

Gómez-Ruiz, Pilar A.; Lindig-Cisneros, Roberto

La restauración ecológica clásica y los retos de la actualidad: La migración asistida como estrategia de adaptación al cambio climático

Revista de Ciencias Ambientales, vol. 51, núm. 2, julio-diciembre, 2017, pp. 31-51

Universidad Nacional

Heredia, Costa Rica

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=665070588005>



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



La restauración ecológica clásica y los retos de la actualidad: La migración asistida como estrategia de adaptación al cambio climático

Classical Ecological Restoration and its Current Challenges: Assisted Migration as an Adaptation Strategy to Climate Change

Pilar A. Gómez-Ruiz^a, Roberto Lindig-Cisneros^b

- a Doctora en Ciencias Biológicas, integrante del Laboratorio de Restauración Ambiental del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES). Universidad Nacional Autónoma de México. Campus Morelia, México. pagomezru@iies.unam.mx
b Doctor en Manejo de Recursos Terrestres, director del Laboratorio de Restauración Ambiental del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES). Universidad Nacional Autónoma de México. Campus Morelia, México. rlindig@iies.unam.mx

Director y Editor:

Dr. Sergio A. Molina-Murillo

Consejo Editorial:

Dra. Mónica Araya, Costa Rica Limpia, Costa Rica
Dr. Gerardo Ávalos-Rodríguez. SFS y UCR, USA y Costa Rica
Dr. Manuel Guariguata. CIFOR-Perú
Dr. Luko Hilje, CATIE, Costa Rica
Dr. Arturo Sánchez Azofeifa. Universidad de Alberta-Canadá

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas

Editorial:

Editorial de la Universidad Nacional de Costa Rica (EUNA)



Los artículos publicados se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) basada en una obra en <http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales>, lo que implica la posibilidad de que los lectores puedan de forma gratuita descargar, almacenar, copiar y distribuir la versión final aprobada y publicada del artículo, siempre y cuando se mencione la fuente y autoría de la obra.



La restauración ecológica clásica y los retos de la actualidad: La migración asistida como estrategia de adaptación al cambio climático

Classical Ecological Restoration and its Current Challenges: Assisted Migration as an Adaptation Strategy to Climate Change

Pilar A. Gómez-Ruiz^a, Roberto Lindig-Cisneros^b

[Recibido: 18 de enero 2017; Aceptado: 02 de mayo 2017; Corregido: 16 de mayo 2017; Publicado: 01 de julio 2017]

Resumen

La restauración ecológica es un área muy activa de la ecología y de gran importancia para el manejo de ecosistemas. A pesar de ser una disciplina relativamente joven, los fundamentos conceptuales clásicos de la restauración parecen actualmente poco prácticos considerando los grandes retos generados por modificación y destrucción de ecosistemas a causa de actividades antrópicas (deforestación, cambio de uso de suelo, contaminación) y el cambio climático global. En el concepto clásico de restauración se pretende recuperar el ecosistema degradado a las mismas condiciones de un referente histórico. Sin embargo, hoy parece poco viable que los ecosistemas vuelvan a un estado previo a las perturbaciones, porque ya se han superado los umbrales de resiliencia. Adicionalmente, el cambio climático está modificando el ambiente a una velocidad sin precedentes. Por tal razón, la restauración ecológica necesita unir esfuerzos de diversos actores para la recuperación de ecosistemas que puedan ser sustentables y funcionales a futuro, donde las especies sean capaces de tolerar las condiciones ambientales que existirán a largo plazo. Como una estrategia de conservación de especies se ha propuesto la migración asistida, que es la translocación de especies a nuevas localidades fuera de su rango de distribución conocido. En el contexto actual de pérdida de diversidad y de ecosistemas, esta estrategia podría ser fundamental para la conformación de nuevas comunidades que luego pueden convertirse en nuevos ecosistemas, donde puedan persistir especies fundamentales para la dinámica de los ecosistemas y, al mismo tiempo, se recupere función, estructura y resiliencia.

Palabras clave: Especies invasoras, nuevos ecosistemas, paradigmas, recuperación de ecosistemas, resiliencia.

Abstract

Ecological restoration is a very active area in ecology and of great importance for ecosystems management. Despite of being a relatively young discipline, the classical concepts of restoration seem, at present, impractical considering the great challenges generated by modification and destruction of ecosystems. This is due to anthropic activities (deforestation, change of land use, pollution) and global climate change. In the classic definition of restoration, the objective is to recover the degraded ecosystem to the same conditions of a historical reference state. However, nowadays the ecosystems return to a state prior to the disturbances seems unviable, because the thresholds of resilience have already been overcome. Additionally, climate change is causing environmental changes at an unprecedented rate. For this reason, ecological restoration needs to unite efforts of diverse actors to recover ecosystems that can be sustainable and functional in the

a Doctora en Ciencias Biológicas, integrante del Laboratorio de Restauración Ambiental del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES). Universidad Nacional Autónoma de México. Campus Morelia, México. pagomezru@iies.unam.mx

b Doctor en Manejo de Recursos Terrestres, director del Laboratorio de Restauración Ambiental del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES). Universidad Nacional Autónoma de México. Campus Morelia, México. rlindig@iies.unam.mx



future, where the species could be able to tolerate the environmental conditions that will exist in the long term. Assisted migration has been proposed as a conservation strategy; it is defined as the translocation of species to new locations outside their known range of distribution. In the current context of loss of diversity and ecosystems, this strategy could be fundamental for the formation of new communities that can later become novel ecosystems where species that are fundamental to the dynamics of ecosystems can persist and, at the same time, recover function, structure and resilience.

Keywords: Ecosystems recovery, invasive species, novel ecosystems, paradigms, resilience.

1. Introducción

La restauración ecológica es una rama activa de la ecología que busca recuperar los ecosistemas que han sido dañados, degradados o destruidos (Society for Restoration Ecology [SER], 2004). A la fecha, se han realizado muchas investigaciones que muestran la complejidad y variabilidad de los procesos de restauración, dependiendo en cada caso de las características del ecosistema, el nivel de perturbación y los objetivos propuestos. Uno de los aspectos más controversiales de la restauración ecológica es determinar cuál es el punto de referencia que se debe usar como base para plantear las metas de restauración, es decir, hasta qué estado se espera recuperar el ecosistema. Esto podría resolverse de la forma planteada por Leopold (1949), al proponer que el ecosistema debe ser restaurado a las condiciones donde no había asentamientos humanos en esas áreas. Sin embargo, con la creciente velocidad de cambio de los ecosistemas, resulta muy difícil determinar la estructura y composición original de un ecosistema previo a las perturbaciones antrópicas. Adicionalmente, en la actualidad hay otros factores, como el cambio climático, que influyen el funcionamiento de los ecosistemas. Debido a esto, el marco conceptual y las estrategias de restauración necesitan ajustarse a las condiciones y necesidades actuales.

El propósito de esta revisión está dividido en tres partes. En primer lugar, presentar una síntesis de los conceptos relacionados con la recuperación de ecosistemas, desde la definición de restauración ecológica clásica hasta los diversos tipos de restauración que se manejan actualmente. En segundo lugar, indicar cuáles son algunos de los retos actuales del campo de la restauración ecológica teniendo en cuenta factores de cambio de los ecosistemas como la deforestación, el cambio de uso de suelo y el cambio climático global. Finalmente, profundizar en el tema de la migración asistida, que es una de las estrategias de manejo de ecosistemas para la conservación de especies más controversiales de las últimas décadas. Esta, aunque no es una estrategia nueva en el campo de manejo de ecosistemas, sí es de uso reciente dentro del marco conceptual y operativo de la restauración, en donde podría ser empleada para facilitar la colonización de especies en nuevas localidades dentro de procesos de restauración de ecosistemas.

