

GA.1.

Programa de Adaptación para la Gestión de los Recursos Vegetacionales

En el marco de cambio climático, desertificación, degradación de las tierras y sequía

Ministerio de Agricultura
Corporación Nacional Forestal
Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV)



Chile
mejor



ENCCRV
ESTRATEGIA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO Y RECURSOS VEGETACIONALES





Autores:

Antonio Varas Myrik¹

Miguel Angel Villarroel²

Colaboradores:

Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales (UCCSA)

Angelo Sartori Ruilova

Jaeel Moraga Veras

Wilfredo Alfaro Catalán

Oswaldo Quintanilla Loaiza

Andrea Choque Brito

Georgina Trujillo Meneses

Cesar Matar Martínez

Agradecimientos:

Fernando Droppelman Felmer

Pablo Ramírez de Arellano

Rodrigo Hasbún Zaror

Gustavo Moreno Díaz

Jaime Espinosa Belmar

Como citar este documento:

Corporación Nacional Forestal (CONAF), 2018. Programa de adaptación para la gestión de los Recursos Vegetacionales en el marco del cambio climático, desertificación, degradación de las tierras y sequía. Santiago. Chile. 78pp.



¹ Ingeniero Forestal. Director del Centro de Semillas, Genética y Entomología. CONAF.

² Ingeniero en Biotecnología Vegetal.



**Chile
mejor**



Programa de Adaptación para la Gestión de los Recursos Vegetacionales en el marco de cambio climático, desertificación, degradación de las tierras y sequía

Ministerio de Agricultura
Corporación Nacional Forestal

Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRIV)



Índice



| | |
|--|-----------|
| Prólogo | 10 |
| Introducción | 14 |
| ¿Está mejor adaptado el material genético local? | 34 |
| I. Plan integral para adaptación de los recursos genéticos vegetacionales al cambio climático | 22 |
| I.1. Vulnerabilidad y Priorización de especies | 26 |
| I.2. Regiones de Procedencia | 28 |
| I.2.1. Nicho Ecológico y efecto del cambio climático | 29 |
| I.2.2. Modelamiento de Nicho Ecológico | 30 |
| I.2.3. Estimación del cambio en la distribución de especies por efecto del Cambio Climático Global | 32 |
| I.3. Determinación e identificación de Fuentes de Germoplasma | 33 |
| I.3.1. Tamaño efectivo de población y diseño de la Colecta | 34 |
| I.4. Colecta de germoplasma | 36 |
| I.5. Ensayos de adaptabilidad y Guías de transferencia | 37 |
| II. Acciones Para Mejorar Adaptabilidad de los recursos vegetacionales | 42 |
| II.1. Migración asistida | 42 |
| II.2. Reforzamiento de Poblaciones y Colonización Asistida | 43 |
| II.3. Efectos de la epigenética sobre la adaptación al cambio climático | 44 |
| II.4. Manejo y mantención de bosque nativo | 47 |
| III. Conservación <i>ex situ</i> | 52 |
| III.1. Almacenamiento <i>ex situ</i> de germoplasma | 54 |
| III.2. Establecimiento de bancos o rodales de conservación | 55 |
| IV. Necesidades Reglamentarias y Estructurales | 58 |
| IV.1. Sistema de certificación para Material Forestal Reproductivo | 58 |
| IV.2. Centro de RGF | 59 |
| Referencias | 62 |
| Anexos | 70 |

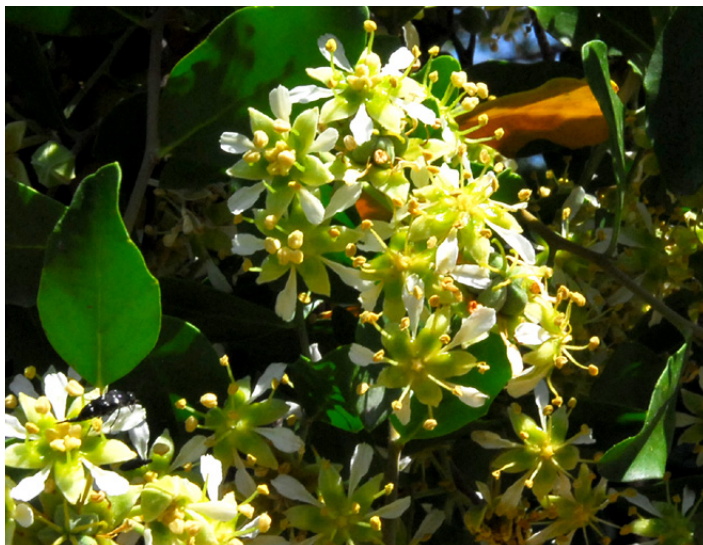


Prólogo





Prólogo



La Corporación Nacional Forestal (CONAF) en el año 2016 finalizó la formulación de la Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV)³ 2017-2025 tras un proceso técnico y participativo de carácter nacional, que corresponde a un instrumento de política pública, el cual establece un conjunto de medidas de acción directas y facilitadoras que se centran en enfrentar el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras y la sequía, mediante una adecuada gestión de los recursos vegetacionales con la finalidad de disminuir las tasas históricas de deforestación, devegetación y degradación de bosques nativos, formaciones xerofíticas y otros recursos vegetacionales, así como también fomentando la recuperación, forestación, revegetación y manejo sustentable de éstos recursos nativos.

En este contexto y considerando que CONAF es punto focal ante la Convención de Naciones Unidas de Luchas contra la Desertificación (CNULD), y para el enfoque de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que busca la reducción de emisiones por deforestación, degradación forestal y aumentar las existencias de carbono, más conocido como REDD+, la Estrategia se ha alineado en materia de adaptación con los principales instrumentos y reportes nacionales referidos a esta temática, como lo son:

● Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022

El cual establece en su eje de acción de adaptación, vínculos concretos con la ENCCRV relevándola como una herramienta alineadas con los compromisos internacionales del país, cuyas medidas generan beneficios ambientales, sociales y económicos en el territorio dado su carácter operacional, y que buscan en conjunto fortalecer la capacidad nacional para adaptarse al cambio climático profundizando los conocimientos de sus impactos y de la vulnerabilidad del país y generando acciones planificadas que permitan minimizar los efectos negativos y aprovechar los efectos positivos y asegurar su sustentabilidad, velando por conservar su patrimonio natural y cultural.

● El Plan de Adaptación Nacional (2014)

El cual es una de las metas del anterior Plan de Acción Nacional sobre Cambio Climático 2008-2012 (PANCC), que incorpora

³ Documento disponible en: <http://www.enccrv-chile.cl/descargas/publicaciones/87-enccrv-2017-2025-v2/file>



la información suministrada por el **Plan de Adaptación al Cambio Climático del Sector Silvoagropecuario (2008-2012)**, que establece que la ENCCRV fomenta la investigación e innovación en el sector silvoagropecuario, orientada al manejo de cultivos agrícolas y bosques.

● **Plan de Adaptación al Cambio Climático en Biodiversidad**

Que en su objetivo referido a promover prácticas productivas sustentables para la adaptación al cambio climático en biodiversidad y la mantención de los servicios ecosistémicos, define a la ENCCRV como uno de los vehículos idóneo para tales fines.

● **Contribución Nacionalmente Determinada de Chile para el Acuerdo de París**

Finalmente, en el documento de la Contribución Nacionalmente Determinada propuesto el 2015 a la comunidad internacional por Chile, y ratificado por el Congreso Nacional mediante la promulgación del Decreto N°30 del MINREL en febrero de 2017, define a la Estrategia como un instrumento de política apropiado para lograr las metas establecidas en materia forestal en mitigación y adaptación con énfasis en territorios pertenecientes a pequeños y medianos propietarios.

De manera específica, en la ENCCRV se ha establecido una medida de acción denominada *Programa de adaptación para la gestión de los recursos vegetacionales en el marco del cambio climático, desertificación, degradación de las tierras y sequía*, que busca avanzar en fomentar la adaptación al cambio climático de los recursos genéticos vegetacionales, abordando temáticas como las acciones necesarias para mejorar la adaptabilidad de ellos, su conservación *ex situ* y distintas necesidades reglamentarias y estructurales existentes.

Para cumplir con este objetivo la Gerencia de Desarrollo y Fomento Forestal (GEDEFF), a través del Centro de Semillas, Genética y Entomología (CSGE) y la Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales (UCCSA), han diseñado el presente Programa, que da cumplimiento a las metas establecidas en la ENCCRV para el año 2025, instalado este Programa en 80 comunas del país, considerando para esto un presupuesto estimado en USD 9.437.940, de los cuales sólo USD 505.700 son recursos existentes en CONAF, mientras que el diferencial deberá gestionarse en instancias nacionales e internacionales, públicas y privadas para lograr el cumplimiento de esta meta.

Se debe relevar que el presente Programa es complementario y sinérgico con otras medidas de acción de la ENCCRV y generará insumos relevantes para su diseño y ejecución, las que incluyen los programas de forestación, restauración y manejo sustentable, entre otras.



Introducción





Introducción

Fischlin *et al.* (2007, citado por IPCC, 2014) mencionan que entre el 20% al 30% de las especies de plantas y animales evaluadas hasta el momento del estudio se pueden considerar en mayor riesgo de extinción si el aumento global de la temperatura promedio excede los 2° C a 3° C. Señalan además, que habrá cambios sustanciales en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. La probabilidad de que se pierda diversidad genética depende tanto de factores naturales de cambios en los ambientes bióticos o abióticos, como de factores antrópicos de deforestación, cambios en el uso de la tierra o prácticas de manejo en ubicaciones específicas (Eriksson *et al.*, 2006b; Peters, 1990; St. Clair y Howe, 2011; Biodiversa, 2014). Otro informe de IPPC señala que si los países cumplen con sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, siglas en inglés), la temperatura media en superficie del planeta subiría 3,7°C, lo que justifica plenamente las medidas propuestas en este documento y su urgencia.

El concepto de adaptación biológica se entiende como el proceso que conduce a un mejor estado de adaptabilidad en un entorno específico. Este estado de adaptabilidad es el grado en que un organismo es capaz de vivir y reproducirse en un conjunto determinado de entornos. Este, a su vez, está estrechamente relacionado con el concepto de “*fitness*” o aptitud, que es una expresión de la contribución que tendrá un individuo a la próxima generación, en relación con otros individuos de la misma población. Así, la adaptabilidad es la capacidad de una población para responder genética o fenotípicamente a las diferentes condiciones ambientales. La plasticidad fenotípica es la propiedad de un genotipo de producir diferentes fenotipos en respuesta a diferentes condiciones ambientales (Eriksson *et al.*, 2006).

Potencial de supervivencia



Figura 1. Las flechas que apuntan hacia arriba muestran los factores que aumentan la adaptabilidad de una especie y las flechas que apuntan hacia abajo son limitaciones para la adaptación. Fuente: Eriksson *et al.* (2006).

Las especies forestales constituyen organismos ideales para comprender la divergencia adaptativa de las poblaciones naturales, su evolución y sus bases moleculares, considerando su escasa domesticación, las extensas poblaciones de bosques nativos con polinización abierta y los altos niveles de variación genética y fenotípica. La identificación de alelos con rasgos adaptativos ayudará a comprender la acción y la regulación de los distintos genes en los procesos de adaptación al cambio climático. Así, la determinación de los efectos alélicos sobre los fenotipos y la identificación de patrones de variación adaptativa a nivel del paisaje, serían claves para diseñar estrategias de conservación de las especies forestales (Yakovlev *et al.*, 2012; Eriksson *et al.*, 2006).

Para la supervivencia a largo plazo, las especies vegetales deben poseer dos condiciones: la capacidad de dispersión de semillas y regeneración de la especie, y la capacidad de responder

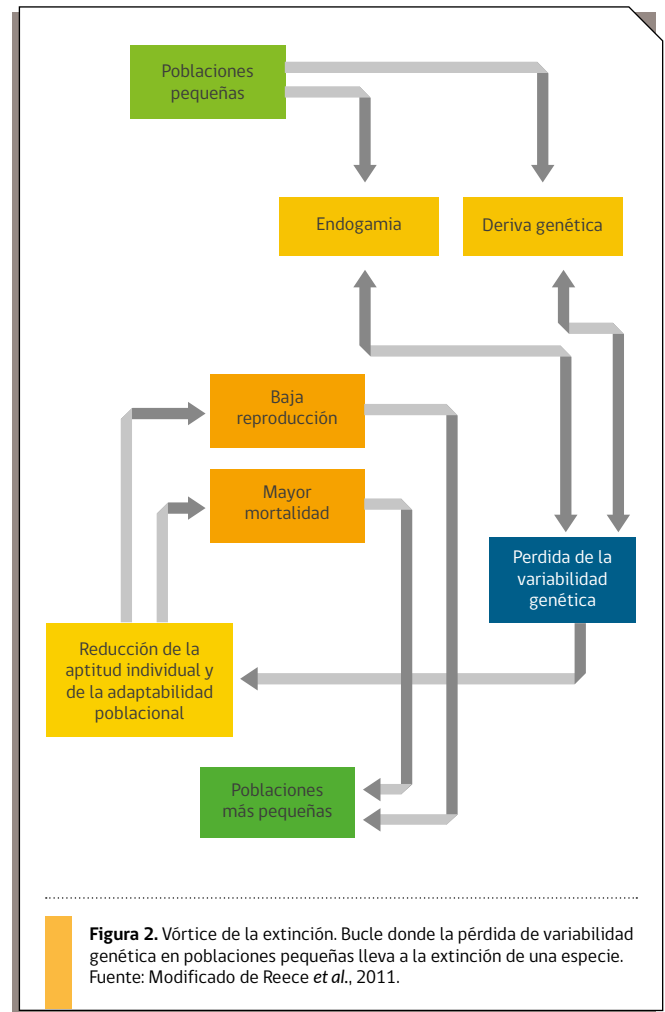
genéticamente, es decir, que exista una amplia varianza aditiva para los rasgos de adaptación significativos (Eriksson *et al.*, 2006). Si alguna de estas capacidades es suficiente para hacer frente a los cambios en el medio ambiente, la especie/población sobrevivirá. Una especie/población continuamente distribuida con largas distancias de transferencia de polen, puede beneficiarse de este flujo genético en contraste con una especie de distribución discontinua o fragmentada, con poco o nulo flujo genético. La fenología es fundamental para la supervivencia y desarrollo de muchas especies de árboles de clima templado en el mundo. Ha sido comprobado que el inicio de la floración depende de ciertos umbrales de temperatura en varias especies de árboles, especialmente en latitudes altas. Es probable que la floración ocurra más temprano durante la temporada en caso de aumento de la temperatura, ya que esta, como muchos otros rasgos fenológicos, puede ser inducida por la acumulación de horas de calor. Esto podría conducir a floración temprana, con

una exposición a temperaturas bajas y dañinas, lo que podría provocar daño severo por heladas (Eriksson *et al.*, 2006).

Por otra parte, para efecto de la previsión de los impactos del cambio climático, es difícil concluir si la ruptura de la latencia de las yemas se alcanza antes o después en caso de aumento de temperaturas. La interrupción de la latencia puede ocurrir más tarde si las bajas temperaturas son poco frecuentes o antes si las bajas temperaturas son bastante frecuentes. Un problema con la ruptura o interrupción temprana de la latencia es que las fluctuaciones entre el clima templado y las heladas se espera que sean más frecuentes. Esto puede provocar daños severos por heladas de los brotes altamente sensibles (Eriksson *et al.*, 2006a).

Otra consecuencia esperable del cambio climático es la fragmentación de una especie continuamente distribuida. Esto podría conducir a tamaños efectivos de población bajos, ya que el flujo genético se vería interrumpido y los niveles de parentesco o endogamia aumentarían dentro de dichas poblaciones, diferenciándose las poblaciones pequeñas y fragmentadas resultantes por pérdida de alelos menos frecuentes, lo que provocaría posteriormente un aumento de la varianza genética entre las poblaciones fragmentadas. Finalmente, las nuevas generaciones de las poblaciones fragmentadas tienen aún mayor endogamia, lo que resulta en un vórtice de extinción (figura 2). La fragmentación podría ser considerada sólo si genera poblaciones con tamaños efectivos menores a 100 individuos. En general, el efecto depende del flujo de genes antes de la fragmentación, el patrón de la migración entre poblaciones separadas después de la fragmentación, así como el resultado local de recolonización y extinción (Eriksson *et al.*, 2006). El flujo genético entre poblaciones es algo indispensable para una población que necesita de alelos adaptativos para sobrevivir al cambio climático, ya que la fragmentación de poblaciones podría afectar negativamente. Sin embargo, no siempre la fragmentación de poblaciones tiene este efecto y un monitoreo de la variabilidad genética y endogamia de poblaciones en riesgo, es absolutamente necesario.

El cambio climático también puede tener consecuencias a nivel de especie. Especies alopátricas relacionadas, pueden migrar de tal manera que ocuparán el mismo hábitat. Si no tienen medios de aislamiento, a excepción del aislamiento geográfico anterior, puede ocurrir la hibridación interespecífica, habiendo ejemplos para esto en el género *Nothofagus*. A partir del estudio de marcadores moleculares y del registro fósil, algunos



ecólogos han llegado a la conclusión de que la mayoría de las especies no podrán migrar lo suficientemente rápido como para hacer frente a la velocidad del cambio causado por el actual proceso de calentamiento global. Si esta conclusión es cierta, las especies disponen de su capacidad genética para responder al cambio climático (segunda condición).

En conclusión, para la supervivencia a largo plazo de una especie en un escenario de cambio climático global, al menos una de las siguientes condiciones debe cumplirse:



- La capacidad de dispersión y regeneración es mayor que la velocidad de cambio ambiental.
- La respuesta genética es mayor que la velocidad de cambio ambiental.

Cabe señalar que estas condiciones se aplican independientemente de la duración del cambio ambiental. De todos modos, debe recordarse que una especie con una generación cada 25 años necesita una cantidad mucho mayor

de varianza genética aditiva que una especie anual que puede responder 25 veces durante este mismo período. Especies con reproducción exclusivamente asexual dependen casi exclusivamente de la capacidad de dispersión para hacer frente al cambio global (Eriksson *et al.*, 2006). Por todo lo anterior, es de suma urgencia conservar y proteger la diversidad genética del bosque nativo para generaciones futuras, debido a que estas especies silvestres se ven altamente amenazadas (St. Clair y Howe, 2011).

¿Está mejor adaptado el material genético local?

Se entiende que la adaptación de una población es perfecta si ocurre en un sitio en particular y si ha permanecido y crecido allí durante muchas generaciones, de modo que la selección natural moldeó perfectamente a la población sólo para las condiciones presentes en este sitio. Incluso se discute sobre el real efecto del retraso adaptativo, entendido como una falta de coincidencia de genotipos y entornos, causada por un cambio ambiental relativamente rápido y una respuesta evolutiva relativamente lenta. En pocas palabras, si se permitiera que la selección natural se desarrollara durante un número suficiente de generaciones,

eventualmente se debería observar una adaptación perfecta. Sin embargo, para que esto ocurra, se requiere que se cumplan las siguientes condiciones: que el ambiente sea constante y; que todos los rasgos en la población sean totalmente independientes el uno del otro (Eriksson *et al.*, 2006).

