragmentos de bosque natural a distancias adecuadas promueve la dispersión y establecimiento de las especies, la conectividad y resiliencia entre sitios, y aumenta los efectos de interacción de borde, favoreciendo la nucleación (Ceccon 2013; Hulvey et al. 2017). Esta condición facilita que los flujos ecológicos se den en doble vía: del bosque al área en restauración y desde el área en restauración hacia el bosque o área circundante (Reis et al. 2010). Es decir, la unión de parches en un proceso de sucesión ecológica dirigido por la nucleación permite que los mecanismos de restablecimiento de los ecosistemas se manifiesten de forma natural (Reis et al. 2010).

Además, en la nucleación aplicada no solo es fundamental disponer de fuentes de propágulos y dispersores para el reclutamiento, sino que elegir y conocer las características de las especies a introducir puede evitar ralentizar la formación de microhábitats y el avance de la sucesión (Padilla and Pugnaire 2006; Martínez-Garza et al. 2013). Incluir especies y genotipos con buenas habilidades de dispersión, considerando diferentes tipos de síndromes (gravedad, viento y animales), puede facilitar los procesos de dispersión asociados a los núcleos (Hulvey et al. 2017). Los rasgos funcionales de las especies de árboles remanentes también pueden incidir de forma positiva en la dispersión de semillas y en el reclutamiento de plántulas (Derroire et al. 2016; Zahawi et al. 2021) al interior de los núcleos y sus áreas circundantes. La nucleación se puede favorecer si se anticipan efectos de inhibición sobre el reclutamiento y la expansión de los núcleos, producidos ya sea por el tipo de implementación y mantenimiento (Holl et al. 2011; Corbin and Holl 2012; Barrera-Cataño et al. 2022) o por el impacto de la herbivoría, la competencia con especies invasoras o eventos de fuego naturales o antrópicos (Peterson et al. 2014; Bhadouria et al. 2016; Holl et al. 2020; Wilson et al. 2021).

Aspectos sociales y económicos (e.g., la inclusión del conocimiento tradicional local

en la selección de especies o el uso de otros elementos) pueden llevar a la aceptación y la apropiación social de prácticas de RE —entre ellas, la nucleación—, y agregarle valor a los proyectos (Méndez-Toribio et al. 2021), minimizando los riesgos de pérdidas por prácticas inadecuadas o presiones antrópicas. La inversión económica para actividades esenciales de mantenimiento en los primeros años puede garantizar el establecimiento exitoso de las plantas sembradas (Holl et al. 2011; Wilson et al. 2021), llevando al desarrollo estructural de los núcleos, sin el cual no se producirían cambios en la regulación microclimática y la aparición de nichos de regeneración (Zahawi and Augspurger 2006; Rey-Benayas et al. 2008). En síntesis, los intereses socioeconómicos alineados con los objetivos de la nucleación pueden contribuir a su sostenibilidad a largo plazo.

Beneficios de la nucleación y desventajas

La nucleación contribuye a superar barreras ecológicas como la baja disponibilidad de propágulos, la carencia de micrositios de implantación protegidos, la escasa oferta de especies determinantes para activar la sucesión, la capacidad limitada de agentes dispersores para el transporte de propágulos y las condiciones microclimáticas agrestes (Vargas 2011; Lindig-Cisneros 2017; Holl et al. 2020). De acuerdo con las necesidades del sitio, la técnica se puede adaptar a propósitos como: a) sitios de atracción de animales (e.g., dispersores, polinizadores o detritívoros) en los que se provee alimento o refugio; b) sitios para la captura y deposición de semillas; c) islas de recursos con sombra, nutrientes, humedad y protección contra herbivoría; d) islas de biodiversidad para aumentar la riqueza; e) ser centros de desarrollo rápido de coberturas y estructura de la vegetación, y f) ser islas de acumulación de biomasa, suelo y residuos vegetales (hojarasca y leños) (Bechara et al. 2016; Hulvey et al. 2017).

En el contexto productivo, la plasticidad de la nucleación permite concebir diferentes metas y objetivos en los proyectos, que varían en posibilidades de implementación (Reis et al. 2010) y escalas de ejecución (Hulvey et al. 2017). Esta propiedad la faculta como técnica para alcanzar logros de desarrollo sostenible asociados a un territorio, conduciendo a la adaptación de modelos acordes con los intereses de uso del suelo de las poblaciones humanas (Rey-Benayas 2008). En la práctica, significa la opción de usar la nucleación en

diferentes configuraciones dentro del paisaje (Hulvey et al. 2017) sin que su aprovechamiento socioeconómico restrinja la recuperación de servicios ecosistémicos (e.g., polinización, fertilidad del suelo, materia orgánica del suelo) y la conectividad ecosistémica. Es decir, la restauración a través de la nucleación es una forma de aumentar la biodiversidad de sistemas agropecuarios y sus servicios (Kazemi et al. 2018), y poner en práctica el concepto de paisajes multifuncionales sostenibles recuperando las funciones del ecosistema para mejorar la producción y el bienestar de la población (Gann et al. 2019).

En el caso específico de la nucleación aplicada, se estableció que los beneficios no solo incluyen la atracción de dispersores y la facilitación del reclutamiento de otras plantas, sino que los núcleos sirven como áreas focales de colonización donde hay mayor heterogeneidad del hábitat para diversos organismos (Zahawi et al. 2013; Holl et al. 2013; Bechara et al. 2016; Hulvey et al. 2017). Otros beneficios en ambientes degradados como las pasturas son la provisión de sombra para suprimir el crecimiento de heliófitas dominantes (Holl et al. 2021) y la exportación de semillas desde los núcleos a sitios inmediatos con baja regeneración (Reis et al. 2010; Wilson et al. 2021). Cabe destacar que, según el contexto específico, la nucleación tiene el potencial de lograr metas de restauración a un costo menor que estrategias como las plantaciones forestales tradicionales (Holl et al. 2020; Bechara et al. 2021; Wilson et al. 2021).

A pesar del componente artificial de las implementaciones, la nucleación puede crear un sistema menos determinístico que el que se obtiene con modelos forestales tradicionales, lo que permite una mayor apertura a la variedad de flujos aleatorios en el paisaje (Reis et al. 2010; Ceccon 2013). Una vez que se forman los núcleos, su expansión aumenta la probabilidad de conexión, lo cual genera nuevas condiciones microambientales y aumenta la diversidad del sistema restaurado con la aparición de nuevos nichos de regeneración para las especies (Corbin and Holl 2012; Ceccon 2013).

La nucleación puede tener desventajas en ambientes donde la competencia con especies exóticas agresivas es una barrera tanto para su establecimiento como para la regeneración natural, y donde la dispersión no es mediada en buena medida por los animales (Corbin and Holl 2012). En estos contextos, las invasiones

de exóticas ejercen una resistencia biótica a la persistencia y la expansión de los núcleos, lo cual dificulta el reclutamiento de plántulas, el desarrollo vegetal, el inicio de trayectorias sucesionales y la conectividad (Hulvey et al. 2017). Así, la velocidad de recuperación, la previsibilidad y la resistencia a factores adversos como las invasiones biológicas y otras presiones pueden ser de nivel intermedio, en comparación con otras técnicas (Ceccon 2013; Bechara et al. 2016). Las respuestas sucesionales esperadas pueden tomar mayor tiempo, pues se ha visto que el tipo de implementación y mantenimiento (incluyendo el control de exóticas) puede inhibir el reclutamiento natural en los primeros años (Barrera-Cataño et al. 2022).

Otra desventaja de la nucleación se presenta a nivel de respuestas funcionales como las vinculadas al ciclo de nutrientes, que resultan de menor magnitud luego de la primera década, en comparación con técnicas como las plantaciones tradicionales (Holl et al. 2020). La mayor desventaja es su poca viabilidad en sitios muy fragmentados, con condiciones hidrológicas y edáficas severamente alteradas, donde es necesario realizar otras acciones para la reconfiguración topográfica y para la recuperación de suelos y de cobertura vegetal (Corbin and Holl 2012).