2. La evolución del concepto de restauración ecológica

La restauración ecológica tiene sus orígenes en la década de 1930, hace más de 80 años, con los experimentos de restauración de comunidades vegetales de praderas en el Arboreto de la Universidad de Wisconsin, liderados por Aldo Leopold y John Curtis, entre otros. En su momento, se hablaba de que la ciencia se ocupara de la tierra, reconstruyendo lo que se tenía en un principio (Leopold, 1949). Sin embargo, fue hasta varias décadas más tarde cuando se generó el



mayor desarrollo de esta disciplina en donde se reconoció la necesidad de implementar acciones inmediatas que revirtieran o mejoraran las condiciones en los ecosistemas degradados (Bradshaw, 1984). Desde entonces, se ha considerado que la restauración ecológica es el laboratorio de prueba de las teorías ecológicas (Bradshaw, 1983; Choi, 2004; Harris, Hobbs, Higgs & Aronson, 2006; Hobbs & Norton, 1996; Jordan, Peters & Allen, 1988; Temperton, Hobbs, Nuttle & Halle, 2004) o más coloquialmente, la “prueba ácida” de la ecología (Bradshaw, 1987). En 1993, la SER unifica las ideas del concepto y define la restauración como el proceso de restablecer la estructura, función e integridad de ecosistemas nativos, así como el mantenimiento de los hábitats que proveen.

Con el desarrollo y evolución de esta disciplina, la definición de restauración ecológica ha ido cambiando. En los 90's se hicieron varias propuestas como: el retorno de un sitio degradado a una condición ecológica exacta existente antes del disturbio (Munshower, 1994), o el proceso de inducción y asistencia a los componentes bióticos y abióticos de un ambiente para devolverlos a su estado no deteriorado u original en que se encontraban (Bradshaw, 1997), y una definición similar plantea que la restauración es la creación de un ecosistema con la misma composición de especies y características funcionales del sistema que existía previamente (Urbanska Webb & Edwards, 1997). Queda en evidencia en las anteriores definiciones un dogma central ampliamente retrospectivo y enfocado en el pasado, donde se intenta reconstruir ecosistemas o hábitats que alguna vez existieron (Choi et al., 2008; J. Stanturf, Palik, Williams, Dumroese, & Madsen, 2014). Según estas propuestas el ecosistema de referencia debe ser preferiblemente prístino sin influencia humana (J. Stanturf et al., 2014), o un ecosistema que se autorregula donde la influencia humana es mínima (Perry, 2002). Entonces, la restauración hacia un estado más natural significaría regresar a una condición de fidelidad histórica (Bradshaw, 2004) con una composición de especies y estructura igual a la existente previo a la degradación. Pero el componente histórico de la definición siempre ha sido cuestionable, por lo tanto en la definición establecida por la SER en 2004 se excluye parcialmente el referente histórico, definiendo la restauración ecológica como el proceso de asistir la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido (SER, 2004).

Durante el proceso de recuperación de un ecosistema, el resultado final puede no llegar a una completa restauración funcional y estructural como se desearía. Durante la trayectoria de recuperación puede ocurrir que los procesos ecosistémicos no sigan un desarrollo ordenado hasta un único punto final, ya que por un lado los ecosistemas son dinámicos aunque sigan tendencias sucesionales y también pueden pasar por rápidas transiciones entre diferentes estados estables hacia múltiples puntos terminales (Choi, 2004; Choi, 2007; Ehrenfeld & Toth, 1997; Harris et al., 2006; Hobbs & Norton, 1996; McLane & Aitken, 2012; Michener, 1997; Palmer, Ambrose & Poff, 1997; White & Walker, 1997). De esto se derivaron otros conceptos relacionados con la recuperación de ecosistemas, tales como rehabilitación y reclamación o reemplazo (**Figura 1**). Rehabilitación hace referencia al mejoramiento de un ecosistema perturbado sin que llegue al estado original (Bradshaw, 2002; Simenstad, Reed & Ford, 2006), es una restauración parcial donde se recupera la estructura y funciones básicas del ecosistema original, particularmente la productividad (Walker & Moral, 2003). Reemplazo se refiere a tener un ecosistema funcional, pero en el que su composición y estructura no intentan asimilarse a las condiciones previas al disturbio (Ehrenfeld & Toth, 1997; Seabrook, Mcalpine & Bowen, 2011).

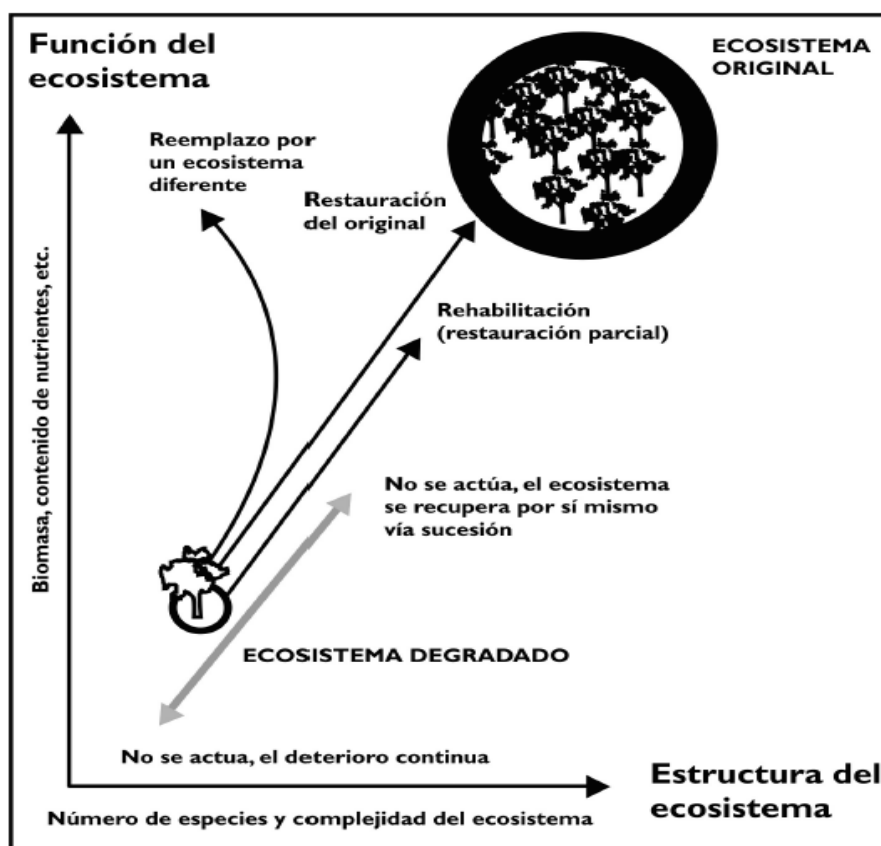


Figura 1. Alternativas de recuperación de ecosistemas respecto a su función y estructura. Tomado con permiso de Vargas-Ríos & Mora (2008), basado en Bradshaw (1984).