Se sabe que las condiciones ambientales no son constantes en el tiempo, además que estas se ven afectadas por el cambio climático. En 2014, el IPCC presentó el Quinto Informe de Evaluación, donde indica que la capacidad de adaptación natural



de los ecosistemas contra el efecto combinado del cambio climático y otros factores estresantes, probablemente se vea excedida si la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) continúa o es superior. Se podría pensar en que las variaciones de un año a otro son tan leves que no harían ninguna diferencia en la selección natural. Sin embargo, no se sabe si las diferencias sutiles serían evolutivamente muy importantes. Con respecto a esto, se debe suponer que la selección natural puede cambiar las frecuencias de los alelos en diferentes direcciones bajo diferentes condiciones ambientales (Eriksson *et al.*, 2006; IPCC, 2014).

La relación entre dos rasgos puede ser positiva, negativa o ausente. Si es negativa, significa que el progreso en un rasgo conduce a una regresión en el segundo. Dado que la selección natural opera en el individuo como una entidad, significa que puede haber una regresión en un rasgo de valor adaptativo si se correlaciona negativamente con otro rasgo de valor de adaptación aún mayor. Es el fenotipo de un individuo como entidad, el objetivo de selección en la mayoría de los casos. Por lo tanto, los rasgos no pueden segregarse entre sí y, como

corolario de esto, la selección natural puede conducir a una buena adaptación en ciertos rasgos o una baja adaptación en otros. Ya Darwin afirmó que "la selección natural no producirá la perfección absoluta" (Eriksson *et al.*, 2006a).

Además de los dos prerequisites planteados anteriormente, existen otras condiciones que hacen poco probable encontrar una adaptación perfecta. En poblaciones pequeñas existe una pérdida de alelos condicionada por el azar debido a la deriva genética. Una vez más, es importante enfatizar que lo importante es la cantidad de individuos que contribuyen a la formación de la próxima generación (tamaño efectivo de la población). Este número puede ser considerablemente menor en poblaciones pequeñas y aisladas. La polinización por viento, que es importante para evitar la deriva genética, puede ralentizar la adaptación. Este es el caso si el polen proviene de otras poblaciones con un cierto grado de adaptación, en la cuales las condiciones del sitio son diferentes (Eriksson *et al.*, 2006a).



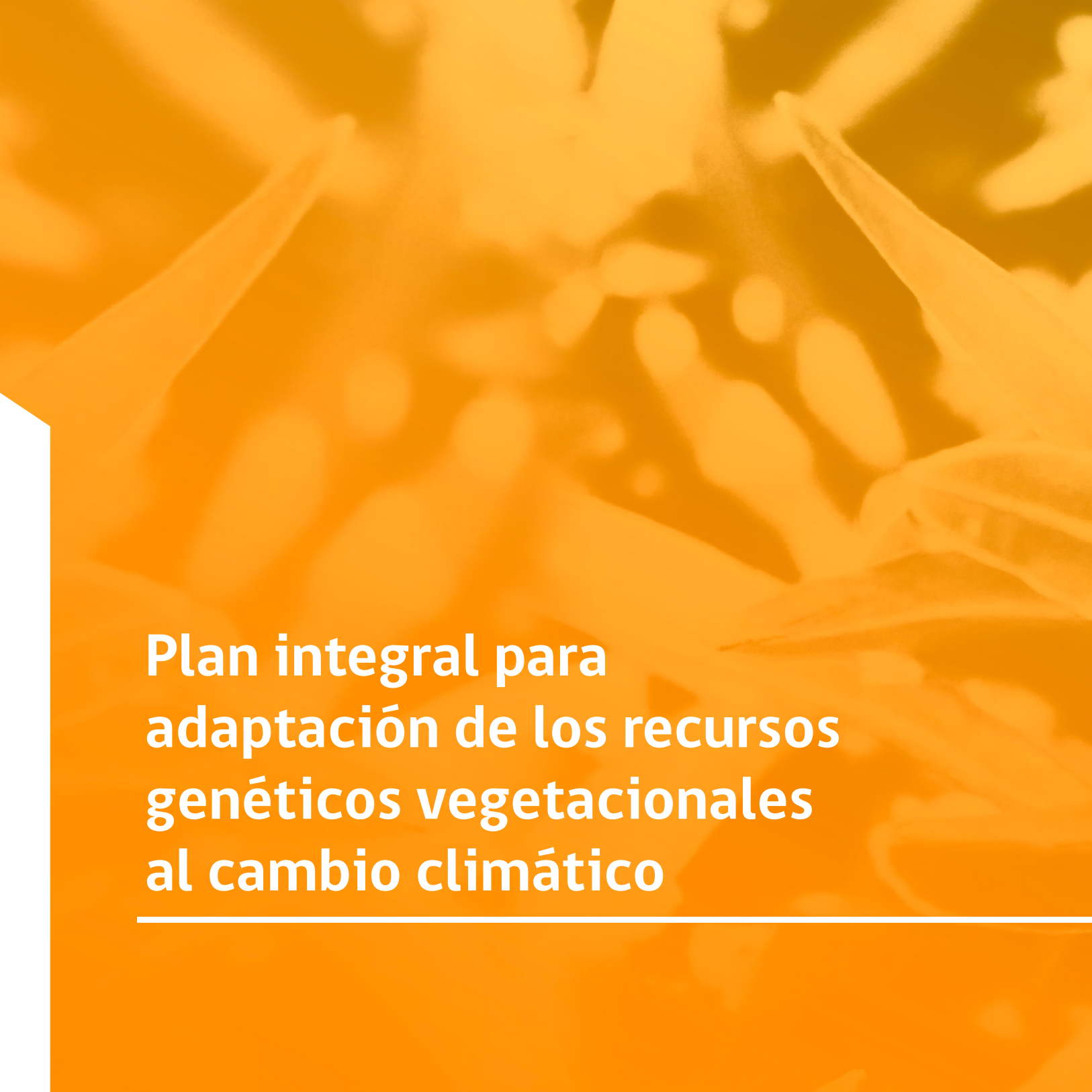
Es esperable que varios genotipos diferentes puedan dar lugar a un fenotipo. Para ejemplificar esto, podríamos utilizar el siguiente supuesto: los alelos con índice 1 contribuyen igualmente a la adaptación y de forma diferente a los alelos con índice 2. En estas condiciones, los genotipos $a_1a_1b_1b_2c_1c_2$ y $a_2a_2b_1b_1c_1c_1$ tendrían la misma adaptación. El fenotipo con mayor aptitud puede diferir genéticamente y por lo tanto, la selección natural no favorecerá a un solo genotipo. Por ende, la población que crece en la naturaleza como consecuencia de la selección natural, con todas sus limitaciones, debe considerarse solamente como una solución, de un gran número de soluciones posibles (Eriksson *et al.*, 2006a).

El retraso adaptativo no es infrecuente y de hecho es parte de cualquier cambio evolutivo a través de la selección natural direccional. Incluso si el retraso adaptativo no representa una amenaza para la supervivencia general de una especie, puede resultar en un crecimiento sub-óptimo, una salud forestal deficiente o altas tasas de mortalidad de los árboles, por lo cual es una preocupación para el manejo forestal y la provisión

de servicios ecosistémicos. El retraso adaptativo se puede detectar con experimentos de trasplante recíproco, probando germoplasma de diferentes fuentes semilleras en diversas regiones de procedencia. A pesar de que estos impactos podrían verse como una parte natural del cambio evolutivo, las estrategias proactivas de adaptación al cambio climático deberían apuntar a maximizar la salud y el vigor del bosque a través de la intervención. (Gray *et al.*, 2011).

La conclusión de la discusión anterior es que nunca se puede considerar la constitución genética actual de una población como perfecta, sino que debe considerarse transitoria y una de varias posibles. Por lo tanto, la presente constitución genética per se no debe ser objetivo en la conservación genética dinámica.

El presente Programa se basa en la implementación de acciones para promover, facilitar e incrementar las dos condiciones que deben darse para la supervivencia de una especie al cambio climático: capacidad de dispersión/regeneración y la respuesta genética, las que serán la piedra angular para el diseño.



**Plan integral para
adaptación de los recursos
genéticos vegetacionales
al cambio climático**



1



Plan integral para adaptación de los recursos genéticos vegetacionales al cambio climático

RESUMEN

Debido al cambio climático, muchas especies/poblaciones se verán afectadas en su distribución y supervivencia, aumentando el riesgo de extinción. Diversos estudios apuntan a conservar poblaciones utilizando sólo el germoplasma local disponible, indicando que el material local ya se encuentra adaptado para su nicho ecológico. El problema surge cuando la rapidez del cambio climático reduce la capacidad de la respuesta adaptativa a las nuevas condiciones bióticas y abióticas. Estudios realizados por Grey y Hamann (2011) y Grey *et al.* (2016), proponen estrategias y metodologías con las cuales resolver estos inconvenientes, utilizando modelos matemáticos y estadísticos, modelamiento de nichos ecológicos y proyecciones climáticas para determinar Regiones de Procedencia y fuentes semilleras dentro de éstas.

Para el desarrollo del presente Programa, se recomienda seguir las siguientes medidas:

1. Definir prioridades respecto de las especies o poblaciones
2. Identificar regiones de procedencia para fuentes semilleras
3. Construir las Guías de Transferencia o Guías de Utilización
4. Construir las Guías de Transferencia o Guías de Utilización
5. Inducir adaptación en condiciones de laboratorio
6. Mejorar la adaptabilidad a través del manejo silvicultural (Ley N°20.283)

- 7. Conservación *ex situ*
- 8. Sistema de seguimiento y monitoreo de indicadores de adaptabilidad

Comenzando por definir prioridades respecto de las especies o poblaciones con las que se trabajará, ya que resulta poco eficaz seleccionar puntos de partida sin un criterio objetivo. Para ello, se debe considerar la Vulnerabilidad de la especie/población, así como también de los Criterios y Categorías de la UICN, las recomendaciones de Gold *et al.* (2004) presentes en el anexo 3 y las prioridades establecidas por St. Clair y Howe (2011), o un uso combinado de estas. Es importante tener en cuenta las interacciones de la especie y el rol que juega en un ecosistema o paisaje.

Posterior a la selección de la especie/población, se debe identificar Regiones de Procedencia idóneas donde establecer fuentes semilleras, con el objetivo de capturar la mayor cantidad posible de alelos favorables. Para esto, se propone utilizar la técnica del modelamiento de Nicho Ecológico, herramienta que permite predecir la distribución de especies/poblaciones dependiendo de variables bioclimáticas, generando mapas ecoregionales. La identificación de Regiones de Procedencia y el establecimiento de fuentes semilleras se debe realizar bajo el contexto de cambio climático, asegurando que la colecta de germoplasma sea apropiada para su posterior utilización en planes de adaptación.

Una vez colectado el germoplasma, se prosigue con ensayos de adaptación, para luego construir las Guías de Transferencia o Guías de Utilización. Las Guías de Transferencia son un conjunto de información que delimitan el rango geográfico determinado por latitud, longitud y elevación, que permite saber qué fuente semillera puede ser utilizada en un lugar determinado, garantizando que la población contenga individuos con una elevada capacidad de respuesta frente a los cambios del entorno, así como también una alta capacidad de reproducción, asegurando la supervivencia. Los ensayos necesarios para construir dichas Guías tienen como objetivo maximizar la adaptación de poblaciones mediante la comparación de las respuestas de diferentes genotipos en diversas áreas de prueba. Dichos ensayos también pueden realizarse en ambientes controlados (invernaderos), con plantas pequeñas, en forma paralela a los ensayos de campo. En estos ensayos las plantas se caracterizan fisiológicamente mediante distintas variables que se asocian con





una mejor respuesta adaptativa, como eficiencia en el uso del agua, respuesta estomática, parámetros de intercambio gaseoso, la concentración de hormonas y el potencial hídrico en hojas, entre otras.

Posteriormente, el material base colectado debe ser utilizado, en Acciones para mejorar Adaptabilidad de los Recursos Genéticos Vegetacionales, respetando las Guías de Transferencia construidas. La Migración Asistida es el traslado de germoplasma fuera de su distribución geográfica histórica, en ambientes con condiciones que actualmente no son óptimas para su crecimiento, pero que podrían ser apropiados en un escenario de cambio climático. Por otra parte, el Reforzamiento de Poblaciones, es el movimiento de germoplasma dentro de su distribución geográfica y tiene como objetivo mejorar la adaptabilidad al incorporar genotipos mejor adaptados a la población objetivo. Ambas herramientas deben utilizarse mediante las Guías de Transferencia.

La epigenética ejerce un rol fundamental sobre los aspectos fisiológicos de las especies vegetales, ya que regula las etapas clave de su desarrollo, tales como la latencia de los tejidos meristemáticos, el desarrollo de los órganos, floración y maduración. Esta abre un amplio camino para la generación de adaptaciones. Esta regulación ambiental de la expresión genética sucede, según varias publicaciones, sólo durante

la embriogénesis. Por lo anterior, es posible inducir estas adaptaciones en condiciones de laboratorio, de forma de adelantarse a las condiciones climáticas futuras. También es posible mejorar la adaptabilidad de una población, favoreciendo del establecimiento de la regeneración natural, ya que esa semilla posee una lectura más actual del ambiente y por lo tanto una mejor adaptación.

Muchas de las medidas silviculturales para mejorar la adaptabilidad de las formaciones vegetacionales nativas, constituyen actividades bonificables por la Ley N°20.283, tales como plantación suplementaria, establecimiento de la regeneración natural, forestación con especies nativas, entre otras. Por lo anterior, dichas actividades de adaptación de los recursos genéticos vegetacionales podrían ser ejecutadas en el contexto de esta ley. Otro punto importante es establecer líneas de investigación para determinar los efectos del manejo silvícola del bosque nativo sobre sus parámetros genéticos, ya que algunos métodos de corta podrían estar erosionando genéticamente dichas formaciones.

Es altamente recomendable la conservación *ex situ* del Material Base previamente colectado, ya que puede ser utilizado tanto como refuerzo ante eventos de pérdida, como para el uso y estudio a futuro. Existen variadas estrategias de conservación *ex situ*, dependiendo del tipo de germoplasma recolectado,

tales como el almacenamiento en bancos de semillas (especies ortodoxas), almacenamiento *in vitro* (especies recalcitrantes), almacenamiento de polen y en bancos o rodales de conservación.

En cada caso y dependiendo de la especie, deben evaluarse la mejor relación costo/beneficio del tipo de almacenamiento, ya que la conservación y almacenamiento *in vitro* puede llegar a ser muy costosa. Muchos estudios apuntan a que el establecimiento de rodales de conservación o colecciones *in vivo* de especies o poblaciones, serían la estrategia que presenta una mejor eficiencia y eficacia para la conservación genética.

Finalmente, se debe considerar el complementar el sistema de seguimiento y monitoreo de la ENCRRV con los indicadores de adaptabilidad de la especie/población que se definan como parte de este Programa, en los que ya se ha estado abordando con trabajos específicos para definir un marco de indicadores que incluyan mitigación y adaptación al cambio climático.

A continuación en la figura 4, se resume una serie de actividades para la conservación de recursos genéticos vegetacionales frente al cambio climático.

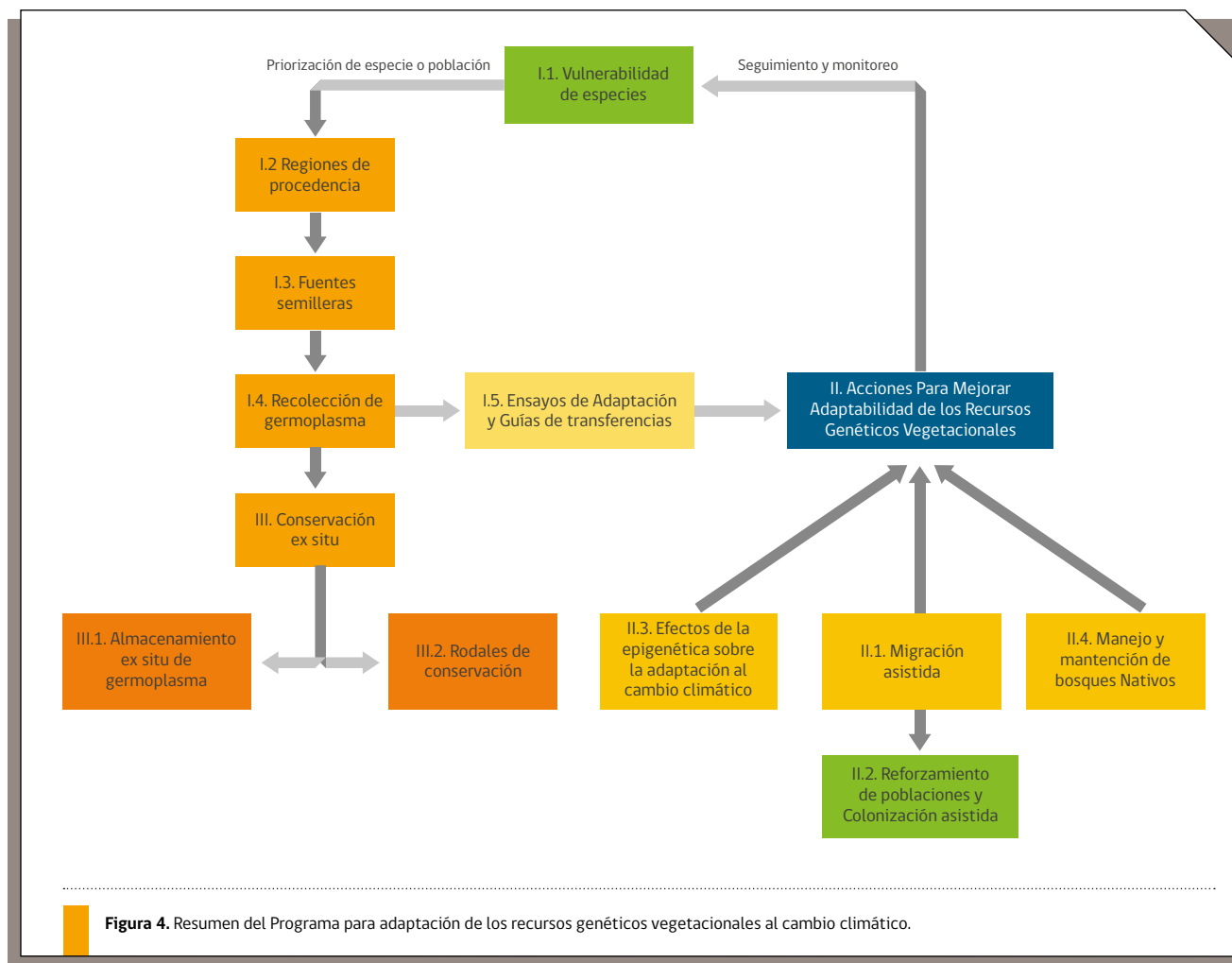


Figura 4. Resumen del Programa para adaptación de los recursos genéticos vegetacionales al cambio climático.