EXPERIENCIAS DE NUCLEACIÓN CON APROXIMACIÓN A BOSQUES DEL NEOTRÓPICO

A nivel global, las experiencias de nucleación se centraron sobre los bosques neotropicales en estados altos de transformación y degradación por actividades agropecuarias, en especial. Reis et al. (2010) recopilaron las bases teóricas y expusieron el papel de la nucleación en la restauración y la gama de técnicas disponibles, resaltando la necesidad de integrar la teoría ecológica y su aplicación práctica en los proyectos. Corbin y Holl (2012) exploraron el potencial de la nucleación aplicada y sus ventajas relativas sobre otras estrategias, y concluyeron que es necesario realizar experimentos para evaluar la influencia de factores variantes en su efectividad.

Boaneres y de Azevedo (2014), encontraron que la mayor contribución al tema la hizo Brasil (período 1996-2012), con ~50% de los estudios revisados (n=30), y que las investigaciones se centraron en el uso de varias técnicas, siendo las más exitosas perchas, plantaciones en

islas y la regeneración natural. Bechara et al. (2016) ofrecieron un panorama comparativo entre las opciones de restauración de bosques húmedos neotropicales, desde la década del 90 en Latinoamérica y España (Tabla 3). Este estudio indicó dos perspectivas. Por un lado, la perspectiva brasilera se enfoca en combinar diversas 'técnicas de nucleación' para establecer varios tipos de núcleos de tamaños variables, con el fin de incrementar la heterogeneidad de los sitios a partir de las interacciones entre los diversos elementos conformantes. Por otro lado, la perspectiva centroamericana evaluada en Costa Rica enfatiza la implementación de islas de gran tamaño compuestas solo por árboles, separadas a distancias considerables. En ambos casos hay coincidencia en la reducción del área de implementación como una ventaja que disminuye costos. Shaw et al. (2020), en su revisión sobre métodos basados en patrones espaciales para la restauración y manejo de la vegetación, encontraron que 46% de las investigaciones se asociaron a la nucleación; los estudios se enfocaron en la lluvia de semillas y la diversidad dentro de los núcleos, enfatizando en la facilitación de la restauración a través del incremento del reclutamiento de semillas por dispersión animal.

Entre los estudios observacionales y experimentales, es precursora la investigación de Zahawi y Augspurger (2006) en un bosque húmedo de Honduras. La misma evaluó la habilidad de islas de siembra de árboles como focos de reclutamiento, encontrando que las más grandes tuvieron mayor arribo de semillas y regeneración natural, sin importar su distancia al bosque secundario. Filho et al. (2013), en Brasil, implementaron cuatro tratamientos de nucleación por trasposición de suelo, encontrando diferencias en la germinación y densidad de plántulas atribuidas al sustrato base utilizado. Derroire et al. (2016), en Costa Rica, evaluaron la función de árboles aislados en pasturas como núcleos de regeneración natural, y hallaron una correlación entre los rasgos funcionales de los árboles y la composición funcional del ensamble de plántulas reclutado. A nivel de experimentos de largo plazo, se destaca el realizado en Costa Rica por Cole et al. (2010) en un bosque húmedo montano; estos autores comenzaron evaluando el efecto del tamaño de los núcleos compuestos por especies seleccionadas y el área del bosque circundante sobre la deposición de semillas. La serie de estudios y experimentos subsecuentes a esta experiencia (Holl et al.

2011; Holl et al. 2013; Zahawi et al. 2013; Holl et al. 2017) también evaluaron resultados diferentes al establecimiento de las especies o el reclutamiento; por ejemplo, la diversidad de artrópodos de la hojarasca (Cole et al. 2016) y la actividad de las comunidades de murciélagos (Reid et al. 2015).

Entre los aportes más recientes sobresalen el de Piaia et al. (2020), quienes compararon, para un bosque semi-húmedo de Brasil, núcleos de plántulas de diferentes especies; los autores encontraron que el efecto de facilitación por grupos funcionales tiene el potencial de acelerar la sucesión. Holl et al. (2020) recopilaron lecciones de 15 años de experiencias en Centroamérica, enfatizando los cambios propiciados en la primera década por la nucleación y sugiriendo las condiciones bajo las cuales puede resultar más efectiva. Holl et al. (2021) resaltaron la expansión vegetativa como una característica clave de las especies empleadas en la nucleación en ambientes dominados por especies exóticas. Finalmente, Bechara et al. (2021), en un bosque húmedo subtropical, compararon el rendimiento de la nucleación con los de plantaciones de alta diversidad, encontrando mayor similitud entre las composiciones de plántulas obtenidas por nucleación y regeneración natural, a costos inferiores al 34%. La Tabla 3, sintetiza algunas investigaciones sobre la nucleación.

DESAFÍOS DE USAR LA NUCLEACIÓN EN BOSQUES NEOTROPICALES

La nucleación es una técnica muy poco usada, no solo en el Neotrópico (Wilson et al. 2021), sino a nivel global (Boanares and de Azevedo 2014). Representa un desafío en la restauración de paisajes forestales, en los que su implementación parece inoportuna frente a otras alternativas potencialmente aptas (Ceccon 2013; Holl et al. 2020). Para el Neotrópico, Holl et al. (2020) y Wilson et al. (2021) indicaron que es necesario resolver interrogantes relacionados con las consideraciones técnicas y sociales para desarrollar la nucleación aplicada de forma experimental, incluyendo temas como la composición de especies, la relación entre el grado de estrés del ecosistema y las distancias de siembra, las configuraciones alternativas de implementación (técnicas y arreglos espaciales) y la comparación con otros métodos viables a gran escala. Piaia et al. (2021), por su parte, señalaron el reto de monitorear los resultados de la RE mediante nucleación a través de indicadores ecológicos adecuados. Retomando estos aspectos, la Figura 2 esquematiza las etapas síntesis para desarrollar la nucleación en planes de restauración, junto con el abordaje de algunos de los desafíos centrales que enfrenta su aplicación en la restauración de bosques neotropicales.

Tabla 3. Aproximación sintética de la contribución histórica al uso de la nucleación como técnica.

Table 3. Synthetic approach to the historical contribution to the use of nucleation as a technique.

Autor(es) y región	Año	Contribución
Janzen (Costa Rica)	1988	Uso de parches de nodrizas y recuperación de un bosque mediada por vertebrados a partir de la siembra de 'árboles núcleo'
Nepstad et al. (Brasil)	1991	Propuesta de siembra de 'árboles catalizadores' o árboles formadores de islas llevando a la formación de fragmentos de bosque
Wunderle (EE.UU.)	1997	Sugerencia del uso de 'archipiélagos' de parches pequeños de restauración o islas de vegetación de 50 m, dispersos dentro de áreas abiertas degradadas para reducir aislamiento y promover una adecuada lluvia de semillas
Harrington (EE.UU.)	1999	Plantaciones en grupos de árboles o 'islas de árboles' para promover la heterogeneidad espacial, mejorar el suelo y el microclima, ser trampas de semillas dispersadas por el viento y servir como perchas y cobertura (refugio) para animales dispersores
Robinson y Handel (EE.UU.)	2000	
Zahawi y Augspurger (Honduras)	2006	
Rey-Benayas et al. (España)	2008	Propuesta de 'isletas de elementos leñosos' plantados densamente, bien espaciadas en cerca del 1% del terreno para incrementar la heterogeneidad y biodiversidad usando un grado intermedio entre la restauración y plantaciones forestales convencionales
Reis et al. (2010) (Brasil)	2010-	Aplicación de la teoría de Yarranton y Morrison de 1974 en bosques neotropicales con aproximación integral que combina diferentes técnicas de uso de elementos bióticos y abióticos (opciones diferentes a la siembra de árboles)
Cole et al. (2010) y Holl et al. (2011, 2013, 2020) (Costa Rica y Centroamérica)		Aplicación de la teoría de Yarranton y Morrison de 1974 en bosques neotropicales con aproximación a la conformación de parches o islas por siembra de árboles
Adaptado de Bechara et al. (2016)		