Algunos estudios sugieren que la terminología o definición de la restauración depende del punto de origen y de la escala espacial (Stanturf et al., 2014). Derivado de esto se pueden encontrar otras definiciones asociadas como restauración de paisaje en donde se pretende restaurar procesos ecológicos que operan a gran escala (Mansourian & Vallauri, 2014) con consideración del mosaico social y del uso del suelo en un área determinada. Por otro lado, la restauración funcional se centra en el restablecimiento de los procesos bióticos y abióticos en ecosistemas degradados, en donde la estructura y composición pueden ser diferentes a la condición histórica de referencia (Stanturf et al., 2014). Para lograr esta funcionalidad se manipulan las interacciones entre procesos, junto con la estructura y composición del ecosistema degradado (King & Hobbs, 2006). Finalmente, la revegetalización es un proceso donde no se pone tanta atención a la diversidad estructural y de composición de especies, ya que el esfuerzo está enfocado en recuperar funciones productivas primarias o evitar procesos de erosión en sitios altamente degradados (Stanturf et al., 2014). Aunque estos conceptos parecen diferir de las otras alternativas de recuperación de ecosistemas ya mencionadas, en realidad no tienen objetivos muy diferentes entre sí. La definición que se adopte dependerá del



tipo de restauración que se planea hacer con base en las metas que se esperan lograr, ya que la restauración ecológica no es una receta predeterminada que funciona en todos los ecosistemas, su fin último siempre será recuperar un ecosistema degradado, pero el camino para llegar a ello puede ser muy variable.

3. Los retos de la restauración ecológica en la actualidad

Anteriormente se presentó la definición original o clásica de restauración ecológica y algunos conceptos relacionados con la recuperación de ecosistemas. De aquí se deriva el primero de los retos que se relaciona con el establecimiento de las metas, objetivos y alcances de los proyectos de restauración. Si, por ejemplo, el interés es solo recuperar cobertura vegetal (revegetalización) con el propósito de rehabilitar o de reemplazar el ecosistema perturbado, en este punto es muy importante establecer previamente hasta dónde se espera llegar con los procesos de restauración, lo cual beneficiará la implementación y ejecución de los proyectos. Existen fuertes críticas a la práctica de la restauración relacionadas con la inaplicabilidad de un enfoque estático (una condición en el espacio/tiempo como referencia) a ecosistemas dinámicos. También puede haber un conocimiento insuficiente de los ecosistemas históricos, por lo cual se hace más difícil decidir a qué estado se quiere retornar (Hobbs, Higgs & Harris, 2009) y con la dinámica actual de los ecosistemas los referentes históricos pueden no ser muy útiles como objetivos directos de restauración, aunque sí proporcionan información importante para proponer futuros arreglos del ecosistema (Harris et al., 2006). Otro punto de crítica se refiere a que la restauración ecológica ha progresado de forma *ad hoc*, en sitios y situaciones específicas (Hobbs & Norton, 1996), por lo cual se ha dejado un poco de lado la importancia de la conectividad a nivel de paisaje. Esto impide que los métodos empleados sean reproducidos, si son desarrollados a muy pequeña escala y para ecosistemas de características muy particulares. Se espera que el alcance de la restauración sea más amplio, para que los beneficios puedan verse reflejados en un mejor funcionamiento de los ecosistemas y los servicios que proveen a las sociedades.

Se predice que lo restante de este siglo estará caracterizado por fuertes cambios en los patrones climáticos globales, de forma variable respecto a la ubicación geográfica (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014). Estas alteraciones se pueden resumir en cambios en los patrones de precipitación e incremento de la temperatura atmosférica y de los océanos, del nivel del mar y de la incidencia de eventos climáticos extremos (Harris et al., 2006). Considerando las actuales condiciones de degradación de muchos ecosistemas, irremediables en algunos casos, sumado a los efectos del cambio climático, es poco probable que se puedan restaurar ecosistemas a las mismas condiciones del pasado, esto porque muchas de las características originales se han alterado irreparablemente (Choi, 2004; Wali, 1999) y muchas de las especies clave, indispensables para el funcionamiento del ecosistema, han desaparecido (Davis, 2000; Davis & Slobodkin, 2004) a causa del cambio de uso de suelo de estos ecosistemas por actividades antrópicas.

El cambio climático es una realidad innegable a la cual debe hacerse frente con nuevas estrategias de manejo, debido a que genera condiciones sin precedentes históricos. Por lo cual, las condiciones del ecosistema en el pasado pueden ser una guía, pero no necesariamente sirven



como una receta predeterminada para lo que se necesita hacer (Higgs, 2003). Las condiciones climáticas serán probablemente muy diferentes de las actuales y más aún respecto al pasado, por lo cual un ecosistema restaurado con base en la fidelidad histórica probablemente no sea sustentable en el futuro (Choi, 2004; Harris et al., 2006; Vitousek, Mooney, Lubchenco & Melillo, 1997). Así que el objetivo de conservar la composición de las comunidades biológicas tal cual son o restaurarlas hacia algún estado histórico puede no ser viable con las condiciones ambientales y biológicas actuales y las que se esperan a futuro (Thomas, 2011). Además, para que sea posible este tipo de restauración, las especies del ecosistema de referencia deben tolerar las actuales condiciones climáticas y la variabilidad estimada por las predicciones para las próximas décadas (Cairns, 2002), lo cual es poco probable teniendo en cuenta que tienen poco tiempo para adaptarse a estas nuevas condiciones. Por lo tanto, muchas de las comunidades que hoy se reconocen, probablemente, desaparecerán para dar espacio a otras agrupaciones funcionales de las especies que logren establecerse y permanecer en diversos hábitats.

Aunque muchos proyectos de restauración ecológica permanecen enfocados en condiciones históricas y en los procesos y estructuras “naturales” (Clewett & Aronson, 2013; Hobbs, 2013), debe generarse un cambio de objetivos para la recuperación de los ecosistemas que puedan ser viables a largo plazo; pero sin desvincularse completamente de la historia del ecosistema degradado. En el contexto actual, donde hay múltiples problemáticas ambientales que requieren de intervención, también se debe tener en consideración que es importante superar las posibles limitaciones políticas, económicas y sociales que pueden llegar a impedir o detener el éxito de los esfuerzos de restauración y generar resultados fragmentados (Choi et al., 2008). El cambio de las metas de restauración que se ha dado con el paso del tiempo es un reflejo del aumento de la conciencia social, de la degradación ambiental y del reconocimiento de papel interdisciplinario que es necesario para solucionar las problemáticas ambientales (Perring et al., 2015). Por eso es muy importante la participación de diversos actores y tomadores de decisiones en el desarrollo de los proyectos de restauración, ya que, a la hora de considerar las metas de proyectos, se necesita plantear objetivos realistas que tengan sentido ecológico, sean factibles económicamente y socialmente aceptables (Halle, 2007; Hobbs, 2007), porque las metas de restauración están ampliamente influenciadas por la aceptación social (Choi, 2004; Davis & Slobodkin, 2004; Hobbs & Norton, 1996; Jackson, Lopoukhine & Hillyard, 1995) y no deben estar restringidas por una fidelidad histórica (Higgs, 2003).

4. La migración asistida de especies como estrategia de restauración de ecosistemas

Uno de los principales factores limitantes en la restauración de ecosistemas es la capacidad de dispersión de las especies (Vargas, 2011) y, ante las aceleradas modificaciones bióticas y abióticas de los hábitats en la actualidad, la dificultad para dispersarse podría ir en aumento impidiendo que las especies lleguen a nuevos sitios. Para superar esta barrera, la translocación o reubicación de especies ha sido ampliamente empleada (Seddon, 2010) y en esto consiste la estrategia de *migración asistida* que se define como el movimiento intencional de especies a sitios receptores en donde no están presentes actualmente y donde no se esperaría que las colonizaran por su propios medios en un corto plazo (Kreyling, Bittner, Jaeschke, Jentsch,



Jonas, Thiel & Beierkuhnlein, 2011). Se hace una translocación de especies para facilitar la expansión de su área de dispersión (Vitt, Havens, Kramer, Sollenberger & Yates, 2010), las especies son deliberadamente llevadas a localidades fuera de sus rangos de distribución históricos para que puedan establecer allí nuevas poblaciones (Seddon, 2010). Se le considera una estrategia adaptativa frente al cambio climático para prevenir posibles extinciones (Lunt et al., 2013; McLachlan, Hellmann & Schwartz, 2007; Richardson et al., 2009; Stanturf et al., 2014; Thomas, 2011; Williams & Dumroese, 2013). En la bibliografía se pueden encontrar otros términos para esta estrategia como colonización asistida o translocación de especies (Sáenz-Romero et al., 2016). La migración asistida puede integrarse como estrategia de restauración para facilitar la colonización de nuevas áreas en donde se pueda lograr sustentabilidad de los ecosistemas a futuro, al establecerse nuevas comunidades que recuperen atributos de función y servicios de provisión (Figura 2).