I.1. Vulnerabilidad y Priorización de especies

Es preciso identificar, seleccionar y priorizar las especies con las cuales se realizarán los programas de mejoramiento de la adaptabilidad, debido a que no es posible ni práctico abarcarlas todas, ya sea por motivos económicos o por la baja variabilidad entre individuos, entre otras razones. Por consiguiente, se debe dar prioridad a especies/poblaciones en base a su vulnerabilidad frente al cambio climático y a criterios específicos, lo que permitirá planificar y optimizar las actividades del programa o proyecto a realizar (Gold *et al.*, 2004). Se debe evaluar la vulnerabilidad de las especies vegetales ante los diferentes escenarios provocados por el cambio climático.

La vulnerabilidad de una especie frente el cambio climático se define por tres factores fundamentales: el grado de exposición, su sensibilidad y su capacidad de adaptación, las cuales se modelan por su capacidad adaptativa. La exposición es la naturaleza y grado de variaciones climáticas a las que está sometida la especie. La sensibilidad se define como los límites ecofisiológicos de una población para resistir diferentes tipos de estrés, y se puede medir en caracteres relacionados a la aptitud (biomasa, crecimiento, mortalidad, etc) Williams *et al.* (2008, Citado por Fernández-Manjarrés y Benito-Garzón, 2015). La capacidad de adaptación es la habilidad para ajustarse al cambio climático y responder a daños moderados, tomar ventaja a oportunidades generadas o superar las consecuencias del cambio climático (Fernández-Manjarrés y Benito-Garzón, 2015; Bahamondez *et al.*, 2009).

Los criterios que pueden ser utilizados, suelen ser biológicos, ecológicos, culturales y económicos, entre otros. La UICN utiliza diferentes categorías y criterios para la evaluación global de variados taxones, los que deben ser aplicados a un taxón basándose en la evidencia disponible respecto a su abundancia, tendencias y distribución. Las categorías presentes en la Lista Roja (RL, siglas en inglés) son las siguientes: Extinto (EX), Extinto en Estado Silvestre (EW), En Peligro Crítico (CR), En Peligro (EN), Vulnerable (VU), Casi Amenazado (NT), Preocupación Menor (LC), Datos Insuficientes (DD) y No Evaluado (NE). A su vez, los criterios (Figura 6) son utilizados para evaluar la pertenencia de una especie a una categoría de amenaza. Los criterios de la Lista Roja son: A) Reducción del tamaño poblacional; B) Distribución geográfica (representada como extensión de presencia y área de ocupación), C) Pequeño tamaño de población y deterioro; D) Población muy pequeña o restringida y E) Análisis Cuantitativo (UICN, 2012a; UICN, 2012b).

El objetivo principal de estas categorías y criterios es estimar de forma relativa la posibilidad de extinción de un taxón o especie (UICN, 2012b). Alternativamente, el Análisis de Viabilidad de Poblaciones (PVA, siglas en inglés), es un enfoque cuantitativo que permite analizar en particular una población con una elevada exactitud predictiva, donde la declinación poblacional se ajusta a los valores observados, sin sesgo significativo y con una proyección de los tamaños de población que no difieren significativamente de la realidad (Brook *et al.*, 2000).

Se deben establecer las prioridades generales, es decir, la identificación de los recursos genéticos a nivel de especie en función de su valor socioeconómico actual o potencial y su estado de conservación (Thomson *et al.*, 2001), además de otras prioridades de conservación, como la consideración de los aspectos financieros, culturales, logísticos, biológicos, éticos y sociales, además del riesgo de extinción, para así maximizar la efectividad de las acciones de conservación a realizar (Miller *et al.*, 2007).

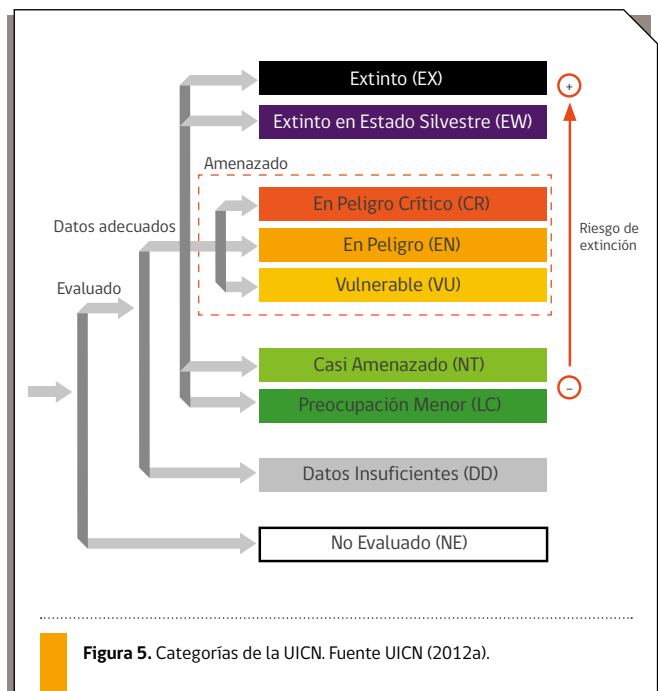
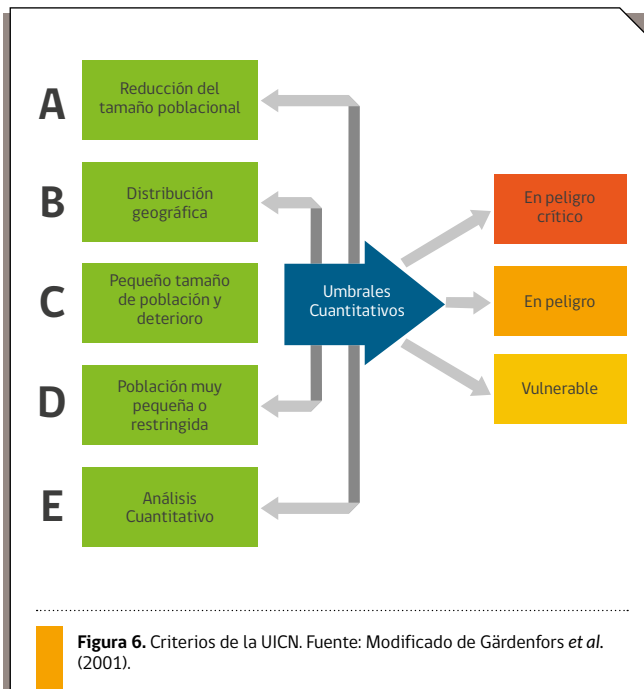


Figura 5. Categorías de la UICN. Fuente UICN (2012a).



St. Clair y Howe (2011) indican que las especies y poblaciones más vulnerables al cambio climático son especies escasas; especies longevas; especies adaptadas localmente; especies con plasticidad fenotípica limitada; especies o poblaciones con baja variabilidad genética como poblaciones pequeñas, especies influenciadas por deriva genética o endogamia; especies o poblaciones con bajo potencial de dispersión y colonización como poblaciones fragmentadas y/o disjuntas; poblaciones con una distribución en el borde de su frontera, poblaciones sin hábitat cercano al cual desplazarse y poblaciones amenazadas por pérdida de hábitat, incendios, enfermedades o insectos. Yanchuk (2007) menciona que la especie debe prestarse a una manipulación relativamente fácil para las recolecciones de germoplasma como estacas con raíces, enraizamiento, injertado, floración, realización de cruces controlados, recolección de semillas almacenamiento de semilla, desarrollo de brinzales, así como también para ensayos de campo y mejoramiento genético.

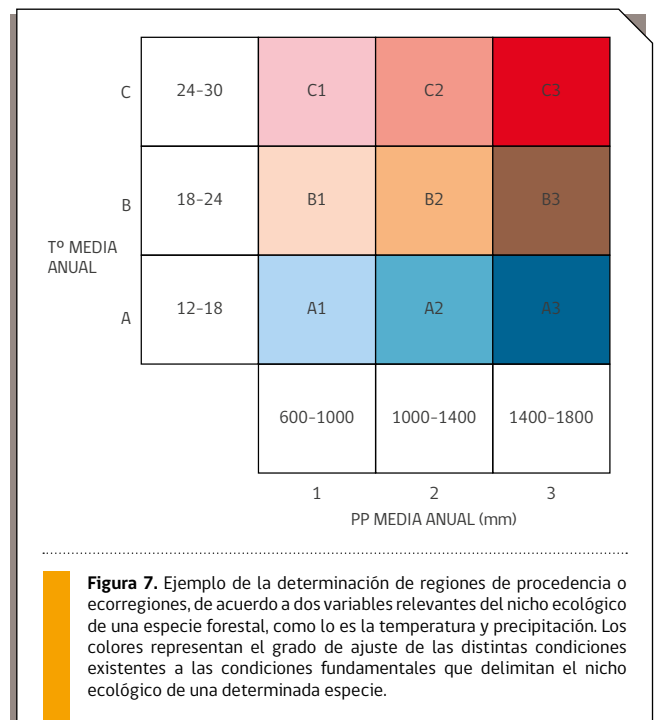
En Chile se deben priorizar poblaciones de especies vegetales, que presenten alta vulnerabilidad, debido al cambio climático y a los efectos que este conlleva, a los incendios forestales y a la propagación de plagas y especies invasoras, entre otras, además de los factores antrópicos.



I.2. Regiones de Procedencia

Se entiende por regiones de procedencia para una especie o subespecie forestal, como el área o grupo de áreas sujetas a condiciones ecológicas suficientemente uniformes, en la cual los bosques o rodales presentan caracteres fenotípicos o genéticos similares (OCDE, 2017). De acuerdo con esta definición, sería esperable encontrar rasgos adaptativos diferentes en cada región de procedencia o ecorregión. Por esta razón, contar con esta información provee de una potente herramienta para el muestreo de la mayor cantidad de variabilidad genética posible y consecuentemente, de un mayor pool de genes para ser probados en las diferentes ecorregiones.

Para establecer estas regiones de manera eficaz, se deben utilizar e interpretar los resultados arrojados por una técnica cada vez más utilizada, llamada modelamiento de nicho ecológico (Figura 7). Es necesaria una descripción de los conceptos de **nicho ecológico y modelamiento de nichos ecológicos**, para lograr un mejor entendimiento sobre estos.

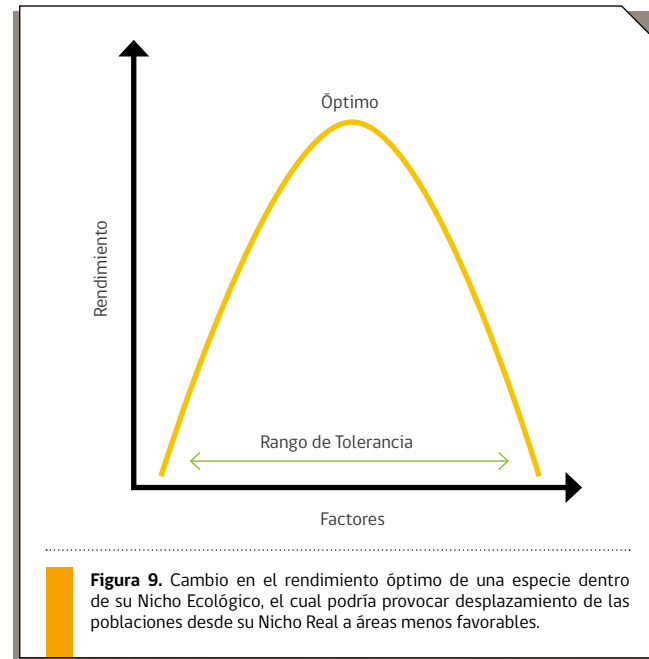
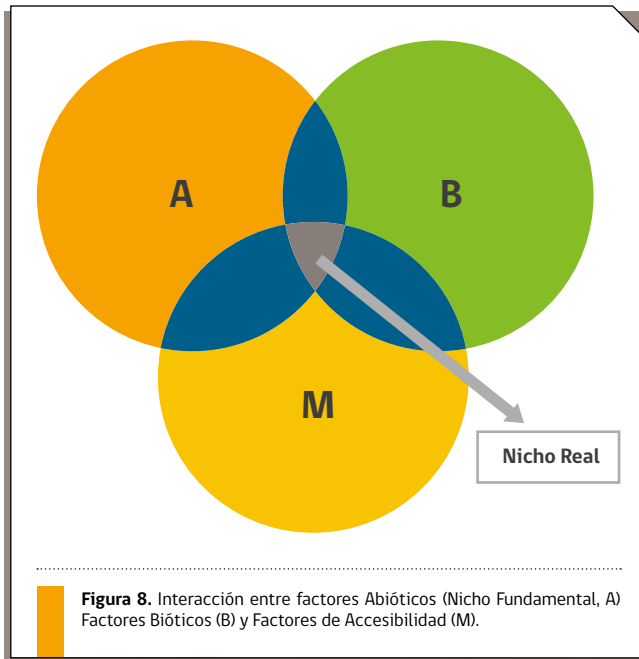


I.2.1. Nicho ecológico y efecto del cambio climático

Cada especie posee un sistema fisiológico, morfológico y un perfil de comportamiento propio, que la hace adecuada para establecerse en espacios o sitios que ofrece la naturaleza. De esta manera George Hutchinson (1957) definió nicho ecológico o fundamental como la suma de todos los factores ambientales, los cuales forman un híper volumen que actúa sobre un organismo, determinando así su distribución, donde puede sobrevivir, crecer, reproducirse y mantener una población viable en el tiempo dentro de ciertos rangos de estos factores. Este híper volumen puede ser de "n" dimensiones dependiendo de la existencia de más factores. En otros términos, el nicho ecológico es una posición en el espacio-tiempo que no se puede ver, por tratarse de un concepto abstracto, el que agrupa todas las condiciones ambientales o abióticas, en las cuales las especies pueden mantener su existencia y prevalecer en el tiempo. Las condiciones bajo las cuales las especies podrían vivir son a menudo más amplias que las condiciones en donde en realidad viven, a

causa de las interacciones bióticas, como la competencia. Por este motivo Hutchinson (1957) introduce el concepto de nicho real o efectivo (Figura 8) que se define como el lugar del nicho fundamental en la que las especies están restringidas por las interacciones interespecíficas.

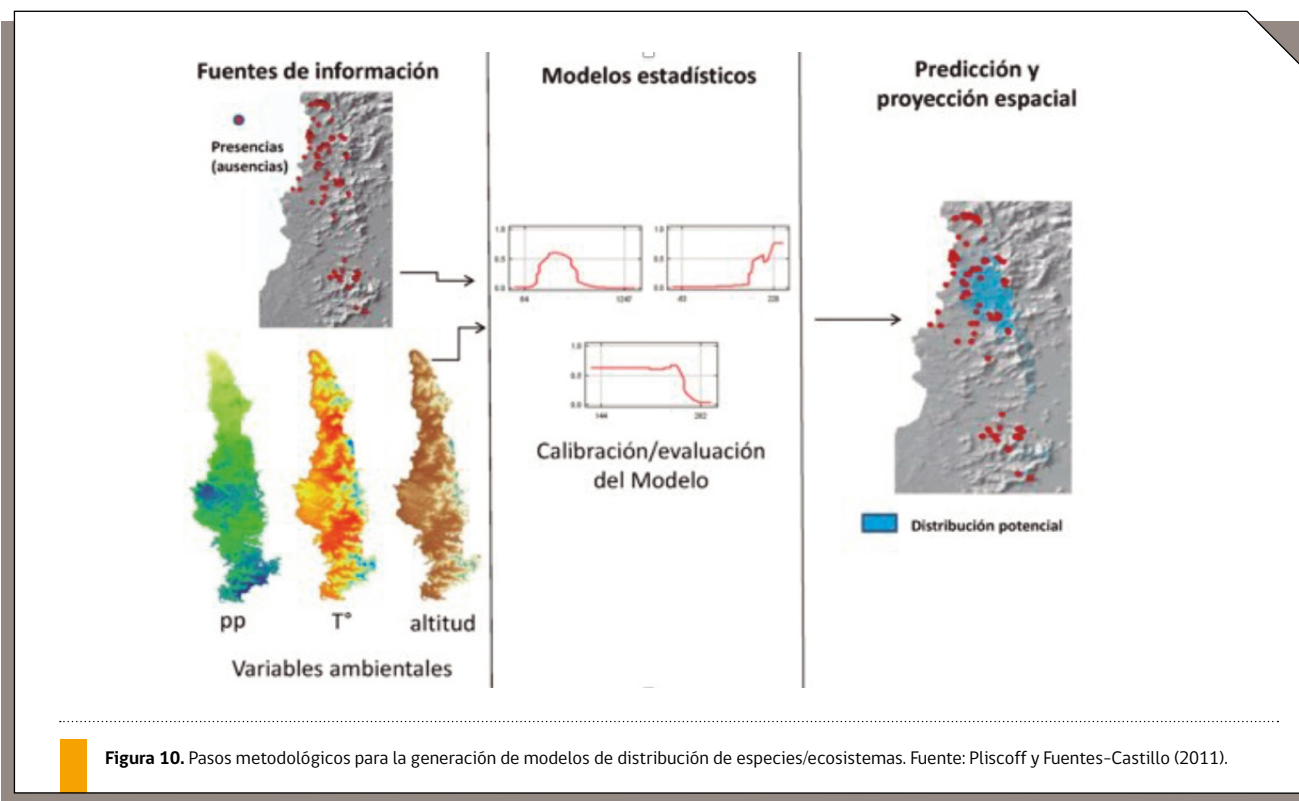
Algunas especies están limitadas en su distribución geográfica (nicho real) debido a que son excluidas, ya sea por parasitismo, plagas, enfermedades, por competencia con otras especies, o por limitaciones propias (limitaciones en la capacidad dispersiva, entre otras). Por ende, aunque existan áreas con las condiciones abióticas adecuadas como T° , pH, altitud, precipitación, suelo, pendiente, entre otras, para el establecimiento de las especies, estas no son utilizadas, debido al cambio del óptimo de rendimiento provocado por estas limitantes, y se desplazan a lugares menos favorables para su supervivencia (figura 9).



