



Incorporación de criterios genéticos en la restauración ecológica efectiva

Incorporating genetic criteria into effective ecological restoration

Fabiana Tabash-Porras¹

DOI: 10.22458/rb.v36i2.6274

Recibido – Received: 11/ 08/ 2025/ Corregido–Revised: 07/ 10/ 2025/ Aceptado–Accepted: 06 /11 / 2025

RESUMEN

El objetivo de esta revisión es destacar la importancia de incorporar la diversidad genética en la restauración ecológica y ofrecer recomendaciones prácticas para su aplicación efectiva. Se realizó un análisis de la literatura científica existente, incluyendo estudios de caso sobre proyectos de restauración en distintos ecosistemas terrestres degradados. La revisión se centra en los criterios genéticos aplicados a la selección de material vegetal, la procedencia de semillas, la adaptación local y el flujo génico, así como en el uso de herramientas genómicas modernas para apoyar la toma de decisiones. Los resultados muestran que la consideración de estos criterios mejora la viabilidad, resiliencia y funcionalidad de las poblaciones restauradas, y que estrategias como la recolección amplia de semillas, la utilización de proveniencia mixta y la integración de marcadores genéticos contribuyen significativamente al éxito de los proyectos. Se concluye que la restauración ecológica requiere combinar criterios genéticos con factores ecológicos, ambientales y sociales, implementando monitoreo y evaluación a largo plazo, para asegurar ecosistemas sostenibles, funcionales y adaptables frente a desafíos futuros.

Palabras clave: ecosistemas; diversidad genética; adaptación local; flujo génico; cambio climático.

ABSTRACT

The aim of this review is to highlight the importance of incorporating genetic diversity into ecological restoration and to provide practical recommendations for its effective application. An analysis of the current scientific literature was conducted, including case studies of restoration projects in various degraded terrestrial ecosystems. The review focuses on genetic criteria applied to the selection of plant material, seed provenance, local adaptation, and gene flow, as well as the use of modern genomic tools to support decision-making. The results indicate that considering these criteria enhances the viability, resilience, and functionality of restored populations, and that strategies such as broad seed collection, the use of mixed provenance, and the integration of genetic markers contribute significantly to the success of projects. It is concluded that ecological restoration requires combining genetic criteria with ecological, environmental and social factors, while implementing long-term monitoring and evaluation to ensure sustainable, functional, and adaptable ecosystems in the face of future challenges.

Key words: ecosystems; genetic diversity; local adaptation; gene flow; climate change.

¹ Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica; Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. fabiana.tabash@gmail.com

ID: <https://orcid.org/0009-0001-3727-9645>

Introducción

La restauración ecológica es un proceso que busca recuperar la funcionalidad y estructura de los ecosistemas que han sido alterados, degradados o destruidos por causas humanas, o por eventos naturales, tales como inundaciones o deslizamientos de tierra (Navarro et al., 2021). Este proceso implica la aplicación de un conjunto de acciones cuya selección y secuencia dependen de la intensidad y el tipo de daño sufrido por el ecosistema (Navarro et al., 2021). El término restauración puede entenderse tanto como el retorno a una condición previa al disturbio, como la mejora de un sistema natural más allá de su estado original. En este sentido, la restauración ecológica consiste en asistir activamente a la recuperación de comunidades o poblaciones que han sido afectadas, con el objetivo de restablecer ecosistemas definidos, nativos e históricos, reconstruyendo no solo su estructura, sino también sus funciones ecológicas (Azpilicueta et al., 2011).

La consideración de criterios genéticos en la restauración ecológica es fundamental porque la diversidad genética influye directamente en la capacidad de las especies para adaptarse a condiciones ambientales cambiantes, resistir perturbaciones y mantener procesos ecológicos clave. Restaurar sin atender esta dimensión puede resultar en poblaciones con baja viabilidad a largo plazo, poca capacidad de regeneración natural y menor funcionalidad ecológica (Ipinza Carmona & Gutiérrez Caro, 2014). Incorporar principios genéticos, por tanto, no solo mejora la efectividad de los proyectos, sino que fortalece su sostenibilidad futura (Bozzano et al., 2014).