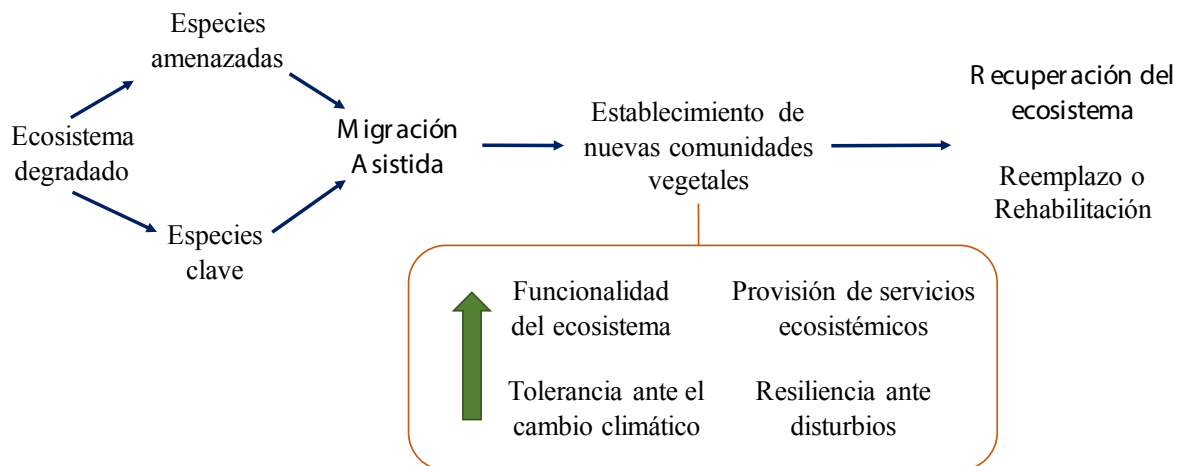


Figura 2. Integración de la migración asistida a los procesos de recuperación de ecosistemas y beneficios esperados de su implementación.

Frente al cambio climático global, las especies pueden responder de diferentes maneras a través de: adaptación por plasticidad fenotípica (ej. cambios a nivel fisiológico), evolución a nivel genético, migración a sitios con mejores condiciones ambientales o extinguirse (Aitken, Yeaman, Holliday, Wang & Curtis-McLane, 2008; Bellard, Bertelsmeier, Leadley, Thuiller & Courchamp, 2012; Davis & Shaw, 2001; Gienapp, Teplitsky, Alho, Mills & Merilä, 2008; Ledig, Rehfeldt, Sáenz-Romero & Flores-López, 2010; Rehfeldt, 1994; Reusch & Wood, 2007). Para algunas especies podrá ser más fácil adaptarse a nuevas condiciones climáticas sin cambiar su rango de distribución. Pero en el caso de especies longevas, una rápida adaptación o evolución *in situ* es poco factible, lo cual les permitiría permanecer en sus actuales hábitats en el futuro. Por lo tanto, migrar a nuevas localidades podría ser la única alternativa para escapar de la extinción (Ledig et al., 2010). Esto ya está sucediendo con algunos grupos taxonómicos, de



plantas y animales, que están cambiando sus áreas de distribución hacia mayores latitudes y altitudes, al tiempo que el clima se va calentando (Hickling, Roy, Hill, Fox & Thomas, 2006; Lenoir, Gegout, Marquet, de Ruffray & Brisse, 2008; Nadezda, Gerald & Elena, 2006; Parmesan, 2006; Thomas, 2010), lo cual ha causado múltiples cambios fenológicos (Lurgi, Lopez & Montoya, 2012) y así mismo cambios a nivel ecosistémico. Sin embargo, estos desplazamientos naturales son insuficientes respecto a la velocidad que necesitan para ir a la par del cambio climático, por lo cual la translocación de especies se hace necesaria para restaurar ecosistemas con una alta presión de cambio (Harris et al., 2006).

El movimiento de especies no es una práctica nueva en restauración, muchos lo han utilizado como estrategia de enriquecimiento de especies durante décadas, en intentos por restablecer la cobertura vegetal en áreas muy alteradas debido a disturbios antrópicos o naturales (Vitt et al., 2010). Sin embargo, estos movimientos no implicaban desplazarlas fuera de sus rangos de distribución natural, pero bajo las actuales condiciones de degradación y cambios ambientales esta translocación necesita ser asistida por seres humanos, debido a las limitaciones en la dispersión y establecimiento de las especies, relacionadas también con su edad de madurez sexual (Sáenz-Romero et al., 2016). En el caso de especies arbóreas, la migración asistida podría ser una de las pocas estrategias de manejo que ayudarían a su permanencia, ya que el 100% de los modelos predictivos estiman que se necesitan tasas de migración latitudinal de 1000 m por año o más para que puedan mantenerse en un hábitat adecuado con las condiciones del cambio climático (Malcolm, Markham, Neilson & Garaci, 2002). Sin embargo, deben considerarse las distancias a las cuales se plantea movilizar a las especies, porque estas podrían tener un pobre desempeño si son reubicadas en sitios que difieran mucho de su hábitat natural (Joshi et al., 2001).

La migración asistida ha generado grandes controversias y divisiones entre profesionales de la ecología y practicantes de la restauración, por las implicaciones que podría tener su implementación, ya que una parte es fiel a los fundamentos iniciales de la restauración ecológica, mientras que otra ve necesario y urgente el cambio de paradigmas y la aplicación de nuevas estrategias que puedan mitigar o revertir, al menos parcialmente, el daño de los ecosistemas; la migración asistida resulta una opción viable para este segundo grupo. Esta discusión se ha alimentado de diversos argumentos a favor y en contra de la migración asistida (Cuadro 1), muchos de los cuales aún carecen de evidencia empírica que los soporten, sobre todo los que rechazan esta práctica y esto puede afectar a largo plazo la inclusión de esta estrategia en políticas de manejo de ecosistemas. En este contexto, la migración asistida genera distintos retos previo a su implementación: el entendimiento de la biología de especies potenciales, la evaluación de riesgos biológicos asociados con las acciones de manejo y la negociación de la discordia generada por la mayoría de propuestas de implementación de la estrategia (Schwartz, 2016).



Cuadro 1. Argumentos a favor y en contra sobre la migración asistida

A favor	En contra
<ul style="list-style-type: none">• Riesgo bajo basado en que la mayoría de especies introducidas que no han sido perjudiciales (1).• Posibles efectos negativos sobre la biodiversidad por inacción pueden ser mayores (2,3).• Reducción del riesgo de extinción de especies que no puedan adaptarse ni tengan una buena habilidad de dispersión para enfrentar el cambio climático (1,5,6,7,9,10,12,13,14).• Factibilidad técnica para varios taxones (11,12)• Mantenimiento del potencial productivo y estabilidad de los bosques (4,16).• Conservación de la diversidad genética (17).	<ul style="list-style-type: none">• Efectos adversos en la composición de especies nativas y en el funcionamiento del ecosistema por introducción de invasoras (1,4,5,6,7,8,9,10,11,12).• Enfoque muy individualista, no favorable para la conservación (5).• Reducción de los esfuerzos por preservar o restaurar hábitats (7,9,10,15).• Factibilidad técnica cuestionable, especialmente para especies raras o amenazadas (1,7,9,13).• Problemas con la identificación de las localidades receptoras basados en el escaso conocimiento de su ecología (7,8,17).• Algunas condiciones climáticas actuales no tienen una proyección clara a futuro, por tanto, la migración asistida de las especies asociadas a estos climas no es factible (18).• Homogenización biótica (11).