I.2.2. Modelamiento de Nicho Ecológico

El modelamiento de nichos ecológicos es una herramienta estadística que permite predecir la distribución de especies/poblaciones dependiendo de variables bioclimáticas y la generación de mapas ecoregionales de la especie. Para generar estos modelos matemáticos se emplean diversas variables bioclimáticas (Fick y Hijmans, 2017), las cuales representan las tendencias anuales, por ejemplo, temperatura anual media, precipitación anual, estacionalidad, por ejemplo, rango anual de temperatura y precipitación y factores ambientales extremos o limitantes, por ejemplo, temperatura del mes más frío y más cálido, precipitación o humedad relativa, estas variables se precisan en el Anexo 1. Además se utilizan datos geográficos de presencia o ausencia de especies/ecosistemas que se quiera modelar (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011) como se muestra en la figura 10. La técnica de modelación seleccionada establecerá una relación entre la posición geográfica de la información de

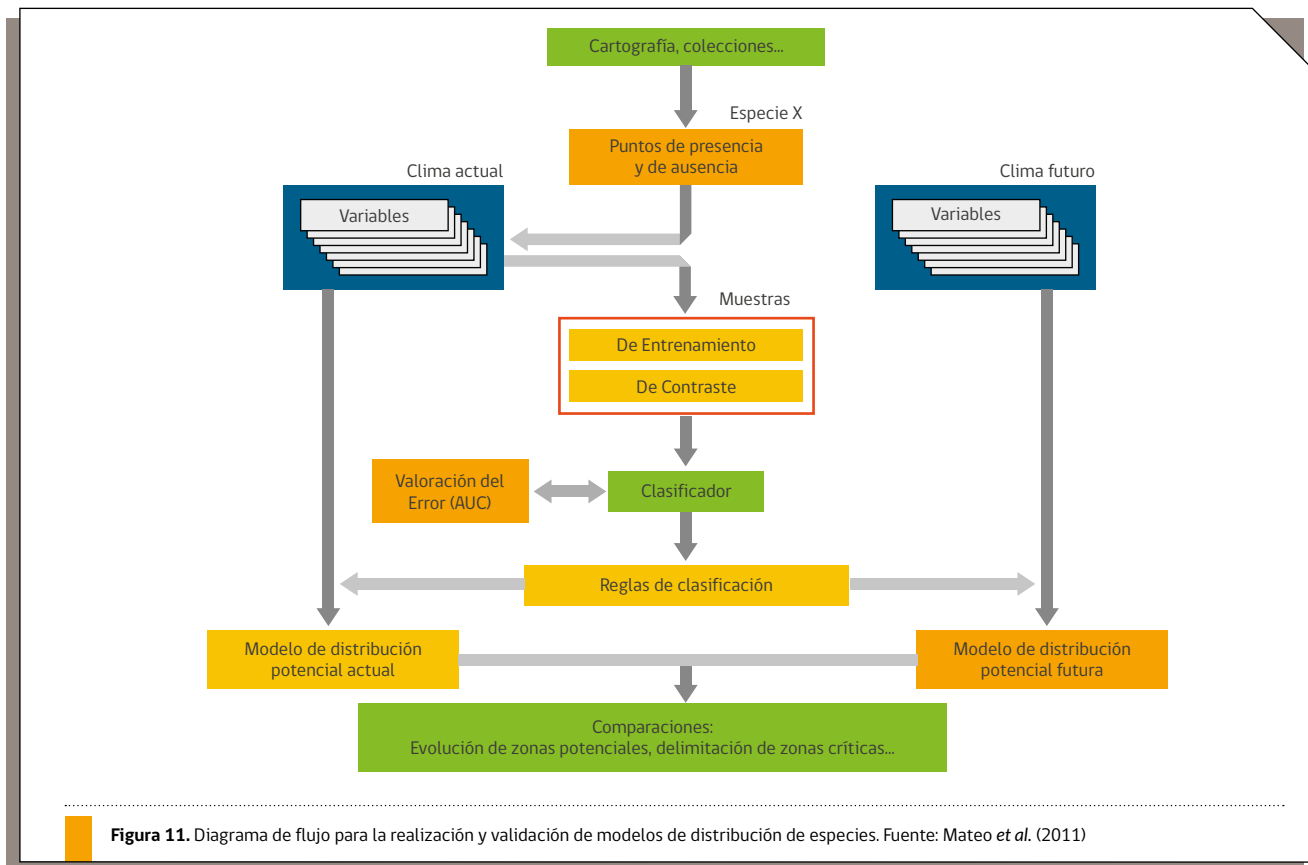
presencia o ausencia de la especie y el rango de valores del conjunto de variables climáticas donde se ubican estos puntos. Según Pliscoff y Fuentes-Castillo (2011) existen cuatro grandes familias de técnicas para la modelación de distribución geográfica de las especies/ecosistemas: modelos estadísticos de regresiones (Modelos Lineales Generalizados [GLM]), Modelos Aditivos Generalizados (GAM), métodos de clasificación (Random Forest [RF], Boosted regresiontrees [BRT]), los modelos predictivos de distribución espacialmente explícitos con datos de ausencia o pseudo-ausencia (Bloc LIM, ENFA) y aquellos basados en algoritmos específicos (GARP, MAXENT). Además agregan que se puede incluir un nuevo enfoque, basado en utilizar ensambles de técnicas para obtener modelos de consenso, buscando disminuir los sesgos y limitaciones propias del uso en forma individual de las técnicas estadísticas mencionadas.



Los modelos de distribución de especies basados en el nicho ecológico permiten producir mapas de alta resolución que muestran cómo las probabilidades de presencia de especies están propensas a modificarse con el cambio climático. En regiones topográfica y ambientalmente diversas, estos mapas contienen una riqueza de detalles que pueden pronosticar un futuro bastante diferente del presente (Wiens *et al.*, 2009). Para generar un modelo de distribución, es necesario proyectar en el espacio geográfico del modelo que ha sido calibrado y evaluado previamente (Figura 11). En este paso los valores continuos de probabilidad, o los valores binarios obtenidos de un umbral, son transferidos al espacio geográfico, por lo que se pueden representar en forma cartográfica. Esto implicará que el lugar desde donde se pueda coleccionar el germoplasma, dependiendo de la posición dentro del nicho donde se encuentre, pueda contener material de zonas cuyo micro-clima es más parecido hoy a cómo será en la zona a restaurar. (ENSCONET, 2009; Mateo *et al.*, 2011).

Es prácticamente imposible conocer la confiabilidad de un modelo de distribución, aunque sí se conocen los factores que influyen en la disminución del desempeño de los modelos y por ende, su confiabilidad. Estos factores están relacionados principalmente con la calidad de los datos de entrada, tanto en sus valores como en su distribución. Además, se debe tener en cuenta que estos tipos de modelos arrojan resultados diferentes entre sí, por lo que se requiere realizar una evaluación estadística de sus resultados, aunque también se han de evaluar en cuanto a la coherencia espacial y al conocimiento sobre la especie (Mateo *et al.*, 2011).

Según Elith como se cita en Liras *et al.*, (2008), existen alrededor de 12 a 15 modelos de nicho ecológico, cuya diferencia está en la forma en la que estiman el nicho potencial de las especies modeladas (Anexo 2). En general, no existe un método/software mejor o peor, ya que lo primordial es entender cómo opera, para determinar el más adecuado (Liras *et al.*, 2008).



I.2.3. Estimación del cambio en la distribución de especies por efecto del Cambio Climático Global

Utilizando la información anteriormente mencionada, se puede realizar el modelamiento de nicho ecológico con proyección en el espacio-tiempo, modificando el valor de las variables para proyectarlas al futuro y predecir el efecto que tendrá en la distribución de una especie/población, producto del cambio climático (Figura 12). Este enfoque general puede ser usado para despejar incógnitas existentes entre ecología y evolución (Eliosa *et al.*, 2010).

Los modelos de distribución también se pueden proyectar hacia el pasado, utilizando variables descriptoras que correspondan a los tiempos que se desean analizar. Este proceso de transferencia temporal requiere de enfoques diferentes de calibración y evaluación. En la actualidad el enfoque más común involucra la proyección actual de la entidad natural analizada y su posterior proyección bajo un escenario de cambio climático. Existen

Modelos Generales de Circulación (CGM, siglas en inglés) para proyectar escenarios futuros y pasados del clima, los que sirven como fuentes para crear conjuntos de variables descriptoras para diferentes umbrales de tiempo (Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

Posibles inconvenientes pueden existir al utilizar estos modelos para proyectar climas futuros, ya que se asume que el cambio de las variables climáticas es lineal, además de la no inclusión del cambio del uso de suelo o la fragmentación y pérdida de hábitat. La naturaleza es compleja y heterogénea, por lo cual no es razonable esperar que los modelos reflejen con precisión los mecanismos inherentes a un proceso espacio-temporal tan complejo como es la distribución de las especies (Mateo *et al.*, 2011).

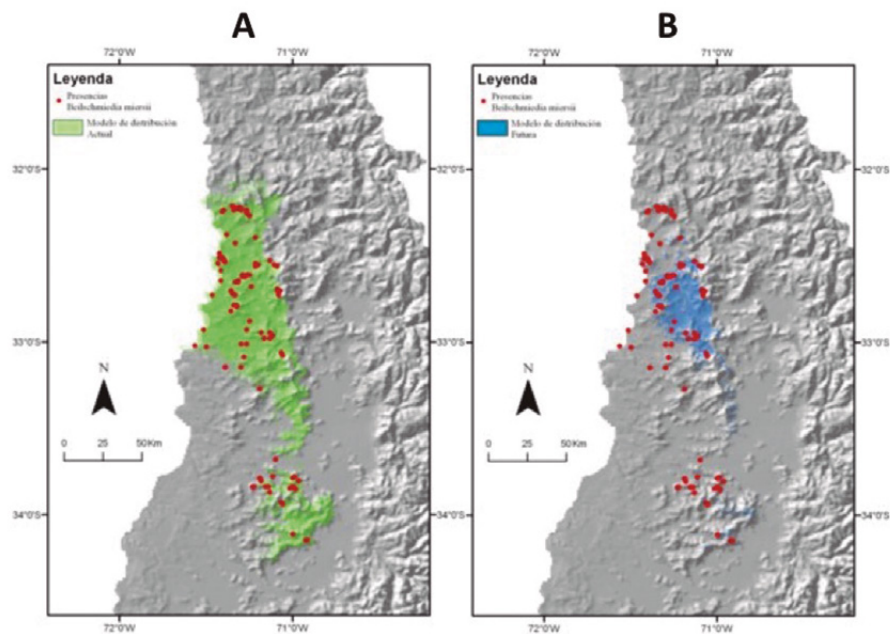


Figura 12. Ejemplo de Modelos de distribución potencial actual (A) y modelos de distribución proyectado bajo escenario de cambio climático para el año 2080 (B), para el belloto del norte (*Beilschmiedia miersii*). Fuente Pliscoff y Fuentes-Castillo (2011).



El desarrollo de modelos dinámicos que dan cuenta de los movimientos de las especies o del cambio climático, está dando un nuevo valor al rol de los modelos de distribución dentro de los procesos de planificación de conservación (Loiselle *et al.*, 2003; Wilson *et al.*, 2005; Elith y Leathwick, 2009, citados por Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011).

Para la determinación de variabilidad genética se requiere generalmente de un análisis de laboratorio, con marcadores moleculares o definitivamente una secuenciación de genes. Opcionalmente el conocimiento del nicho ecológico simplifica la interpretación, su aplicación es de menor complejidad, ya que simplifica la interpretación a través de modelos y técnicas geoestadísticas que sintetizan las relaciones entre especies y variables ambientales. Además, los medios necesarios para realizarlo son de bajo costo, debido a que la información se encuentra disponible en la web (Mateo *et al.*, 2011). Los antecedentes mencionados como el conocimiento del nicho ecológico de la especie/población a restaurar; las relaciones interespecíficas de especies o poblaciones, la ubicación de la

especie/población dentro de su nicho y el uso de modelos de proyecciones climáticas, son elementos primordiales para la realización de labores de restauración ecológica a gran escala y de la integración de los servicios ecosistémicos en la economía productiva.

1.3. Determinación e identificación de fuentes de germoplasma

Las fuentes semilleras son áreas o rodales dentro de regiones de procedencia determinadas, donde se colecta germoplasma, ya sea semillas o material vegetativo. La identificación de fuentes semilleras se delimitan por áreas geográficas según elevación, drenaje y clima, entre otros (Wheeler y Neale, 2013), donde la especie/población previamente priorizada tenga una distribución estable. La utilización de modelos de proyección, tanto para el clima como para la especie/población objetivo, suelen ser



efectivos al momento de establecer fuentes semilleras. Gray y Hamann (2011) utilizaron modelos, con los cuales establecieron que al momento de determinar fuentes semilleras para una estrategia de reforestación, la búsqueda debería enfocarse en “posibles fuentes semilleras” presentes en el clima de referencia (clima correspondiente a periodo anterior al actual) en el clima actual y en su proyección a futuro, con el fin de que el germoplasma a recolectar posea un alto grado de adaptación y así minimizar la probabilidad de que falle la plantación ante inciertos climas (Wheeler y Neale, 2013). La identificación de posibles fuente éstas se debe hacer de forma presencial, luego de obtener resultados de diversos modelos de proyección.

Los ensayos de procedencia proporcionan un medio más empírico para identificar las fuentes semilleras que puedan actuar de manera óptima y que posean germoplasma mejor adaptado a diversos entornos (Wheeler y Neale, 2013). Sin embargo, debido a los tiempos de espera prolongados, esta forma de evaluar adaptabilidad tiene fuertes limitaciones de implementación práctica para aportar resultados en el horizonte de planificación como la Agenda 2030 para el desarrollo sustentable o la Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales (ENCCRV) 2017-2025.

I.3.1. Tamaño efectivo de población y diseño de la Colecta

Las especies/poblaciones forestales oscilan en niveles de variación genética, sobre todo en poblaciones fragmentadas y de tamaño efectivo reducido. A su vez, por poseer un tamaño poblacional limitado, se ven afectadas por la deriva genética, ya que transitan hacia la fijación o pérdida de un alelo mediante la endogamia. La deriva genética reduce la frecuencia de heterocigotos en la población, es decir el porcentaje de locus en cromosomas homólogos con dos versiones diferentes para un mismo gen y por consiguiente, disminuye su variabilidad genética. Esto generaría que las generaciones futuras presenten menos copias de los alelos originales provocando que los individuos sean cada vez más homogotos, aumentando la probabilidad de que sus alelos sean idénticos por descendencia (Moreno, 2007). Por lo tanto, se deben establecer estrategias para la realización del muestreo y definir el uso de modelos teóricos predictivos o el uso de técnicas moleculares. Se reconocen dos enfoques para la estimación del



tamaño de muestras, el uso de fórmulas o modelos estadísticos y los valores estándares usados por consenso en programas de restauración (Gutiérrez, 2015).

Wright (1930) determinó que la deriva genética es el factor más agravante para la degeneración de la heterocigosis⁴ o variabilidad de un gen en un mismo locus. Además, demostró que la heterocigosis⁵ promediada para el conjunto de subpoblaciones, se ajusta a la relación:

$$H_t = \left[1 - \left(\frac{1}{2N}\right)\right]H_{t-1}$$

Donde H_t y H_{t-1} es la heterocigosis de la población en las generaciones t y $t-1$, respectivamente. N es el número de individuos que participan con sus genes en la reproducción.



⁴ Individuo que para un gen (locus) dado tiene en cada cromosoma homólogo un alelo distinto.

⁵ Medida de la variación genética de una población, respecto a un locus en particular. Frecuencia de heterocigotos para ese locus en una población.

A su vez, la expresión $\left[1 - \left(\frac{1}{2N}\right)\right]100$, utilizada por Yanchuk y Hald (2007) estima una proporción aproximada de heterocigidad o variación genética aditiva captada en una muestra de tamaño efectivo N_e , donde N_e es el número de árboles muestreados no emparentados. Según esta expresión, el uso de 50 árboles no emparentados de una población representará el 99% de la variación genética aditiva de esta. Además menciona que este tipo de variación genética adaptativa (aditiva) es la variación más importante para el mejoramiento genético de características adaptativas de crecimiento y evolutivas. Los tamaños muestrales que se utilizan comúnmente en muestreos genéticos para conservación forestal varían entre 50 y 5.000 árboles, cantidad que dependerá, como se mencionó, de la biología reproductiva, la estructura genética actual de la especie y otros diversos factores relacionados con los objetivos de la conservación (Gutiérrez, 2015). Ipinza (2017) indica que se necesita un mínimo de 15 árboles madres no emparentadas, mientras que de Viana *et al.* (2011) propone un mínimo de 10 árboles y que estén a 30 m separados entre sí. Se estima que el número mínimo de individuos elegidos al azar debería ser 30 en especies alógamas y 59 en especies autógamas. No obstante, debido a que podemos desconocer el sistema de cruzamiento de la especie a coleccionar, se recomienda el muestreo de 50 individuos no emparentados por población, como cifra de referencia general (ENSCONET, 2009).



Debido a que el valor de $[1 - (\frac{1}{2N})]$ fluctúa entre 0,5 y 1, la frecuencia esperada de heterocigotos en cualquier generación, será siempre menor que la frecuencia de heterocigotos encontrada en la generación previa. Cuanto menor sea el tamaño poblacional, más rápido será el descenso en la frecuencia de heterocigotos y mayor es la probabilidad de que su frecuencia génica presente diferencias mayores en relación con la frecuencia observada en la población original (Morais, 1997).

Es altamente deseable una elevada frecuencia de heterocigotos en un lote de semillas para mejoramiento de la adaptabilidad, ya que podemos esperar que se encuentren presentes todas las "versiones" de un gen, así como también combinaciones de alelos que proveen una mayor probabilidad de adaptación al nicho ecológico.

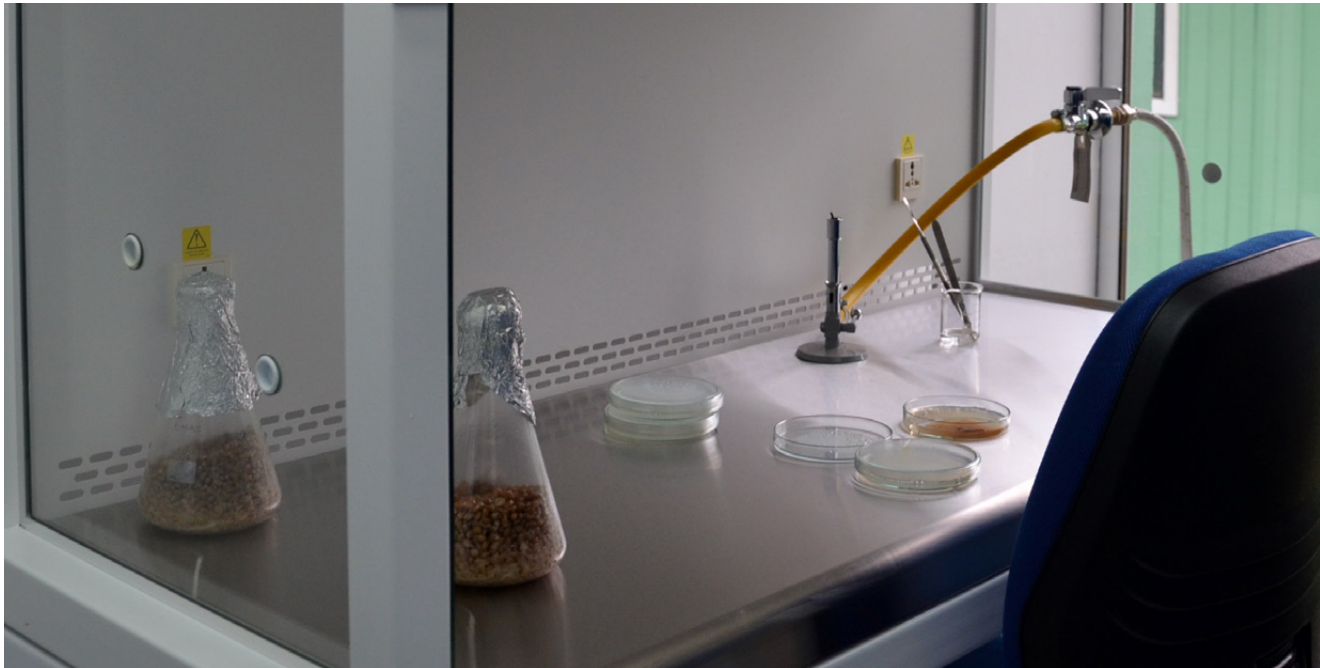
1.4. Colecta de germoplasma

Una vez seleccionada la especie o población priorizada mediante la información ya entregada, se debe profundizar en la biología de dichas especies/poblaciones, con el fin de obtener antecedentes con respecto a su ciclo de reproducción, vectores de dispersión de polen y de semillas, además de su fenología floral e interacciones. La selección de árboles madre se debe hacer a una distancia de 30 a 50 m para minimizar el parentesco entre las madres semilleras, lo que dependerá de la biología reproductiva de las especies, del modelo de dispersión de la semilla (época de dispersión, peso, alas o sin alas) y el flujo de genes (Ipinza y Gutiérrez, 2014).