Sin embargo, la genética no constituye el único eje de acción. Aunque idealmente debería guiar muchas de las decisiones, en la práctica existen limitaciones económicas, logísticas y sociales que no siempre permiten una aplicación rigurosa del enfoque genético. Por ello, es necesario adoptar un enfoque equilibrado, en el que los aspectos genéticos se integren junto con consideraciones ecológicas, técnicas y contextuales, permitiendo avanzar hacia restauraciones más realistas, adaptadas y efectivas (Kettenring & Tarsa, 2020).

Por lo tanto, esta revisión tiene como propósito resaltar la relevancia de los criterios genéticos en la restauración de ecosistemas terrestres, con el fin de fomentar una comprensión más integral del proceso y promover prácticas más efectivas. Asimismo, busca prevenir errores frecuentes en el diseño e implementación de estrategias restaurativas. Esta revisión aborda los criterios genéticos clave en restauración, analiza casos donde su omisión afectó los resultados y ofrece recomendaciones prácticas basadas en evidencia científica.

Fundamentos genéticos clave en restauración ecológica

La restauración ecológica efectiva va mucho más allá de la simple replantación o de la recuperación estética del paisaje. Para que los ecosistemas restaurados sean funcionales y resilientes en el largo plazo, es esencial incorporar un enfoque genético que permita comprender y gestionar los procesos evolutivos que sustentan la biodiversidad. En este contexto, la genética aplicada a la restauración estudia cómo la diversidad genética, la estructura de las poblaciones, la adaptación

local y el flujo génico afectan de manera directa el éxito y la sostenibilidad de los proyectos restaurativos (Aitken et al., 2008; Williams et al., 2014).

Uno de los pilares fundamentales es la variabilidad genética, es decir, la diversidad heredable presente dentro de individuos, poblaciones y especies. Esta variabilidad constituye la base sobre la cual operan los mecanismos evolutivos y es indispensable para que las especies puedan responder a amenazas como enfermedades, plagas, sequías o cambios ambientales drásticos (Piñero et al., 2008). En su ausencia, como sucede en poblaciones genéticamente homogéneas, se incrementa la vulnerabilidad a perturbaciones, disminuyendo la viabilidad de las poblaciones e incrementando el riesgo de fracaso de la restauración (Brown & Hardner, 2000).

En estrecha relación con ello, se encuentra la adaptación local, entendida como el proceso mediante el cual las poblaciones evolucionan en respuesta a condiciones ambientales específicas, generando genotipos óptimamente adaptados a su entorno. Ignorar esta adaptación e introducir individuos genéticamente distintos, aunque sean de la misma especie, puede resultar en un desajuste ecológico que afecte negativamente la regeneración, el crecimiento y la interacción con otras especies del ecosistema (Azpilicueta et al., 2011; Meek et al., 2023).

A su vez, el flujo génico, que permite el intercambio de genes entre poblaciones a través del polen o las semillas, es clave para mantener la diversidad genética y evitar la endogamia (cruce entre individuos genéticamente emparentados). Este proceso garantiza la continuidad de la evolución adaptativa y aumenta la capacidad de respuesta de las

poblaciones frente a condiciones cambiantes. Sin embargo, el aislamiento de las poblaciones restauradas puede interrumpir este flujo, debilitando su integridad genética y reduciendo su potencial de adaptación (Sexton et al., 2024; Breed et al., 2013; Thomas et al., 2014). En conjunto, estos fundamentos genéticos son esenciales para diseñar proyectos de restauración verdaderamente sostenibles, capaces de resistir los desafíos ambientales presentes y futuros.

Aplicaciones prácticas y toma de decisiones

La implementación efectiva de proyectos de restauración ecológica requiere decisiones informadas en cada etapa, especialmente en lo que respecta a la selección del material vegetal, la procedencia de semillas, las estrategias de recolección y las respuestas frente al cambio climático. Estas decisiones son fundamentales para asegurar la adaptabilidad, resiliencia y sostenibilidad del ecosistema restaurado.

Selección de material vegetal y procedencias

La selección adecuada del material vegetal para proyectos de restauración debe fundamentarse en un conocimiento detallado de la variabilidad genética de las especies involucradas y su grado de adaptación al sitio específico de restauración. Muchas poblaciones remanentes en áreas perturbadas son pequeñas y están aisladas, lo que conlleva niveles reducidos de diversidad genética y aumenta la probabilidad de que evolucionen por deriva genética aleatoria, limitando su capacidad de adaptación mediante selección natural (Broadhurst et al., 2008; Conceição et

al., 2024). Cuando se busca reconstruir el ecosistema original —o al menos aproximarse a su estado natural—, la elección de la fuente de semilla o del material de propagación es un aspecto fundamental, ya que su estructura genética puede influir significativamente en los resultados del proceso de restauración (Azpilicueta et al., 2011). Por ello, emplear semillas o plántulas con alta diversidad genética incrementa la probabilidad de que algunas plantas sobrevivan a condiciones ambientales cambiantes e impredecibles (Aitken et al., 2008; Brown & Hardner, 2000).