Referencias: 1) Mueller & Hellmann, 2008; 2) Hewitt et al., 2011; 3) Schwartz, Hellmann & McLachlan, 2009; 4) Chapin, Danell, Elmqvist, Folke & Fresco, 2007; 5) Davidson & Simkanin, 2008; 6) Hoegh-Guldberg, Hughes, McIntyre, Lindenmayer, Parmesan, Possingham, & Thomas, 2008; 7) Hunter, 2007; 8) McLachlan et al., 2007; 9) Ricciardi & Simberloff, 2009; 10) Richardson et al., 2009; 11) Van Der Veken, Hermy, Vellend, Knapen & Verheyen, 2008; 12) Willis, Hill, Thomas, Roy, Fox, Blakeley & Huntley, 2009; 13) Pelini, Dzurisin, Prior, Williams, Marsico, Sinclair, & Hellmann 2009; 14) Thomas et al., 2004; 15) Fazey & Fischer, 2009; 16) McKenney, Pedlar & O'Neill, 2009; 17) del Castillo, Argueta & Sáenz-Romero, 2009; 18) Williams, Jackson & Kutzbach, 2007.

La migración asistida podría llegar a ser una práctica frecuente para muchas especies si se crean marcos de toma de decisiones que permitan evaluar la relación entre reducir el riesgo de no realizar translocaciones en contra del riesgo de hacerlas (Hoegh-Guldberg et al., 2008; McLachlan et al., 2007). Como las estrategias de manejo de especies y restauración convencionales pueden ser insuficientes para recuperar los ecosistemas degradados, puede considerarse como una opción viable el movimiento de especies más allá de sus áreas de distribución conocidas (Hunter, 2007; McLachlan et al., 2007; Seddon, 2010). Esto puede ser un escenario plausible para las poblaciones de muchas especies arbóreas que se están desacoplando del clima al cual estaban adaptadas a causa del cambio climático (Sáenz-Romero, Lindig-Cisneros, Joyce, Beaulieu, Bradley & Jaquish, 2016). En algunos años las condiciones climáticas donde habitan podrían darse en un lugar diferente o desaparecer (Rehfeldt, Crookston, Sáenz-Romero & Campbell, 2012). Pero en la actualidad deben tolerar la variabilidad climática en sus hábitats, lo cual puede causar un incremento de estrés fisiológico en las especies, volviéndolas



más susceptibles a enfermedades y plagas, reduciendo su capacidad de respuesta a los disturbios (Alfaro et al., 2014; Sáenz-Romero, 2014). Muchas especies están en alto riesgo de sobrevivir bajo estas condiciones, pero no todas podrán ser reubicadas en otros lugares por las limitaciones de espacio y condiciones abióticas.

La selección de especies que puedan ser candidatas ideales para la migración asistida debe considerar varios criterios. Por un lado, pueden ser aquellas especies con poblaciones pequeñas, distribución restringida, baja fecundidad o que están sufriendo algún declive por enfermedades o competencia con otras especies (Aitken et al., 2008; Chen et al., 2011; Loss, Terwilliger & Peterson, 2011). Otros criterios a tener en cuenta son: si están en alto riesgo por el cambio climático, si favorecen a la comunidad biológica del ecosistema receptor de forma que reduzcan el riesgo de extinción de las especies nativas, si mejoran la provisión de servicios ecosistémicos o si reducen los costos de manejo y conservación del ecosistema (Thomas, 2011). Igualmente se deben priorizar las especies que tengan un buen potencial de restauración, es decir, aquellas que tienen una escala de atributos que pueden ser útiles en los sitios a restaurar (Vargas, 2011) y las especies clave que tienen un papel fundamental en la estructura del ecosistema (Aitken & Whitlock, 2013). Además de la selección de especies, otro aspecto importante es la selección de las localidades receptoras, ya que para algunas especies con requerimientos de hábitat muy específicos podría no existir una localidad receptora adecuada (Kreyling et al., 2011), porque las condiciones microclimáticas que necesitan probablemente no se encontrarán en el futuro (Williams & Jackson, 2007).

Uno de los mayores riesgos asociados con esta estrategia puede derivarse de una mala selección de las especies, ya que podrían volverse invasoras en los sitios donde sean introducidas (Davidson & Simkanin, 2008; Ricciardi & Simberloff, 2009; Vitt et al., 2010). Sin embargo, en el caso de la mayoría de las translocaciones conocidas, estas no han tenido un establecimiento exitoso (Dalrymple, Banks, Stewart & Pullin, 2012; Schwartz, 2016) y solo muy pocas de las especies que se han establecido se han convertido en invasoras (Richardson & Pyšek, 2006). Esto depende mucho de las condiciones ambientales de los sitios receptores, ya que el ambiente biótico del microclima puede ser más determinante para muchas especies que las condiciones macro climáticas (Ellison et al., 2005; Harsch, Hulme, McGlone & Duncan, 2009; Pelini et al., 2009). En un momento dado, esto puede favorecer que una especie reubicada se vuelva dominante y empiece a invadir el ecosistema, si las condiciones abióticas le son favorables, si no tiene depredadores en la nueva localidad y si tiene características innatas de una especie invasora como: elevada tasa de crecimiento y reproducción, alta plasticidad fenotípica y facilidad para la hibridación (Castro-Díez, Valladares & Alonso, 2004). Por lo tanto, para minimizar el riesgo de introducir especies potencialmente invasoras, se debe conocer previamente la biología de cada especie. A mayor conocimiento de cómo son las especies respecto a sus límites de tolerancia a condiciones ambientales, biología reproductiva, relación con polinizadores y dispersores, mayor probabilidad de acertar en su selección para la migración asistida (Hampe, 2011).

Al llevar a cabo procesos de migración asistida se puede seleccionar la diversidad genética de poblaciones de una especie, lo cual puede ser favorable para que se mantengan caracteres que permiten adaptación a rápidos cambios ambientales, como los que pueden ocurrir en ciertos escenarios de cambio climático (Rice & Emery, 2003). El mantenimiento de la diversidad



genética puede incrementar el éxito de programas de restauración (Bischoff, Steinger & Müller-Schärer, 2010), ya que una selección amplia de genotipos provenientes de poblaciones climáticamente diferentes puede beneficiar el establecimiento en corto tiempo y la adaptación potencial a largo plazo (McKay, Christian, Harrison & Rice, 2005). La ocurrencia de eventos climáticos extremos puede incrementar la presión de selección en la supervivencia más que las condiciones climáticas promedio (Jentsch & Beierkuhnlein, 2008), por lo que se recomienda una evaluación experimental de la tolerancia de las especies de interés a las condiciones climáticas esperadas (Kreyling et al., 2011). Este tipo de evaluación podría hacerse, por ejemplo, por medio de experimentos de jardín común, donde individuos de diferentes poblaciones de una especie están en las mismas condiciones ambientales para determinar su desempeño bajo determinados factores (Williams, Auge & Maron, 2008), esto puede ayudar en el proceso de selección de fuentes de propágulos para proyectos de restauración (Bower, Bradley, Clair & Erickson, 2014).