Lowe (2010) propone que para maximizar la variabilidad genética de poblaciones, se debe mezclar muestras de sitios distintos dentro de una procedencia, por lo cual se debe coleccionar el 60% de las muestras necesarias en poblaciones locales, el 30% en poblaciones intermedias y el 10% en las más lejanas. Los métodos de recolección de semillas se esquematizan en el Anexo 4.

Cuando el material tiene como destino la producción de plantas para restauración de hábitats y el establecimiento de plantaciones con fines de conservación, se debe procurar cosechar una cantidad equilibrada de semillas por pie, muestreando el mayor número de pies posible y dejando cierta distancia entre individuos recolectados (Bacchetta, 2008).

Sería recomendable no tan solo recolectar semillas, si no también material vegetativo de dichas madres, ya sean púas, estacas y/o yemas, con el fin de conservar el material génico de estas.



Algunas especies presentan problemas al conservar sus semillas, ya sea porque no se pueden almacenar (recalcitrantes), por una baja producción de semillas en la población a recolectar o por mala germinación de estas. Además, según Gutiérrez (2015), con el uso de material vegetativo se pueden establecer bancos clonales *in vitro*, en terreno o incluso utilizar este material para crio-preservación. Bacchetta (2008) indica que a veces esta última es la única manera para la conservación de un genotipo, de un taxón o de una población.

La otra posibilidad es la colecta de polen, que corresponde a una forma indirecta ya que, se colectan las flores o porciones de ramas que contengan yemas florales, las que pueden ser inducidas para provocar florecimiento en laboratorio y así, obtener el polen de su interior (Gutiérrez, 2015). Esta herramienta sería útil en caso de no existir sincronía reproductiva de la población establecida, ya sea en huertos semilleros, bancos o rodales. Se debe tener en cuenta que muchas especies producen polen en una baja cantidad.

Es de gran importancia resguardar germoplasma en bancos de conservación, ya sea material vegetativo, semillas o polen antes de propagar (bancos de semillas, *in vitro*, polen, crio-conservación) según corresponda.

1.5. Ensayos de adaptabilidad y Guías de transferencia

Debido a la urgencia actual frente al cambio climático se deben tomar medidas a corto plazo para conservar especies/poblaciones en riesgo alto. Para ello se deben tener establecidas las fuentes semilleras (véase en sección 1.3.4) y **las Guías de transferencia de semillas**⁶, que corresponden a un conjunto de información que delimitan el rango geográfico determinado dentro del cual una fuente de semilla puede ser utilizada, por ejemplo en reforzamiento de poblaciones o migración asistida (Ying y Yanchuk, 2006). Según Hamann *et al.*, (2011) las fuentes semilleras y Guías de transferencia son esenciales en la reforestación y el mejoramiento de la adaptabilidad, asegurando que las plántulas respondan de buena forma a las condiciones del sitio de plantación.

⁶ Las directrices de transferencia y determinación de fuentes semilleras utilizan modelos matemáticos, los cuales se detallan en la metodología de los estudios realizados por Ying y Yanchuk (2006) y Hamann *et al.* (2011).



Además, los autores agregan que existen dos enfoques para el desarrollo de fuentes de semilleras y guías de transferencia de semillas: el primero, tiene como objetivo maximizar el crecimiento de los árboles mediante la comparación de las respuestas de diferentes genotipos en diversas áreas de prueba. El segundo enfoque se basa en minimizar el riesgo por el supuesto de que las fuentes locales se adaptan de manera óptima a los entornos en los que se producen, para ello es necesario unir diversas fuentes semilleras de ubicaciones geográficas diferentes. En poblaciones muy aisladas, y por el efecto del cambio climático, el último enfoque no sería válido, debido a lo anteriormente mencionado sobre la adaptación del material genético local. La utilización de Guías de transferencia de semillas, permite determinar las áreas donde se realizarán los ensayos de progenie, ayudando así a que los árboles estén en forma, esto quiere decir, que tengan una elevada capacidad para hacer frente a los cambios en el entorno, capacidad de competir y la capacidad de reproducción, garantizando su supervivencia y, por lo tanto, la perpetuidad de las poblaciones de árboles silvestres (Ying y Yanchuk, 2006).

Gray *et al.* (2016) utilizaron diferentes zonas de procedencias para probar el comportamiento (Figura 13A) y rendimiento de diversas poblaciones y procedencias de *Picea glauca* en reforestación (Figura 13B). Los resultados del estudio sugieren que las procedencias locales de *Picea glauca* pueden trasladarse con éxito al noroeste, hacia climas más fríos dentro del grupo de regiones centrales de reproducción, pero las transferencias hacia ambientes más cálidos dieron como resultado un bajo rendimiento. Estos resultados de rendimiento se basaron en el uso de un modelo matemático mixto:

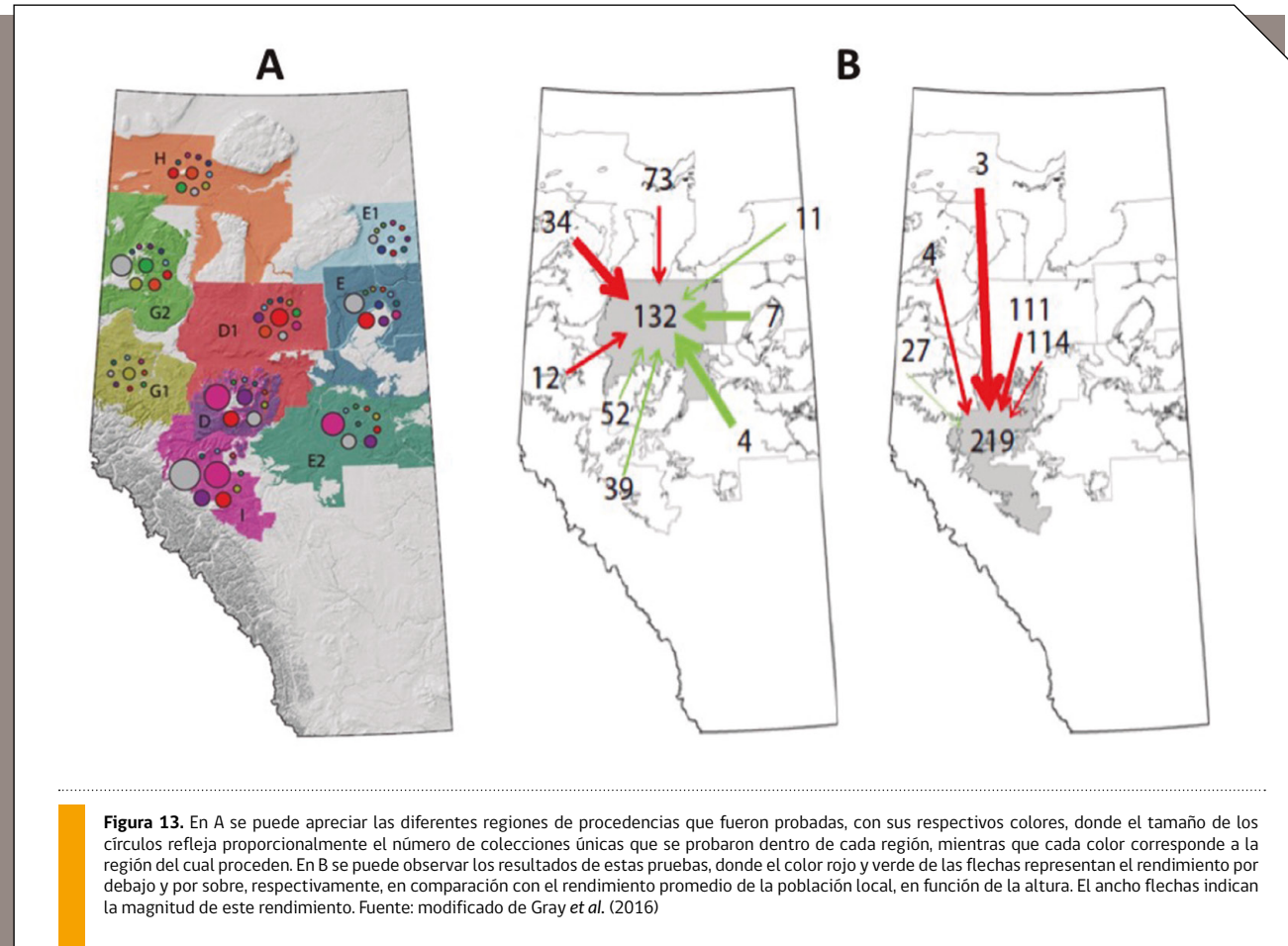
$$Y_{ijkl} = \mu + G(RO)_{jl} + RO_j + S(RT)_{lk1} + RT_l + (RO \times RT)_{jl} + E_{ijkl}$$


Donde Y_{ijkl} es la medida de la altura u otro rasgo que se asocia a adaptación de los genotipos (G), que se originan dentro de la j -ésima región de origen (RO) y se prueban en el k -ésimo sitio (S) dentro de la l -ésima región de prueba (RT). El genotipo (G) representa una procedencia o una familia de semifratrías o medio-hermanos. ($RO \times RT$) representa la interacción entre la región de origen y la región de prueba, μ es la media experimental global

y **e** el error experimental (residual). Este modelo sería muy útil para la determinación de qué germoplasma utilizar en una determinada región de procedencia y de qué fuente semillera extraerlo.

Es importante obtener esta información antes de realizar estos ensayos de procedencia, ya que trasladar la semilla más allá del límite presente en su nicho ecológico, puede resultar ineficiente,

debido a una mala adaptación de los árboles, provocando lesión por frío, sequía y susceptibilidad a enfermedades e insectos que causan un crecimiento deficiente o incluso mortalidad. Los resultados de pruebas de procedencia y progenie han demostrado ampliamente que las fuentes de semillas en diferentes ubicaciones geográficas de la distribución de la especie, tienen diferentes potenciales de crecimiento y rangos de ambientes en los sitios donde pueden crecer bien (Ying y Yanchuk, 2006).





**Acciones para mejorar
adaptabilidad de los
recursos vegetacionales**

2



Acciones para mejorar adaptabilidad de los recursos vegetacionales

II.1. Migración asistida

Debido al cambio climático las especies arbóreas ven sobrepasadas sus capacidades de adaptabilidad, ya que poseen largos ciclos de vida y limitada capacidad de dispersión, como ya se ha mencionado. A partir de esto, surge el concepto de migración asistida, que consiste en el traslado de germoplasma semillas o material vegetativo, mediante acción humana, tanto dentro de su distribución geográfica, como en el borde e incluso fuera de su distribución actual. El movimiento dentro de su distribución geográfica, como en el margen de esta se denomina Reforzamiento de Poblaciones y el traslado fuera de su distribución histórica se denomina Colonización Asistida (Alfaro *et al.*, 2014; Fernández-Manjarrés y Benito-Garzón, 2015). Dicho de otra manera y dentro del contexto de cambio climático, la migración asistida es el movimiento o traslado de germoplasma a áreas con características similares a las actuales o con características esperadas debido a los efectos del cambio climático.

Gray et al. (2011) indican que el movimiento de germoplasma ya es una práctica de manejo bien establecida en programas de reforestación, aunque actualmente se asegura que el stock de reforestación se adapte bien a los ambientes de siembra limitando las transferencias del germoplasma. Además sugieren que existe bastante información sobre cómo las poblaciones de especies arbóreas comercialmente importantes se adaptan a los ambientes locales, por lo cual proponen utilizar dicha información para monitorear el crecimiento y la salud del bosque a fin de determinar la necesidad de una migración asistida. Los modelos predictivos de nichos ecológicos proveen información para guiar de manera íntegra la migración asistida y facilitan este traslado de germoplasma en especies nativas de las cuales no se tiene información.

Últimamente se está debatiendo sobre el uso de esta práctica, debido a diversos factores (tabla 1), como la migración asistida para especies no amenazadas.

El movimiento de especies/poblaciones a nuevas áreas podría generar posibles perturbaciones en la flora y fauna local. El caso de una fallida migración asistida para plantaciones forestales comerciales, ocurrió en el invierno de 1984-1985 con *Pinus*

pinaster Aiton en Francia, donde 30.000 ha fueron destruidas por el uso de germoplasma no resistente a heladas (Alfaro *et al.*, 2014, citado por Timbal *et al.*, 2005). Antes de realizar migración asistida, es necesario considerar cuidadosamente todos los factores ambientales que estén relacionados con el cambio climático, y que deben aplicarse pruebas de campo y guías de transferencia.

Tabla 1. Resumen de argumentos a favor y en contra del uso de migración asistida.

| Argumentos a favor | Argumentos en contra |
|---|--|
| Alternativa para compensar la fragmentación del paisaje | Riesgos e impactos irreparables de invasión |
| Remediación de funciones ecosistémicas | Impactos sobre ecosistemas y sus funciones |
| Método para prevenir la extinción local | Insuficiente información científica |
| Opciones de manejo innovadora | Desvío de recursos de alta prioridad |
| Necesario u obligatorio para especies con poca dispersión y sensibles al cambio climático | Contaminación genética de poblaciones locales (hibridación intra e inter específica) |
| Opción plausible con un manejo de riesgos adecuado | Sesgo hacia especies consideradas importantes (prioridades erróneas) |
| Mejoramiento de prácticas de traslado de especies amenazadas | Impactos sociales y culturales por la modificación del paisaje |
| Beneficios sociales y culturales | Continuación de prácticas poco efectivas |

Fuente: Fernández-Manjarrés y Benito-Garzón, 2015

II.2. Reforzamiento de Poblaciones y Colonización Asistida

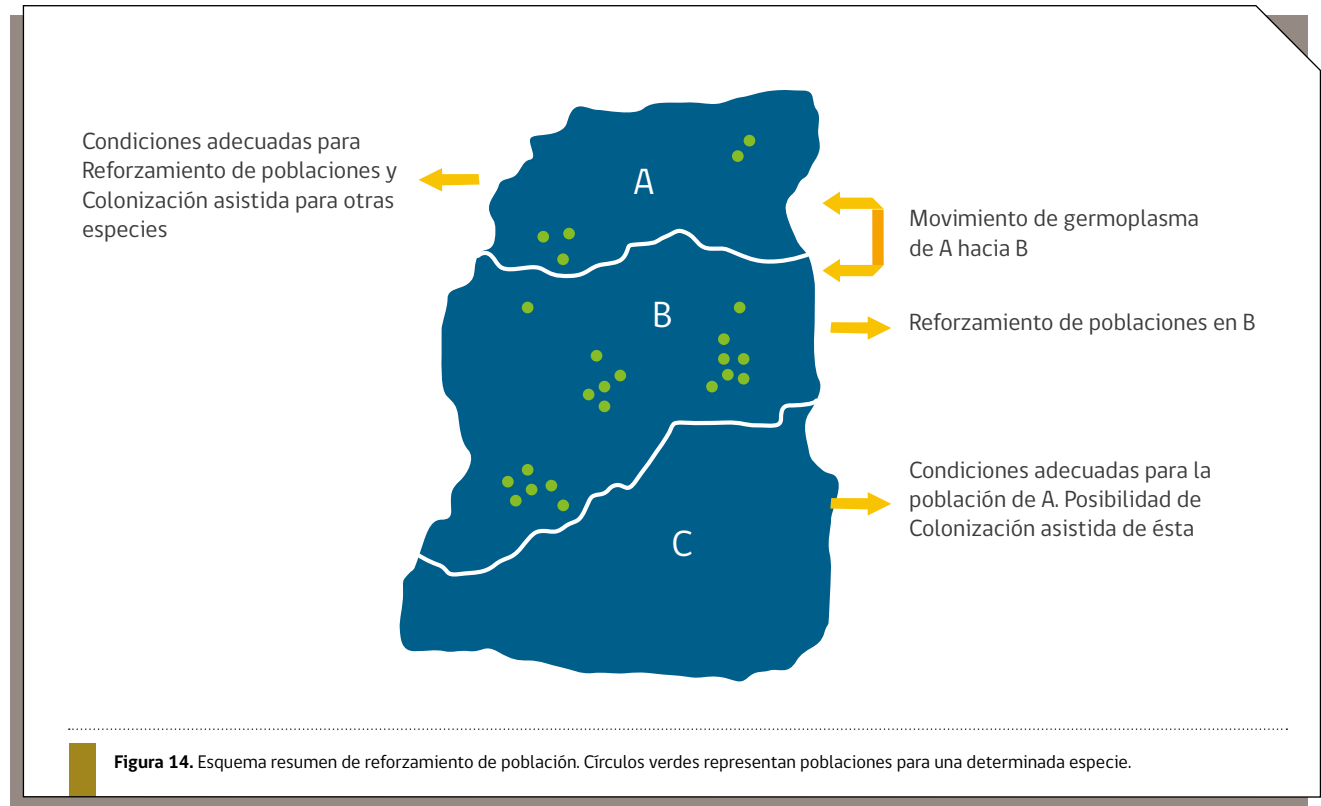
El reforzamiento de poblaciones, como se mencionó, es el movimiento de germoplasma dentro de su distribución geográfica y tiene como objetivo mejorar la variabilidad genética e incorporar genotipos mejor adaptados a la población objetivo. Por su parte, la colonización asistida corresponde al movimiento de germoplasma fuera de su distribución histórica. En teoría, ambos conceptos corresponden a tipos de migración asistida.

Gray *et al.* (2011) realizaron un experimento de movimiento recíproco de germoplasma y sugieren a través de sus resultados que se podrían lograr mayores ganancias en la adaptabilidad

al hacer coincidir los genotipos con las nuevas condiciones ambientales a través de la migración asistida, la que podría exceder las ganancias proyectadas de los actuales programas de mejoramiento genético de las especies forestales. Un ejemplo de reforzamiento de poblaciones (Figura 14) sería el movimiento de germoplasma de poblaciones de una especie, desde áreas en las cuales estén sometidas al efecto del cambio climático. El Área "A" representa las condiciones que a futuro no permitirán la sobrevivencia de la especie. El área "B" representa el lugar donde las condiciones, aunque menos favorables, aún permitirán la presencia de la especie. Finalmente el Área "C" representa los

sitios donde la especie no existe naturalmente, pero que en el futuro, y debido al cambio climático, proveerá de las condiciones para su permanencia. Estas áreas son determinadas mediante el modelamiento de nicho ecológico.