En escenarios ideales, lo recomendable es usar material de propagación proveniente de la misma población afectada, siempre que ésta conserve individuos remanentes, ya que así se mantiene la coherencia genética del ecosistema y se favorece la recuperación de sus funciones originales. Cuando esto no sea posible, se puede recurrir a poblaciones cercanas geográficamente que compartan condiciones ambientales similares y hayan experimentado presiones selectivas comparables (Azpilicueta et al., 2011).

Para restaurar múltiples funciones ecosistémicas, es indispensable utilizar una diversidad de especies. Las plantaciones con pocas especies pueden ser eficientes en la producción de biomasa, pero son menos efectivas para cumplir simultáneamente funciones como almacenamiento de carbono, regulación hídrica y ciclado de nutrientes. Además, para garantizar la estabilidad de estas funciones en el tiempo, es necesaria la diversidad funcional del conjunto de especies, lo que adquiere mayor relevancia ante el cambio climático y el aumento de eventos extremos. Por ello, los proyectos forestales de restauración deben priorizar la diversidad funcional,

asegurando que las especies en conjunto desempeñen diferentes roles ecológicos para fortalecer la resistencia y salud del ecosistema (Aerts & Honnay, 2011).

No obstante, aunque el uso de semillas locales suele considerarse la opción más adecuada debido a su aparente mejor adaptación al entorno, esta estrategia no está exenta de limitaciones. En poblaciones pequeñas, aisladas o genéticamente erosionadas, el uso exclusivo de material local puede aumentar el riesgo de endogamia y pérdida de diversidad genética, comprometiendo la capacidad adaptativa a largo plazo. Por ello, es fundamental evaluar la calidad genética de las poblaciones locales y, cuando sea necesario, complementar con material de otras poblaciones cercanas o ecológicamente similares, con el fin de evitar cuellos de botella evolutivos y fortalecer la resiliencia. No obstante, la incorporación de semillas no locales debe realizarse con cautela, ya que diferencias genéticas excesivas pueden provocar efectos adversos como la depresión por cruzamiento. En consecuencia, el éxito de los proyectos de restauración depende de encontrar un equilibrio entre preservar la adaptación local y ampliar la diversidad genética, asegurando la compatibilidad ecológica y evolutiva del material seleccionado (Broadhurst et al., 2008; Thomas et al., 2014).

En zonas con degradación baja o moderada, donde el suelo está en buen estado y existen fuentes suficientes de germoplasma, como árboles maduros o bancos de semillas naturales, la regeneración natural es la opción preferible. Esta estrategia minimiza los riesgos asociados a la introducción de material externo y conserva la integridad genética y la adaptación local. Sin embargo, cuando las fuentes nativas son



escasas, erosionadas genéticamente o cuando se realiza restauración activa mediante plantación, la incorporación de material reproductivo proveniente de otras áreas puede ser necesaria o incluso la única opción viable a corto plazo (Thomas et al., 2014).

Los estudios de procedencia, que evalúan el desempeño de plantas originarias de distintas fuentes genéticas bajo condiciones ambientales similares, son fundamentales para identificar los genotipos más adecuados para la restauración. Estos estudios permiten seleccionar material vegetal con mejor adaptación al sitio, incrementando las probabilidades de éxito a largo plazo. Además, los avances en genética molecular, como la secuenciación de nueva generación (NGS, por sus siglas en inglés *Next Generation Sequencing*) y el uso de marcadores moleculares —por ejemplo, microsatélites y SNPs (*Single Nucleotide Polymorphisms*, polimorfismos de nucleótido único)— han permitido caracterizar la variabilidad genética y estructura poblacional. Estas tecnologías no solo permiten identificar genes vinculados con la adaptación ambiental, sino también detectar procesos como hibridación, poliploidía o endogamia, facilitando la selección de material que garantice la diversidad genética necesaria para la resiliencia y sostenibilidad del ecosistema restaurado (Williams et al., 2014).