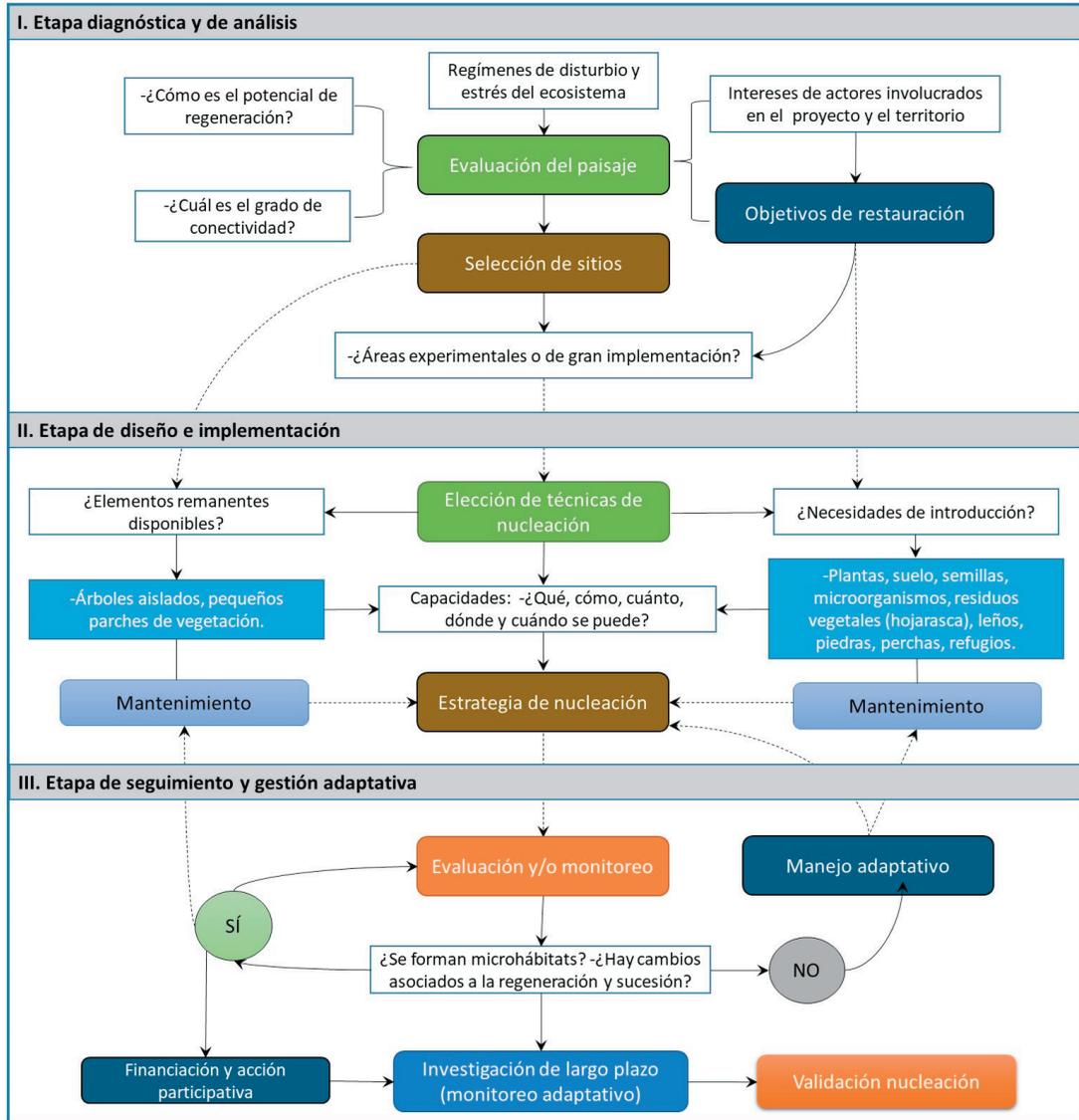


Figura 2. Síntesis para el desarrollo de la nucleación en planes de restauración y abordaje de desafíos.
Figure 2. Synthesis for the development of nucleation in restoration plans and addressing challenges.

Etapa diagnóstica y de análisis

Uno de los puntos de esta etapa es la definición de objetivos de restauración, derivados de las necesidades y prioridades identificadas para un área en la que su aceptación social es un condicionante para adoptar determinadas estrategias de restauración (Holl et al. 2020). Saber si los objetivos planteados a corto, mediano y largo plazo se cumplen mediante la nucleación, y la pertinencia entre objetivos-estrategias (Holl 2017), es fundamental para entender cómo la nucleación sería una alternativa coherente dentro del ejercicio de restauración (Reis et al. 2010) y cómo es consistente con las metas y objetivos de los proyectos (Bechara et al. 2021).

En Latinoamérica y el Caribe, los objetivos de restauración comprenden sobre todo aumentar la cobertura vegetal, recuperar la biodiversidad y los procesos ecológicos, generar empleo y medios de subsistencia, capturar y almacenar carbono, mejorar la productividad de tierras, la conectividad ecológica, el control de la erosión y recuperar el hábitat de especies amenazadas (Romijn et al. 2019). Estos objetivos pueden variar y resultar más o menos desafiantes según el marco normativo de los países (Méndez-Toribio et al. 2017), los escenarios particulares encontrados para diferentes ecosistemas y la historia de uso de la tierra (Murcia and Guariguata 2014; Murcia et al. 2017). Por

ejemplo, en ecosistemas secos, la nucleación es clave para controlar malezas, manejar el fuego, mitigar la erosión y para establecer fuentes de semillas a largo plazo (Hulvey et al. 2017), sin desconocer su virtud con respecto a otros objetivos y tipos de ecosistemas boscosos.

Otro desafío clave es la evaluación del paisaje como un aspecto inicial para priorizar áreas de implementación de estrategias basadas en nucleación, dada la importancia que tiene la configuración espacial en la conectividad de las coberturas vegetales y la dinámica de la sucesión ecológica (Ceccon 2013). Conocer las barreras ecológicas y socioeconómicas (Holl 2017), así como el potencial de regeneración (Csákvári et al. 2022; Ruíz et al. 2023) y de dispersión de propágulos en los bosques a nivel del paisaje (Corbin et al. 2016) resulta esencial antes de iniciar un proceso de restauración mediante la nucleación. De manera similar, la historia de uso, el régimen de disturbios, el régimen de estrés, los patrones de sucesión o regeneración y el estado de degradación (Vargas 2011) son piezas esenciales para determinar las vías de inicio de la nucleación.

Saber cómo, dónde y por qué ciertos sitios del paisaje no solo son adecuados para la nucleación por sus beneficios ecológicos (Hulvey et al. 2015), sino por su potencial para satisfacer demandas socioeconómicas de la población local, es un reto mayor (Holl et al. 2020). Los sitios donde hay menos regeneración natural son buenos candidatos para la nucleación (Wilson et al. 2021), pero los sectores con niveles de resiliencia intermedia son los que posiblemente albergan sitios aptos para su desarrollo (Ruíz et al. 2023). Este nivel de conocimiento facilita vislumbrar el escalamiento para implementar la nucleación en grandes áreas; en este caso, el enfoque de restauración del paisaje forestal (Sabogal et al. 2015; Stanturf and Mansourian 2020) es la vía para conciliar las oportunidades de restauración con las presiones de usos productivos. Así, tanto sitios degradados con baja vocación productiva como aquellos de alto potencial de conservación, pueden contemplarse en iniciativas de doble vía (desde o hacia los actores sociales del territorio), siempre que la nucleación sea socialmente aceptada en un esquema participativo y transdisciplinario (Herrera-Varón and Pinzón-Arias 2021).

Shaw et al. (2020) hicieron énfasis en la importancia de la selección de los sitios

y la configuración inicial de los parches, planteando como desafío comprometer experiencias donde, a pesar de no observarse de manera natural el patrón de sucesión por nucleación, opere la facilitación entre algunas especies. Aquí es relevante la integración del conocimiento local sobre las interacciones entre especies y su implicancia en la conformación natural de las comunidades vegetales, para replicar ensambles dentro de la nucleación. Este tipo de desafíos se puede extender a todas las técnicas de nucleación y sus combinaciones.