Aunque aún haya mucho escepticismo y falta de evidencias sobre la funcionalidad de la migración asistida, es necesario considerar esta estrategia e implementarla en los casos que se requiera. Es claro que no es posible movilizar ecosistemas enteros ni sus redes de interacción; pero la llegada de nuevas especies a localidades receptoras podría dar paso a una reorganización del ecosistema con comunidades vegetales que tengan el potencial de mantenerse bajo las condiciones impuestas por el cambio climático y por las acciones humanas. Al reubicar varias especies a nuevas áreas se estaría promoviendo la creación de nuevos ecosistemas o ecosistemas emergentes (Chapin & Starfield, 1997; Hobbs et al., 2006), en los cuales las especies ocurren en combinaciones y abundancias que no habían ocurrido previamente dentro de un determinado bioma (Milton, 2003) y cuyas características funcionales son desconocidas, aunque no necesitan de una continua intervención humana para su mantenimiento (Hobbs et al., 2009). En cambio, de intentar que los ecosistemas regresen a ciertas condiciones históricas, lo cual a futuro será probablemente insustentable e insostenible, el desarrollo de estos nuevos ecosistemas, usando especies no nativas introducidas a una región (Hobbs & Harris, 2001), puede promover el mantenimiento de ecosistemas viable y resilientes (Seastedt, Hobbs & Suding, 2008). Esto es parte de la transición de una restauración histórica a una restauración futurista (Choi, 2004), en donde la migración asistida de especies puede, a largo plazo, ser determinante en la dinámica y mantenimiento de los ecosistemas en años futuros.

5. Conclusiones

La restauración ecológica debe seguir siendo una herramienta clave para el manejo y conservación de ecosistemas frente al cambio climático, pero los enfoques tradicionales basados en recuperar el ecosistema a las condiciones del pasado son insostenibles para responder a los factores de disturbio de hoy. Se necesita hacer un balance entre reconstruir el pasado e intentar construir ecosistemas resilientes y sustentables a futuro.

La migración asistida de especies puede ser considerada para todas aquellas especies que están siendo seriamente afectadas por acciones antrópicas y el cambio climático. También para aquellas que son importantes para el funcionamiento de los ecosistemas.



Quienes practican la restauración no pueden basarse únicamente en los conceptos clásicos de cómo tendría que ser la restauración de ecosistemas degradados, ya que esta disciplina debe responder a las necesidades actuales del ambiente y de la sociedad, por lo cual es deseable tener una mente abierta respecto a las estrategias y herramientas que se están desarrollando en búsqueda de la recuperación los ecosistemas.

En el planteamiento de proyectos de restauración ecológica se deben reconocer las condiciones ambientales variables y hasta impredecibles que habrá en el futuro, considerando la naturaleza dinámica de las comunidades ecológicas con múltiples trayectorias posibles; además de la necesidad de conectar elementos del paisaje para restablecer la estructura y función de los ecosistemas con metas de restauración factibles y realistas.

6. Agradecimientos

Los autores queremos agradecer a las personas revisoras conocidas y anónimas por los comentarios de las versiones previas del artículo que ayudaron a mejorar considerablemente su versión final.

7. Referencias

- Aitken, S. N. & Whitlock, M. C. (2013). Assisted Gene Flow to Facilitate Local Adaptation to Climate Change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst*, 44, 367–88. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135747>
- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T. & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1), 95–111. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Alfaro, R. I., Fady, B., Vendramin, G. G., Dawson, I. K., Fleming, R. A., Sáenz-Romero, C., ... & Loo, J. (2014). The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.006>
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W. & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>
- Bischoff, A., Steinger, T. & Müller-Schärer, H. (2010). The importance of plant provenance and genotypic diversity of seed material used for ecological restoration. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100x.2008.00454.x>
- Bower, A. D., Bradley, J., Clair, S. & Erickson, V. (2014). Generalized provisional seed zones for native plants. *Communications Ecological Applications*, 24(5), 913–919. doi: <https://doi.org/10.1890/13-0285.1>



- Bradshaw, A. (1983). The Reconstruction of Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 20, 1–17. doi: <https://doi.org/10.2307/2403372>
- Bradshaw, A. (1984). Technology Lecture: Land Restoration: Now and in the Future. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1098/rspb.1984.0079>
- Bradshaw, A. (1987). Restoration: the acid test for ecology. *Restoration Ecology: A Synthetic Approach to Ecological Research*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00139.x>
- Bradshaw, A. (1997). What do we mean by restoration? In K. M. Urbanska, N. R. Webb, & P. J. Edwards (Eds.), *Restoration ecology and sustainable development* (pp. 8–16). Cambridge University Press.
- Bradshaw, A. (2002). Introduction and philosophy. In M. R. Perrow & A. J. Davy (Eds.), *Handbook of Ecological Restoration Volume 1 Principles of Restoration*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511549984.003>
- Bradshaw, R. H. (2004). What is a Natural Forest? In J. A. Stanturf & P. Madsen (Eds.), *Restoration of boreal and temperate forests* (pp. 15–30). CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9780203497784.pt2>
- Cairns, J. (2002). Rationale for restoration. In M. Perrow & A. Davy (Eds.), *Handbook of Ecological Restoration. Volume 1 Principles of Restoration* (pp. 10–23). Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511549984.004>
- Castellanos-Acuña, D., Lindig-Cisneros, R. & Sáenz-Romero, C. (2015). Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere*, 6(1), 1–16. doi: <https://doi.org/10.1890/ES14-00375.1>
- Castro-Díez, P., Valladares, F. & Alonso, A. (2004). La creciente amenaza de las invasiones biológicas. *Ecosistemas*, 13(3), 61–68. Retrieved from <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/532/506>
- Chapin, F. S. I., Danell, K., Elmqvist, T., Folke, C. & Fresco, N. (2007). Managing climate change impacts to enhance the resilience and sustainability of Fennoscandian forests. *Ambio*. doi: [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[528:MCCITE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[528:MCCITE]2.0.CO;2)
- Chapin, F. S. & Starfield, A. M. (1997). Time lags and novel ecosystems in response to transient climatic change in arctic Alaska. *Climatic Change*. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1005337705025>
- Chen, I. C., Hill, J. K., Shiu, H. J., Holloway, J. D., Benedick, S., Chey, V. K., ... & Thomas, C. D. (2011). Asymmetric boundary shifts of tropical montane Lepidoptera over four decades of climate warming. *Global Ecology and Biogeography*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00594.x>



- Choi, Y. (2004). Theories for ecological restoration in changing environment: toward “futuristic” restoration. *Ecological Research*, 19(1), 75–81. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00594.x>
- Choi, Y. (2007). Restoration ecology to the future: A call for new paradigm. *Restoration Ecology*, 15(2), 351–353. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00224.x>
- Choi, Y., Temperton, V., Allen, E., Grootjans, A., Halassy, M., Hobbs, R., ... & Torok, K. (2008). Ecological restoration for future sustainability in a changing environment. *Ecoscience*, 15(1), 53–64. doi: [https://doi.org/10.2980/1195-6860\(2008\)15\[53:ERFFSI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2980/1195-6860(2008)15[53:ERFFSI]2.0.CO;2)
- Clewell, A. & Aronson, J. (2013). The SER primer and climate change. *Ecological Management and Restoration*, 14(3), 182–186. doi: <https://doi.org/10.1111/emr.12062>
- Dalrymple, S. E., Banks, E., Stewart, G. B. & Pullin, A. S. (2012). A Meta-Analysis of the Threatened Plant Reintroductions from across the Globe. *Plant Reintroduction in a Changing Climate : Promises and Perils, The Science and Practice of Ecological Restoration*. doi: https://doi.org/10.5822/978-1-61091-183-2_3
- Davidson, I. & Simkanin, C. (2008). Skeptical of Assisted Colonization. *Science*, 322(5904), 1048b–1049b. doi: <https://doi.org/10.1126/science.322.5904.1048b>
- Davis, M. A. (2000). “Restoration” - A misnomer? *Science*, 287, 1203. doi: <https://doi.org/10.1126/science.287.5456.1203b>
- Davis, M. B. & Shaw, R. G. (2001). Range Shifts and Adaptive Responses to Quaternary Climate Change. *Science*. doi: <https://doi.org/10.1126/science.292.5517.67373>
- Davis, M. & Slobodkin, L. (2004). Response to Hobbs 2004 “Restoration ecology: the challenge of social values and expectations” *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2, 44–45. Retrieved from <https://www.macalester.edu/~davis/frontiers.pdf>
- del Castillo, R. F., Argueta, S. T. & Sáenz-Romero, C. (2009). *Pinus chiapensis*, a keystone species: Genetics, ecology, and conservation. *Forest Ecology and Management*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.004>
- Ehrenfeld, J. G. & Toth, L. A. (1997). Restoration Ecology and the Ecosystem Perspective. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.00544.x>
- Ellison, A. M., Bank, M. S., Clinton, B. D., Colburn, E. A., Elliott, K., Ford, C. R., ... & Webster, J. R. (2005). Loss of foundation species: Consequences for the structure and dynamics of forested ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*. doi: [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0479:LOFSCF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0479:LOFSCF]2.0.CO;2)
- Fazey, I., & Fischer, J. (2009). Assisted colonization is a techno-fix. *Trends in Ecology and Evolution*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.05.003>