Estrategias de recolección de semillas

Una estrategia adecuada de recolección de semillas debe priorizar la captación de la mayor diversidad genética posible, ya que esta diversidad es la base de la adaptabilidad, la resiliencia y el éxito a largo plazo de las poblaciones restauradas. Para lograrlo, es fundamental

recolectar semillas provenientes de múltiples poblaciones, lo cual permite integrar una amplia gama de variantes genéticas (Kettenring & Tarsa, 2020). Si bien el número ideal de poblaciones varía según la especie, el grado de fragmentación del hábitat y las condiciones ecológicas del sitio, se recomienda recolectar de al menos 5 a 20 poblaciones para asegurar una mezcla genética robusta.

Dentro de cada población, también es crucial capturar la mayor variabilidad genética posible. Para alcanzar al menos el 95 % de la diversidad genética intra-poblacional, los expertos sugieren recolectar semillas de un mínimo de 30 individuos, y nunca menos de 20 (Brown & Hardner, 2000; Espeland et al., 2016). Algunos estudios incluso recomiendan entre 50 y 200 individuos para especies con alta heterogeneidad genética. En el caso de especies leñosas, como árboles o arbustos ribereños o de humedales, recolectar de más de 10 individuos puede ser suficiente.

En la práctica, se recomienda recolectar pequeñas cantidades de semillas provenientes de muchos árboles, en lugar de grandes cantidades de unos pocos, ya que esta estrategia permite capturar una mayor diversidad genética, evita la pérdida de alelos raros, reduce el riesgo de endogamia y mejora la viabilidad de las poblaciones restauradas. Por esta razón, en contextos de incertidumbre, se sugiere optar por una recolección amplia en lugar de una limitada, lo que incrementa la posibilidad de incorporar variantes genéticas clave (Broadhurst et al., 2008). Esta lógica ha dado origen a enfoques como la “mezcla regional”, que integra tanto poblaciones locales como no locales, siempre y cuando provengan de entornos ecológicamente comparables y no presenten riesgos de mala adaptación o hibridación desfavorable (Bucharova et al., 2019).

La estrategia de recolección también debe considerar el sistema reproductivo de la especie, es decir, si las plantas son autocompatibles (capaces de fertilizarse a sí mismas) o autoincompatibles (requieren polen de otros individuos para la fecundación). La autocompatibilidad se determina mediante estudios de polinización controlada o análisis genéticos que evalúan la capacidad de los individuos para producir semillas con su propio polen. Además, deben considerarse las distancias típicas de dispersión de semillas y polen, así como el nivel de conectividad del paisaje. Todos estos factores afectan el flujo génico entre poblaciones, influyendo directamente en la estructura genética de las futuras poblaciones y en su capacidad para adaptarse a condiciones ambientales cambiantes (Breed et al., 2013; Erez et al., 2024; Thomas et al., 2014).

Un ejemplo ilustrativo de cómo aplicar estos principios lo brinda el estudio de Krauss et al. (2013), quienes evaluaron la estructura genética de 24 poblaciones de *Banksia menziesii*, una especie australiana, para definir zonas seguras de recolección. Usando 100 marcadores AFLP—una técnica que genera marcadores de ADN multilocus mediante PCR sin requerir información previa de la secuencia—los investigadores detectaron una diferenciación genética significativa entre poblaciones, determinada principalmente por la distancia geográfica y no por variables climáticas. A partir de estos datos, propusieron que poblaciones separadas por más de 60 km tenían el doble de probabilidad de ser genéticamente distintas, por lo que recomendaron delimitar un radio de 30 km como zona segura de procedencia genética local. Esta estrategia permite asegurar que el material recolectado esté genéticamente

adaptado al sitio de restauración, minimizando riesgos ecológicos. Así, se demuestra que el uso de evidencia genética puede mejorar significativamente la toma de decisiones en proyectos de restauración ecológica.