Etapa de diseño e implementación

Desde el diseño, las técnicas elegidas deben concebirse de tal forma que puedan restablecer o acelerar los procesos naturales, siendo los componentes de los núcleos no solo claves en la funcionalidad de los bosques, sino apropiados para inducir respuestas sucesionales relativamente rápidas (Torres-Rodríguez et al. 2019). Esto conduce a evaluar la importancia relativa de una u otra técnica de nucleación en una estrategia, abriendo la posibilidad al planteamiento de múltiples configuraciones, en atención a los objetivos de restauración (Holl et al. 2020).

La selección de las técnicas de nucleación involucra conocer los elementos que permanecen en los sitios de restauración, así como la necesidad de reintroducir componentes clave eliminados por factores de degradación (e.g., suelo, microorganismos, bancos de semillas, agentes dispersores), y los tipos de recursos necesarios para su implementación (e.g., materiales, instrumentos, herramientas, equipos tecnológicos, infraestructura operativa). Aunque se ha recomendado que las diferentes técnicas de nucleación se implementen en conjunto (Reis et al. 2010; Bechara et al. 2016), su aplicación depende de los recursos materiales y tecnológicos disponibles a nivel local o regional (Filho et al. 2013). De acuerdo con la técnica, la incorporación de elementos (bióticos o abióticos) puede supeditarse a las facilidades para su acceso y uso, como también a la cantidad requerida y sus costos (Murcia and Guariguata 2014), siendo un desafío definir su balance y las formas de obtención, sin sacrificar las metas de los proyectos.

En el caso de la nucleación aplicada, Wilson et al. (2021) establecieron los siguientes temas como desafíos por resolver en cada experiencia: a) el tamaño óptimo, la forma

y el espaciamiento entre los núcleos; b) la configuración espacial de la implementación; c) la cantidad de área a ser sembrada; d) la selección de especies y el material vegetal; e) la distancia de siembra entre las plantas; f) la ubicación de las especies en arreglos florísticos y sitios de implementación, y f) las necesidades de mantenimiento. Además, Holl et al. (2020) y Wilson et al. (2021) coinciden en que la percepción de los propietarios de tierra y actores involucrados en la RE son limitantes potenciales de este tipo de nucleación, siendo un reto hacer que las necesidades y preferencias sociales sean compatibles y estén involucradas en el diseño e implementación de las estrategias.

Las capacidades técnicas, logísticas y económicas constituyen otros aspectos para atender la implementación de las estrategias basadas en nucleación (Wilson et al. 2021). Existen necesidades de capacitación y de entrenamiento de personal que, aunque no son necesariamente un escollo (Ramírez-Soto et al. 2018), representan una ventaja para los rendimientos de su implementación en proyectos de gran envergadura. Otras son las condiciones para el transporte de materiales y personal, en las que inciden la proximidad, el estado de las vías de acceso, la complejidad topográfica y los costos de operación específicos de un lugar (Murcia et al. 2017). Las limitaciones económicas pueden determinar la calidad y la cantidad de los materiales y del talento humano a los cuales se acceden (Murcia and Guariguata 2014), así como la proporción de área destinada a la nucleación y la posibilidad de desarrollar mantenimientos como parte integral de una estrategia (Trentin et al. 2018). La posibilidad de ofrecer incentivos socioeconómicos está implicada en la implementación de la nucleación a gran escala (Holl et al. 2021).

Evaluación o monitoreo de resultados y gestión adaptativa

Igual que con otras técnicas o estrategias de restauración, la nucleación presenta un gran desafío en términos de evaluación y seguimiento de sus resultados durante el tiempo (Ramírez-Soto et al. 2018). Una de las primeras necesidades es alinear las pretensiones del monitoreo con el alcance de los objetivos de restauración específicos para distintos plazos y conforme a las estrategias de RE. Habitualmente, los proyectos terminan en plazos cortos (Murcia and Guariguata 2014),

comprometiendo solo objetivos de interés inmediato (Dimson and Gillespie 2020) sin que el monitoreo sirva para conocer el comportamiento de la sucesión inducida por la formación de microhábitats a partir de la nucleación (Corbin et al. 2016). En consecuencia, asegurar la continuidad y sostenibilidad del monitoreo a largo plazo, comprometiéndolo al apoyo financiero y comunitario, es una tarea pendiente para experiencias de nucleación vigentes y futuras.

Otra necesidad es que las variables y sus formas de medición sean suficientemente claras dentro del programa de monitoreo, y que su selección y métodos se orienten a la detección de cambios asociados a la sucesión y regeneración en escalas espacio-temporales adecuadas (Herrick et al. 2015). La evaluación del éxito de la nucleación incluye a las dimensiones de composición, estructura y función, implicando atributos como la composición de especies en la regeneración natural, la cobertura del suelo, el desarrollo de estratos de vegetación y el ensamble de grupos funcionales (Piaia et al. 2021). Sin embargo, no siempre es posible usar múltiples indicadores relevantes durante el monitoreo, en especial si la adición de alguno involucra mayores esfuerzos y costos. En experiencias de nucleación aplicada, pese al énfasis dado al monitoreo del desempeño durante el establecimiento, la medición de variables funcionales de las especies utilizadas y sus respuestas, según los tratamientos de RE (Fremout et al. 2021), es poco abordada y requiere más atención. Un gran desafío a largo plazo es lograr evaluar el aumento de la conectividad del paisaje, la recuperación de la diversidad de especies nativas en el gradiente sucesional (etapas temprana, intermedia y tardía) y la recuperación paulatina de servicios ecosistémicos específicos.

La relación costo-efectividad de las estrategias basadas en nucleación es un aspecto que depende de los retornos conseguidos tras la inversión en los proyectos de restauración (Holl et al. 2011; Trentin et al. 2018; Bechara et al. 2021). Al implementar distintas alternativas de nucleación, un reto vigente es esclarecer de qué manera las relaciones de costo-beneficio resultan en mayor o menor costo-efectividad (Barrera-Cataño et al. 2022). Desde la década pasada se demandan estudios que, más allá de reportar aspectos ecológicos asociados a las experiencias de nucleación, también informen aspectos económicos (Boanares

and de Azevedo 2014; Holl et al. 2020). En este sentido, la forma de medir la efectividad de la estrategia, acompañada por la claridad en la ejecución de los recursos presupuestarios para desarrollarla, son también temas desafiantes que pueden implicar al monitoreo.

Otro de los desafíos es la gestión adaptativa, requerida para hacer ajustes oportunos a las experiencias de nucleación, con el apoyo de información derivada del análisis de datos (Díaz-Triana et al. 2019). A menudo, la implementación de la nucleación tiende a verse estática, pero su articulación con el monitoreo a través actividades de manejo adaptativo recurrentes y el componente social, pueden cambiar su noción hacia una estrategia dinámica en la RE (Méndez-Toribio et al. 2021). La modificación, el reemplazo, el complemento o el mantenimiento de las técnicas, con base en información destinada a la toma de decisiones de manejo, puede evitar retrasos en la restauración de los bosques, más que con ajustes provenientes de medidas intuitivas o de ensayo-error (Murcia and Aronson 2014). En el caso de las invasiones biológicas que pueden afectar de forma permanente a la nucleación, el monitoreo y la gestión adaptativa sobre su impacto son fundamentales para garantizar respuestas efectivas de control o contención de especies invasoras, buscando evitar las limitaciones que producen en el proceso de restauración (Milton et al. 2007; Zalba and Ziller 2007).

Los esfuerzos de nucleación en el futuro deben contemplar marcos de investigación paralelos al monitoreo, de modo que, cumpliendo las exigencias de los proyectos de implementación, se aborden fases experimentales dirigidas a comparar los resultados de estrategias contrastantes (Holl 2017; Holl et al. 2020; Garibello et al. 2021). Uno de los desafíos es la propuesta de monitoreo adaptativo (Lindenmeyer and Likens 2009, 2010), en el que la investigación de largo plazo se consigue en ciclos de retroalimentación basados en la solución de preguntas fundamentales sobre la nucleación. Otro, es la 'restauración experimental sistémica' (Howe and Martínez-Garza 2014), que involucra usar tratamientos alternativos contrastantes para conocer respuestas múltiples ante diferentes factores, e inferir causas y efectos de su éxito con suficiente robustez. Para todo, es necesario considerar los esquemas de financiamiento y el apoyo de mecanismos de acción participativa de las comunidades locales.