- Gienapp, P., Teplitsky, C., Alho, J. S., Mills, J. A. & Merilä, J. (2008). Climate change and evolution: Disentangling environmental and genetic responses. *Molecular Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03413.x>
- Halle, S. (2007). Science, art, or application - The “Karma” of restoration ecology. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00226.x>
- Hampe, A. (2011). Plants on the move: The role of seed dispersal and initial population establishment for climate-driven range expansions. *Acta Oecologica*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2011.05.001>
- Harris, J., Hobbs, R., Higgs, E. & Aronson, J. (2006). Ecological restoration and global climate change. *Restoration Ecology*, 14(2), 170–176. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00136.x>
- Harsch, M. A., Hulme, P. E., McGlone, M. S. & Duncan, R. P. (2009). Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x>
- Hewitt, N., Klenk, N., Smith, A. L., Bazely, D. R., Yan, N., Wood, S., ... & Henriques, I. (2011). Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.04.031>
- Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K., Fox, R. & Thomas, C. D. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Global Change Biology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01116.x>
- Higgs, E. (2003). *Nature by design: people, natural process, and ecological restoration*. MIT Press.
- Hobbs, R. J. (2007). Setting effective and realistic restoration goals: Key directions for research. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00225.x>
- Hobbs, R. J. (2013). Grieving for the Past and Hoping for the Future: Balancing Polarizing Perspectives in Conservation and Restoration. *Restoration Ecology*, 21(2), 145–148. doi: <https://doi.org/10.1111/rec.12014>
- Hobbs, R. J., Arico, S., Aronson, J., Baron, J. S., Bridgewater, P., Cramer, V. A., ... Zobel, M. (2006). Novel ecosystems: Theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Global Ecology and Biogeography*, 15(1), 1–7. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00212.x>
- Hobbs, R. J. & Harris, J. A. (2001). Restoration ecology: Repairing the earth's ecosystems in the new millennium. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2001.009002239.x>
- Hobbs, R. J., Higgs, E. & Harris, J. A. (2009). Novel ecosystems: implications for conservation and restoration. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(11), 599–605. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.05.012>



- Hobbs, R. J. & Norton, D. a. (1996). Towards a Conceptual Framework for Restoration Ecology. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1996.tb00112.x>
- Hoegh-Guldberg, O., Hughes, L., McIntyre, S., Lindenmayer, D. B., Parmesan, C., Possingham, H. P. & Thomas, C. D. (2008). Ecology. Assisted colonization and rapid climate change. *Science (New York, N.Y.)*. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1157897>
- Hunter, M. L. (2007). Climate change and moving species: Furthering the debate on assisted colonization. *Conservation Biology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00780.x>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer, Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC. Retrieved from https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
- Jackson, L. L., Lopoukhine, N. & Hillyard, D. (1995). Ecological Restoration: A Definition and Comments. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1995.tb00079.x>
- Jentsch, A. & Beierkuhnlein, C. (2008). Research frontiers in climate change: Effects of extreme meteorological events on ecosystems. *Comptes Rendus - Geoscience*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.07.002>
- Jordan, W. R., Peters, R. L. & Allen, E. B. (1988). Ecological restoration as a strategy for conserving biological diversity. *Environmental Management*. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01867377>
- Joshi, J., Schmid, B., Caldeira, M. C., Dimitrakopoulos, P. G., Good, J., Harris, R., ... & Lawton, J. H. (2001). Local adaptation enhances performance of common plant species. *Ecology Letters*. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2001.00262.x>
- King, E. G. & Hobbs, R. J. (2006). Identifying linkages among conceptual models of ecosystem degradation and restoration: Towards an integrative framework. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00145.x>
- Kreyling, J., Bittner, T., Jaeschke, A., Jentsch, A., Jonas Steinbauer, M., Thiel, D. & Beierkuhnlein, C. (2011). Assisted Colonization: A Question of Focal Units and Recipient Localities. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2011.00777.x>
- Ledig, T., Rehfeldt, G., Sáenz-Romero, C. & Flores-López, C. (2010). Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *American Journal of Botany*. doi: <https://doi.org/10.3732/ajb.0900329>
- Lenoir, J., Gegout, J. C., Marquet, P. A., de Ruffray, P. & Brisse, H. (2008). A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science*. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1156831>



- Leopold, A. (1949). *A Sand County Almanac*. Oxford University Press. doi: <https://doi.org/10.2307/1319034>
- Loss, S. R., Terwilliger, L. A. & Peterson, A. C. (2011). Assisted colonization: Integrating conservation strategies in the face of climate change. *Biological Conservation*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.11.016>
- Lunt, I. D., Byrne, M., Hellmann, J. J., Mitchell, N. J., Garnett, S. T., Hayward, M. W., ... & Zander, K. K. (2013). Using assisted colonisation to conserve biodiversity and restore ecosystem function under climate change. *Biological Conservation*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.08.034>
- Lurgi, M., Lopez, B. C. & Montoya, J. M. (2012). Novel communities from climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0238>
- Malcolm, J. R., Markham, A., Neilson, R. P. & Garaci, M. (2002). Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *Journal of Biogeography*. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00702.x>
- Mansourian, S. & Vallauri, D. (2014). Restoring forest landscapes: Important lessons learnt. *Environmental Management*, 53(2), 241–251. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0213-7>
- McKay, J. K., Christian, C. E., Harrison, S. & Rice, K. J. (2005). “How local is local?” - A review of practical and conceptual issues in the genetics of restoration. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00058.x>
- McKenney, D., Pedlar, J. & O'Neill, G. (2009). Climate change and forest seed zones: Past trends, future prospects and challenges to ponder. *The Forestry Chronicle*. doi: <https://doi.org/10.5558/tfc85258-2>
- McLachlan, J. S., Hellmann, J. J. & Schwartz, M. W. (2007). A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Conservation Biology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00676.x>
- McLane, S. C. & Aitken, S. N. (2012). Whitebark pine (*Pinus albicaulis*) assisted migration potential: Testing establishment north of the species range. *Ecological Applications*. doi: <https://doi.org/10.1890/11-0329.1>
- Michener, W. K. (1997). Quantitatively evaluating restoration experiments: Research design, statistical analysis, and data management considerations. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.00546.x>
- Milton, S. J. (2003). “Emerging ecosystems”: a washing-stone for ecologists, economists and sociologists? *South African Journal of Science*, 99(9–10), 404–406.
- Mueller, J. M. & Hellmann, J. J. (2008). An assessment of invasion risk from assisted migration. *Conservation Biology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00952.x>