Consideraciones especiales bajo cambio climático

El cambio climático plantea un reto para la restauración ecológica, pues altera las condiciones ambientales de los sitios intervenidos y genera incertidumbre sobre su evolución futura. Estos cambios afectan tanto a comunidades bióticas como a factores abióticos, influyendo en poblaciones localmente adaptadas y en sus patrones de dispersión (Vitt et al., 2022). Para enfrentar este escenario, se han propuesto enfoques que incorporan proyecciones climáticas en la selección de material genético, con el fin de aumentar las probabilidades de éxito a largo plazo. Así, depender únicamente de fuentes locales puede resultar insuficiente, especialmente en ecosistemas frágiles donde la baja diversidad genética limita la resiliencia, entendida como la capacidad de las poblaciones restauradas para mantener su funcionalidad y adaptarse a cambios o perturbaciones ambientales (Maxwell et al., 2018).

La interacción genotipo × ambiente (G×E) se refiere a cómo los genes de una planta (su genotipo) y las condiciones del lugar donde crece (el ambiente) combinan sus efectos para determinar su desempeño, supervivencia y adaptación. En otras palabras, el mismo genotipo puede comportarse de manera diferente según factores como el clima, el suelo o la disponibilidad de agua. Por ello, al seleccionar material genético para la restauración, es fundamental considerar tanto la



composición genética de las especies como las condiciones específicas del sitio, asegurando que los individuos elegidos puedan prosperar y adaptarse a su entorno. En escenarios donde esta interacción es baja, el uso de semillas locales con suficiente diversidad puede ser adecuado para garantizar la adaptación. Sin embargo, frente a la creciente incertidumbre climática, se recomienda la estrategia de proveniencia compuesta, que combina 70–80 % de semillas locales con 20–30 % de semillas de áreas vecinas cuyas condiciones se asemejan a las proyectadas para el sitio en el futuro (Aitken et al., 2008). En situaciones de mayor incertidumbre, se sugiere aplicar la proveniencia mixta o *admixture provenancing*, que prioriza la diversidad genética incluyendo hasta 100 % de la variabilidad disponible, independientemente de la distancia geográfica entre las fuentes (Williams et al., 2014).

Más allá de la selección del material genético, la restauración debe concebirse dentro de un enfoque de paisaje, que promueva la conectividad entre áreas restauradas y remanentes naturales. Esta conectividad ecológica es clave para facilitar la migración de especies y el flujo génico, lo cual es fundamental para sostener la resiliencia ecosistémica ante el cambio climático. Además, fortalece procesos como la polinización cruzada en especies autoincompatibles, reduciendo la depresión por endogamia y mejorando la producción y calidad de semillas (Breed et al., 2012; Newton, 2011).

Sin embargo, según Pita et al. (2024), aunque el cambio climático representa una amenaza clara para la efectividad y sostenibilidad de los esfuerzos de restauración forestal, la mayoría de los estudios revisados no lo

incorpora explícitamente en el diseño o evaluación de los proyectos. Solo un tercio de los artículos examinados hace referencia directa al cambio climático, y en muchos casos esta mención es superficial o general. A ello se suma la escasez de evidencia empírica, pues predominan los estudios basados en modelos o simulaciones, mientras que los proyectos reales, implementados y monitoreados a largo plazo, suelen estar poco documentados o fuera del alcance de la literatura científica. Esta desconexión entre la investigación académica y la práctica limita la posibilidad de aprender de experiencias concretas y ajustar las estrategias de restauración de forma dinámica ante un entorno cambiante.

Pita et al. (2024) también enfatizan en que enfrentar estos desafíos requiere integrar el cambio climático en todas las etapas del ciclo del proyecto: desde la formulación de objetivos hasta la selección de especies, el diseño del monitoreo y la evaluación de riesgos climáticos específicos. Asimismo, destacan la importancia de incorporar conocimientos y saberes tradicionales, ancestrales y locales como parte fundamental de los enfoques de restauración, ya que ofrecen perspectivas valiosas sobre adaptación ecológica y social que frecuentemente son ignoradas en los marcos técnicos dominantes. Bajo esta visión, la restauración ecológica en contextos de cambio climático no debe considerarse simplemente como un ajuste técnico, sino como una reconfiguración profunda de los fines, métodos y actores involucrados: qué restauramos, por qué y para quién.

Finalmente, como señalan Timpane-Padgham et al. (2017), integrar la resiliencia como objetivo explícito en los proyectos de restauración es clave para fomentar la



capacidad adaptativa de los ecosistemas. Esto implica ajustar el enfoque y la escala del proyecto para seleccionar métricas apropiadas que prioricen atributos naturales de resiliencia, como la diversidad biológica y la conectividad. Dada la variabilidad climática y ambiental, el monitoreo continuo de la respuesta y recuperación ecosistémica se vuelve indispensable para identificar y reforzar aquellos factores que permiten una mejor adaptación frente a futuros escenarios de cambio climático.