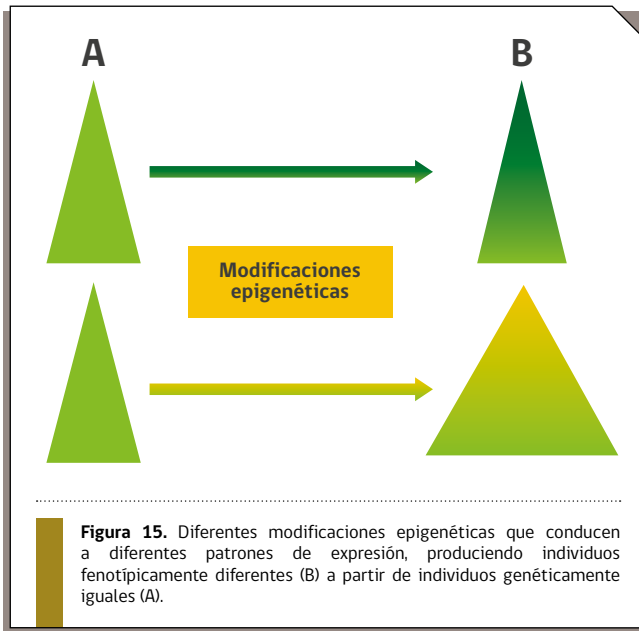
Para cada una de estas situaciones, las Guías de transferencia de material deben dar la respuesta de qué material introducir en las poblaciones más vulnerables, ya sea mediante colonización asistida o a través del refuerzo de poblaciones.



II.3. Efectos de la epigenética sobre la adaptación al cambio climático

El concepto de epigenética fue acuñado por Waddington (1942) y se refiere al estudio del genotipo, la interacción entre los genes y sus productos en función del fenotipo que produce. Estas interacciones provocan cambios reversibles en el ADN que no afectan las secuencias nucleotídicas de los genes, pero

sí producen cambios en su expresión, siendo estos cambios heredables. Dicho de otra manera, la epigenética explica los fenómenos en los que células de organismos genéticamente idénticos expresan sus genomas de forma diferente, generando diferencias fenotípicas (Figura 15).



Los árboles son organismos sensibles que responden de manera rápida y reversible a diferentes estreses abióticos durante sus ciclos de vida, ajustando su crecimiento y desarrollo a las condiciones ambientales predominantes con el objetivo de aumentar su supervivencia y su aptitud. El control de las etapas clave del desarrollo de la planta como lo es la latencia, el desarrollo de los órganos, la floración y la maduración están reguladas epigenéticamente. El control epigenético y sus mecanismos subyacentes⁷ tienen un rol crucial como puente entre el medio ambiente y el genoma. Los estreses ambientales también pueden inducir marcas epigenéticas⁸ que pueden ser heredadas por generaciones posteriores de forma materna, a esto se le llama memoria epigenética. Esta memoria junto con la variación epigenética natural, son responsables de la variación de algunos fenotipos y la capacidad de adaptación a nuevos nichos ambientales, lo cual implica una forma muy prometedora de obtener progenies adaptadas a diferentes condiciones ambientales. Es probable que la variación epigenética y su



⁷ Regulación de transcripción (factores de especificidad, represores, factores de transcripción, activadores y potenciadores) regulación post transcripcional (modificación y escisión de intrones, transporte al citoplasma, vida media, ARN de interferencia) y modificación del ADN (Metilación, compactación de cromatina, alteraciones en nucleosomas) (Yakovlev et al., 2012).

⁸ Metilación del ADN genómico, modificaciones de las histonas (Yakovlev et al., 2012).



regulación contribuya a la plasticidad fenotípica y a la capacidad de adaptación de las especies vegetales, para así generar distintos fenotipos ante las diferentes condiciones ambientales (Yakovlev *et al.*, 2012; Pascual *et al.*, 2014; Gömöry *et al.*, 2017).

La epigenética y la regulación sobre los aspectos fisiológicos de las especies vegetales forestales, abren un amplio camino para la generación de adaptaciones en las especies vegetales. Estudios realizados por Yakovlev *et al.*; Kvaalen y Johnsen; Rohde y Junttila (2012, 2008 y 2008, respectivamente, citados por Pascual *et al.*, 2014) demuestran que en el momento de la embriogénesis, los embriones producidos en condiciones de mayor temperatura y déficit hídrico son capaces de resistir mejor el estrés térmico y la sequía cuando son llevadas a campo. Gömöry *et al.* (2017) menciona que incluso cuando los árboles adultos se dañan por efecto del estrés abiótico, la generación de descendientes de estos árboles ya pueden hacer frente al nuevo clima. La silvicultura cercana a la naturaleza, dejando el espacio más amplio para los

procesos naturales, puede ser una estrategia complementaria viable para la migración asistida, en la mitigación de los efectos del cambio climático.

Considerando lo anterior, es posible inducir estas adaptaciones bajo ambientes controlados, de forma de adelantarse a las condiciones climáticas futuras. Mediante embriogénesis somática en laboratorio, se puede someter a los embriones en formación a diferentes condiciones controladas, ya sea por estrés hídrico, estrés por temperatura o en otras condiciones (alta salinidad, por ejemplo). Para ello, se deberá implementar un laboratorio de cultivo de tejidos equipado para dichas tareas. Otra alternativa es la utilización de invernaderos con ambiente controlado, donde se pueden realizar cruzamientos controlados en plantas pequeñas pero con floración suficiente, donde la embriogénesis ocurre naturalmente en la flor femenina, lo que ofrece a los mejoradores la posibilidad de generar plántulas con propiedades de adaptación bien definidas (Yakovlev *et al.* 2012).

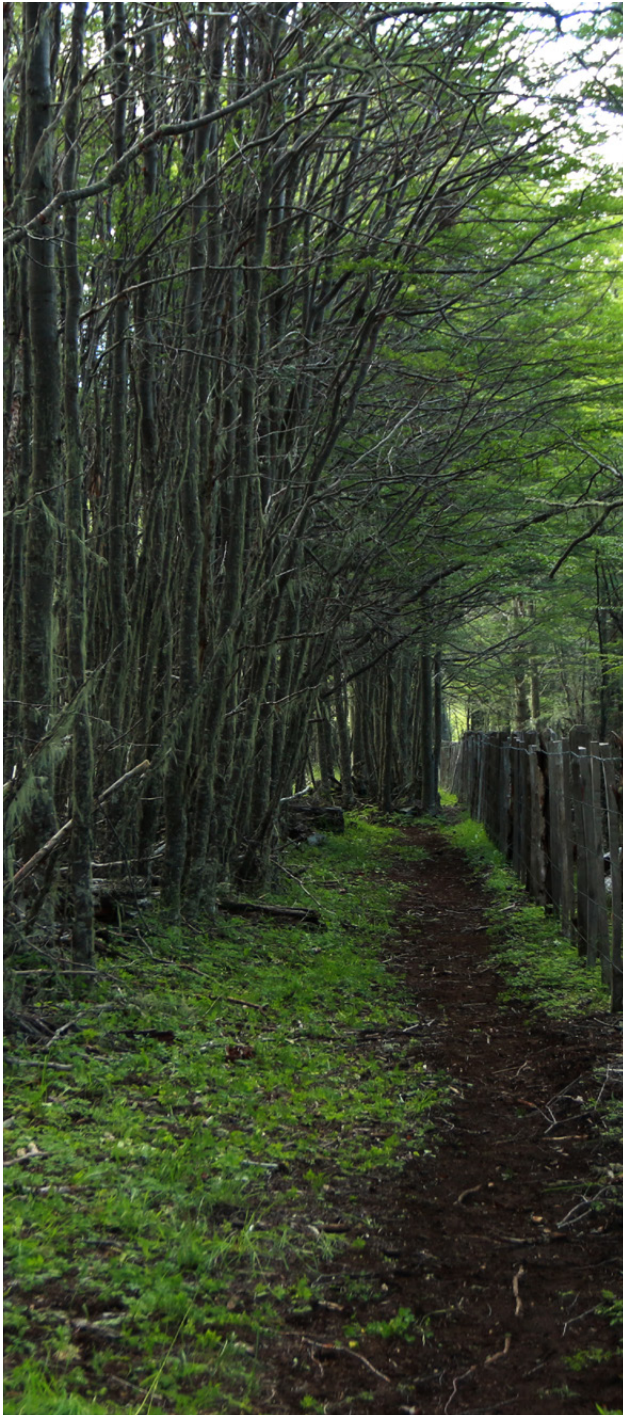
Finalmente, es posible mejorar la adaptabilidad de una población, al favorecer el establecimiento de la regeneración natural, ya que la semilla producida por estas poblaciones debería poseer una lectura más actual del ambiente y por ende una mejor adaptación. Lo anterior indica que una acción inmediata sería el fomento a esta práctica de manejo como actividad bonificable de la Ley N°20.283, en cualquiera de sus 3 literales. Sin embargo, para desarrollar estas acciones sería relevante acompañarlo de estudios que permitan determinar si la respuesta genética, o la cantidad de varianza genética adaptativa, es suficiente. Dichos estudios también pueden enmarcarse en el Fondo de Investigación del Bosque Nativo de dicha Ley. En resumen, la Ley N°20.283 es un instrumento de regulación y fomento que será utilizado desde ya como apoyo a este Programa de Adaptación.

II.4. Manejo y mantención de bosque nativo

Desde la entrada en vigencia del DL N°701 y especialmente después de aprobada la Ley N°20.283, el manejo del bosque nativo, no tan sólo para cosecha y regeneración, se realiza a través de un plan de manejo aprobado por CONAF. La Ley N°20.283 considera incentivos para estos manejos en los literales de preservación, no maderero y maderero, a través de diversas actividades que se bonifican. La propuesta de este programa es que otro instrumento considerado por esta ley, como lo es el Fondo de Investigación de Bosque Nativo, destine recursos a investigar los efectos de estas actividades en las dos condiciones principales que favorecen la adaptación de los bosques nativos al cambio climático: la capacidad de dispersión y regeneración y la capacidad de responder genéticamente. Los distintos métodos silviculturales para cosecha y regeneración, por ejemplo las cortas intermedias, podrían estar atentando contra alguno de estos dos aspectos clave para la adaptación. De momento, las actividades de establecimiento de la regeneración serían favorables para la adaptación, en tanto se construyan las Guías de transferencia y se realice el reforzamiento de poblaciones o colonización asistida.

De acuerdo a lo señalado en el párrafo anterior, y según Ledig (1992, citado por Ratnam *et al.*, 2014), las prácticas de manejo silvícola que modifican la densidad de los árboles y la estructura de la clase de edad, en diferentes etapas durante la rotación del bosque, pueden tener fuertes efectos sobre la diversidad genética, la conectividad y el tamaño efectivo de la población.





Ratnam *et al.* (2014) indican que las prácticas silvícolas basadas en sistemas de aclareo selectivo, seguidos de regeneración natural o artificial pueden afectar la estructura de la población y los patrones de apareamiento, por lo tanto, el flujo de genes y la diversidad genética. El autor menciona además, que estos efectos dependerán de la especie y cuán adaptada esté a los cambios en su entorno, como es el caso de *Picea ariana* que posee mayor diversidad genética por regeneración natural *post* incendio o el caso de *Pinus strobus* que al realizar un raleo de aproximadamente 20% de los árboles, su diversidad genética se redujo en aproximadamente 7% para el número de alelos en rodales residuales *post* cosecha. Por otra parte, según los resultados de Tiscar *et al.* (2015), los raleos generan estructuras menos heterogéneas y resistentes.

Las prácticas silvícolas deben tener en cuenta el tamaño de la población, la biología reproductiva y la tasa de crecimiento de una especie para garantizar que la diversidad genética y los procesos evolutivos se mantengan en las poblaciones forestales. El conocimiento de los atributos biológicos de las especies como el sistema de apareamiento, el flujo de genes y la depresión endogámica, incluidos los principales polinizadores, la fenología de la floración y su sincronía intraespecífica, se pueden utilizar para desarrollar guías de campo para la gestión a fin de mantener la diversidad genética (Ratnam *et al.*, 2014).

Un manejo silvícola cercano a la naturaleza, podría generar bosques estructuralmente diversos de manera congruente con la heterogeneidad subyacente de condiciones ecológicas, e imita los regímenes naturales de perturbaciones menores. A este manejo se conoce como Gestión Forestal Próxima a la Naturaleza, la que se basa en intervenciones frecuentes orientadas por principios económicos y ecológicos, que coinciden con la idea de gestión adaptativa y de gestión forestal sostenible (Tiscar *et al.*, 2015).

Finalmente, un aspecto muy relevante y poco considerado, son los incendios forestales. La construcción de cortafuegos y corta-combustibles eficientes en torno a los rodales y bosques es indispensable, para evitar posibles incendios forestales, que representa una amenaza continua para la supervivencia del rodal, sobre todo en países de elevada ocurrencia de incendios como Chile, donde sólo entre el año 2016 hasta septiembre de 2017 se vieron afectadas 570.197 ha (CONAF, 2017). En la figura 16 se muestra la ocurrencia y daño entre 2013 y 2017.

Porcentaje de Daño Nacional Promedio Quinquenio 2013-2017

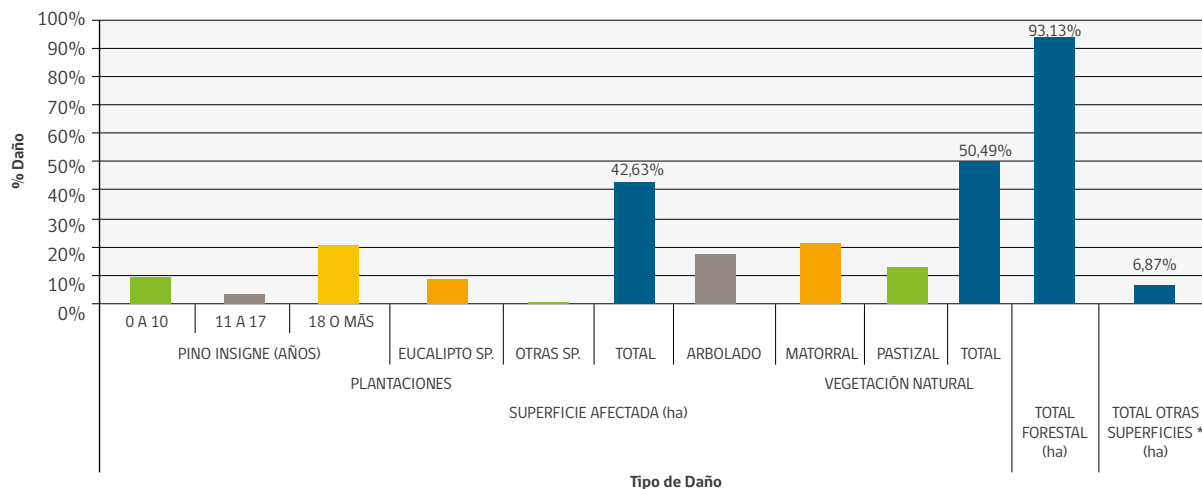


Figura 16. Gráfico de Porcentaje de daño nacional, promedio entre 2013-2017. Fuente: CONAF, 2017a. Disponible en <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>



Conservación *ex situ*

3



Conservación *ex situ*

St. Clair y Howe (2011) proponen dos estrategias para la conservación de recursos genéticos frente al cambio climático: conservación *in situ* y *ex situ* (Tabla 2). La conservación *in situ* es aquella que pretende preservar y mantener la diversidad genética de poblaciones en su hábitat natural. Aunque se designaron por razones distintas a la conservación de genes, las reservas naturales estrictas y otros tipos de áreas protegidas se han considerado áreas importantes de conservación de genes *in situ*, la que también puede ocurrir en tierras no protegidas, incluidas aquellas que son manejadas activamente, en particular si se promueven procesos evolutivos normales a través de la regeneración natural.

La principal actividad para la conservación *in situ* de los bosques y la flora nativa de Chile se encuentra relacionada con el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), las Áreas Protegidas Privadas (APP) y los terrenos administrados por el Ministerio de Bienes Nacionales (Magni *et al.*, 2012). El SNASPE,

que fue creado y administrado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), y en la actualidad consta de 101 unidades, distribuidas en 36 Parques Nacionales, 49 Reservas Nacionales y 16 Monumentos Naturales. Estas unidades cubren una superficie aproximada de 14,6 millones de hectáreas, que equivalen al 20% del territorio nacional (CONAF, 2017b). Los objetivos de la conservación *in situ* abarcan desde la preservación de muestras de ambientes naturales, rasgos culturales y escénicos asociados a ellos y en la medida compatible con lo anterior, la realización de actividades de educación e investigación, aunque el objetivo más relevante es que se produzca la continuidad de los procesos evolutivos normales (CONAF, 2017b; Heywood, 2008).

Por su parte, la conservación *ex situ* se refiere a la recolección, almacenamiento y mantenimiento de germoplasma en lugares alejados de los hábitat de origen (St. Clair y Howe, 2011) en que las especies se extraen de su medio natural y se conservan en herbarios, jardines botánicos, centros o bancos

de semillas, cultivos de tejidos y rodales de conservación, entre otros. Generalmente, este método se aplica a especies muy amenazadas, que no podrían sobrevivir en su medio natural. El principal sistema de conservación *ex situ* de Chile, son los bancos de semillas, especialmente para la conservación de biodiversidad agrícola (Manzur, 2005). En la mayoría de los casos, esto implica recolecciones de semillas o polen almacenadas en frío, aunque también pueden incluir plantas cultivadas en pruebas genéticas, huertos reproductores y plantaciones de conservación en el campo. Según Torres y Magni (2012) en Chile se han identificado diferentes unidades de conservación para recursos genéticos vegetacionales (RGV), los cuales serían: rodales de conservación,

pertenecientes a empresas forestales, las cuales la utilizan para mejoramiento genético, principalmente de especies forestales introducidas (*Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *E. nitens*); Banco de semillas (banco base y bancos activos); y por último, bancos *in vitro* y banco de polen.

La conservación *ex situ* es una estrategia de respaldo a largo plazo para especies individuales y debe ser considerada como complementaria a la conservación *in situ* y no un reemplazo, ya que en esta, además de diversidad genética, se conservan las interrelaciones y los procesos ecológicos y evolutivos (Hechenleitner *et al.*, 2005, León-Lobos *et al.*, 2003).