- Munshower, F. F. (1994). *Practical handbook of disturbed land revegetation*. CRC Press.
- Nadezda, M. T., Gerald, E. R. & Elena, I. P. (2006). Impacts of climate change on the distribution of *larix* spp. and *Pinus sylvestris* and their climatypes in Siberia. In *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. doi: <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9019-0>
- Palmer, M., Ambrose, R. & Poff, N. (1997). Ecological theory and community restoration ecology. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.00543.x>
- Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
- Pelini, S. L., Dzurisin, J. D. K., Prior, K. M., Williams, C. M., Marsico, T. D., Sinclair, B. J. & Hellmann, J. J. (2009). Translocation experiments with butterflies reveal limits to enhancement of poleward populations under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0900284106>
- Perring, M. P., Standish, R. J., Price, J. N., Craig, M. D., Erickson, T. E., Ruthrof, K. X., ... & Hobbs, R. J. (2015). Advances in restoration ecology: rising to the challenges of the coming decades. *Ecosphere*, 6(8), art131. doi: <https://doi.org/10.1890/ES15-00121.1>
- Perry, G. L. W. (2002). Landscapes, space and equilibrium: shifting viewpoints. *Progress in Physical Geography*. doi: <https://doi.org/10.1191/0309133302pp341ra>
- Rehfeldt, G. E. (1994). Evolutionary genetics, the biological species, and the ecology of interior cedar-hemlock forests. *Proceedings of Interior Cedar-Hemlock-White Pine Forests: Ecology and Management*. [https://doi.org/Genetic Considerations in Ecological Restoration](https://doi.org/Genetic%20Considerations%20in%20Ecological%20Restoration)
- Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Sáenz-Romero, C. & Campbell, E. M. (2012). North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*. doi: <https://doi.org/10.1890/11-0495.1>
- Reusch, T. B. & Wood, T. E. (2007). Molecular ecology of global change. *Molecular Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03454.x>
- Ricciardi, A. & Simberloff, D. (2009). Assisted colonization: good intentions and dubious risk assessment. *Trends in Ecology and Evolution*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.05.005>
- Rice, K. J. & Emery, N. C. (2003). Managing microevolution: Restoration in the face of global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*. doi: [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0469:MMRITF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0469:MMRITF]2.0.CO;2)
- Richardson, D. M., Hellmann, J. J., Mclachlan, J. S., Sax, D. F., Schwartz, M. W., Gonzalez, P., ... & Vellend, M. (2009). Multidimensional evaluation of managed relocation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(24), 9721–9724. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0902327106>



- Richardson, D. M. & Pyšek, P. (2006). Plant invasions: merging the concepts of species invasiveness and community invasibility. *Progress in Physical Geography*. doi: <https://doi.org/10.1191/0309133306pp490pr>
- Sáenz-Romero, C. (2014). *Guía técnica para la planeación de la reforestación adaptada al cambio climático*. Retrieved from <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/19/6688GuíaTécnica para la Planeación de la Reforestación.pdf>
- Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., Bradley, J. S. C., & Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change | Migración asistida de las poblaciones forestales para la adaptación de árboles ante el cambio climático. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>
- Schwartz, M. W. (2016). Elucidating biological opportunities and constraints on assisted colonization. *Applied Vegetation Science*. doi: <https://doi.org/10.1111/avsc.12237>
- Schwartz, M. W., Hellmann, J. J. & McLachlan, J. S. (2009). The precautionary principle in managed relocation is misguided advice. *Trends in Ecology and Evolution*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.05.006>
- Seabrook, L., Mcalpine, C. A. & Bowen, M. E. (2011). Restore, repair or reinvent: Options for sustainable landscapes in a changing climate. *Landscape and Urban Planning*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.015>
- Seastedt, T. R., Hobbs, R. J. & Suding, K. N. (2008). Management of novel ecosystems: Are novel approaches required? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(10), 547–553. doi: <https://doi.org/10.1890/070046>
- Seddon, P. J. (2010). From Reintroduction to Assisted Colonization: Moving along the Conservation Translocation Spectrum. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00724.x>
- Society for Restoration Ecology. (2004). Principios de SER International sobre la Restauración Ecológica. www.ser.org y Tucson: Society for Ecological Restoration International, 16.
- Simenstad, C., Reed, D. & Ford, M. (2006). When is restoration not? Incorporating landscape-scale processes to restore self-sustaining ecosystems in coastal wetland restoration. In *Ecological Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.09.007>
- Stanturf, J., Palik, B., Williams, M., Dumroese, R. & Madsen, P. (2014). Forest Restoration Paradigms. *Journal of Sustainable Forestry*, 33(sup1), S161–S194. doi: <https://doi.org/10.1080/10549811.2014.884004>
- Temperton, V. M., Hobbs, R., Nuttle, T. & Halle, S. (2004). *Assembly rules and restoration ecology: bridging the gap between theory and practice*. Island Press.



- Thomas, C. D. (2010). Climate, climate change and range boundaries. *Diversity and Distributions*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00642.x>
- Thomas, C. D. (2011). Translocation of species, climate change, and the end of trying to recreate past ecological communities. *Trends in Ecology and Evolution*, 26(5), 216–221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.02.006>
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., ... & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145–148. doi: <https://doi.org/10.1038/nature02121>
- Urbanska, K. M., Webb, N. R. & Edwards, P. J. (1997). *Restoration ecology and sustainable development*. Cambridge University Press.
- Van Der Veken, S., Hermy, M., Vellend, M., Knapen, A. & Verheyen, K. (2008). Garden plants get a head start on climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*. doi: <https://doi.org/10.1890/070063>
- Vargas-Ríos, O. & Mora, F. (2008). La restauración ecológica. Su contexto, definiciones y dimensiones. In O. Vargas-Ríos & GREUNAL (Eds.), *Estrategias para la restauración ecológica del bosque altoandino* (2nd ed., pp. 19–40). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas, O. (2011). Restauración Ecológica: Biodiversidad y Conservación. *Acta Biológica Colombiana*, 16(2), 221–246.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. & Melillo, J. M. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 277(5325). Retrieved from doi: <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.494>
- Vitt, P., Havens, K., Kramer, A. T., Sollenberger, D. & Yates, E. (2010). Assisted migration of plants: Changes in latitudes, changes in attitudes. *Biological Conservation*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.08.015>
- Wali, M. K. (1999). Ecological succession and the rehabilitation of disturbed terrestrial ecosystems. *Plant and Soil*. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1004475206351>
- Walker, L. R., & Moral, R. del. (2003). *Primary succession and ecosystem rehabilitation*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511615078>
- White, P. S. & Walker, J. L. (1997). Approximating Nature's Variation: Selecting and Using Reference Information in Restoration Ecology. *Restoration Ecology*. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.00547.x>
- Williams, J. & Jackson, S. (2007). Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(9), 475–482. doi: <https://doi.org/10.1890/070037>



- Williams, J. L., Auge, H. & Maron, J. L. (2008). Different gardens, different results: native and introduced populations exhibit contrasting phenotypes across common gardens. doi: <https://doi.org/10.1007/s00442-008-1075-1>
- Williams, J. W., Jackson, S. T. & Kutzbach, J. E. (2007). Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.0606292104>
- Williams, M. & Dumroese, R. (2013). Preparing for Climate Change: Forestry and Assisted Migration. *Journal of Forestry*, 111(4), 287–297. doi: <https://doi.org/10.5849/jof.13-016>
- Willis, S. G., Hill, J. K., Thomas, C. D., Roy, D. B., Fox, R., Blakeley, D. S. & Huntley, B. (2009). Assisted colonization in a changing climate: a test-study using two U.K. butterflies. *Conservation Letters*. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1755-263x.2008.00043.x>