Errores comunes y recomendaciones basadas en evidencia

La restauración ecológica juega un papel fundamental en la recuperación de ecosistemas degradados, pero uno de los errores más comunes y críticos está relacionado con una gestión genética inadecuada. Esto incluye la utilización de semillas con baja calidad genética o provenientes de una única fuente, sin considerar la diversidad natural propia de las poblaciones originales. Además, la preferencia por plantar plántulas en vivero, en lugar de fomentar la regeneración natural o la siembra directa, tiende a reducir el tamaño efectivo y la diversidad genética de las poblaciones restauradas, limitando su capacidad de adaptación futura. Otro problema frecuente es la falta de definición clara de zonas de transferencia genética, lo que puede derivar en mezclas inapropiadas de material genético y aumentar los riesgos de maladaptación o depresión por cruzamiento, afectando negativamente la viabilidad de las poblaciones (Prakash et al., 2024; Wei et al., 2023).

Las consecuencias de esta mala gestión genética son profundas y duraderas. La reducción en la diversidad genética disminuye la capacidad de las poblaciones para sobrevivir y adaptarse a condiciones cambiantes, incrementando el riesgo de endogamia y efectos fundadores que pueden debilitar su resistencia frente a enfermedades, estrés ambiental y procesos evolutivos futuros. En la práctica, esto se traduce en fracasos de restauración a largo plazo, la necesidad de intervenciones costosas adicionales, pérdida de recursos valiosos y disminución de la confianza pública en los proyectos de restauración (Wei et al., 2023).

Para evitar estos problemas, es imprescindible que la diversidad genética se convierta en un objetivo central dentro de las estrategias de restauración. Se recomienda, siempre que sea posible, priorizar la regeneración natural, permitiendo que los ecosistemas se renueven con su propia dinámica. Cuando se requiera restauración activa, favorecer la siembra directa de semillas sobre la plantación de plántulas puede ayudar a aumentar el tamaño poblacional inicial y preservar la diversidad genética. Asimismo, es fundamental utilizar mezclas de semillas provenientes de múltiples poblaciones locales, dentro de zonas de transferencia genética bien definidas, con el fin de maximizar la diversidad y minimizar los riesgos asociados a mezclas genéticas inapropiadas. En este sentido, las tecnologías genómicas modernas se presentan como herramientas valiosas para seleccionar fuentes genéticas adecuadas y monitorear el progreso y la salud genética de las poblaciones restauradas a largo plazo (Wei et al., 2023).

Finalmente, la planificación de monitoreos genéticos a largo plazo es esencial para evaluar la efectividad de las estrategias aplicadas



y detectar posibles problemas. Es crucial evitar transferencias genéticas entre regiones separadas por barreras naturales que puedan impedir el flujo génico. La aplicación de enfoques genómicos avanzados permite mejorar la recolección, evaluación y seguimiento del material genético, ayudando a delimitar zonas de transferencia, incrementar la diversidad sin perder adaptaciones locales y comprender mejor el flujo génico. Todo ello es clave para diseñar estrategias de restauración efectivas que fortalezcan la conservación y la resiliencia de los ecosistemas frente al cambio climático (McLennan et al., 2025; Mijangos et al., 2015).

Conclusiones

La incorporación de la genética en los proyectos de restauración ecológica es fundamental para conservar la diversidad y asegurar la adaptación de las poblaciones, aspectos clave para la resiliencia y funcionalidad a largo plazo de los ecosistemas restaurados. No obstante, la genética por sí sola no resuelve todos los desafíos que enfrenta la restauración; es necesario un enfoque integral que integre también factores ecológicos, ambientales y sociales que influyen en el éxito de las intervenciones. Para ello, es crucial aplicar estrategias basadas en evidencia genética, como el uso de proveniencias mixtas que aumenten la diversidad y la conectividad genética que facilite el flujo génico. Además, el uso de herramientas genómicas avanzadas y el monitoreo a largo plazo permiten evaluar y ajustar las acciones, fortaleciendo la sostenibilidad de los proyectos ante el cambio climático y otras amenazas ambientales. Así, solo mediante la combinación de la genética con una visión amplia y multidisciplinaria se podrán lograr restauraciones efectivas y duraderas.