Tabla 2. Estrategias para la para la conservación de recursos genéticos vegetacionales frente al cambio climático.

| Conservación de RGV <i>in situ</i> |
|--|
| Instaurar reservas en áreas de alta heterogeneidad ambiental para maximizar la diversidad genética y el flujo de genes dentro y entre las reservas. |
| Diseñar una red de reservas, con una matriz forestal entre estas, para así minimizar la fragmentación, estimulando el flujo genético entre las poblaciones conservadas y evitar tamaños pequeños de población efectiva. |
| Administrar activamente las reservas para aumentar la resistencia de los rodales al incremento de estrés biótico y abiótico que pueden ser perturbaciones naturales o antrópicas, como incendios, sequías, enfermedades e insectos, entre otros. |
| Complementar la variación genética ya existente mediante la inclusión de plántulas de poblaciones adaptadas a nuevos climas, dentro de las reservas o en zonas aledañas a estas. |
| Conservación de RGV <i>ex situ</i> |
| Priorizar las poblaciones de áreas particularmente amenazadas por incendios, enfermedades o insectos, así como también poblaciones pequeñas y disjuntas, poblaciones al borde de su nicho, y poblaciones de alta elevación sin un hábitat cercano al cual desplazarse. |
| Colonización/migración asistida |
| Mover poblaciones de elevada prioridad a nuevos lugares donde se adapten a climas futuros. |

Fuente: Modificado de St. Clair y Howe (2011).

III.1. Almacenamiento *ex situ* de germoplasma

El almacenamiento de germoplasma es de gran importancia, debido a que sirve tanto como refuerzo ante eventos de pérdida de material, como para el uso y estudio a futuro. Existen variadas estrategias para esto, dependiendo del tipo de germoplasma recolectado. Las semillas ortodoxas por ejemplo, se pueden almacenar en bancos de semillas por largos periodos de tiempo, ya que se pueden deshidratar hasta que su contenido de humedad sea de 4% o menos. En cambio, las semillas recalcitrantes no toleran la deshidratación, por ende, no se pueden almacenar en bancos semilleros, por lo que a partir de estas semillas se debe recurrir a la conservación de plantas, cultivo *in vitro*, conservación de brinzales y crio-preservación (Theilade *et al.*, 2007a).

El almacenamiento *in vitro* como se mencionó anteriormente, se utiliza para especies recalcitrantes y también para germoplasma, que tiene comportamiento entre especies ortodoxas y recalcitrantes. El cultivo *in vitro* se divide en almacenamiento a corto, mediano y largo plazo, como se describe en la tabla 3.

Para el almacenamiento del polen es necesaria la evaluación de su viabilidad mediante pruebas de germinación-emisión del tubo

polínico. Al igual que en las semillas ortodoxas, el polen puede ser almacenado deshidratándolo, pero su vida es relativamente corta. En general se debe almacenar en pequeñas cantidades separadas, para utilizar la cantidad apropiada sin interferir en la conservación de todo un lote (Gutiérrez *et al.*, 2015).

Un método efectivo que se ha utilizado de forma progresiva, es el almacenamiento de ADN, el cual se extrae del núcleo, mitocondrias o cloroplastos. Con el uso de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) se pueden amplificar oligonucleótidos específicos o genes presentes en el ADN genómico. Generalmente se utiliza este método de almacenamiento como conservación de información, ya que no permite la generación de plantas completas (Gutiérrez *et al.*, 2015; Theilade *et al.*, 2007a).

Si es el caso de semillas, los germoplasmas recolectados pueden ser almacenados en bancos de semillas, por ejemplo en el Centro de Semillas, Genética y Entomología (CSGE) de CONAF o el Banco Base de Semillas de INIA, entre otros.

Tabla 3. Comparación almacenamiento *in vitro* a corto, mediano y largo plazo.

| Aspectos | Corto plazo | Mediano plazo | Largo plazo |
|-----------------------------|---|--|--|
| Técnica | Subcultivo celular | Crecimiento reducido del cultivo | Crio-preservación |
| Retardantes del crecimiento | Sin retardantes | Reducir temperatura, oxígeno, intensidad de luz, nutrientes en medios, uso de hormonas | Almacenamiento a bajas temperaturas con nitrógeno líquido (-196°C) |
| Ventajas | Rápida multiplicación de germoplasma | Mantenimiento controlado de crecimiento y variabilidad, usos futuros | Usos futuros. Conservación de material original |
| Desventajas o riesgos | Posible contaminación de cultivo, costos elevados, variación somaclonal | Posible reducción de variabilidad del cultivo y dificultades para su regeneración | Formación de hielo intracelular. Muerte celular |

III.2. Establecimiento de bancos o rodales de conservación

El principal uso de los rodales o bancos de conservación *ex situ* es mantener los recursos genéticos en áreas seguras para su futura utilización, objetivos que se deben enfatizar antes de establecer rodales o bancos de conservación. Estos serán establecidos previa selección del sitio o área hospedante bajo patrones, diseño estadístico o por un orden en específico, con el fin de obtener respuestas e información útil, ya sea con fines comerciales o de conservación (Molina e Ipinza, 2015; Theilade *et al.*, 2007b).

Los bancos de conservación están asociados a mejoramiento genético, ya que estos mantienen la identidad genética de los árboles madres. Su finalidad es evaluar el comportamiento de varios clones en determinados sectores, para realizar una caracterización en específico y ver cuán posible es masificarlos. Generalmente se utiliza para especies con interés a futuro, ya sean madereras o no madereras.

El caso de los rodales de conservación es opuesto a los bancos, ya que no mantienen la identidad genética, dado que su finalidad no es mejoramiento genético, si no la conservación en sí. En general estos rodales contienen la mayor parte de las procedencias o poblaciones de la especie donde el germoplasma fue recolectado. Para el establecimiento se utilizan lotes de semillas, previamente mezcladas en cantidades similares para cada procedencia o población, los cuales se pueden plantar de forma similar como se hace en un bosque normal, con una separación entre los árboles madres de unos 3 a 5 m dependiendo de la especie en una superficie mayor o igual a 10 ha.

El tamaño del rodal dependerá de la estrategia de muestreo empleada, de los objetivos del rodal de conservación y de consideraciones genéticas, como mantener altos los niveles de variabilidad genética. Los tamaños pueden ser variables, lo importante a considerar es que incluso un tamaño mínimo

de rodal (algunas ha) puede ser eficaz si se aplica un manejo apropiado. FAO (1985) recomienda un tamaño mínimo de 5 a 10 ha, tanto para los rodales semilleros como para los rodales de conservación.

El rodal de conservación se debe aislar adecuadamente para evitar la contaminación de polen foráneo, lo cual reduciría el valor de la conservación. La zona de aislamiento dependerá del modelo de polinización de la especie (Theilade *et al.*, 2007b). Para especies con polinizadores anemófila, FAO (1985) indica el uso de fajas de aislamiento de al menos 330 m entre rodales y con cualquier rodal vecino que potencialmente puede producir hibridación. Estas pueden plantarse convenientemente con una especie no compatible para hibridación, lo que servirá en parte como barrera física contra la inmigración de polen extraño. Otro motivo para aislar el rodal es la posible presencia de animales, ya sean silvestres o domesticados, que puedan provocar daños a las plantas en sí. Para evitar este daño no menor, se debe cercar de manera eficiente el rodal y evitar la entrada de animales de gran tamaño (bovinos, ovinos) como también de animales menores (conejos, liebres, entre otros). Para estos últimos, Molina e Ipinza (2015) indican que el uso de protecciones individuales para las plantas, como el uso de mallas, podría ser un mecanismo idóneo contra este tipo de animales.

Para ambas opciones se debe tener en cuenta que el diseño debe ser lo más cuadrado posible al momento de establecer rodales o bancos, con el objetivo de asegurar un correcto cruzamiento natural dentro del rodal. Por razones de seguridad, no se recomienda plantar todos los rodales de conservación *ex situ* en el mismo lugar. Además el total del rodal debe ser plantado lo más rápido posible, con el objetivo de disminuir las diferencias en el estado de las plantas.



Necesidades Reglamentarias y Estructurales



4



Necesidades Reglamentarias y Estructurales

IV.1. Sistema de certificación para Material Forestal Reproductivo

Debido a la importancia del origen y procedencia del germoplasma a utilizar, tanto para su conservación, producción de plantas, ensayos de campo, guías de transferencia, migración asistida, entre otras, es esencial contar con información confiable respecto al origen y las características genéticas del Material Forestal Reproductivo (MFR) que utilizará en cada una de estas actividades. Se entiende por MFR al germoplasma que sea capaz de producir una planta. Dentro de esta categoría están las semillas, incluidos conos, frutos y semillas, partes de plantas, como estacas, tallos, hojas, raíces, yemas, troncos, tejidos, etc. y plántulas obtenidas ya sea por regeneración natural o por viverización tradicional.

Debido a los efectos que tiene y tendrá el cambio climático sobre nuestro país, es urgente preservar la diversidad biológica y asegurar una alta diversidad genética intraespecífica, mejorando así el potencial de adaptación para futuras labores de restauración ecológica, reforestaciones, forestaciones, actividades de manejo de bosque nativo; entre otras actividades forestales, como así también el uso responsable de la biotecnología para futuros mejoramientos de especies forestales.

La necesidad e importancia de establecer una certificación del MFR radica en la utilización de germoplasma adecuado para las tareas de conservación de la diversidad biológicas de poblaciones de especies nativas que presenten riesgos o

amenaza por efectos del cambio climático. La certificación del MFR abarcaría todas las semillas, partes de plantas y plantas que hayan sido colectadas, transportadas y procesadas, almacenadas, cultivadas, muestreadas, etiquetadas y selladas. Según el Reglamento de Material Forestal Reproductivo utilizado por la OCDE, que considera para adopción de un instrumento equivalente, las categorías de Certificación serían:



Identificado

Es la categoría mínima permitida, en la que la ubicación y altitud del (los) lugar(es) desde donde se colecta el MFR deben ser registradas; y donde la selección fenotípica es escasa o nula.



Seleccionado

El Material Básico debe ser fenotípicamente seleccionado a nivel de población.



Calificado

Los componentes del Material Básico se han seleccionado a nivel individual; sin embargo, la evaluación de su valor genético no ha sido realizada.



Probado

La superioridad del MFR debe haber sido demostrada mediante pruebas comparativas, o una estimación de su superioridad calculada a partir de la evaluación genética de los individuos que componen del Material Básico.

Se entiende como Material Básico a los individuos que se utilizará como fuente de MFR (fuentes semilleras). Este material debe cumplir ciertos requisitos para cada categoría anteriormente mencionada. Para la categoría "Identificado", el Material Básico debe ser un rodal ubicado dentro de una región de procedencia determinada. En la categoría Seleccionado, el Material Básico consistirá en un rodal situado dentro de una única región de procedencia y fenotípicamente seleccionado. Para la categoría "Calificado" este material corresponde a los huertos semilleros, padres de familia, clones o mezclas clonales, cuyos componentes hayan sido seleccionados fenotípicamente, y finalmente, para

la categoría "Probado", el Material Básico consistirá en rodales, huertos semilleros, padres de familia, clones o mezclas clonales, donde además este material debe ser evaluado genéticamente y comparado mediante pruebas para demostrar categoría superior, bajo los estándares apropiados (Tabla 4).

Tabla 4. Cuadro resumen del Material Básico con sus correspondientes categorías.

| Tipo de Material Básico | Identificado | Seleccionado | Calificado | Probado |
|-------------------------|--------------|--------------|------------|---------|
| Fuente semillera | X | | | |
| Rodal semillero | X | X | | X |
| Huerto semillero | | | X | X |
| Padres de familias | | | X | X |
| Clon | | | X | X |
| Mezcla clonal | | | X | X |

IV.2. Centro de Recursos Genéticos Vegetacionales (CRGV)

Finalmente, la creación de un Centro de Recursos Genéticos Vegetacionales es una oportunidad para abordar el presente Programa de Adaptación, y para otros aspectos relacionados con la conservación de la diversidad genética y biológica en áreas de trabajo de la ENCCRV. Una unidad al interior de CONAF, que coordine acciones nacionales de colecta de germoplasma en regiones, almacene dicho germoplasma, produzca plantas para ensayos de terreno, participe en su establecimiento, realice el modelamiento de los nichos ecológicos de las especies priorizadas, y el resto de las actividades contenidas en este documento es de suma importancia. Todos los países que ya han implementado estrategias de adaptación mantienen Centros de Recursos Genéticos Vegetacionales, los cuales administran los recursos técnicos y financieros para el desarrollo de estas estrategias. Los profesionales que trabajan en estos centros provienen de diversas áreas, no tan sólo forestal, sino que de la genética, ecología, biología, botánica, biotecnología, entre otras.



Referencias



V. Referencias

- Alfaro, R., Fady, B., Vendramin, G., Dawson, I., Fleming, R., Sáenz-Romero, C. y Skrøppa, T. 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*, 333, 76-87.
- Bacchetta, G., Bueno Sánchez, A., Fenu, G., Jiménez-Alfaro, B., Mattana, E., Piotto, B. y Virevaire, M. (eds). 2008. Conservación ex situ de plantas silvestres. Principado de Asturias / La Caixa. 378 pp
- Bahamondez, C., Martin, M., Müller-Using, S., Pugin, A., Vergara, G. y Rojas Y. 2009. Estimación de vulnerabilidad en Bosques en Chile. INFOR. Valdivia, Chile. [En línea]. <http://argus.iica.ac.cr/Esp/regiones/sur/chile/Documents/Estimaci%C3%B3n%20de%20vulnerabilidad%20en%20Bosques%20en%20Chile_C.%20Bahamondez.pdf//>.
- Biodiversa. 2014. *Adaptation of trees and forests to climate change: the importance of genetic variability* [En línea]. <<http://www.biodiversa.org/694//>>. [Consulta: 10 de Noviembre de 2017].
- Brook, B., O'grady, J., Chapman, A., Burgman, M., Akcakaya, H. y Frankham, R. 2000. *Predictive accuracy of population viability analysis in conservation biology*. *Nature*, 404(6776), 385-387.
- CONAF. 2017a. Estadísticas - Resumen Nacional Ocurrencia (Número) y Daño (Superficie Afectada) por Incendios Forestales 1964 - 2017. [En línea] <<http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/>>. [Consulta: 17 de Noviembre de 2017]
- CONAF. 2017b. Parques Nacionales de Chile. [En línea]. <<http://www.conaf.cl/parques-nacionales/parques-de-chile/>>. [Consulta: 8 de Noviembre de 2017].
- De Viana, M., Morandini, M., Giamminola, E. y Díaz, R. 2011. Conservación ex situ: un banco de germoplasma de especies nativas. *Lhawet*, 1, 35-41.
- Eliosa, H., Montes, A. y Navarro, M. 2010. Conservadurismo filogenético del nicho ecológico un enfoque integral de la evolución. *Ciencias* 98, abril-junio, 64-69. [En línea] <<http://www.revistaciencias.unam.mx/en/99-revistas/revista-ciencias-98/646-conservadurismo-filogenetico-del-nicho-ecologico2.html>>. [Consulta: 14 de Noviembre de 2017]
- ENSCONET. 2009. ENSCONET: Manual para la Recolección de Semillas de Especies Silvestres
- Eriksson, G., Ekberg, I. y Clapham, D. 2006a. *Evolution*. En, Eriksson, G., Ekberg, I. y Clapham, D (eds), *An introduction to Forest Genetics*. Segunda Edición. Uppsala, Suecia.
- Eriksson, G., Ekberg, I. y Clapham, D. 2006b. *Forest tree gene conservation*. En, Eriksson, G., Ekberg, I. y Clapham, D (eds), *An introduction to Forest Genetics*. Segunda Edición. Uppsala, Suecia.
- FAO. 1985. Información sobre RECURSOS GENETICOS FORESTALES No 14. En: Rodales semilleros de procedencia y rodales de conservación de procedencias. [En línea]. <[http://www.fao.org/docrep/006/r4968s/R4968S14.htm#ch13//](http://www.fao.org/docrep/006/r4968s/R4968S14.htm#ch13//>)>. [Consulta: 17 de Noviembre de 2017].

Fernández-Manjarrés, J. y Benito-Garzón, M. 2015. El debate de la migración asistida en los bosques de Europa Occidental. En: Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España. Herrero A., Zavala MA (Eds). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 463-468.

Fick, S. y Hijmans, R. 2017. Worldclim 2: *New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas*. International Journal of Climatology

Gallo, L., Marchelli, P., Azpilicueta, M. y Crego, P. 2006. El uso de marcadores genéticos en el género *Nothofagus* con especial referencia a raulí y roble. *Bosque (Valdivia)*, 27(1), 3-15

Gärdenfors, U., Hilton-Taylor, C., Mace, G. y Rodríguez, J. 2001. *The application of IUCN Red List Criteria at regional levels*. Conservation Biology 15: 1206-1212.

Gold, K., León-Lobos, P. y Way, M. 2004. Manual de recolección de semillas de plantas silvestres para conservación a largo plazo y restauración ecológica. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Intihuasi, La Serena, Chile. Boletín INIA N° 110, 62 p.

Gömöry, D., Hrivnák, M., Krajmerová, D. y Longauer, R. 2017. Epigenetic memory effects in forest trees: a victory of “*Michurinian biology*”? Central European Forestry Journal, 63(4), 173-179.

González, L., Bustamante, R., Navarro, R., Herrera, M. e Ibáñez, M. 2009. *The Ecology and management of the chilean palm (Jubaeachilensis (Mol.) Baillon): History, current situation and perspectives*. Palms 53(2): 68-74.

González, M., Lara, A., Urrutia, R. y Bosnich, J. 2011. Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42° S). *Bosque (Valdivia)*, 32(3), 215-219.

Gray, L. y Hamann, A. 2011. *Strategies for reforestation under uncertain future climates: guidelines for Alberta, Canada*. PLoS One, 6(8), e22977.

Gray, L., Gylander, T., Mbogga, M., Chen, P. y Hamann, A. 2011. *Assisted migration to address climate change: recommendations for aspen reforestation in western Canada*. Ecological Applications, 21(5), 1591-1603.

Gray, L., Hamann, A., John, S., Rweyongeza, D., Barnhardt, L. y Thomas, B. 2016. *Climate change risk management in tree improvement programs: selection and movement of genotypes*. *Treegenetics&genomes*, 12(2), 23.

Gutiérrez, B. 2015. Consideraciones para el muestreo y colecta de germoplasma en la conservación ex situ de recursos genéticos forestales. En, Gutiérrez, B., Ipinza, R. y Barros, S. (Eds), Conservación de recursos genéticos forestales, Principios y Prácticas. Instituto Forestal, Chile

Gutiérrez, B., Magni, C. y Gutiérrez, P. 2015. Almacenamiento de colecciones de germoplasma ex situ. En Conservación de recursos genéticos forestales

Hamann, A., Gylander, T. y Chen, P. 2011. *Developing seed zones and transfer guidelines with multivariate regression trees*. *TreeGenetics&Genomes*, 7(2), 399–408.

Hechenleitner, V., Gardner, M., Thomas, P., Echeverría, C., Escobar, B., Brownless P. y Martínez, C. 2005. *Plantas Amenazadas del Centro-Sur de Chile. Distribución, Conservación y Propagación*. Primera Edición. Universidad Austral de Chile y Real Jardín Botánico de Edimburgo. 188 pp.

Heywood, V. 2008. *Challenges of in situ conservation of crop wild relatives*. *Turk J Bot* 32: 421–432.

IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

Ipinza, R. 2017. Establecimiento de plantaciones de alta biodiversidad (MetodoKageyama). En: *Curso Internacional: Rehabilitación de bosques chilenos, principios genéticos. Iniciativa 20x20 y desafío Bonn*. Chillán, 2 de noviembre.