HACIA LA INTEGRACIÓN DE ENFOQUES DE LA NUCLEACIÓN

Dadas las tendencias sobre las que se ha enfocado la nucleación en Latinoamérica, una propuesta para su integración en proyectos de restauración de bosques neotropicales es conciliar el uso de la 'nucleación aplicada' en conjunto con las 'técnicas de nucleación brasileras' y el empleo de árboles remanentes (Figura 3), buscando un enfoque de nucleación complementaria. En esta alternativa, la nucleación por establecimiento de parches de vegetación podría ocupar los espacios principales en sitios priorizados, mientras que las otras técnicas de nucleación podrían ensamblarse en espacios intermedios. Wilson et al. (2021) sugieren prestar atención a espacios entre núcleos conformados por árboles como espacios de regeneración natural donde desarrollar otras acciones. Su utilidad a nivel de paisaje es rescatable porque las alternativas de nucleación a esta dimensión pueden ser mixtas y servir a distintos propósitos en respuesta a múltiples objetivos de restauración.

El tema de la combinación de técnicas de nucleación busca incrementar la complejidad ecológica en múltiples escalas, a fin de aumentar, en los paisajes, las interacciones entre parches y la conectividad, que no se reduce solo al aspecto espacial. La nucleación aplicada tendría como propósito obtener complejidad estructural del microhábitat, mientras que las técnicas brasileras contribuirían poco a poco a su enriquecimiento (i.e., mayor disponibilidad de recursos) (Bechara et al. 2016). Usar diferentes técnicas es una forma integral para abordar las necesidades de RE, que conduce no solo a estabilizar la comunidad de organismos y a acelerar la sucesión (Boanares and de Azevedo 2014), sino que garantiza la heterogeneidad ambiental y la diversidad. En mayor o menor grado, su aplicación seguiría dependiendo de los recursos disponibles y del estado de partida.

La existencia de árboles aislados remanentes en el paisaje, como legado de la historia de uso y los disturbios, facilita tanto el enfoque de nucleación aplicada como el de técnicas brasileras. Como ventaja, su uso en un paisaje propicio reduciría los costos de la restauración en un área, pero depende de su disponibilidad, de las características funcionales de las especies y de la distribución espacial (Zahawi et al. 2021). Estos árboles pueden ser objeto de acciones variadas, y fundamentalmente

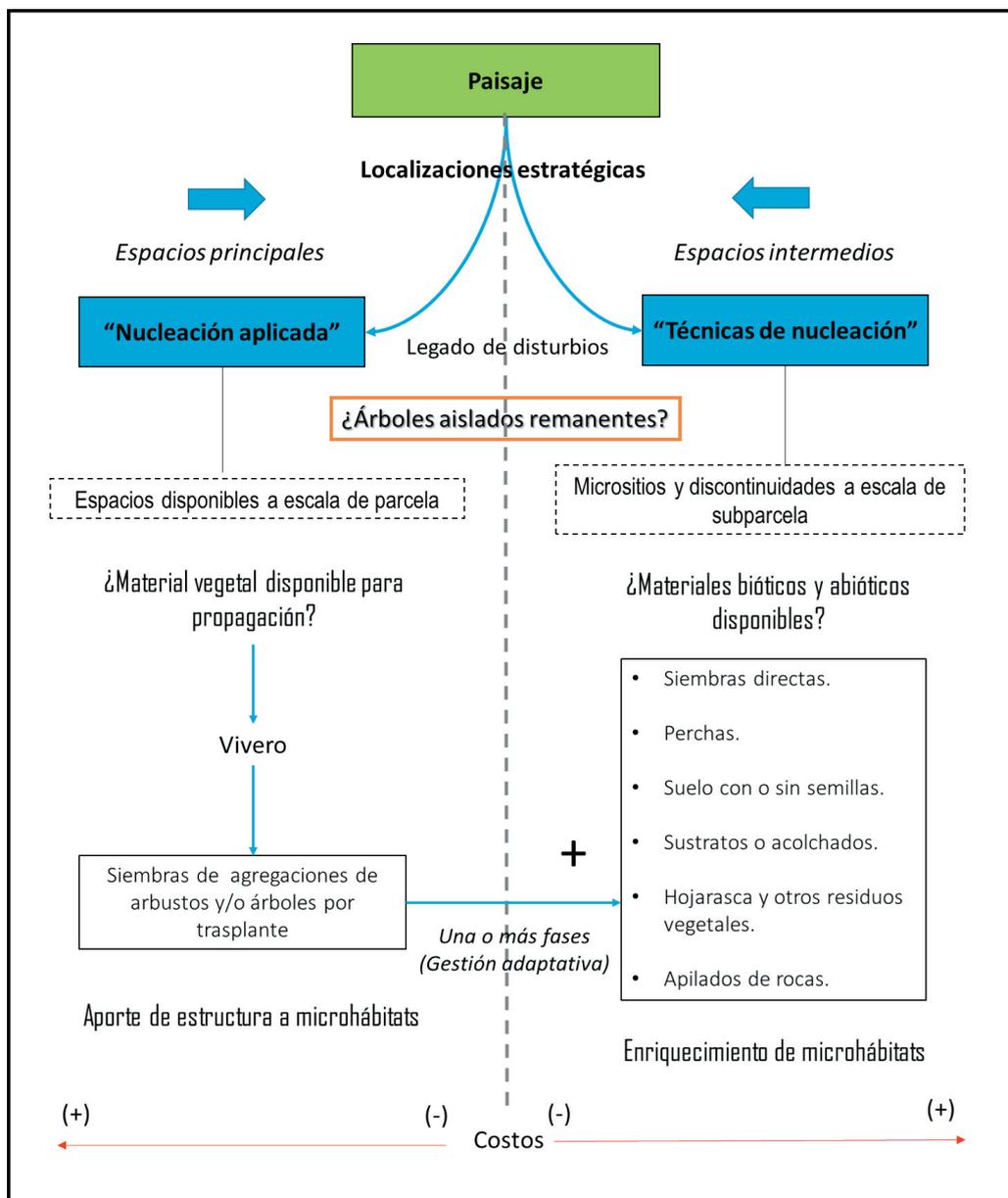


Figura 3. Propuesta para integrar enfoques de nucleación en bosques neotropicales.

Figure 3. Proposal for the integration of nucleation approaches in neotropical forests.

nodrizas y piedras de paso (stepping stones), para mejorar flujos como los asociados a los procesos de dispersión (Reis et al. 2010; Ceccon 2013).

En la práctica, se propone que los diseños de las estrategias impliquen no solo los arreglos y las distribuciones espaciales, sino que anticipen fases de retroalimentación supeditadas a la gestión adaptativa (Figura 3), en un marco flexible para incorporar las variaciones necesarias. Es posible que el

usar una u otra técnica sea pertinente en un estado de avance específico, así como otro tipo de acciones adicionales que se requieren en el mantenimiento de cualquier opción de nucleación. La ventaja en los bosques neotropicales, es la enorme variación de circunstancias y escenarios donde se encuentran recursos naturales disponibles (Cayuela and Granzow-de la Cerda 2012) que permiten plantear soluciones basadas en la naturaleza (Gann et al. 2019) para el manejo de la nucleación.

CONCLUSIONES

La nucleación es un conjunto de técnicas de RE que se fundamenta en un modelo de sucesión que se concentra en parches focales constituidos por elementos vivos e inertes, buscando la formación de microhábitas o micrositos protegidos donde se favorezca la colonización, reclutamiento y regeneración de especies nativas. Esta técnica es potencialmente aplicable en diferentes escenarios encontrados en los bosques neotropicales, adaptándose a diferentes potenciales de recuperación, pero requiere de condiciones mínimas de conectividad en el paisaje para su efectividad. Por tal razón, la dinámica de la nucleación se fundamenta en las interacciones interespecíficas entre organismos incorporados y dispersados, siendo relevantes la facilitación in situ y los flujos de intercambio entre parches. Dicha dinámica también contempla la expansión y la fusión de los núcleos.