Referencias

- Aerts, R., & Honnay, O. (2011). Forest restoration, biodiversity and ecosystem functioning. *BMC Ecology*, 11, 29. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-11-29>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Azpilicueta, M. M., Gallo, L. A., Pastorino, M., & Lozano, L. (2011). *Aspectos genéticos de la restauración ecológica del bosque nativo: Ejemplos de aplicación en la Región Andino-Patagónica* (Serie técnica: Sistemas Forestales Integrados, Cuadernillo N.º 2). INTA EEA Bariloche, Argentina
- Bozzano, M., Jalonen, R., Thomas, E., Boshier, D., Gallo, L., Cavers, S., Bordács, S., Smith, P., & Loo, J. (2014). *Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species*. FAO/Bioversity International. <https://hdl.handle.net/10568/67424>
- Breed, M. F., Stead, M. G., Ottewell, K. M., Gardner, M. G., & Lowe, A. J. (2013). Which provenance and where? Seed sourcing strategies for revegetation in a changing environment. *Conservation Genetics*, 14(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10592-012-0425-z>
- Broadhurst, L. M., Lowe, A., Coates, D. J., Cunningham, S. A., McDonald, M., Vesk, P. A., & Yates, C. (2008). Seed supply for broadscale restoration: Maximizing evolutionary potential. *Evolutionary Applications*, 1(4), 587–597. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2008.00045.x>
- Brown, A. H. D., & Hardner, C. (2000). Sampling the gene pools of forest trees for ex situ conservation. In A. Young, T. Boyle, & D. Boshier (Eds.), *Forest conservation genetics: Principles and practice* (pp. 185–199). CSIRO Publishing.
- Bucharova, A., Bossdorf, O., Hölzel, N., Kollmann, J., Prasse, R., & Durka, W. (2019). Mix and match: Regional admixture provenancing strikes a balance among different seed-sourcing strategies for ecological restoration. *Conservation Genetics*, 20, 7–17. <https://doi.org/10.1007/s10592-018-1067-6>