Ipinza, R. y Gutiérrez, B. 2014. CONSIDERACIONES GENÉTICAS PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA. [En línea]. <https://www.researchgate.net/publication/280027225_CONSIDERACIONES_GENETICAS_PARA_LA_RESTAURACION_ECOLOGICA/>.

León-Lobos, P., Way, M., Pritchard, H., Moreira-Muñoz, A., León, M. y Casado, F. 2003. Conservación ex situ de la Flora de Chile en banco de semillas. *Chlorischilensis*, 6(1). [En línea]. <<http://www.chlorischile.cl/bancosemillas/bancosem.htm/>>. [Consulta: 14 de Noviembre de 2017].

Liras, E., Cabello, J. y Bonet, F. 2008. Bioinformática para la conservación de la flora. *Conservación Vegetal*.

Magni, C., Abarca, B. y Poch, P. 2012. PRESENCIA DE RECURSOS GENÉTICOS FORESTALES EN ÁREAS PROTEGIDAS DE CHILE: CONSERVACIÓN IN SITU. En, Ipinza, R., Barros, S., Gutiérrez, B., Magni, C. y Torres, J., (Eds), *Recursos Genéticos Forestales en Chile. Catastro 2012*, Pp 113–137

Manzur, M. 2005. Conservación Ex Situ. En, Paz, M. y Larrain, S. (eds), *SITUACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD EN CHILE DESAFÍOS PARA LA SUSTENTABILIDAD*. 1era edición. LOM Ediciones. Santiago, Chile.

Mateo, R., Felicísimo, Á. y Muñoz, J. 2011. Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84(2), 217–240.

Miller, R., Rodríguez, J., Aniskowicz-Fowler, T., Bambaradeniya, C., Boles, R., Eaton, M., Gärdenfors, U., Keller, V., Molur, S., Walker, S. y Pollock, C. 2006. Extinction risk and conservation priorities. *Science* 313: 441.

- Morais, O. 1997. Tamaño efectivo de la población. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Moreno A. 2007. Tamaño efectivo de la población. En, Eguiarte, L., Souza, V., Aguirre, X. (eds), *Ecología molecular*. Instituto Nacional de Ecología, 2007.
- OCDE. 2017. SCHEME FOR THE CERTIFICATION OF FOREST REPRODUCTIVE MATERIAL MOVING IN INTERNATIONAL TRADE. [En línea]. <<https://www.oecd.org/tad/code/oecd-forest-scheme-rules-and-regulations-en.pdf> // >. [Consulta: 29 de Noviembre de 2017]
- Pascual, J., Cañal, M., Correia, B., Escandon, M., Hasbún, R., Meijón, M. y Valledor, L. 2014. Can epigenetics help forest plants to adapt to climate change?. In *Epigenetics in Plants of Agronomic Importance: Fundamentals and Applications* (pp. 125-146). Springer International Publishing.
- Peters, R. 1990. Effects of global warming on forests. *For. Ecol. Manage.*, 35:13-33.
- Plischoff, P. y Fuentes-Castillo, T. 2011. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de geografía Norte Grande*, (48), 61-79.
- Ratnam, W., Rajora, O., Finkeldey, R., Aravanopoulos, F., Bouvet, J., Vaillancourt, R. y Vinson, C. 2014. Genetic effects of forest management practices: global synthesis and perspectives. *Forest ecology and management*, 333, 52-65.
- Reece, J., Urry, L., Cain, M., Wasserman, S., Minorsky, P. y Jackson, R. 2011. *Conservation Biology and Global Change*. Campbell biology. Boston: Pearson Education, Inc. [En línea]. <<https://cdsscience.wikispaces.com/file/view/Chapter%2043%20Global%20Ecology%20Consevation%20Biology.ppt/551330206/Chapter%2043%20Global%20Ecology%20Consevation%20Biology.ppt> // >
- St. Clair, J. y Howe, G. 2011. Strategies for conserving forest genetic resources in the face of climate change. *Turkish Journal of Botany*. 35: 403-409.
- Theilade, I., Petri, L. y Engels, J. 2007a. Conservación *ex situ* mediante almacenamiento y utilización. En, FAO, FLD y Bioversity International, *Conservación y manejo de recursos genéticos forestales: en plantaciones y bancos de germoplasma (ex situ)*. Vol 3. Instituto Internacional de Recursos Filogenéticos. Roma, Italia
- Theilade, I., Yanchuk, A. y Hald, S. 2007b. Establecimiento y manejo de rodales de conservación *ex situ*. En, FAO, FLD y Bioversity International, *Conservación y manejo de recursos genéticos forestales: en plantaciones y bancos de germoplasma (ex situ)*. Vol 3. Instituto Internacional de Recursos Filogenéticos. Roma, Italia
- Thomson, L., Graudal, L. y Kjaer, Erik. 2001. Selección y ordenación de áreas de conservación genética in situ ara especies elegidas. En, FAO, CSFD, IPGRI, *Conservación y ordenación de recursos genéticos forestales: en bosques naturales ordenados y áreas protegidas in situ*. Vol 2. Instituto Internacional de Recursos Filogenéticos. Roma, Italia.

Tiscar, P., García-Abril, A., Aguilar, M. y Solís, A. 2015. Gestión Forestal Próxima a la Naturaleza: potencialidades y principios para su aplicación en los pinares de montaña mediterráneos como medida de adaptación al cambio climático. En: Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España. Herrero A., Zavala MA (eds). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 555-564

Torres, J. y Magni, C. 2012. Conservación *ex situ* de Recursos genéticos forestales. En: Recursos Genéticos Forestales en Chile. Catastro 2012.

IUCN. 2012a. Categorías y Criterios de la Lista Roja de la IUCN: Versión 3.1. Segunda edición. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: IUCN. vi + 34pp. Originalmente publicado como IUCN Red List Categories and Criteria: Version 3.1. Second edition. (Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN, 2012).

IUCN. 2012b. Directrices para el uso de los Criterios de la Lista Roja de la IUCN a nivel regional y nacional: Versión 4.0. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: IUCN. iii + 43pp. Originalmente publicado como Guidelines for Application of IUCN Red List Criteria at Regional and National Levels: Version 4.0. (Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN, 2012).

Waddington, C. 1942. Canalization of development and the inheritance of acquired characters. *Nature*, 150(3811), 563-565.

Wheeler, N. y Neale, D. 2013. Landscape genomics [Online Learning Module]. Pine Reference Sequence. eXtension Foundation. Available at: <http://www.extension.org/pages/67919>

Wiens, J., Stralberg, D., Jongsomjit, D., Howell, C. y Snyder, M. 2009. Niches, models, and climate change: assessing the assumptions and uncertainties. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (Supplement 2), 19729-19736.

Wright, S. 1930. Evolution in mendelian populations. *Genetics* 16:97-158.

Yanchuk, A. 2007. Conservación *ex situ* mediante selección y mejoramiento genético. En: Conservación y manejo de recursos genéticos forestales: en plantaciones y bancos de germoplasma (*ex situ*). Vol 3. Instituto Internacional de Recursos Filogenéticos. Roma, Italia

Yanchuk, A. y Hald, S. 2007. Estrategias de muestreo para la conservación de *ex situ*. En: Conservación y manejo de recursos genéticos forestales: en plantaciones y bancos de germoplasma (*ex situ*). Vol 3. Instituto Internacional de Recursos Filogenéticos. Roma, Italia.

Yakovlev, I., Fossdal, C., Skrøppa, T., Olsen, J, Jahren, A., y Johnsen, Ø. 2012. An adaptive epigenetic memory in conifers with important implications for seed production. *Seed Science Research*, 22(2), 63-76.

Ying, C. y Yanchuk, A. 2006. The development of British Columbia's tree seed transfer guidelines: purpose, concept, methodology, and implementation. *Forest Ecology and Management*, 227(1), 1-13.

The background features a wooden sign with the text "ATE" and "ureliopsis" visible. A leaf with several holes is positioned above the sign. The entire scene is overlaid with a semi-transparent orange filter.

Anexos

124

Philippiana

Anexos

Anexo 1. Código de Variables Bioclimáticas

| Código | Variable Bioclimatic |
|--------|--|
| BIO1 | Annual Mean Temperature |
| BIO2 | Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp)) |
| BIO3 | Isothermality (BIO2/BIO7) (* 100) |
| BIO4 | Temperature Seasonality (standard deviation *100) |
| BIO5 | Max Temperature of Warmest Month |
| BIO6 | Min Temperature of Coldest Month |
| BIO7 | Temperature Annual Range (BIO5-BIO6) |
| BIO8 | Mean Temperature of Wettest Quarter |
| BIO9 | Mean Temperature of Driest Quarter |
| BIO10 | Mean Temperature of Warmest Quarter |
| BIO11 | Mean Temperature of Coldest Quarter |
| BIO12 | Annual Precipitation |
| BIO13 | Precipitation of Wettest Month |
| BIO14 | Precipitation of Driest Month |
| BIO15 | Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation) |
| BIO16 | Precipitation of Wettest Quarter |
| BIO17 | Precipitation of Driest Quarter |
| BIO18 | Precipitation of Warmest Quarter |
| BIO19 | Precipitation of Coldest Quarter |

Fuente: Fick y Hijmans, 2017. Disponible en: <http://worldclim.org/bioclim>

Anexo 2. Principales Software para Modelamiento de Nicho Ecológico

| Método | Tipo de Modelo | Datos ¹ | Software |
|-----------|--|--------------------|--|
| BIOCLIM | Modelo de envuelta | p | DIVA-GIS |
| BRT | Árboles de decisión amplificados | pa | R, gbm package |
| BRUTO | Regresión, implementación rápida de GAM | pa | DesktopGarp |
| DKP-GARP | Reglas para algoritmos genéticos, versión de escritorio | pa | R & Splus, mda package |
| DOMAIN | Distancia multivariante | p | DIVA-GIS |
| GAM | Regresión: modelos aditivos de generalización | pa | S-Plus, GRASP |
| GDM | Modelos de disimilaridad generales, utiliza datos de comunidad | pacomm | Programa especializado que utiliza ArcView y Splus |
| GDM-SS | Modelos de disimilaridad generales, implementación para especies | pa | Igual que GDM |
| GLM | Regresión, modelos lineales generalizados | pa | S-Plus, GRASP |
| LIVES | Distancia multivariante | p | Programa especializado |
| MARS | Regresión, regresiones multivariantes adaptativas | pa | R, mda package |
| MARS-COMM | Implementación de MARS para datos de comunidad | pacomm | Como MARS |
| MARS-INT | Implementación de MARS para permitir interacciones | pa | Como MARS |
| MAXENT | Máxima entropía | pa | Maxent |
| MAXENT-T | Máxima entropía con valores de frontera | pa | Maxent |
| OM-GARP | Versión de código abierto de GARP | pa | Nueva versión de GARP |

p = solo presencia; pa = datos de presencia y ausencia; comm = datos de comunidad

Fuente: Liras et al., 2008

Anexo 3. Criterios biológicos y ecológicos para la selección y priorización especies con fines de conservación *ex situ*

| Criterio | Estados del Criterio |
|---|--|
| <p>Conducta de almacenamiento de semillas Esta información es desconocida para la mayoría de las plantas. Sin embargo, las semillas recolectadas pueden ser investigadas para determinar su conducta de almacenamiento.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Ortodoxa • Intermedia • Recalcitrante • No Conocido |
| <p>Estado de conservación de plantas (UICN)¹ El estado de conservación es uno de los criterios relevantes al momento de priorizar las especies a conservar en <i>ex situ</i>. Sin embargo, para especies particulares, éste normalmente es asignado en base a limitada fuente de información.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Extinta • En Peligro de Extinción • Vulnerable • Insuficientemente Conocida • Fuera de Peligro |
| <p>Forma de vida Dar prioridad a una particular forma de vida tiene una gran influencia en la estrategia de muestreo, en las opciones de identificación y en la elección del material de recolección.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Anuales • Perennes herbáceas y geófitas • Perennes leñosas • Árboles y arbustos |
| <p>Rol ecológico Se requiere un buen conocimiento de las especies de plantas que componen una comunidad para establecer su rol y relaciones en el ecosistema (Ej. Fijadoras de nitrógeno, alimentación para animales en peligro de extinción).</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Especies pioneras (potencial para restauración de suelos perturbados) • Especies claves ("keystone species") • Especies ecológicamente asociadas con especies raras oútiles • Especies dominantes |



¹ Las distintas categorías de conservación han sido usadas en la mayoría de los países para generar los listados rojos. Recientemente, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) ha revisado estos criterios y ha propuesto modificaciones. Ver en: <http://www.iucn.org/themes/ssc/redlistcatspanish.pdf>.

| Criterio | Estados del Criterio |
|---|--|
| <p>Origen Esta información puede estar disponible en listas o catálogos nacionales y bases de datos de flora.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▸ Plantas endémicas a una región ▸ Plantas endémicas al país ▸ Plantas nativas ▸ Plantas introducidas |
| <p>Distribución geográfica de especies² En la mayoría de los países esta información es generada a partir de bases de datos de herbarios nacionales y publicada en flora y listados de la región. El rango de este criterio puede ir desde especies de distribución geográfica restringida a distribución amplia.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▸ Como ejemplo, las especies distribuidas en cuadrantes de: <ul style="list-style-type: none"> ▸ 1 grado de latitud ▸ 2 grados de latitud ▸ 3 grados de latitud ▸ Más de tres grados de latitud |
| <p>Unicidad taxonómica Las familias o géneros monoespecíficos (con una sola especie tienen alta prioridad ya que al desaparecer la especie desaparece también un linaje evolutivo de nivel superior.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▸ Familias monoespecíficas ▸ Géneros monoespecíficos ▸ Familias multiespecíficas ▸ Géneros multiespecíficos |
| <p>Uso actual o potencial³ El conocimiento sobre el uso de plantas normalmente es mantenido por las comunidades locales o está disponible en publicaciones etnobotánicas o bases de datos institucionales. Las especies relacionadas a plantas cultivadas pueden tener un uso potencial.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ▸ Uso actual reconocido ▸ Uso potencial reconocido ▸ Sin uso conocido |

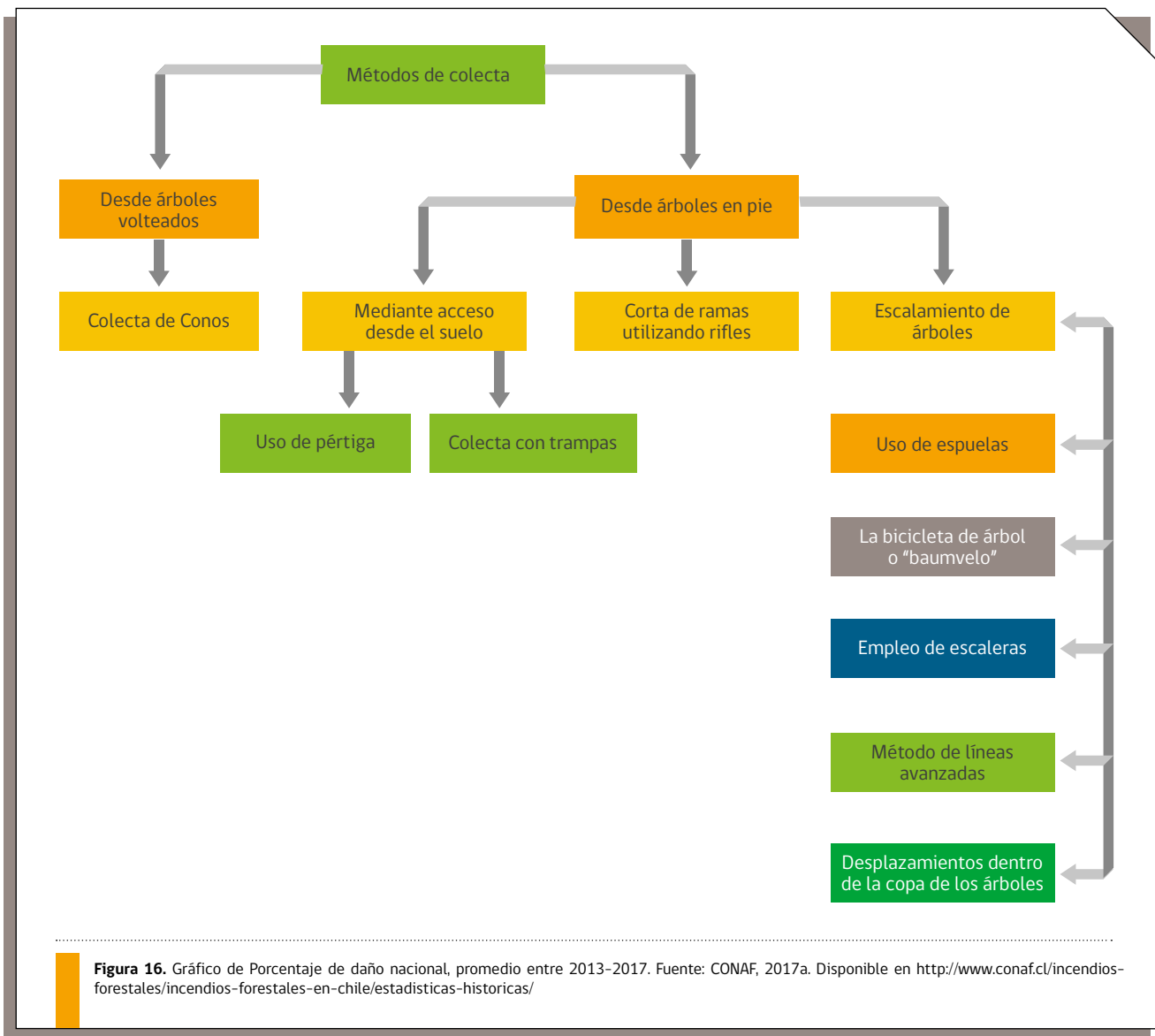
Fuente: Gold et al., 2004.



² La distribución geográfica es considerada por Rabinowitz (1981) como un componente del estado de rareza, junto al tamaño población y la especificidad de hábitat de las especies de plantas. Así, las plantas más raras en la naturaleza son aquellas de distribución geográfica y hábitat restringido y, con poblaciones pequeñas.

³ Los tipos de uso incluyen: ornamental, alimenticio, forrajero, medicinal, aromático, colorante, tintura, conservación de suelos, maderero, etc.

Anexo 4. Métodos de colecta de semillas



Fuente: Basado y modificado del Manual De Colecta De Germoplasma Para Restauración Ecológica, facilitado por el Centro de Semillas, Genética y Entomología, 2017.







ESTRATEGIA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO Y RECURSOS VEGETACIONALES

Estrategia Nacional de Cambio Climático y Recursos Vegetacionales

Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales (UCCSA)
Gerencia de Desarrollo y Fomento Forestal (GEDEFF)
Corporación Nacional Forestal (CONAF)
Ministerio de Agricultura de Chile

www.enccrv-chile.cl

www.conaf.cl

**Paseo Bulnes 377, Oficina 207
Santiago de Chile**