Las estrategias basadas en nucleación no necesariamente deben estar limitadas a una técnica específica, pues su organización depende de los objetivos de restauración planteados en un proceso, y puede implicar a una o varias técnicas dependiendo de los intereses identificados. Esta posición abre campo a una gama de alternativas que pueden basarse en el manejo de componentes vegetales, animales o abióticos, en distintas disposiciones, formas, cantidades y configuraciones espaciales que permitan ampliar la heterogeneidad ambiental y las interacciones entre componentes. Sin embargo, las posibilidades de su implementación pueden estar condicionadas a las facilidades de uso y acceso, a los recursos materiales y tecnológicos requeridos, y a los costos implicados en una escala de trabajo específica.

Con respecto a las experiencias desarrolladas en Latinoamérica, existe una tendencia fuerte a concentrarse en países de Centroamérica como Costa Rica, y de Suramérica como Brasil, donde se desarrollaron los modelos difundidos de las técnicas más conocidas ('nucleación aplicada' y 'técnicas de nucleación'), que han sido comparadas con otras estrategias tradicionales. Algunas de las experiencias no se publican en la literatura científica y se encuentran en trabajos de tesis o literatura gris, pero existe una fuerte tendencia a concentrar los esfuerzos en técnicas de siembra por trasplante. No obstante, a lo largo del tiempo tuvo lugar una combinación

de iniciativas que parten desde las necesidades de proyectos de intervención y proyectos de investigación, abriendo paso a estudios teóricos, observacionales y experimentales, en diferentes localidades.

El uso de estrategias de restauración basadas en nucleación enfrenta desafíos en el Neotrópico, donde todavía es necesario que se difunda su modelo y fundamentos para aplicarlas en diferentes tipos de bosques. Estos desafíos incluyen, entre otros, aspectos como: 1) la definición y comprensión de los objetivos de restauración alcanzables mediante nucleación; 2) la selección de técnicas coherentes con los objetivos y acordes a la realidad de los territorios; 3) la evaluación del paisaje sobre el estado de degradación y el potencial de regeneración; 4) la priorización de sitios potencialmente aptos para la nucleación; 5) la selección de especies facilitadoras iniciales según los sitios; 6) las capacidades técnicas, logísticas y económicas para la implementación y mantenimiento; 7) las necesidades de monitoreo, evaluación e investigación a largo plazo, y 8) el escalamiento a nivel de paisaje contemplando los beneficios ecológicos y socioeconómicos. Sin embargo, también se abre la oportunidad a que los enfoques de nucleación desarrollados puedan sumarse bajo una propuesta de nucleación complementaria.

Se requiere que las experiencias futuras de nucleación implementen la gestión adaptativa, permitiendo ajustes oportunos de las estrategias de restauración, cuyas decisiones se basen en el análisis de datos provistos por el monitoreo y la integración de escalas de trabajo. Las necesidades de mantenimiento deben formar parte de la estrategia integral y contemplarse dentro del manejo adaptativo, al menos dentro del corto plazo. Propuestas como el monitoreo adaptativo y la restauración experimental sistémica, pueden contribuir a desarrollar marcos de investigación a largo plazo, dando valor agregado a experiencias de nucleación hechas por mandato u obligación ambiental. Abordar en simultáneo los enfoques de experimentación y de implementación en grandes áreas puede contribuir a profundizar el conocimiento, la operatividad y la adaptación del modelo de sucesión por nucleación en la restauración de un mayor rango de bosques neotropicales.

AGRADECIMIENTOS. A la Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, a través del

Proyecto de investigación ¿Cómo optimizar los esfuerzos de restauración del bosque seco?: un análisis desde el paisaje y los rasgos funcionales de las especies, Convocatoria para el Apoyo a Proyectos de Investigación y Creación Artística 2020-2022.

REFERENCIAS

- Abilash, P. C. 2021. Restoring the Unrestored: Strategies for Restoring Global Land during the UN Decade on Ecosystem Restoration (UN-DER). *Land* 10:2-19. <https://doi.org/10.3390/land10020201>.
- Aguilar-Garavito, M. 2014. Técnicas y estrategias de restauración ecológica. Pp. 142-171 *en* M. Cabrera and W. Ramírez (eds.). *Restauración ecológica de los páramos de Colombia. Transformación y herramientas para su conservación*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Bogotá, D.C., Colombia.
- Albornoz, F. E., A. Gaxiola, B. J. Seaman, F. I. Pugnaire, and J. J. Armesto. 2013. Nucleation-driven regeneration promotes post-fire recovery in a Chilean temperate forest. *Plant Ecology* 214:765-776. <https://doi.org/10.1007/s11258-013-0206-x>.
- Armenteras, D., and N. Rodríguez. 2014. Dinámicas y causas de deforestación en bosques de Latinoamérica: una revisión desde 1990. *Colombia Forestal* 17(2): 233-246. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a07>.
- Badano, E. I., O. R. Samour-Nieva, J. Flores, J. L. Flores-Flores, J. A. Flores-Cano, and J. P. Rodas-Ortiz. 2016. Facilitation by nurse plants contributes to vegetation recovery in human-disturbed desert ecosystems. *Plant Ecology* 9(5):485-497. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw002>.
- Balvanera, P. 2012. Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas* 21(1-2):136-147. URL: revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=709.
- Barrera-Cataño, J. I., J. Garibello, C. Moreno-Cárdenas, and S. Basto. 2022. Trade-offs at applying tree nucleation to restore degraded high andean forests in Colombia. *Restoration Ecology* 31(3):e13753. <https://doi.org/10.1111/rec.13753>.
- Bechara, F. C., S. J. Dickens, E. C. Farrer, L. Larios, E. N. Spotswood, P. Mariotte, and K. N. Suding. 2016. Neotropical rainforest restoration: comparing passive, plantation and nucleation approaches. *Biodiversity and Conservation* 25: 2021-2034. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1186-7>.
- Bechara, F. C., B. E. Trentin, V. Lex Engel, D. A. Estevan, and T. Ticktin. 2021. Performance and cost of applied nucleation versus high-diversity plantations for tropical forest restoration. *Forest Ecology and Management* 491:119088. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119088>.
- Bhadouria, R., R. Sing, P. Srivastava, and A. S. Raghubanshi. 2016. Understanding the ecology of tree-seedling growth in dry tropical environment: a management perspective. *Energy, Ecology and Environment* 1(5):296-309. <https://doi.org/10.1007/s40974-016-0038-3>.
- Boaneres, D., and C. S. de Azevedo. 2014. The use of nucleation techniques to restore the environment: A bibliometric analysis. *Natureza and Conservação* 12: 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2014.09.002>.
- Carlucci, M. B., L. da S. Duarte, and V. D. Pillar. 2011. Nurse rocks influence forest expansion over native grassland in southern Brazil. *Journal of Vegetation Science* 22:111-119. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2010.01229.x>.
- Casalla, R., and J. Korb. 2018. Termite diversity in Neotropical dry forest of Colombia and the potential role of rainfall in structuring termite diversity. *Biotropica* 51:165-177. <https://doi.org/10.1111/btp.12626>.
- Cayuela, L., and I. Granzow-de la Cerda. 2012. Biodiversidad y conservación de bosques neotropicales. *Ecosistemas* 21(1-2):1-5. URL: revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=725.
- Ceccon, E. 2013. Restauración de bosques tropicales: fundamentos ecológicos, prácticos y sociales. Editorial Díaz De Santos. México, D.F., México.
- Cole, R. J., K. D. Holl, and R. A. Zahawi. 2010. Seed rain under tree islands planted to restore degraded lands in a tropical agricultural landscape. *Ecological Applications* 20:1255-1269. <https://doi.org/10.1890/09-0714.1>.
- Connel, J., and R. Slatyer. 1977. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *American Naturalist* 111:1119-1144. <https://doi.org/10.1086/283241>.
- Corbin, J. D., and K. D. Holl. 2012. Applied nucleation as a forest restoration strategy. *Forest Ecology and Management* 265:37-46. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.013>.
- Corbin, J. D., G. R. Robinson, L. M. Hafkemeyer, and S. N. Handel. 2016. A long-term evaluation of applied nucleation as a strategy to facilitate forest restoration. *Ecological Applications* 26:104-114. <https://doi.org/10.1890/15-0075>.
- Csákvári, E., Z. Molnár, and M. Halassy. 2022. Estimates of regeneration potential in the Pannonian sand region help prioritize ecological restoration interventions. *Communications Biology* 5:1136. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-04047-8>.
- Derroire, G., R. Coe, and J. R. Healey. 2016. Isolated trees as nuclei of regeneration in tropical pastures: testing the importance of niche-based and landscape factors. *Journal of Vegetation Science* 27:679-691. <https://doi.org/10.1111/jvs.12404>.
- Díaz-Gallegos, J. R., and J. F. Mas-Causel. 2009. La deforestación de los bosques tropicales: una revisión. *Mapping* 136:83-96.
- Díaz-Triana, J. E., S. Torres-Rodríguez, L. Muñoz-P, and A. Avella-M. 2019. Monitoreo de la restauración ecológica en un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia): programa y resultados preliminares. *Caldasia* 41(1):43-30. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.71318>.
- Dimson, M., and T. W. Gillespie. 2020. Trends in active restoration of tropical dry forest: Methods, metrics, and outcomes. *Forest Ecology and Management* 467:118150. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118150>.