- Conceição, T. A., Santos, A. S., Fernandes, A. K. C., Meireles, G. N., Oliveira, F. A., Barbosa, R. M., & Gaiotto, F. A. (2024). Guiding seed movement: Environmental heterogeneity drives genetic differentiation in *Plathymenia reticulata*, providing insights for restoration. *AoB Plants*, 16(3), plae032. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plae032>
- Erez, K., Jangid, A., Feldheim, O. N., & Friedlander, T. (2024). The role of promiscuous molecular recognition in the evolution of RNase-based self-incompatibility in plants. *Nature Communications*, 15, 4864. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49163-7>
- Espeland, E. K., Emery, N. C., Mercer, K. L., Woolbright, S. A., Kettenring, K. M., Gepts, P., & Etterson, J. R. (2016). Evolution of plant materials for ecological restoration: Insights from the applied and basic literature. *Journal of Applied Ecology*, 53(5), 1092–1101. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12739>
- Ipinza Carmona, R., & Gutiérrez Caro, B. (2014). Consideraciones genéticas para la restauración ecológica. *Ciencia & Investigación Forestal*, 20(2), 51–72. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2014.421>
- Kettenring, K. M., & Tarsa, E. E. (2020). Need to seed? Ecological, genetic, and evolutionary keys to seed-based wetland restoration. *Frontiers in Environmental Science*, 8, Article 109. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00109>
- Krauss, S. L., Sinclair, E. A., Bussell, J. D., & Hobbs, R. J. (2013). An ecological genetic delineation of local seed-source provenance for ecological restoration. *Ecology and Evolution*, 3(7), 2138–2149. <https://doi.org/10.1002/ece3.595>
- Maxwell, S. L., Butt, N., Maron, M., McAlpine, C. A., Chapman, S., Ullmann, A., Segan, D. B., & Watson, J. E. M. (2018). Conservation implications of ecological responses to extreme weather and climate events. *Diversity and Distributions*, 24(9), 1222–1236. <https://doi.org/10.1111/ddi.12878>
- McLennan, E. A., Grueber, C. E., Belov, K., & Hogg, C. J. (2025). The current status of genetic monitoring in conservation introductions. *Conservation Science and Practice*, 7(3), e70036. <https://doi.org/10.1111/csp2.70036>
- Meek, M. H., Beever, E. A., Barbosa, S., Fitzpatrick, S. W., Fletcher, N. K., Mittan-Moreau, C. S., Reid, B. N., Campbell-Staton, S. C., Green, N. F., & Hellmann, J. J. (2023). Understanding local adaptation to prepare populations for climate change. *BioScience*, 73(1), 36–47. <https://doi.org/10.1093/biosci/biac101>
- Mijangos, J. L., Pacioni, C., Spencer, P. B. S., & Craig, M. D. (2015). Contribution of genetics to ecological restoration. *Molecular Ecology*, 24(1), 22–37. <https://doi.org/10.1111/mec.12995>
- Navarro, G., De la Barra, N., Ferreira, W., Llanos, S., & Herbas, E. (2021). Guía práctica para la restauración ecológica de ambientes degradados en Bolivia. *Acta Nova*, 10(2) 222-245. Epub 31 de noviembre de 2021. Recuperado en 03 de noviembre de 2025, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892021000200222&lng=es&tlng=es.
- Newton, A. C. (2011). Synthesis: Principles and practice for forest landscape restoration. In A. C. Newton & N. Tejedor (Eds.), *Principles and practice of forest landscape restoration: Case studies from the drylands of Latin America* (pp. 353–383). IUCN.
- Piñero, D., Caballero-Mellado, J., Cabrera-Toledo, D., Canteros, C. E., Casas, A., Castañeda Sortibrán, A., Castillo, A., Cerritos, R., Chassin-Noria, O., Colunga-GarcíaMarín, P., Delgado, P., Díaz-Jaimes, P., Eguarte, L. E., Escalante, A. E., Espinoza, B., Fleury, A., Flores Ramírez, S., Fragos, G., González-Astorga, J., & Zúñiga, G. (2008). La diversidad genética como instrumento para la conservación y el aprovechamiento de la biodiversidad: Estudios en especies mexicanas. En R. Dirzo, R. González, & J. A. Meave (Eds.), *Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 437–494). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Pita, K., Wickham, S. B., Davis, E. L., Lauriault, P., Johnson, A., Le, N. Q., Mullally, S., Schang, K., Smitas-Kraas, M. M. A., Wittmann, E., & Trant, A. J. (2024). How does restoration ecology consider climate change uncertainties in forested ecosystems? *Restoration Ecology*, 32(5), e14265. <https://doi.org/10.1111/rec.14265>



- Prakash, A., Capblancq, T., Shallows, K., Saville, D., Landau, D., Landress, C., Jacobs, T., & Keller, S. (2024). Bringing genomics to the field: An integrative approach to seed sourcing for forest restoration. *Applications in Plant Sciences*, 12(3), e11600. <https://doi.org/10.1002/aps3.11600>
- Sexton, J. P., Clemens, M., Bell, N., Hall, J., Fyfe, V., & Hoffmann, A. A. (2024). Patterns and effects of gene flow on adaptation across spatial scales: Implications for management. *Journal of Evolutionary Biology*, 37(6), 732–745. <https://doi.org/10.1093/jeb/voae064>
- Thomas, E., Jalonen, R., Loo, J., Boshier, D., Gallo, L., Cavers, S., Bordács, S., Smith, P., & Bozzano, M. (2014). Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. *Forest Ecology and Management*, 333, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.015>
- Timpane-Padgham, B. L., Beechie, T., & Klinger, T. (2017). A systematic review of ecological attributes that confer resilience to climate change in environmental restoration. *PLoS ONE*, 12(3), e0173812. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173812>
- Vitt, P., Finch, J., Barak, R. S., Braum, A., Frischie, S., & Redlinski, I. (2022). Seed sourcing strategies for ecological restoration under climate change: A review of the current literature. *Frontiers in Conservation Science*, 3, 938110. <https://doi.org/10.3389/fcosc.2022.938110>
- Wei, X., Xu, Y., Lyu, L., Xiao, Z., Wang, S., Yang, T., & Jiang, M. (2023). Impacts of ecological restoration on the genetic diversity of plant species: A global meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 60(10), 2573–2586. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14390>
- Williams, A. V., Nevill, P. G., & Krauss, S. L. (2014). Next-generation restoration genetics: Applications and opportunities. *Trends in Plant Science*, 19(8), 529–537. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.03.011>