- FAO and PNUMA. 2020. El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. El Estado del Mundo. ONU, Roma, Italia. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>.
- Filho, N. L., G. Rodrigues dos Santos, and R. L. Ferreira. 2013. Comparando técnicas de nucleação utilizadas na restauração de áreas degradadas na amazonia brasileira. *Revista Árvore, Viçosa-MG* 37(4):587-597. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400002>.
- Franks, S. J. 2003. Facilitation in multiple life-history stages: Evidence for nucleated succession in coastal dunes. *Plant Ecology* 168:1-11. <https://doi.org/10.1023/A:1024426608966>.
- Fremout, T., E. Thomas, H. Taedoumg, S. Briens, C. E. Gutiérrez-Miranda, et al. 2021. Diversity for Restoration (D4R): Guiding the selection of tree species and seed sources for climate-resilient restoration of tropical forest landscapes. *Journal of Applied Ecology* 59:664-679. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14079>.
- Gann, G. D., 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, and K. W. Dixon. 2019. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology* 27:S1-S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>.
- García-Barrios, L., Y. M. Galván-Miyoshi, I. A. Valdivieso-Pérez, O. R. Masera, G. Bocco, and J. Vandermeer. 2009. Neotropical Forest Conservation, Agricultural Intensification, and Rural Out-migration: The Mexican Experience. *BioScience* 59(10):863-873. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.10.8>.
- Garibello, J., L. Riaño, J. Cuellar, J. I. Barrera-Cataño, and W. Ramírez. 2021. Identificación de vacíos de investigación aplicada para restaurar ecosistemas terrestres en Colombia. *Colombia Forestal* 24(1):88-107. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15679>.
- Gómez-Aparicio, L., R. Zamora, J. M. Gómez, J. A. Hódar, J. Castro, and E. Baraza. 2004. Applying plant facilitation to forest restoration: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications* 14(4):1128-1138. <https://doi.org/10.1890/03-5084>.
- Griscom, H. P., and M. S. Ashton. 2011. Restoration of dry tropical forest in Central America: A review of pattern and process. *Forest Ecology and Management* 261:1564-1579. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.027>.
- Grubb, P. J. 1977. The maintenance of species-richness in plant communities: the importance of the regeneration niche. *Biological Reviews* 52(1):107-145. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1977.tb01347.x>.
- Hartshorn, G. S. 2002. Biogeografía de los bosques neotropicales. Pp. 59-82 *en* M. R. Guariguata and G. H. Kattan (eds.). *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. Editorial Libro Universitario Regional, Cartago, Costa Rica. ISBN 9968-801-11-9.
- Herrera-Varón, Y., and M. Pinzón-Arias. 2021. Generalidades del monitoreo participativo y su aplicación en la restauración ecológica. Pp. 64-73 *en* M. Aguilar-Garavito and W. Ramírez (eds.). *Evaluación y seguimiento de la restauración ecológica en el páramo andino*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá D. C., Colombia.
- Herrick, J. E., J. W. van Zee, S. E. McCord, E. M. Courtright, J. W. Karl, et al. 2015. *Monitoring Manual for Grassland, Shrubland, and Savanna Ecosystems Volume 1: Core Methods*. Second Edition. USDA-ARS Jornada Experimental Range, Las Cruces, New México, USA.
- Holl, K. D. 2017. Restoring tropical forest from the bottom up. *Science* 355:455-456. <https://doi.org/10.1126/science.aam5432>.
- Holl, K. D., J. C. Lesage, T. Adams, J. Rusk, R. D. Schreiber, and M. Tang. 2021. Vegetative spread is key to applied nucleation success in non-native-dominated grasslands. *Restoration Ecology* 29:1-9. <https://doi.org/10.1111/rec.13330>.
- Holl, K. D., J. L. Reid, J. M. Chaves-Fallas, F. Oviedo-Brenes, and R. A. Zahawi. 2017. Local tropical forest restoration strategies affect tree recruitment more strongly than does landscape forest cover. *Journal of Applied Ecology* 54: 1091-1099. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12814>.
- Holl, K. D., J. L. Reid, R. J. Cole, F. Oviedo-Brenes, J. A. Rosales, and R. A. Zahawi. 2020. Applied nucleation facilitates tropical forest recovery: Lessons learned from a 15-year study. *Journal of Applied Ecology* 57:2316-2328. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13684>.
- Holl, K. D., V. M. Stout, J. L. Reid, and R. A. Zahawi. 2013. Testing heterogeneity-diversity relationships in tropical forest restoration. *Oecologia* 173:569-578. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2632-9>.
- Holl, K. D., R. A. Zahawi, R. J. Cole, R. Ostertag, and S. Cordell. 2011. Planting Seedlings in Tree Islands Versus Plantations as a Large-Scale Tropical Forest Restoration Strategy. *Restoration Ecology* 19:470-479. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00674.x>.
- Howe, H. F., and C. Martínez-Garza. 2014. Restoration as experiment. *Botanical Sciences* 92(4):459-468. <https://doi.org/10.17129/botsci.146>.
- Hulvey, K. B., E. A. Leger, L. M. Porensky, L. M. Roche, K. E. Veblen, A. Fund, J. Shaw, and E. S. Gornish. 2017. Restoration islands: a tool for efficiently restoring dryland ecosystems? *Restoration Ecology* 25:S124-S134. <https://doi.org/10.1111/rec.12614>.
- Hunter, O. M., M. Keller, D. Morton, B. Cook, M. Lefsky, M. Ducey, S. Saleska, R. C. de Oliveira, and J. Schiatti. 2015. Structural dynamics of tropical moist forest gaps. *PLoS ONE* 10(7):e0132144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132144>.
- Kazemi, H., H. Klug, and B. Kamkar. 2018. New services and roles of biodiversity in modern agroecosystems: A review. *Ecological Indicators* 93:1126-1135. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.018>.
- Lambin, E. F., P. Meyfroidt, X. Rueda, A. Blackman, J. Börner, et al. 2014. Effectiveness and synergies of policy instruments

- for land use 527 governance in tropical regions. *Global Environmental Change* 28:129-140. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.007>.
- Lindig-Cisneros, R. 2017. *Ecología de Restauración y Restauración Ambiental*. UNAM. México, D. F., México. <https://doi.org/10.22201/enesmorelia.9786070294525e.2017>.
- Löff, M., A. Bolte, D. F. Jacobs, and A. M. Jensen. 2014. Nurse Trees as a Forest Restoration Tool for Mixed Plantations: Effects on Competing Vegetation and Performance in Target Tree Species. *Restoration Ecology* 22(6):758-765. <https://doi.org/10.1111/rec.12136>.
- Martínez-Garza, C., F. Bongers, and L. Poorter. 2013. Are functional traits good predictors of species performance in restoration plantings in tropical abandoned pastures? *Forest Ecology and Management* 303:35-45. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.046>.
- Méndez-Toribio, M., C. Martínez-Garza, and E. Ceccon. 2021. Challenges during the execution, results, and monitoring phases of ecological restoration: Learning from a country-wide assessment. *PLoS ONE* 16(4):e0249573. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249573>.
- Milton, S. J., J. R. Wilson, D. M. Richardson, C. L. Seymour, W. R. Dean, D. M. Iponga, and S. Proches. 2007. Invasive alien plants infiltrate bird-mediated shrub nucleation processes in arid savanna. *Journal of Ecology* 95:648-661. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01247.x>.
- Murcia, C., and M. R. Guariguata. 2014. La restauración ecológica en Colombia: Tendencias, necesidades y oportunidades. Documentos Ocasionales 107. CIFOR. Bogor, Indonesia. <https://doi.org/10.17528/cifor/004519>.
- Murcia, C., M. R. Guariguata, M. Peralvo, and V. Gálmez. 2017. La restauración de bosques andinos tropicales: Avances, desafíos y perspectivas del futuro. Documentos Ocasionales 170. CIFOR. Bogor, Indonesia. <https://doi.org/10.17528/cifor/006524>.
- Padilla, F. M., and F. I. Pugnaire. 2006. The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4:196-202. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)004\[0196:TRONPI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004[0196:TRONPI]2.0.CO;2).
- Peterson, C. J., J. J. Dosch, and W. P. Carson. 2014. Pasture succession in the Neotropics: Extending the nucleation hypothesis into a matrix discontinuity hypothesis. *Oecologia* 175:1325-1335. <https://doi.org/10.1007/s00442-014-2986-7>.
- Piaia, B. B., A. P. M. Rovedder, D. Procknow, and B. Camargo. 2021. Assessment of ecological indicators in restoration by applied nucleation with different ages. *Ciencia Florestal* 31:1512-1534. <https://doi.org/10.5902/1980509848105>.
- Piaia, B. B., A. P. M. Rovedder, D. Procknow, B. Camargo, M. D. Gazzola, J. P. Croda, and M. de Moraes Stefanello. 2020. Natural regeneration as an indicator of ecological restoration by applied nucleation and passive restoration. *Ecological Engineering* 157:105991. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105991>.
- Ramírez-Soto, A., C. R. Lucio-Palacio, R. Rodríguez-Mesa, I. Shesefia-Hernández, F. N. Farhat, B. Villa-Bonilla, L. Landa Libreros, G. Gutiérrez Sosa, O. Trujillo Santos, I. Gómez Sánchez, and E. Ruelas Inzunza. 2018a. Restoration of tropical montane cloud forests: a six-prong strategy. *Restoration Ecology* 26:206-211. <https://doi.org/10.1111/rec.12660>.
- Reis, A., F. C. Bechara, M. B. de Espindola, N. K. Vieira, and L. L. de Souza. 2003. Restoration of damaged land areas: using nucleation to improve successional processes. *Natureza and Conservação* 1(1):85-92.
- Reis, A., F. C. Bechara, and D. R. Tres. 2010. Nucleation in tropical ecological restoration. *Scientia Agricola* 67:244-250. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000200018>.
- Rey-Benayas, J. M., J. M. Bullock, and A. C. Newton. 2008. Creating woodland islets to reconcile ecological restoration, conservation, and agricultural land use. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6:329-336. <https://doi.org/10.1890/070057>.
- Rojas-Botero, S., J. Solorza-Bejarano, J. Kollmann, and L. H. Teixeira. 2020. Nucleation increases understory species and functional diversity in early tropical forest restoration. *Ecological Engineering* 158:106031. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106031>.
- Romijn, E., R. Coppus, V. De Sy, M. Herold, R. M. Roman-Cuesta, and L. Verchot. 2019. Land Restoration in Latin America and the Caribbean: An Overview of Recent, Ongoing and Planned Restoration Initiatives and Their Potential for Climate Change Mitigation. *Forests* 10:510. <https://doi.org/10.3390/f10060510>.
- Ruíz, J., O. Vargas, and N. Rodríguez. 2023. Restoration priorities: Integrating successional states and landscape resilience in tropical dry forest compensation projects in Colombia. *Applied Geography* 157:103021. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103021>.
- Sabogal, C., C. Besacier, and D. McGuire. 2015. Restauración de bosques y paisajes: conceptos, enfoques y desafíos que plantea su ejecución. *Unasylva* 66(3):3-10.
- Shaw, J. A., L. M. Roche, and E. S. Gornish. 2020. The use of spatially patterned methods for vegetation restoration and management across systems. *Restoration Ecology* 28:766-775. <https://doi.org/10.1111/rec.13198>.
- Shimamoto, C. A., A. A. Padial, C. M. da Rosa, and M. C. M. Marques. 2018. Restoration of ecosystem services in tropical forests: A global meta-analysis. *PLoS ONE* 13(12):e0208523. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208523>.
- Stanturf, J. A., and S. Mansourian. 2020. Forest landscape restoration: state of play. *Royal Society Open Science* 7: 201218. <https://doi.org/10.1098/rsos.201218>.
- Strassburg, B. B. N., A. Iribarrem, H. L. Beyer, C. L. Cordeiro, R. Crouzeilles, et al. 2020. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature* 586(7381):724-729. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9>.
- Trentin, B. E., D. A. Estevan, E. F. S. Rossetto, M. R. Gorenstein, G. P. Brizola, and F. C. Bechara. 2018. Restauração florestal na mata atlântica: Passiva, nucleação e plantio de alta diversidade. *Ciencia Florestal* 28:160-174. <https://doi.org/10.5902/1980509831647>.

- Tres, D. R., and A. Reis. 2007. La nucleación como propuesta para la restauración de la conectividad del paisaje. II Simposio Internacional sobre restauración ecológica 11. Cuba.
- Torres-Rodríguez, S., J. E. Díaz-Triana, A. Villota, W. Gómez, and A. Avella-M. 2019. Diagnóstico ecológico, formulación e implementación de estrategias para la restauración de un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia). *Caldasia* 41(1):29-42. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.71275>.
- [UN] General Assembly. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. In: Proceedings of the General Assembly 70th Session. 2015. New York, USA.
- Vargas, O. 2011. Restauración Ecológica: Biodiversidad y Conservación. *Acta biológica colombiana* 16(2):221-246. URL: revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/19280.
- Vieira, I. R., F. S. de Araújo, and R. B. Zandavalli. 2013. Shrubs promote nucleation in the Brazilian semi-arid region. *Journal of Arid Environments* 92:42-45. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.01.009>.
- Wilson, S. J., N. S. Alexandre, K. D. Holl, J. L. Reid, R. Zahawi, D. Celentano, and L. Werden. 2021. Applied nucleation restoration guide for tropical forests. Conservation International Final Report. United States.
- Yarranton, G. A., and R. G. Morrison. 1974. Spatial Dynamics of a Primary Succession: Nucleation. *The Journal of Ecology* 62:417-428. <https://doi.org/10.2307/2258988>.
- Zahawi, R. A., and C. K. Augspurger. 2006. Tropical forest restoration: Tree islands as recruitment foci in degraded lands of Honduras. *Ecological Applications* 16:464-478. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[0464:tfrtia\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[0464:tfrtia]2.0.co;2).
- Zahawi, R. A., K. D. Holl, R. J. Cole, and J. L. Reid. 2013. Testing applied nucleation as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *Journal of Applied Ecology* 50:88-96. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12014>.
- Zahawi, R. A., L. K. Werden, M. San-José, J. A. Rosales, J. Flores, and K. D. Holl. 2021. Proximity and abundance of mother trees affects recruitment patterns in a long-term tropical forest restoration study. *Ecography* 44:1826-1837. <https://doi.org/10.1111/ecog.05907>.
- Zalba, S., and S. R. Ziller. 2007. Adaptive management of alien invasive species: putting the theory into practice. *Natureza and Conservação* 5(2):86-92.